



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.
Носова»



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЕиС
Ю.В. Сомова

03.02.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Научная специальность

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации

Форма обучения
очная

Институт/ факультет	Институт естествознания и стандартизации
Кафедра	Физики
Курс	1
Семестр	1, 2

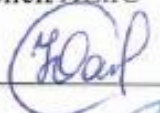
Магнитогорск
2025 год

Рабочая программа составлена на основе ФГТ (приказ Минобрнауки России от 20.10.2021 г. № 951)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Физики
28.01.2025, протокол № 4

Зав. кафедрой  Д.М. Долгушин

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИЕиС
03.02.2025 г. протокол № 3

Председатель  Ю.В. Сомова

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры Физики, канд. физ.-мат. наук  Г.А. Дубский

Рецензент:

зав. кафедрой ПМИИ, д-р техн. наук  Ю.А. Извеков

Лист актуализации рабочей программы

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2026 - 2027 учебном году на заседании кафедры Физики

Протокол от ____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.М. Долгушин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2027 - 2028 учебном году на заседании кафедры Физики

Протокол от ____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.М. Долгушин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2028 - 2029 учебном году на заседании кафедры Физики

Протокол от ____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.М. Долгушин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2029 - 2030 учебном году на заседании кафедры Физики

Протокол от ____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.М. Долгушин

1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Цель изучения дисциплины - формирование научной основы для осознанного и целенаправленного использования свойств твердых тел, в первую очередь – полупроводников, при создании элементов, приборов и устройств микро и наноэлектроники.

Задачами курса служат расширение научного кругозора и эрудиции студентов на базе изучения фундаментальных результатов физики твердого тела и способов практического использования свойств твердых тел, развитие понимания взаимосвязи структуры и состава твердых тел, и многообразия их физических свойств, практическое овладение методами теоретического описания и основными теоретическими моделями твердого тела, навыками постановки физического эксперимента по изучению свойств твердых тел и основными экспериментальными методиками, создание основы для последующего изучения вопросов физики полупроводниковых приборов, включая элементы и приборы наноэлектроники, физики низкоразмерных систем, твердотельной электроники и технологии микро- и наноэлектроники.

2 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Физика конденсированного состояния вещества» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

КНС-1	Способен свободно владеть фундаментальными и прикладными разделами физики и математики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач по физике конденсированного состояния, в том числе и по физике наноструктурных объектов
КНС-4	Способен применять на практике навыки составления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов, написания статей по направлению физика конденсированного состояния и смежным направлениям

3. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц 216 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 86 акад. часов;
- аудиторная – 86 акад. часов;
- внеаудиторная – 0 акад. часов;
- самостоятельная работа – 130 акад. часов;

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)		Самостоятельная работа студента	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Лек.	практ. зан.		
1. Типы конденсированных сред, симметрия и структура кристаллов					
1.1 Основные характеристики и свойства кристаллических, неупорядоченных и аморфных твердых тел и жидких кристаллов. Определение структуры простейших решеток по данным рентгеноструктурного анализа. Методы описания и механизмы взаимодействия электрического и электромагнитного поля с решеткой. Динамика решетки, фононы.	1	6	9	24	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.
Итого по разделу	6		9	24	
2. Свободный электронный газ в полупроводниках и металлах.					
2.1 Расчеты кинетических характеристик твердых тел в приближении свободного электронного газа.	1	7	10	25	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.
Итого по разделу	7		10	25	
3. Зонная теория и ее приложения.					
3.1 Основные приближения зонной теории, свойства блоховского электрона, и особенности энергетического спектра электрона в кристалле, понятие эффективной массы. Типы и роль примесей в полупроводниках. Статистика равновесных носителей заряда. Методы описания мелких и глубоких примесных состояний, методы расчета положения уровня Ферми в полупроводнике, особенности температурной зависимости концентрации носителей заряда, основные эффекты, проявляющиеся при высоком уровне легирования.	1	9	3	15	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.
Итого по разделу	9		3	15	
Итого за семестр	22		22	64	зачёт
4. Неравновесные носители заряда					
4.1 Генерация, рекомбинация, диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда.	2	6	8	20	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.
Итого по разделу	6		8	20	
5. Магнетики, сверхпроводники.					
5.1 Физическая природа магнетизма, основные типы магнетиков. Свойства	2	5	5	20	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.

и основные типы сверхпроводников, макро- и микроскопические модели сверхпроводимости.					
Итого по разделу		5	5	20	
6. Поверхность и контактные явления.					
6.1 Контактные явления в металлах и полупроводниках	2	5	3	8	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.
Итого по разделу		5	3	8	
7. Основные экспериментальные методы изучения структуры, электрических и магнитных свойств твердых тел.					
7.1 Методы экспериментального определения электропроводности и концентрации носителей заряда в твердом теле, ширины запрещенной зоны, концентрации, подвижности, времени жизни, коэффициента диффузии носителей заряда в полупроводнике.	2	5	5	18	1. Беседа - обсуждение 2. Устный опрос.
Итого по разделу		5	5	18	
Итого за семестр		21	21	66	зачёт
Итого по дисциплине		43	43	130	зачет

4 Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестации

Представлены в приложении 1.

5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) Основная литература:

1. Физика твердого тела : учебное пособие [для вузов] / Г. А. Дубский [и др.] ; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова. - Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2019. - 1 CD-ROM. - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsistema.ru/uploader/fileUpload?name=3822.pdf&show=dcatalogues/1/1530258/3822.pdf&view=true> (дата обращения: 23.10.2020). - Макрообъект. - ISBN 978-5-9967-1594-7. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

2. Молекулярная физика. Термодинамика. Конденсированные состояния : учебное пособие / Ш. А. Пиралишвили, Е. В. Шалагина, Н. А. Каляева, Е. А. Попкова. — 2-е изд., доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 200 с. — ISBN 978-5-8114-2431-3. — Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/91292>.

3. Кульков, В. Г. Физика конденсированного состояния в электротехническом материаловедении : учебное пособие / В. Г. Кульков. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 272 с. — ISBN 978-5-8114-2379-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/90003>.

б) Дополнительная литература:

1. Дубский, Г. А. Физика конденсированного состояния вещества : лабораторный практикум / Г. А. Дубский, А. А. Нефедьев, Т. Я. Дубская ; МГТУ. - [2-е изд., подгот. по печ. изд. 2014 г.]. - Магнитогорск : МГТУ, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsistema.ru/uploader/fileUpload?name=1445.pdf&show=dcatalogues/1/1123966/1445.pdf&view=true> (дата обращения: 23.10.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

<https://e.lanbook.com/book/91292> 1. Молекулярная физика. Термодинамика. Конденсированные состояния : учебное пособие / Ш. А. Пиралишвили, Е. В. Шалагина, Н. А. Каляева, Е. А. Попкова. — 2-е изд., доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 200 с.

<https://e.lanbook.com/book/90003> Кульков, В. Г. Физика конденсированного состояния в электротехническом материаловедении : учебное пособие / В. Г. Кульков. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 272 с.

Программное обеспечение

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
MS Office 2007 Professional	№ 135 от 17.09.2007	бессрочно

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Название курса	Ссылка
Национальная информационно-аналитическая система — Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)	URL: https://elibrary.ru/project_risc.asp
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности»	URL: http://www1.fips.ru/

Приложение 1

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

При изучении дисциплины осуществляются текущий, промежуточный и итоговый контроль по дисциплине.

Текущий контроль основан на беглом опросе раз в неделю. Формы: тестовые оценки за выполнение индивидуальных заданий. Основная цель ТК: своевременная оценка успеваемости студентов, побуждающая их работать равномерно, исключая малые загрузки или перегрузки в течение семестра.

Практические занятия следует проводить в аудитории с мультимедийным оборудованием, при этом и коллоквиумы, и защита результатов исследований проводятся по традиционной методике в классе.

Промежуточный контроль – осуществляется в форме коллоквиумов. Цель ПК: побудить студентов отчитаться за усвоение разделов дисциплины накопительным образом, т.е. сначала за первые, затем за следующие разделы, изучаемые в семестре.

Итоговый контроль по дисциплине - это проверка уровня учебных достижений студентов по всей дисциплине за семестр. Форма контроля: зачет с оценкой в конце семестра. Проводится традиционным способом. Цель итогового контроля: проверка знаний дисциплины, полученных при изучении разделов, достаточных для последующего обучения.

Темы практических занятий.

Практическое занятие 1.

Исследование явлений термоэлектронной эмиссии (ТЭЭ) и определение работы выхода методом прямой Ричардсона.

Практическое занятие 2.

Исследование зависимости электропроводности металла и полупроводника от температуры.

Практическое занятие 3.

Температурное исследование р-n- перехода полупроводникового диода. Определение контактной разности потенциалов.

Практическое занятие 4. Определение концентрации и знака заряда носителей, и знака заряда носителей тока в полупроводниках с помощью эффекта Холла.

Практическое занятие 5. Исследование диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Практическое занятие 6. Измерение удельного заряда электрона (отношение заряда электрона к его массе).

Практическое занятие 7. Изучение электронно-лучевого осциллографа измерение параметров электрических сигналов.

Практическое занятие 8. Измерение температуры, лучеиспускательной способности и степени черноты раскаленных металлов.

Практическое занятие 9. Исследование теплофизических характеристик твердых тел методом периодических колебаний температуры.

Приложение 2

Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

КНС-1 Способен свободно владеть фундаментальными и прикладными разделами физики и математики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач по физике конденсированного состояния, в том числе и по физике наноструктурных объектов

Перечень теоретических вопросов

- 1 Типы связей в кристаллах: силы Ван-дер-Ваальса, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.
- 2 Решетки Браве: 7 сингоний, 3 кубических решетки.
- 3 Обозначение узлов, направлений и плоскостей (индексы Миллера) в кристалле.
- 4 Дефекты в кристалле: Френкеля и Шоттки.
5. Микрочастицы: фермионы и бозоны. Функция распределения. Плотность состояний для электронов в кристалле.
- 6 Функция распределения Ферми-Дирака. Физический смысл энергии Ферми для металла.
- 7 Функция распределения Максвелла-Больцмана.
- 8 Функция распределения Бозе-Эйнштейна.
- 9 Собственные полупроводники: зонная диаграмма, энергия Ферми E_F , равновесная концентрация носителей заряда n_0 . Закон действующих масс.
- 10 Дырки в полупроводниках. Эффективная масса.
- 11 Прямозонные и непрямозонные полупроводники.
- 12 Донорные полупроводники (n-тип): зонная диаграмма.
- 13 Акцепторные полупроводники (p-тип): зонная диаграмма.
- 14 Температурная зависимость концентрации носителей заряда в примесном полупроводнике.
- 15 Дрейф носителей заряда. Подвижность. Время релаксации. Длина свободного пробега.
- 16 Удельная электропроводность. Электропроводность чистых металлов.
- 17 Собственная проводимость полупроводников.
- 18 Примесная проводимость полупроводников.
- 19 Работа выхода. Контакт двух металлов.
- 20 Контакт металла с полупроводником: зонные диаграммы для стационарного состояния, прямого и обратного включения; контактная разность потенциалов, ширина обедненной области; вольт-амперная характеристика.
- 21 Контакт двух полупроводников (p-n-переход): зонные диаграммы для стационарного состояния, прямого и обратного включения; контактная разность потенциалов, ширина обедненной области; вольт-амперная характеристика.
- 22 Нормальные колебания линейной кристаллической решетки из одинаковых атомов: дисперсионная зависимость.
- 23 Нормальные колебания линейной кристаллической решетки с базисом из двух атомов: дисперсионная зависимость.
- 24 Функция распределения Нормальных колебаний. Характеристическая частота и температура Дебая.
- 25 Фононы. Энергия кристаллической решетки твердого тела. Теплоемкость твердого тела.

КНС-4 Способен применять на практике навыки составления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов, написания статей по направлению физика конденсированного состояния и смежным направлениям

Задания на решение задач из профессиональной области, комплексные задания

Вычислить концентрации электронов n в литии, меди и серебре при температуре $T=0$ К. Энергии Ферми металлов равны: $E_F(\text{Li})=4,72$ эВ, $E_F(\text{Cu})=7,11$ эВ, $E_F(\text{Ag})=5,49$ эВ.

Определить энергию Ферми в германиевом собственном полупроводнике при температуре $T=300$ К. Ширина запрещенной зоны $E_g=0,67$ эВ. Эффективная масса электронов $m_e^*=0,56m_e$ и эффективная масса дырок $m_h^*=0,59m_e$ (m_e – масса свободного электрона).

Вычислить энергию Ферми в германиевом примесном полупроводнике, отсчитанную от дна зоны проводимости, при температуре $T=20$ К. Германий легирован акцепторной примесью In с концентрацией $N_a=10^{23} \text{ м}^{-3}$. Ширина запрещенной зоны при этой температуре равна $E_g=0,75$ эВ. Энергия активации $E_a=0,011$ эВ.

Вычислить энергию Ферми в германиевом примесном полупроводнике, отсчитанную от дна зоны проводимости, при температуре $T=20$ К. Германий легирован донорной примесью Sb с концентрацией $N_d=10^{23} \text{ м}^{-3}$. Ширина запрещенной зоны при этой температуре равна $E_g=0,75$ эВ.

Вычислить энергию Ферми в германиевом примесном полупроводнике, отсчитанную от дна зоны проводимости, при температуре $T=20$ К. Германий легирован донорной примесью As с концентрацией $N_d=10^{23} \text{ м}^{-3}$ и акцепторной примесью Ga с концентрацией $N_a=5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Вычислить среднюю дрейфовую скорость движения электронов $v_{др}$ в медном проводнике длиной $l=1$ м, если к нему приложена разность потенциалов $U=10$ В. Удельное сопротивление меди $\rho=1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Концентрация носителей заряда $n_e=10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Вычислить длину свободного пробега электронов в полупроводнике в сильном электрическом поле. Критическая напряженность поля $E_k=2 \cdot 10^4 \text{ В/см}$. Температура 20°C .

Электропроводность натрия равна $\sigma=2,17 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Эффективная масса электрона $m^*=1,2m_e$. Вычислить: а) время релаксации τ при $T=300$ К; б) среднюю длину свободного пробега λ при $T=300$ К; в) дрейфовую скорость $v_{др}$ в поле $E=100 \text{ В/м}$.

Практические задания

- Плоскость отсекает на осях координат отрезки $S_1=0,5$, $S_2=1,25$, $S_3=1,5$ в единицах ребер элементарной ячейки. Определить индексы Миллера этой плоскости.
- Найти индексы Миллера плоскости, проходящей через узловые точки

кристаллической решетки с координатами $x_1=9$, $x_2=10$, $x_3=30$, если параметры решетки $a=3$, $b=5$, $c=6$.

3 Рассчитать с помощью индексов Миллера расстояния между соседними кристаллическими плоскостями (100), (110), (111) для примитивной кубической ячейки.

4 Пусть a – длина ребра основного куба гранецентрированной кубической решетки. Каково расстояние a_0 между ближайшими атомами в ГЦК-решетке?

5 Пусть a – длина ребра основного куба объемцентрированной кубической решетки. Каково расстояние a_0 между ближайшими атомами в ОЦК-решетке?

6 Определить число атомов n_0 в элементарной ячейке железа, кристаллизующегося в кубической системе. Ребро куба $a=0,286$ нм, атомный вес железа $A=55,84$ г/моль, плотность $\rho=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физика конденсированного состояния вещества» включает теоретические вопросы и практические задания, позволяющие оценить степень сформированности компетенций, проводится в форме зачёта.

Зачёт обучающиеся получают в результате выполнения всех видов работ и собеседования по вопросам и заданиям согласно перечню вопросов и практических заданий к зачету.

Показатели и критерии оценивания зачета:

- на оценку «зачтено» обучающийся демонстрирует уровень, не ниже порогового, сформированности компетенций: в ходе контрольных мероприятий могут допускаться ошибки, может проявляться отсутствие отдельных знаний, умений, навыков, обучающиеся могут испытывать значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации.

- на оценку «не зачтено» обучающийся не может показать знания на пороговом уровне сформированности компетенций, т.е. обучающийся не показывает знание основного материала в объеме, необходимом для предстоящей профессиональной деятельности; не способен аргументировано и последовательно излагать, допускает грубые ошибки в ответах; не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач. не подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой.