

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**

### **СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В КРИСТАЛЛАХ И ТОНКИХ ПЛЕНКАХ**

Укрупненная 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 «Структурообразование и явления переноса в кристаллах и тонких пленках» 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.  
докт. физ.-мат. наук

В.М. Юрченко

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: Физика деформированных сред, 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.12.2 Структурообразование и явления переноса в кристаллах и тонких пленках
Часть образовательной программы	Вариативная часть: выбор обучающегося
Количество зачетных единиц / всего часов	2 / 72

### 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	8			30	42	72	зачет

## 3. ЦЕЛИ ДИСЦИПЛИНЫ

Формирование знаний и умений в области получения и изучения особенностей формирования структуры и свойств нанокристаллических материалов.

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

Компетенции	Индикаторы	Результаты обучения
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации,	УК-1.8. Осуществляет поиск информации и решений на основе экспериментальных	УК-1.8.1. Знает методы критического анализа и оценки современных научных достижений УК-1.8.2. Умеет получать новые знания на основе анализа, синтеза и

применять системный подход для решения поставленных задач	действий	других методов УК-1.8.3. Владеет навыками исследования проблем профессиональной деятельности с применением анализа и синтеза
УК-3. Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде	УК-3.5. Применяет принципы и методы организации командной деятельности	УК-3.5.1. Знает виды и функции межличностного общения УК-3.5.2. Умеет осуществлять интеграцию личных и социальных интересов УК-3.5.3. Владеет навыками эффективной коммуникации в процессе социального взаимодействия

## 5. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Название темы	Краткое содержание темы (вопросы темы)
Раздел 1. Структура кристаллов и типы связей в них	
Структура кристаллов..	Описание структуры кристаллов. (Кристаллические структуры, формула кристалла – базис и кристаллические структуры, 7 сингоний и решетки Браве – двумерные и трехмерные, плоскости и индексы Миллера, ячейки Вигнера – Зейтца, закон Вульфа– Брэгга и др.)
Типы излучений.	Типы излучения и методы исследования. (Три типа излучения – рентген, оже – спектроскопия и нейтронное излучение; дифракционные методы – метод Лауэ, метод вращения кристалла и метод порошка, условия дифракции; обратная решетка, зоны Бриллюэна; атомный и структурный факторы.).
Типы связей в кристаллах.	Типы связей в кристаллах. (Кристаллы инертных газов – силы Ван – дер – Вальса; ионные кристаллы – электростатическая энергия и/или энергия Маделунга; объемный модуль упругости и сжимаемость).
Металлические и ковалентные связи.	Типы связей в кристаллах. (Металлические кристаллы – представления Друде и Зоммерфельда; время релаксации, длина свободного пробега; ковалентные кристаллы и кристаллы с F - связью).
Раздел 2. Явления переноса в кристаллах и тонких пленках	
Явления переноса.	Явления переноса в кристаллах и тонких пленках: теплопроводность (перенос энергии) – теплоотдача, конвекция и излучение; диффузия (перенос массы); вязкость (перенос импульса).

Дефекты в кристаллах.	Дефекты в кристаллах и особенности структуры наноматериалов. (Классификация дефектов в кристаллах – точечные или одномерные дефекты; линейные или одномерные; поверхностные или двумерные дефекты – межзеренные и межфазные границы; поры и трещины в кристаллах: по Оровану, Ирвину, Гриффитсу и Баренблатту).
Сегрегация примесей.	Взаимодействие дефектов и явление сегрегации. (Взаимодействие заряженных дефектов с границами раздела – границы наклона и кручения; роль анизотропии – новые качественные результаты; магнитные точечные дефекты и центры дилатации; упругие свойства кристаллов; упругие постоянные и сжимаемость кристаллов).
Уравнения Фика.	Диффузия примесей в кристаллах и наноматериалах и ее следствие в виде сегрегаций. (Уравнения Фика – 1 и 2 уравнения Фика; обогащения границ зерен точечными дефектами, явления ползучести, пластичности, упрочнения и деградации материалов).
Граничные условия.	Локальные и глобальные нарушения симметрии. Явления сегрегации. Роль граничных условий при сегрегации: условия Мак Лина, Ленгмюра, Фаулера и др. Открытые и закрытые системы. Термодинамические потенциалы: внутренняя и свободная (потенциал Гельгольца) энергии; потенциал Гиббса и энтальпия; большой термодинамический потенциал.
Раздел 3. Явления переноса в поликристаллах	
Энергия смешения.	Конкурентный и кооперативный механизмы взаимодействия примесей. Энергия смешения. Взаимодействие примесей двух сортов с границей бикристалла. Кинетика сегрегации примесей в поликристаллах. Уравнения Фика и принцип Онзагера.
Энергия границ.	Энергия границ раздела. Дислокационная модель малоугловых границ и ее энергия. Поверхностная энергия границ раздела – первое и второе борновское приближения; маделунговская составляющая поверхностной энергии. Структурный и атомный факторы – внутренний структурный фактор. Эпитаксия. Модели Франка и Ван дер Мерве.
Поверхностные уровни.	Локализованные состояния на границах раздела. Поверхностные волны Релея. Таммовские поверхностные уровни. Поверхностные состояния на межзеренных границах (модель Кронига – Пенни, потенциал

	Матъе): - «чертова» лестница. Поверхностные волны на межкристаллитных границах.
Распад и упорядочение.	Сегрегация: распадные явления и явления упорядочения на интерфейсах. Формирование островковой структуры на поверхностях интерфейса. Спинодаль и бинодаль. Температурные и концентрационный зависимости свободной энергии Гельмгольца.
Наноструктуры.	Особенности структуры наноматериалов и типы наноразмерных систем. (Неупорядоченные системы, дисклинации в неупорядоченных материалах; границы зерен, зернограницные сегрегации и методы их исследований; нанокластеры и нанокластерные системы; фрактальные системы; фуллерены и нанотрубки. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах).

## 6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Форма обучения – очная, курс – \_\_, семестр – \_\_

Наименования разделов и тем	Количество часов				
	Лекц.	Лабор.	Практ.	СРС	Всего
Раздел 1. Структура кристаллов и типы связей в них			10	14	24
Структура кристаллов..			2	4	6
Типы излучений.			2	4	6
Типы связей в кристаллах.			3	3	6
Металлические и ковалентные связи.			3	3	6
Раздел 2. Явления переноса в кристаллах и тонких пленках			10	14	24
Явления переноса.			2	3	5
Дефекты в кристаллах.			2	3	5
Сегрегация примесей.			2	3	5
Уравнения Фика.			2	3	5
Граничные условия.			2	2	4
Раздел 3. Явления переноса в поликристаллах			10	14	24
Энергия смещения.			2	3	5
Энергия границ.			2	3	5
Поверхностные уровни.			2	3	5
Распад и упорядочение.			2	3	5
Наноструктуры.			2	2	4
ИТОГО ПО КОМПОНЕНТУ ОПОП			30	42	72

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

### 7.1. Контрольные вопросы

#### Раздел 1

1. Кристаллические структуры, формула кристалла – базис и кристаллические структуры, 7 сингоний и решетки Браве – двумерные и трехмерные, плоскости и индексы Миллера, ячейки Вигнера – Зейтца, закон Вульфа– Брэгга и др.
2. Три типа излучения – рентген, оже – спектроскопия и нейтронное излучение.
3. Дифракционные методы – метод Лауэ, метод вращения кристалла и метод порошка.
4. Условия дифракции; обратная решетка, зоны Бриллюэна; атомный и структурный факторы.
5. Кристаллы инертных газов – силы Ван – дер – Вальса.
6. Ионные кристаллы – электростатическая энергия и/или энергия Маделунга.
7. Объемный модуль упругости и сжимаемость.
8. Металлические кристаллы – представления Друде и Зоммерфельда; время релаксации, длина свободного пробега.
9. Ковалентные кристаллы и кристаллы с F - связью.

#### Раздел 2

1. Явления переноса в кристаллах и тонких пленках: теплопроводность (перенос энергии) – теплоотдача, конвекция и излучение.
2. Диффузия (перенос массы) в кристаллах и тонких пленках.
3. Вязкость (перенос импульса) в кристаллах и тонких пленках.
4. Классификация дефектов в кристаллах – точечные или одномерные дефекты; линейные или одномерные; поверхностные или двумерные дефекты – межзеренные и межфазные границы; поры и трещины в кристаллах: по Оровану, Ирвину, Гриффитсу и Баренблатту.
5. Взаимодействие заряженных дефектов с границами раздела – границы наклона и кручения.
6. Магнитные точечные дефекты и центры дилатации.
7. Упругие свойства кристаллов; упругие постоянные и сжимаемость кристаллов.
8. Уравнения Фика – 1 и 2 уравнения Фика.
9. Обогащения границ зерен точечными дефектами, явления ползучести, пластичности, упрочнения и деградации материалов.
10. Локальные и глобальные нарушения симметрии. Явления сегрегации. Роль граничных условий при сегрегации: условия Мак Лина, Ленгмюра, Фаулера и др.
11. Открытые и закрытые системы. Термодинамические потенциалы: внутренняя и свободная (потенциал Гельгольца) энергии; потенциал Гиббса и энтальпия; большой термодинамический потенциал.
12. Конкурентный и кооперативный механизмы взаимодействия примесей. Энергия смещения.
13. Взаимодействие примесей двух сортов с границей бикристалла. Кинетика сегрегации примесей в поликристаллах. Уравнения Фика и принцип Онзагера.
14. Энергия границ раздела. Дислокационная модель малоугловых границ и ее энергия. Поверхностная энергия границ раздела – первое и второе борновское приближения; маделунговская составляющая поверхностной энергии. Структурный и атомный факторы – внутренний структурный фактор.

#### Раздел 3.

1. Эпитаксия. Модели Франка и Ван дер Мерве.

2. Локализованные состояния на границах раздела. Поверхностные волны Релея. Таммовские поверхностные уровни.
3. Поверхностные состояния на межзеренных границах (модель Кронига – Пенни, потенциал Матье): - «чертова» лестница.
4. Поверхностные волны на межкристаллитных границах.
5. Сегрегация: распадные явления и явления упорядочения на интерфейсах. Формирование островковой структуры на поверхностях интерфейса.
6. Спинодаль и бинодаль.
7. Температурные и концентрационные зависимости свободной энергии Гельмгольца.
8. Неупорядоченные системы, дисклинации в неупорядоченных материалах; границы зерен, зернограницные сегрегации и методы их исследований.
9. Нанокластеры и нанокластерные системы; фрактальные системы. Фуллерены и нанотрубки.
10. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах.

## 7.2. Темы письменных работ (типы задач)

- Явления переноса. Кинетическое уравнение
- Функция распределения. Электропроводность
- Теплопроводность.
- Концепция длины свободного пробега.
- Рассеяние на примесях и электронах.
- Кинувравнение при наличии магнитного поля.
- Электрические и градиентные поля. Принцип Онзагера.
- Аномальный и нормальный скин – эффекты.
- Квантование уровней в магнитном поле.
- Спиновый парамагнетизм и диамагнетизм Ландау.

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

## 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 8

Номера разделов	Виды работ	Максимальное количество баллов
1-3	Организационно-учебная работа в аудитории	20
	Самостоятельная работа	10
	Практическая работа	10



	Контрольная работа по теоретическому материалу	20
ИТОГО		60
Зачет		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. Терехов С. В. Физика нанообъектов: [учебное пособие] / С. В. Терехов, В. Н. Варюхин; ГОУ ВПО «ДонНУ» - Донецк: ДонНУ, 2013. – 418 с.
2. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Изд. 2-е. – Москва: Физматлит, 2009. – 414 с.
3. Юрченко В.М. Новые магнитные, оптические и сверхпроводимые наноматериалы [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / В.М.Юрченко - Донецк: ДонНУ, 2019. - Электронные данные (1 файл)
4. Милославский А.Г. Конспект лекций по курсу «Основы процессов микро- и нанотехнологий». – Донецк: ДонНУ, 2018. – 246 с

### **11.2. Дополнительная литература**

1. Нанотехнологии и специальные материалы: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 140140 – Техн. физика / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, С. А. Вологжанина, А. П. Петкова; под ред. Ю. П. Солнцева. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2009. – 334, [1] с.

2. Нанотехнологии: азбука для всех / Н. С. Абрамчук, С. М. Авдошенко, А. Н. Баранов и др.; под ред. Ю. Д. Третьякова. – 2-е изд. – Москва: Физматлит, 2009. – 365 с.

3. Терехов С. В. Вариационные принципы классической механики / С. В. Терехов, В. Н. Варюхин, А. Г. Петренко; ГОУ ВПО "Донецкий национальный университет", Физико-технический факультет, Кафедра теоретической физики и нанотехнологий. – Донецк: ГОУ ВПО "ДонНУ", 2018. – 52 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).