

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 (ЧАСТЬ 3)

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.03.01 Прикладные математика и физика

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/ В | СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экз./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------------|
| 8       | 3                      | 108                        | 22           | 22                        | 0                        |                                          | 28        | 0         | Э                                        |
| Итого   | 3                      | 108                        | 22           | 22                        | 0                        | 0                                        | 28        | 0         |                                          |

## АННОТАЦИЯ

Курс является одним из центральных в обучении студентов по профилям, связанным с физикой твердого тела. Даются современные представления о конденсированном состоянии вещества, теоретические модели явлений, методы исследования, применение твердотельных эффектов в основных методах и достижениях экспериментальной физики.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс является одним из центральных в обучении студентов по профилям, связанным с физикой твердого тела. Даются современные представления о конденсированном состоянии вещества, теоретические модели явлений, методы исследования, применение твердотельных эффектов в основных методах и достижениях экспериментальной физики.

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

Дисциплина читается на старших курсах. Ожидается, что студент уже освоил курсы общей физики, высшей математики, ТФКП, изучил или начал изучение квантовой механики и статистической физики.

### 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;<br>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 области по профилю специализации в соответствии с утвержденными | Деятельность по разработке материалов, покрытий, приборов. | ПК-14.2 [1] - Способен проводить научные исследования в области физики конденсированного состояния вещества с целью разработки полупроводниковых, сверхпроводниковых, тонкопленочных и наноструктурированных | З-ПК-14.2[1] - знать основные современные достижения физики твердого тела и возможности современной экспериментальной техники; основы физической оптики, теорию |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>планами и методиками исследований. участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных компьютерных технологий; участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации; участие в создании новых методов и технических средств исследований и новых разработок, участие во внедрении результатов исследований и разработок.</p> |  | <p>материалов, сверхпроводящих устройств и оптоэлектронных приборов; в области оптического приборостроения, оптических материалов и технологий; в области лазерной физики с целью создания новых эталонов, методик ведения измерений и средств измерений с их последующей аттестацией и вводом в реестр средств измерений для нужд нанометрологии</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 25.049</p> | <p>интерференции, дифракции, основы атомной и молекулярной спектроскопии; способы и методы создания новых эталонов.;<br/>У-ПК-14.2[1] - уметь построить математическую модель явления, рассчитать схему эксперимента, провести оценки параметров материалов, выбрать необходимые материалы и методики для решения конкретных задач с учетом дальнейшего применения в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики конденсированного состояния вещества и средств измерений.;<br/>В-ПК-14.2[1] - владеть основами спектроскопии атомов и молекул, методиками ведения измерений и средств измерений; методами получения, анализа и описания параметров и характеристик процессов в экспериментальных установках физики твердого тела и лазерной физики.</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

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

|                                    |                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Профессиональное воспитание</p> | <p>Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)</p> | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований.</li> </ul> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</li> <li>- 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.</li> </ul> |
| <p>Профессиональное воспитание</p> | <p>Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22)</p>                                             | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>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>8 Семестр</i>                        |        |                                                        |                                           |                               |                                     |                                 |
| 1     | Часть 1                                 | 1-8    | 16/16/0                                                |                                           | 25                            | КИ-8                                | З-ПК-14.2, У-ПК-14.2, В-ПК-14.2 |
| 2     | Часть 2                                 | 9-12   | 6/6/0                                                  |                                           | 25                            | КИ-12                               | З-ПК-14.2, У-ПК-14.2, В-ПК-14.2 |

|  |                                             |  |         |  |    |   |                                       |
|--|---------------------------------------------|--|---------|--|----|---|---------------------------------------|
|  | <i>Итого за 8 Семестр</i>                   |  | 22/22/0 |  | 50 |   |                                       |
|  | <b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b> |  |         |  | 50 | Э | 3-ПК-14.2,<br>У-ПК-14.2,<br>В-ПК-14.2 |

\* – сокращенное наименование формы контроля

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

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| Обозначение | Полное наименование |
|-------------|---------------------|
| КИ          | Контроль по итогам  |
| Э           | Экзамен             |

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели     | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                            | Лек., час.             | Пр./сем., час. | Лаб., час. |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|------------|
|            | <i>8 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                     | 22                     | 22             | 0          |
| <b>1-8</b> | <b>Часть 1</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       | 16                     | 16             | 0          |
| 1          | <b>Тема 1. Поглощение в полупроводниках</b><br>Прямые, не прямые переходы. Экситонное поглощение. Примеси и свободные носители.                                                                                                                                                      | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                      | 0              | 0          |
| 2          | <b>Тема 2. Фотопроводимость</b><br>Фотомагнитный эффект. Вывод формулы для ЭДС фотомагнитного эффекта. Фотомагнитомеханический эффект. Люминесценция. Флюоресценция. Механизмы люминесценции в полупроводниках                                                                       | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                      | 0              | 0          |
| 3          | <b>Тема 3. Сегнетоэлектричество</b><br>Сегнетова соль. Физические основы. Применение                                                                                                                                                                                                 | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                      | 0              | 0          |
| 4          | <b>Тема 4. Эффект Холла в полупроводниках</b><br>Коэффициент Холла и магнитосопротивление. Температурная и полевая зависимость. Методы измерения и интерпретации экспериментальных данных. Эффект Эттингсгаузена Особенности поведения магнитосопротивления для многозонных веществ. | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                      | 0              | 0          |
| 5          | <b>Тема 5. Гетероструктуры на основе полупроводников</b><br>Уровни размерного квантования и двумерный электронный газ. Сверхрешетки. Квантовый эффект Холла                                                                                                                          | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                      | 0              | 0          |
| 6          | <b>Тема 6. Циклотронный резонанс</b><br>Циклотронный резонанс, эксперимент Азбеля-Каннера. Эффективная циклотронная масса. Получение информации о зонной структуре.                                                                                                                  | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1                      | 1              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                      | 0              | 0          |
| 6          | <b>Тема 7. Эффект де-Гааза-ван-Альфена</b><br>Уровни Ландау. Условия проведения эксперимента.                                                                                                                                                                                        | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1                      | 1              | 0          |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                        |   |   |   |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---|---|---|
|      | Построение поверхностей Ферми. Гигантские квантовые осцилляции поглощения ультразвука в металлах. Восстановление зонной структуры.                                                                                                                                                                                                               | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 7    | <b>Тема 8. Гамма-резонансная спектроскопия</b><br>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 | 2 | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 8    | <b>Тема 9. Аннигиляция позитронов в веществе</b><br>Аннигиляция позитронов в веществе – диагностика электронной структуры. Основы метода. Источники позитронов. Схема эксперимента для измерений двухквантовой аннигиляции позитронов. Интерпретация экспериментальных данных. Комптоновское рассеяние как альтернатива аннигиляционного метода. | Всего аудиторных часов | 2 | 2 | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 9-12 | <b>Часть 2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                        | 6 | 6 | 0 |
| 9    | <b>Тема 10. Метод ядерного магнитного резонанса в физике твердого тела</b><br>Основы метода. Спектры ЯМР. Продольная и поперечная релаксация. Ядра, представляющие интерес для ЯМР-спектроскопии. Интерпретация спектров ЯМР: положение, интенсивность, дисперсия тонкой структуры. Сдвиг Найта.                                                 | Всего аудиторных часов | 1 | 1 | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 9    | <b>Тема 11. Метод электронного парамагнитного резонанса</b><br>Основы метода. Отличия метода ЭПР от ЯМР-метода. Спектры ЭПР, спин-решеточная и спин-спиновая релаксация. Интерпретация спектров ЭПР.                                                                                                                                             | Всего аудиторных часов | 1 | 1 | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 10   | <b>Тема 12. Двойные резонансы</b><br>Акустический парамагнитный резонанс, акустический ядерный магнитный резонанс, двойной электронно-ядерный резонанс. Общие представления.                                                                                                                                                                     | Всего аудиторных часов | 1 | 1 | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 11   | <b>Тема 13. Фотоэмиссия и EXAFS</b><br>Фотоэмиссионные и инверсные фотоэмиссионные спектры. Методы XANES, EXAFS – исследование электронной подсистемы твердого тела.                                                                                                                                                                             | Всего аудиторных часов | 1 | 1 | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Онлайн                 | 0 | 0 | 0 |
| 12   | <b>Тема 14. Жидкие кристаллы</b><br>Смектики и нематики. Элементарное описание. Применение.                                                                                                                                                                                                                                                      | 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               |

## ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

| Недели  | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <i>8 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                             |
| 1 - 3   | <b>Радиоспектроскопия электронного парамагнитного резонанса (лабораторная работа №1)</b><br>Цель работы: изучение явления электронного парамагнитного резонанса и экспериментальных методов его наблюдения.                  |
| 4 - 6   | <b>Спектрометр ядерного магнитного резонанса (лабораторная работа №2)</b><br>Цель работы: изучение явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и экспериментальных методов его наблюдения.                                   |
| 7 - 8   | <b>Измерение ширины запрещенной зоны в полупроводнике (лабораторная работа №5).</b><br>Цель работы: определение ширины запрещенной зоны в полупроводнике по температурной зависимости электропроводности и постоянной Холла. |
| 9 - 10  | <b>Ферромагнитный резонанс (лабораторная работа №15)</b><br>Цель работы: изучение явления ферромагнитного резонанса и экспериментальных методов его наблюдения.                                                              |
| 11 - 12 | <b>Эффект Фарадея.</b><br>Цель работы: ознакомление с гистерезисными свойствами магнитных пленок на примере исследования висмутсодержащего граната с помощью эффекта Фарадея.                                                |

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

| Недели | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | <i>8 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 1      | <b>Тема 1. Поглощение</b><br>Спектр поглощения света. Собственное поглощение при прямых и не прямых переходах.: край поглощения, зависимость коэффициента поглощения от энергии. Спектры экситонного поглощения. Поглощение инфракрасного излучения свободными носителями и решеткой. Характерные линии примесного поглощения.                                                                                                                                                                                                   |
| 2      | <b>Тема 2. Фотопроводимость в магнитном поле</b><br>Фотопроводимость в магнитном поле: зависимость фотоЭДС и тока короткого замыкания от величины поля и интенсивности излучения. Четный и нечетный фотомагнитоэлектрический эффект. Циркуляция поверхностного тока при ФМЭ. Люминесценция и люминофоры. Классификация люминесценции по типу возбуждения, длительности свечения и механизму элементарных процессов. Стоксова и антистоксова люминесценция. Краевая и экситонная люминесценция в полупроводниках, центры свечения |
| 3      | <b>Тема 3. Сегнетоэлектричество</b><br>Поляризационная катастрофа и критерий сегнетоэлектричества для нейтральных атомов. Сегнетоэлектричество ионных кристаллов, роль низкочастотных оптических фононов. Антисегнетоэлектричество и пьезоэлектричество.                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 4      | <b>Тема 4. Особенности гальваномагнитных явлений в полупроводниках</b><br>Особенности гальваномагнитных явлений в полупроводниках: температурная зависимость коэффициента Холла, холловская подвижность вырожденных и невырожденных полупроводников. Учет влияния эффекта Эттингсгаузена в измерениях коэффициента Холла. Поперечный и продольный магнитрезистивный                                                                                                                                                              |



|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | эффект многозонных полупроводников.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5  | <b>Тема 5. Квантовый эффект Холла</b><br>Квантовый эффект Холла в инверсионном слое в поперечном поле: целый и дробный эффекты, условия наблюдения. Основы описания эффекта: двумерный электронный газ и квантовая жидкость, роль локализованных состояний. Метрологические применения.                                                                                                                                  |
| 6  | <b>Тема 6. Циклотронный резонанс</b><br>Циклотронный резонанс: условия наблюдения, особенности измерений в СВЧ и инфракрасном диапазонах. Определение компонент тензора эффективной массы носителей при измерениях циклотронного резонанса вдоль различных направлений кристаллической решетки.                                                                                                                          |
| 6  | <b>Тема 7. Применение эффекта де-Гааза-ван-Альфена</b><br>Применение эффекта де-Гааза-ван-Альфена в исследованиях топологии поверхности Ферми: связь площади экстремальных сечений с периодом осцилляций магнитной восприимчивости. Условия проведения эксперимента, преимущества метода по сравнению с другими методами исследования поверхности Ферми.                                                                 |
| 7  | <b>Тема 8. Акустоэлектронное взаимодействие в металлах и полупроводниках</b><br>Поглощение ультразвука в сильных магнитных полях: условия наблюдения квантовых осцилляций в металлах и вырожденных полупроводниках и акустического циклотронного резонанса в невырожденных полупроводниках. Восстановление зонной структуры.                                                                                             |
| 8  | <b>Тема 9. Изучение локальной структуры с помощью мессбауэровской спектроскопии</b><br>Изучение локальной структуры с помощью мессбауэровской спектроскопии: изомерный сдвиг и локальная электронная структура; квадрупольный дублет и градиент кристаллического поля; сверхтонкая структура и распределение электронной и спиновой плотности. Мессбауэровские изотопы и температурная зависимость спектров.             |
| 9  | <b>Тема 10. ЯМР спектроскопия</b><br>Спин-спиновое и спин-решеточное взаимодействие и времена продольной и поперечной релаксации. Форма ЯМР линии и ее расщепление. Химический сдвиг и сдвиг Найта. Принципиальная схема ЯМР-спектрометра, условия измерения эффекта. Акустический ядерный магнитный резонанс.                                                                                                           |
| 10 | <b>Тема 11. ЭПР спектроскопия</b><br>ЭПР спектроскопия: тонкая структура уровней в кристаллическом поле, взаимодействие с магнитными моментами ядер, сверхтонкая и суперсверхтонкая структура линий. Времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. Эффект насыщения. Принципиальная схема ЭПР-спектрометра, условия измерения эффекта. Акустический парамагнитный резонанс.                                        |
| 11 | <b>Тема 12. Масс-спектрометрия</b><br>Основные методы исследования элементного состава сложных соединений. Масс-спектрометрия и рентгеновский флуоресцентный анализ, преимущества и недостатки обоих методов. Применение обратного резерфордского рассеяния для анализа состава тонких слоев.                                                                                                                            |
| 12 | <b>Тема 13. Фотоэлектронная и оже-спектроскопия</b><br>Фотоэлектронная и оже-спектроскопия – методы исследования электронной структуры поверхности. Рентгеновская спектроскопия поглощения – метод исследования локальной кристаллической и электронной структуры кристаллических и аморфных тел. Структура края поглощения – XANES спектроскопия, далекая тонкая структура осцилляций поглощения – EXAFS спектроскопия. |

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, изучении пройденного материала. Для того чтобы показать современное физическое состояние физики конденсированного состояния вещества, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме, посещение лабораторий НИЯУ МИФИ. Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, в том числе, проводимых в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

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

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

| Компетенция | Индикаторы освоения | Аттестационное мероприятие (КП 1) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| ПК-14.2     | З-ПК-14.2           | Э, КИ-8, КИ-12                    |
|             | У-ПК-14.2           | Э, КИ-8, КИ-12                    |
|             | В-ПК-14.2           | Э, КИ-8, 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-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 –                           | E           | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет                                                                                                                                                                                                         |
| 60-64        | «удовлетворительно»           |             |                                                                                                                                                                                                                                                                         |

|         |                              |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                              |   | знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.                                                                                                        |
| Ниже 60 | 2 –<br>«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 Л12 Лабораторный практикум "Механика твердого тела" : , Щербачев О.В. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
3. ЭИ Д 14 Поверхностные свойства сплавов на основе свинца, олова, индия, кадмия : учебное пособие, Кутуев Р. А., Дадашев Р. Х., Созаев В. А., Москва: Физматлит, 2016
4. ЭИ И 87 Полупроводниковые термоэлектрические энергоэффективные устройства : учебное пособие, Гаджиев Х. М., Исмаилов Т. А., Санкт-Петербург: Лань, 2021
5. ЭИ С50 Сборник задач по физике конденсированного состояния : учебное пособие для вузов, Исаенкова М.Г., Елманов Г.Н., Смирнов Е.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
6. ЭИ Е50 Физика и техническое применение наноструктур : лабораторный практикум, Катеев И.Ю., Елесин В.Ф., Безотосный И.Ю., Москва: МИФИ, 2008
7. 621.38 С 77 Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебник для академического бакалавриата, Старосельский В.И., Москва: Юрайт, 2019
8. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : лабораторный практикум, Троян В.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
9. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007
10. ЭИ Е74 Фотопреобразователи солнечной энергии : учебное пособие для вузов, Литвин Н.В., Ермолаева Н.В., Смолин А.Ю., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
11. 621.38 Э41 Экстремальная электроника : текст лекций, Чумаков А.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2014

12. ЭИ Э 94 Эффект Холла в германии, легированном золотом : Лабораторный практикум, Подливаев А.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2020

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 К31 Вычислительные методы в квантовой физике : учеб. пособие для вузов, Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: МИФИ, 2005
2. 537 И 39 Изучение эффекта Холла в полупроводниках : Методические указания к выполнению лабораторной работы, , Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ, 2019
3. 538.9 Б87 Квазичастицы в физике конденсированного состояния : , Кульбачинский В.А., Брандт Н.Б., Москва: Физматлит, 2016
4. ЭИ П 30 Моделирование компонентов и элементов интегральных схем : учебное пособие, Гудков Г. В., Петров М. Н., Санкт-Петербург: Лань, 2021
5. 621.3 С49 Основы материаловедения и технологии полупроводников : Учеб. пособие для вузов, Случинская И.А., Москва: МИФИ, 2002
6. 537 К31 Релаксационные колебания в лазерах : , Кащенко С.А., Григорьева Е.В., Москва: Либроком, 2013
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. ЭИ К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , М.: МИФИ, 2001
9. 539.2 К 89 Тонкопленочные гетерокомпозиции на основе карбида кремния. Особенности получения гетерокомпозиций на основе карбида кремния. : , Каргин Н.И., Сафаралиев Г.К., Кузнецов Г.Д., Москва: Физматлит, 2019
10. 539.2 Г95 Физика твердого тела : учеб. пособие для техн. ун-тов, Гуревич А.Г., СПб: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2004
11. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.1 , Ашкрофт Н. , М.: Мир, 1979
12. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.2 , Ашкрофт Н. , М.: Мир, 1979
13. 621.38 Е74 Фотопреобразователи солнечной энергии : учебное пособие для вузов, Литвин Н.В., Ермолаева Н.В., Смолин А.Ю., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013

#### 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**

При изучении курса 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.

Автор(ы):

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

Кузнецов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н.

Конюхов Игорь Юрьевич