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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 2FBBF5DE0D69884BD28C2AEF8444B461
Владелец МАШАРОВ ПАВЕЛ АНАТОЛЬЕВИЧ
Действителен с 02.06.2025 по 26.08.2026
Должность проректор

УТВЕРЖДАЮ
проректор

_____ П. А. Машаров
«17» апреля 2025 г.
МП

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

Укрупненная группа направлений подготовки	28.00.00 Нанотехнологии и наноматериалы
Программа высшего образования	Программа бакалавриата
Направление подготовки	28.03.03 Наноматериалы
Направленность (профиль) образовательной программы	Наноматериалы
Квалификация	Бакалавр
Форма обучения	Очная

Рабочая программа может быть адаптирована для лиц
с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Донецк 2025

Рабочая программа дисциплины **«Электронная микроскопия»** для обучающихся по направлению подготовки 28.03.03 Наноматериалы (Профиль: Наноматериалы), составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 28.03.03 Наноматериалы, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 22 сентября 2017 г. № 968 (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 2025 года.

Разработчик:
зав. кафедрой теоретической физики и нанотехнологий,
д-р. физ.-мат. наук, проф. А. Г. Петренко

Рабочая программа одобрена на заседании кафедры теоретической физики и нанотехнологий.
Протокол от 10.04.2025 г. № 18.

Заведующий кафедрой А. Г. Петренко

СОГЛАСОВАНО:

И.о. декана физико-технического факультета С. А. Фоменко
16.04.2025 г.

Учебно-методическая комиссия физико-технического факультета.
Протокол от 16.04.2025 г. № 4
Председатель В. Н. Котенко

Руководитель основной образовательной программы, д-р физ.-мат. наук, проф. А. Г. Петренко
10.04.2025 г.

1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

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

базовая подготовка по математике в объёме программы средней школы;

дисциплины программы бакалавриата: Математический анализ, Аналитическая геометрия и линейная алгебра, Механика и молекулярная физика, Методы анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем.

1.2. Дисциплины, курсовые работы и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

Материалы и методы нанотехнологий, Моделирование микро и наноструктур, Производственная практика: практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности.

2. ОПИСАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Общая характеристика

Наименование показателя	Значение показателя
Название образовательной программы (далее – ОП)	28.03.03 Наноматериалы (Профиль: Наноматериалы)
Шифр и название в соответствии с учебным планом	Б1.Б.39 Электронная микроскопия
Часть образовательной программы	Базовая часть
Количество зачетных единиц / всего часов	4 / 144

В случае предъявления от обучающегося или его родителя (законного представителя) заявления на обучение по адаптированной образовательной программе высшего образования, подкрепленного заключением психолого-медико-педагогической комиссии (ПМПК) или медико-социальной экспертизы (МСЭ) с рекомендациями создания индивидуальной программы реабилитации и абилитации (ИПРА), данная рабочая программа может быть адаптирована с учетом индивидуальных особенностей здоровья обучающегося.

2.2. Распределение часов по формам и периодам обучения

Форма обучения	курс	семестр	Общее количество часов					
			лекционных	лабораторных	практических	самостоятельной работы + контроль	всего	Форма контроля
Очная	3	6	32	48	-	64	144	экзамен

3. ЦЕЛИ ДИСЦИПЛИНЫ

Углубленная подготовка 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
ОПК-1. Способен решать задачи профессиональной деятельности на основе применения естественнонаучных и общеинженерных знаний, методов математического анализа и моделирования	ОПК-1.43. Использует знания принципов дифракции электронов для определения фазового состава материалов	ОПК-1.43.1. Знает общие принципы дифракции электронов на материалах и возможности использования ее для анализа структуры наноматериалов ОПК-1.43.2. Умеет получать образцы для электрономикроскопического и электронографического анализов ОПК-1.43.3. Владеет методами определения качественного фазового состава материалов по электронной дифракционной картине
	ОПК-1.44. Применяет методы анализа материалов по электронной картине	ОПК-1.44.1. Знает факторы, влияющие на точность структурного анализа ОПК-1.44.2. Умеет определять качественный фазовый состав материалов по электронной дифракционной картине ОПК-1.44.3. Владеет навыками проведения анализа материалов по электронной картине

5. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Название темы	Краткое содержание темы (вопросы темы)
Раздел 1. Методы 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. Перспективы развития метода электронно-микроскопического исследования	
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 темография.
Электронно-зондовые методы исследования.	Растровая электронная микроскопия (РЭМ). Получение изображений. Качество изображений и разрешающая способность. Формирование контраста. Применение РЭС в материаловедении. Рентгеновский микроанализатор. Сканирующий туннельный микроскоп. Оже-электронная микроскопия и спектроскопия. Дифракция медленных электронов.

6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Форма обучения – очная, курс – 3, семестр – 6

Наименования разделов и тем	Количество часов				
	Лекц.	Лабор.	Практ.	СРС+К	Всего
Раздел 1. Методы электронно-микроскопического исследования	16	24		32	54
Основы электронной оптики.	2	4		5	11
Электронография моно- и поликристаллических объектов.	2	4		5	11
Особенности дифракционной картины в электронных лучах.	3	4		5	12
Методы электронно-микроскопического исследования.	3	4		5	12
Основные параметры электронно-микроскопического изображения.	3	4		6	13
Кинематическая теория дифракционного контраста.	3	4		6	13
Раздел 2. Перспективы развития метода электронно-микроскопического исследования	16	24		32	54
Изучение дислокационной структуры кристалла.	3	4		6	13
Анализ дефектов упаковки.	3	5		6	14
Динамическая теория дифракционного контраста.	3	5		6	14
Перспективы развития метода электронно-микроскопического исследования.	3	5		7	15
Электронно-зондовые методы исследования.	4	5		7	16
ИТОГО ПО КОМПОНЕНТУ ОПОП	32	48		64	144

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

7.1. Контрольные вопросы

Раздел 1

1. История электронной микроскопии. Взаимодействие электронов с веществом. Задачи и особенности электронной микроскопии.
2. Движение электронов в электрических и магнитных полях. Закон преломления электронов в электрическом поле. Аналогия и разница между световой и электронной оптикой.
3. Электрические и магнитные электронные линзы. Оптические характеристики магнитных электронных линз. Аберрации электронных линз.
4. Электронография. Геометрия дифракционной картины. Уравнения Лауэ. Уравнения Вульфа-Брега.
5. Применение обратной решетки и построений Эвальда для интерпретации точечных и кольцевых электронограмм.

6. Расчет кольцевых электронограмм.
7. Определение межплоскостных расстояний кристаллов, индексирования электронограмм; определение параметров кристаллических решеток.
8. Получение и индексирования точечных электронограмм.

Раздел 2

9. Определение ориентации монокристаллических пленок. Методы уточнения ориентации кристаллов.
10. Исследование структуры аморфных веществ.
11. Дифракция для двойников. Двойная дифракция.
12. Линии Кикучи. Картины муара.
13. Косвенный метод: реплики, оттенения реплик.
14. Полупрямой метод: реплики с включениями. Прямой метод: тонкие пленки и фольги.
15. Контраст в изображении кристаллических объектов.
16. Амплитуда лучей, дифрагированных от совершенного кристалла. Изгибные контуры экстинкции. Контуры толщины экстинкции.
17. Амплитудная фазовая диаграмма. Амплитуда лучей, дифрагированных от несовершенного кристалла.

7.2. Темы лабораторных работ:

– Изучение построения и режимов работы электронного микроскопа.
– Калибровка электронного микроскопа.
– Изготовление образцов для электронографических 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
– Электронно-фрактографический анализ изломов.
– Изучение методики электронно 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	Программа бакалавриата
Направление подготовки	28.03.03 Наноматериалы
Профиль подготовки	Наноматериалы
Форма обучения	Очная
Семестр	Шестой
Дисциплина	Электронная микроскопия

Экзаменационный билет № 1

1. Зависимость амплитуды от толщины кристалла. Учет многократных отражений атомными плоскостями.
2. Контраст в изображении кристаллических объектов.
3. Новые области применения ПЭС.

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.).

Самостоятельная работа оценивается на основе предоставленных на проверку выполненных домашних, индивидуальных заданий с учетом своевременности их предоставления и соответствия требованиям к их выполнению.

Количество баллов за контрольную работу вычисляется как сумма баллов за все входящие в её состав задания. Каждое задание оценивается исходя из максимально возможного количества баллов с учетом правильности выполнения задания, полноты приводимых обоснований.

По результатам работы в семестре обучающийся, набравший не менее 60 баллов, имеет право получить оценку. Те, кто претендует на более высокий балл, проходят промежуточную аттестацию. Максимальное количество баллов на промежуточной аттестации – 100. Общее количество баллов за семестр вычисляется как максимальная из полученных за семестр и на промежуточной аттестации и выставляется согласно принятому порядку.

8.1. Семестр 6

Номера разделов	Виды работ	Максимальное количество баллов
1-2	Организационно-учебная работа в аудитории	20
	Самостоятельная работа	10
	Контрольные работы по практике	10
	Контрольная работа по теоретическому материалу	20
ИТОГО		60
Промежуточная аттестация (экзамен)		40
Общий итог за семестр		100

Соответствие баллов оценке

	ECTS	Оценка по пятибалльной шкале

Количество баллов из 100		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. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Учебные занятия проводятся в 4 учебном корпусе ДонГУ (г. Донецк, пр. Театральный, 13). Для проведения 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 могут применяться 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.

10. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

10.1. Основная литература

1. Электронная микроскопия тонких кристаллов : пер. с англ. / под ред. Л. М. Утевского. - Москва : Мир, 1968. - 574 с.

2. Буравлев, Ю. М. Основы инженерии поверхности металлических деталей и конструкций : [учебное пособие] / Ю. М. Буравлев, Н. П. Иваницын, А. Г. Милославский ; ГОУ ВПО Донецкий национальный университет. - Донецк : ГОУ ВПО "ДонНУ", 2017. - 251 с.

3. Иваницын, Н. П. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах [Электронный ресурс] : для студентов, аспирантов, специализирующихся по направлению подготовки 030402 «физика» и специалистов в области физики конденсированных сред, теоретической физики и нанотехнологий. / Н. П. Иваницын, С. В. Терехов, В. М. Юрченко ; ГОУ ВПО "Донецкий национальный университет", Физико-технический факультет

4. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллофизики / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. - М. : Наука, 1975. - 680 с.

10.2. Дополнительная литература

1. Васильева, Л. А. Электронная микроскопия в металловедении цветных металлов : Справочник / А. А. Васильева, Л. М. Малашенко, Р. Л. Тофпенец ; Под ред. С. А. Астапчика ; АН БССР, Физ.-техн. ин-т. - Минск : Наука и техника, 1989. - 208 с.

2. 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.

11. 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: 31.03.2025). – 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: 31.03.2025). – Режим доступа: для авторизов. пользователей. –Текст: электронный.
3. Научная электронная библиотека **«КиберЛенинка»**: сайт / Ассоциация «Открытая наука». – Москва, 2014- . – URL: https://cyberleninka.ru/ (дата обращения: 31.03.2025). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
4. Электронно-библиотечная система **«Лань»**: [сайт]. – URL: https://e.lanbook.com (дата обращения: 31.03.2025). – Режим доступа: издания Сетевой электронной библиотеки, для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
5. **ЭБС Юрайт**: электронная библиотечная система: сайт. – Москва, 2013. – URL: https://urait.ru/library/svobodnyy-dostup/ (дата обращения: 31.03.2025). – Режим доступа: издания свободного доступа, для авторизов. пользователей. – Текст: электронный.
6. **Электронно-библиотечная система ДонГУ**: сайт / ФГБОУ ВО «ДонГУ». – Донецк, 2016- . – URL: http://library.donnu.ru/ (дата обращения: 31.03.2025). – 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: 31.03.2025). – 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: 31.03.2025). – Режим доступа: свободный.

12. 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).