

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий государственный университет»

Физико-технический факультет
Кафедра теоретической физики и нанотехнологий



П.А. Машаров

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ И РЕНТГЕНОГРАФИЯ МАТЕРИАЛОВ

Угруппированная группа направлений подготовки	03.00.00 Физика и астрономия
Программа высшего образования	Программа бакалавриата
Направление подготовки	03.03.02 Физика
Профиль подготовки	Физика
Квалификация	Бакалавр
Форма обучения	Очная

Рабочая программа адаптирована для лиц
с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Донецк 2024

Рабочая программа дисциплины «Электронная микроскопия и рентгенография материалов» для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика (Профиль: Физика), составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 03.03.02 Физика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 07.08.2020 № 891 (с изм. и доп.), Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 06 апреля 2021 г. № 245 (с изм. и доп.), в соответствии с учебным планом, утвержденным Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонГУ» для набора 2024 года.

Разработчик:
профессор кафедры теоретической
физики и нанотехнологий,
канд.физ.-мат.наук



В.И. Фиохи́н

Рабочая программа утверждена на заседании кафедры теоретической физики и нанотехнологий.
Протокол от 26.03.2024 г. № 16

Заведующий кафедрой



А. Г. Петренко

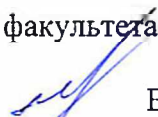
СОГЛАСОВАНО:

Декан физико-технического
факультета
28.03.2024 г.



С. А. Фоменко

Учебно-методическая комиссия физико-технического факультета.
Протокол от 27.03.2024 г. № 2.
Председатель



В. Н. Котенко

Руководители основной профессиональной
образовательной программы:
кандидат физико-математических наук



А. В. Безус

1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

1.1. Требования к предварительной подготовке обучающихся, предшествующие и сопутствующие дисциплины, на которых основывается изучение данной:

дисциплины программы бакалавриата: Математический анализ, Аналитическая геометрия и линейная алгебра. Теория групп, Общая и экспериментальная физика (Механика), Общая и экспериментальная физика (Молекулярная физика. Термодинамика).

1.2. Дисциплины, курсовые работы и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее: Структурообразование и явления переноса в кристаллах и тонких пленках, Производственная: преддипломная практика.

2. ОПИСАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Общая характеристика

Наименование показателя	Значение показателя
Название образовательной программы	03.03.02 Физика (Профиль: Физика)
Шифр и название в соответствии с учебным планом	Б1.В.ДВ.10.2 Электронная микроскопия и рентгенография материалов
Часть образовательной программы	Вариативная часть: выбор обучающегося
Количество зачетных единиц / всего часов	3,5 / 126

2.2. Распределение часов по периодам обучения

Форма обучения	курс	семестр	Общее количество часов					Форма контроля
			лекционных	лабораторных	практических	самостоятельной работы+ контроль	всего	
Очная	4	7	26	39		61	126	экзамен

3. ЦЕЛИ ДИСЦИПЛИНЫ

Получение углубленных знаний в области физических основ метода дифракции электронов для исследования структуры наноструктурированных материалов

4. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ КОМПОНЕНТА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ, ИХ ИНДИКАТОРЫ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Компетенции	Индикаторы	Результаты обучения
ПК-3. Способен проводить и управлять результатами научных исследований и опытно-	ПК-3.24. Использует методы анализа материалов по электронной картине	ПК-3.24.1. З Общие принципы дифракции электронов на материалах и возможности использования ее для анализа структуры материалов ПК-3.24.2. Умеет Получать образцы

конструкторских работ в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта.		для электрономикроскопического и электронографического анализов ПК-3.24.3. Владеет методами определения качественного фазового состава материалов по электронной дифракционной картине
	ПК-3.25 Использует знания принципов дифракции электронов для определения фазового состава материалов	ПК-3.25.1. Знает общие принципы дифракции электронов на материалах и возможности использования ее для анализа структуры наноматериалов ПК-3.25.2. Умеет получать образцы для электрономикроскопического и электронографического анализов ПК-3.25.3. Владеет методами определения качественного фазового состава материалов по электронной дифракционной картине

5. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Название темы	Краткое содержание темы (вопросы темы)
Раздел 1. Основы электронно-микроскопического исследования	
Основы электронной оптики.	Предмет спецкурса. История электронной микроскопии. Взаимодействие электронов с веществом. Задачи и особенности электронной микроскопии. Основные понятия: оптическая сила линзы, фокусное расстояние, Параксиальные пучки, стигматические изображения и другие. Движение электронов в электрических и магнитных полях. Закон преломления электронов в электрическом поле. Аналогия и разница между световой и электронной оптикой. Электрические и магнитные электронные линзы. Оптические характеристики магнитных электронных линз. Аберрации электронных линз.
Электронография моно- и поликристаллических объектов.	Электронография. Геометрия дифракционной картины. Уравнения Лауэ. Уравнения Вульфа-Брега. Применение обратной решетки и

	построений Эвальда для интерпретации точечных и кольцевых электронограмм. Расчет кольцевых электронограмм. Определение межплоскостных расстояний кристаллов, индексирования электронограмм; определение параметров кристаллических решеток. Получение и индексирования точечных электронограмм. Определение ориентации монокристаллических пленок. Методы уточнения ориентации кристаллов. Исследование структуры аморфных веществ.
Особенности дифракционной картины в электронных лучах.	Дифракция для двойников. Двойная дифракция. Линии Кикучи. Картины муара.
Методы электронно-микроскопического исследования.	Косвенный метод: реплики, оттенения реплик. Полупрямой метод: реплики с включениями. Прямой метод: тонкие пленки и фольги.
Основные параметры электронно-микроскопического изображения.	Контраст в изображении кристаллических объектов.
Кинематическая теория дифракционного контраста.	Основные положения теории. Амплитуда лучей, дифрагированных от совершенного кристалла. Изгибные контуры экстинкции. Контуры толщины экстинкции. Амплитудная фазовая диаграмма. Амплитуда лучей, дифрагированных от несовершенного кристалла.
Раздел 2. Перспективные направления исследований методом электронной микроскопии	
Изучение дислокационной структуры кристалла.	Особенности контраста в изображении дислокаций. Определение вектора Бюргерса дислокаций, знака дислокаций и их плотности
Анализ дефектов упаковки.	Особенности контраста в изображении дефектов упаковки. Определение энергии дефекта упаковки.
Динамическая теория дифракционного контраста.	Основные положения динамической теории Дарвина. Амплитуда волн, которые рассеяны бесконечным плоским слоем вещества. Зависимость амплитуды от толщины кристалла. Учет многократных отражений атомными плоскостями.
Перспективы развития метода электронно-микроскопического исследования.	Новые области применения ПЭС. Прямые изображения кристаллической структуры (фазовый контраст). Высоковольтная ПЭС. ПЭС в сходящемся пучке. ПЭС высокого разрешения. Крио ПЭС. Трехмерная 3D темогграфия.
Электронно-зондовые методы исследования.	Растровая Электронная микроскопия и рентгенография материалов (РЭМ). Получение изображений. Качество изображений и разрешающая способность. Формирование контраста. Применение РЭС в материаловедении. Рентгеновский

	микроанализатор. Сканирующий туннельный микроскоп. Оже-Электронная микроскопия и рентгенография материалов и спектроскопия. Дифракция медленн. электронов.
--	--

6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Форма обучения – очная, курс – 4, семестр – 7

Наименования разделов и тем	Количество часов				
	Лекц.	Лабор.	Практ.	СРС	Всего
Раздел 1. Основы электронно-микроскопического исследования	16	19		30	65
Основы электронной оптики.	3	3		5	11
Электроннография моно- и поликристаллических объектов.	3	3		5	11
Особенности дифракционной картины в электронных лучах.	3	3		5	11
Методы электронно-микроскопического исследования.	3	3		5	11
Основные параметры электронно-микроскопического изображения.	2	3		5	10
Кинематическая теория дифракционного контраста.	2	4		5	11
Раздел 2. Перспективные направления исследований методом электронной микроскопии	10	20		31	61
Изучение дислокационной структуры кристалла.	2	4		6	12
Анализ дефектов упаковки.	2	4		6	12
Динамическая теория дифракционного контраста.	2	4		6	12
Перспективы развития метода электронно-микроскопического исследования.	2	4		6	12
Электронно-зондовые методы исследования.	2	4		7	13
ИТОГО ПО КОМПОНЕНТУ ОПОП	26	39		61	126

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (СРЕДСТВА) ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

7.1. Контрольные вопросы

Раздел 1

1. Основы электронной оптики. Основные понятия: оптическая сила
2. линзы, фокусное расстояние, параксиальные пучки, стигматическое
3. изображение и другие. Движение электронов в электрических и
4. магнитных полях. Закон преломления электронов в электрическом поле.
5. Влияние дефектов упаковки на дифракционную картину. Определение

6. Аналогия и разница между световой и электронной оптикой.
7. Электрические и магнитные электронные линзы. Оптические характеристики магнитных электронных линз.
8. Порядок проведения качественного фазового анализа. Осложнения при проведении качественного фазового анализа
9. Кинематическая теория дифракционного контраста. Основные положения теории. Амплитуда лучей, дифрагированных от совершенного кристалла.
10. Количественный фазовый анализ. Методы количественного фазового анализа. Метод гомологических пар. Метод градуировочной кривой. Метод внутреннего эталона.

Раздел 2

1. Электронография. Геометрия дифракционной картины. Основное интерференционное уравнение. Применение обратной решетки и построений Эвальда для интерпретации точечных электронограмм.
2. Методы количественного фазового анализа. Метод добавок. Метод внешнего эталона. Метод измерения коэффициента поглощения. Метод многоканальных дифрактометров. Погрешности количественного фазового анализа.
3. Получения и индентирование точечных электронограмм. Определение ориентации монокристаллических пленок.
4. Рентгеновская топография. Суть и возможности рентгеновской топографии.
5. Рентгеновская картина полной текстуры и ее анализ. Прямая полюсная фигура. Анализ полюсных фигур.
6. Определение характера распределения дислокаций и их плотности.
7. Внутренние напряжения в материалах и их рентгеновская характеристика.
8. Малоугловое рассеяние. Определение размеров частиц моно- и полидисперсных систем. Осложняющие факторы.
9. Растровая электронная микроскопия (РЭМ). Разрешающая способность. Механизм формирования контраста.
10. Определение макронапряжений. Одноосное напряженное состояние. Плоско-напряженное состояние.

7.2. Темы лабораторных работ

- Изучение построения и режимов работы электронного микроскопа.
- Калибровка электронного микроскопа
- Изготовление образцов для электронографического анализа
- Определение кристаллической структуры и фазового поликристаллических пленок.
- Индексирование точечных электронограмм. Изучение морфологии и ориентационной связи эпитаксиальных пленок
- Изготовление и исследования реплик и металлических фольг
- Электроно-фрактографический анализ изломов
- Определение вектора Бюргерса и плотности дислокаций тонких пленок.
- Изучение методики электроно-микроскопических темнопольных исследований.
- Изучение конструкции и принципа действия растрового электронного микроскопа.

Контрольная работа по проверке теоретических знаний – по всем темам, с использованием указанных выше контрольных вопросов.

7.3. Образец содержания экзаменационного билета

Донецкий государственный университет Физико-технический факультет Кафедра теоретической физики и нанотехнологий	
Программа высшего образования Направление подготовки Профиль подготовки Форма обучения Семестр Дисциплина	Программа бакалавриата 03.03.02 Физика Физика Очная Седьмой Электронная микроскопия и рентгенография материалов
Экзаменационный билет № 1	
1. Методы количественного фазового анализа. 2. Порядок проведения качественного фазового анализа. 3. Растровая электронная микроскопия.	
Утверждено на заседании кафедры теоретической физики и нанотехнологий, протокол № _ от _____ 202_ г.	
Заведующий кафедрой Экзаменатор	

В случае ведения учебного процесса с использованием электронного обучения и дистанционных образовательных технологий, содержание билета может отличаться от приведенного.

8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛЛОВ, КОТОРЫЕ ПОЛУЧАЮТ ОБУЧАЮЩИЕСЯ

Общая оценка знаний обучающихся по дисциплине проводится по 100-балльной шкале исходя из максимума, приведенного в таблице ниже. Организационно-учебная работа в аудитории оценивается на основе таких критериев как посещаемость занятий, своевременное и качественное выполнение домашних заданий, активность во время проведения лекционных и практических занятий (участие в обсуждении текущего и пройденного материала, решение задач и т.п.).

8.1. Семестр 7

Номера разделов	Виды работ	Максимальное количество баллов
1-2	Организационно-учебная работа в аудитории	20
	Самостоятельная работа	10
	Лабораторные работы	20
	Контрольная работа по теоретическому материалу	10
ИТОГО		60
Экзамен		40
Общий итог за семестр		100

Соответствие баллов оценке

Количество баллов из 100	ECTS	Оценка по пятибалльной шкале	
		Экзамен, дифференцированный зачет	Зачет
90-100	A	отлично	зачтено
80-89	B	хорошо	зачтено
75-79	C		зачтено
70-74	D	удовлетворительно	зачтено
60-69	E		зачтено
35-59	FX	неудовлетворительно	не зачтено
0-34	F		не зачтено

9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ЛИЦ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ И ИНВАЛИДОВ

В ходе реализации дисциплины используются следующие дополнительные методы обучения, текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в зависимости от их индивидуальных особенностей:

- 1) для слепых и слабовидящих:
 - лекции оформляются в виде электронного документа, доступного с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением;
 - для выполнения задания при необходимости предоставляется увеличивающее устройство; возможно также использование собственных увеличивающих устройств;
 - письменные задания оформляются увеличенным шрифтом.
- 2) для глухих и слабослышащих:
 - лекции оформляются в виде электронного документа;
 - письменные задания выполняются на компьютере в письменной форме;
 - экзамен проводится в письменной форме на компьютере; возможно проведение в форме тестирования.
- 3) для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:
 - лекции оформляются в виде электронного документа, доступного с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением;
 - письменные задания выполняются на компьютере;
 - экзамен и зачёт проводятся в устной форме или выполняются в письменной форме на компьютере.

При необходимости предусматривается увеличение времени для подготовки ответа.

Процедура проведения промежуточной аттестации для обучающихся устанавливается с учётом их индивидуальных психофизических особенностей. Промежуточная аттестация может проводиться в несколько этапов.

Проведение процедуры оценивания результатов обучения допускается с использованием дистанционных образовательных технологий.

Обеспечивается доступ к информационным и библиографическим ресурсам в сети Интернет для каждого обучающегося в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

- 1) для слепых и слабовидящих:
 - в печатной форме увеличенным шрифтом;
 - в форме электронного документа;
- 2) для глухих и слабослышащих:

- в печатной форме;
- в форме электронного документа.
- 3) для обучающихся с нарушениями опорно-двигательного аппарата:
 - в печатной форме;
 - в форме электронного документа.

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Учебные занятия проводятся в 4 учебном корпусе ДонГУ (г. Донецк, пр. Театральный, 13). Для проведения лабораторных занятий требуется аудитория, оборудованная меловой или маркерной доской, мультимедийный проектор и экран, ноутбук, комплект учебной мебели для студентов, рабочее место преподавателя, выход в Интернет – проводной или с использованием Wi-Fi.

Для самостоятельной работы используются текстовые и электронные ресурсы Научной библиотеки университета и других электронных библиотечных баз данных, учебно-методическое обеспечение, представленное в учебно-методическом кабинете кафедры теоретической физики и нанотехнологий (ауд.256).

Обучающиеся имеют возможность использовать учебные материалы по дисциплине, размещенные на платформе Moodle Центра дистанционного образования ФГБОУ ВО «ДонГУ». При изучении дисциплины применяются электронное обучение и дистанционные образовательные технологии.

С использованием ресурсов платформы дистанционного образования осуществляется текущий контроль знаний обучающихся на основе тестирования и проверки результатов самостоятельной работы.

11. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

11.1. Основная литература

1. Электронная микроскопия тонких кристаллов : пер. с англ. / под ред. Л. М. Утевского. - Москва : Мир, 1968. - 574 с
2. Методические указания к лабораторным работам по спецкурсу "Теория и методы структурного анализа" : (для студентов специальности 6.040203 "Физика") / А. Н. Троцан, С. В. Чертопалов, Г. В. Тимофеева ; ДонНУ. Физ.-техн. фак. Каф. нанофизики. - Донецк : ДонНУ, 2013. - 96 с.
3. Троцан, А. Н. Практикум по анализу тонкой структуры материалов / А. Н. Троцан, М. П. Кушнир, С. В. Чертопалов ; Донец. нац. ун-т. - Донецк : ДонНУ, 2004. - 102 с.
4. Васильева, Л. А. Электронная микроскопия в металловедении цветных металлов : Справочник / А. А. Васильева, Л. М. Малашенко, Р. Л. Тофпенек ; Под ред. С. А. Астапчика ; АН БССР, Физ.-техн. ин-т. - Минск : Наука и техника, 1989. - 208 с.

11.2. Дополнительная литература

1. Дюков, В. Г. Электронная микроскопия локальных потенциалов / В. Г. Дюков, С. А. Непийко, Н. Н. Седов ; АН УССР, Ин-т физики. - К. : Наук. думка, 1991. - 198 с.
2. Электронная микроскопия тонких кристаллов : пер. с англ. / под ред. Л. М. Утевского. - Москва : Мир, 1968. - 574 с.

12. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. **Национальная электронная библиотека (НЭБ):** федеральная государственная информационная система / Министерство Культуры РФ; Российская государственная библиотека. – Москва, 2019- . – URL: <https://rusneb.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный, подписка. Необходима установка программного обеспечения. – Текст: электронный.
2. **eLIBRARY.RU:** научная электронная библиотека: сайт. – Москва, 2000- . – URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
3. Научная электронная библиотека **«КиберЛенинка»:** сайт / Ассоциация «Открытая наука». – Москва, 2014- . – URL: <https://cyberleninka.ru/>. – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
4. Электронно-библиотечная система **«Лань»:** [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
5. **ЭБС Юрайт:** электронная библиотечная система: сайт. – Москва, 2013. – URL: <https://biblio-online.ru> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
6. **Электронно-библиотечная система ДонГУ:** сайт / ФГБОУ ВО «ДонГУ». – Донецк, 2016- . – URL: <http://library.donnu.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
7. **Электронный каталог** Научной библиотеки ДонГУ: раздел сайта / НБ ДонГУ. – Текст: электронный // ЭБС ДонГУ: сайт. – URL: <http://library.donnu.ru/catalog/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: поиск свободный, электронные документы – для пользователей ДонГУ.
8. **Электронный архив ДонГУ:** раздел сайта / НБ ДонГУ. – Текст: электронный // ЭБС ДонГУ: сайт. – URL: <http://repo.donnu.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный.

13. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Windows 7 PRO (корпоративная лицензия ДонГУ № 46484614)
2. Microsoft Office (корпоративная лицензия ДонГУ № 46472919)
3. Microsoft Visual Studio (лицензия программы Dream Spark для высших учебных заведений)
4. Антивирус Касперского, Adobe Acrobat Reader, xPDF (лицензии GPL, Apache, BSD для свободного программного обеспечения).