

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол № 13 от 30.11.2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
Введение в структурный анализ твердого тела

---

Уровень высшего образования  
Магистратура

---

Направление подготовки / специальность  
03.04.02 - Физика

---

Направленность образовательной программы  
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Введение в структурный анализ твердого тела» относится к дисциплинам по выбору вариативной части Блока 1 «Дисциплины, модули» ОПОП и осваивается в течение первого семестра первого года обучения в магистратуре. «Введение в структурный анализ твердого тела» формирует у студентов базовые знания об использовании явления дифракции для получения информации об атомной структуре твердых тел. Курс базируется на знаниях студентов, приобретенных в курсах теория колебаний и волн, общая физика, электродинамика, физика твердого тела и др.

Целями освоения дисциплины являются:

1. формирование у студентов представления о современной методологии дифракционных методов исследования твердых тел в общую систему знаний студентов;
2. формирование у студентов общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1  Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	<i>ПК-1.1. Знание принципов построения научной работы, методов сбора и анализа полученного материала ПК-1.2. Уметь осуществлять постановку и проведение экспериментов с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта ПК-1.3. Навыки решения поставленных задач с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</i>	(ПК-1) Знать основные дифракционные методы исследования твердых тел; приемы построения обратного пространства для кристаллических объектов различного типа; способы перехода от картины в обратном пространстве к дифракционной картине, регистрируемой прибором; способы анализа основных параметров кристаллической структуры и микроструктуры по дифракционной картине; виды искажений дифракционной картины в случае кристалла с дефектами;  (ПК-1) Уметь пользоваться основными подходами для анализа структуры твердых тел; применять полученные знания для решения практических задач, описания физических эффектов в области, соответствующей тематике курса. Уметь	Индивидуальные собеседования	Индивидуальные практические задания, экзамен

		<p>ориентироваться в современной научной литературе по вопросам дифракционного структурного анализа твердых тел;</p> <p>(ПК-1) Владеть навыками решения задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</p>		
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>5</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>180</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	<b>66</b>
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
<b>самостоятельная работа</b>	<b>114</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>54</b>
	экзамен

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Тема 1. Предмет дифракционного структурного анализа. Структурный анализ как преобразование Фурье	14	4	4		8	6

Тема 2. Определение геометрии дифракционной картины с помощью фурье-образов рассеивающих объектов	14	4	4		8	6
Тема 3. Периодически модулированные структуры	10	2	2		4	6
Тема 4. Фазовая проблема и ее решение патерсоновскими и прямыми методами. Атомное строение некоторых кристаллов	10	2	2		4	6
Тема 5. Влияние симметрии кристалла на картину дифракции	8	2	2		4	4
Тема 6. Кристалл с дефектами	14	4	4		8	6
Тема 7. Особенности анализа поликристалла и осевой текстуры. Основные типы рентгеновской дифракционной аппаратуры. Особенности рентгеновского дифрактометра	14	4	4		8	6
Тема 8. Дифракционное исследование эпитаксиальных гетероструктур. Анализ мозаичной структуры	8	2	2		4	4
Тема 9. Измерение упругих деформаций и концентрации твердого раствора	8	2	2		4	4
Тема 10. Интенсивность отражения от кристаллической пластинки	8	2	2		4	4
Тема 11. Кинематическое и динамическое рассеяние. Графики Дю-Монда	8	2	2		4	4
Тема 12. Рекуррентная формула для многослойной структуры. Диагностика дефектов эпитаксиальных гетероструктур по кривым качания	8	2	2		4	4
Контроль самостоятельной работы	2				2	
Итоговая аттестация - экзамен						

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, выполнение домашних заданий с последующей проверкой навыков решения задач, а также слушание докладов и сообщений по предлагаемым темам рефератов.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних заданий осуществляется раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины и темы рефератов составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов и тем докладов зависит от числа обучающихся.

#### 5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

##### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен	
Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

## 6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

**Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:**

– индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

**Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:** практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

– выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

### Критерии ответа студента на экзамене

**Оценка «отлично»** – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

**Оценка «хорошо»** – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

**Оценка «удовлетворительно»** – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

**Оценка «неудовлетворительно»** – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1. Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

#### Задача 1

Гетероэпитаксиальная система состоит из подложки Si(001), толстого буферного слоя  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и тонкого слоя Si на поверхности, причем сопряжение верхнего слоя Si с буфером - бездефектное. Экспериментально измерены: деформация решетки буфера относительно подложки в плоскости слоя  $\varepsilon_x=0.01$  и по нормали к поверхности  $\varepsilon_z=0.046$ .

Определить: концентрацию  $x_{\text{Ge}}$  в буфере; упругие напряжения в буфере и слое Si; плотность дислокаций несоответствия в гетеропереходе между подложкой и буфером.

Использовать численные константы:

$(a_{\text{Ge}}-a_{\text{Si}})/a_{\text{Si}}=0.04$ ;  $\varepsilon_z^{\text{elast}} / \varepsilon_x^{\text{elast}} = -0.8$ ;  $\sigma_x = \varepsilon_x^{\text{elast}} \times 150$  [ГПа];

вектор Бюргерса в проекции на плоскость слоя  $b_x=0.5\text{нм}$ .

#### Задача 2

Определить, являются ли две структуры А и Б гомометрическими, т.е. неразличимыми по интенсивности дифракционной картины. Структуры одномерные, содержат по 5 одинаковых атомов, период  $a=10$ . Координаты атомов: А-  $x_i = 0, 3, 4, 5, 6$ ; Б-  $x_i = 0, 1, 3, 4, 5$ .

#### Задача 3

Рассмотреть, чем должны различаться схемы сканирования обратного пространства при измерении на рентгеновском дифрактометре интегральной интенсивности брегговского отражения в случаях: 1- тонкая эпитаксиальная пленка совершенного кристалла; 2 - толстый эпитаксиальный слой мозаичного кристалла.

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Предмет дифракционного структурного анализа. Структурный анализ как преобразование Фурье.
2. Прямая и обратная решетка кристалла. 4-х индексные обозначения.

3. Одномерный кристалл. Сфера Эвальда. Случаи малых длин волн, больших длин волн и средних длин волн.
4. Фурье-образы. Теорема свертки. Принцип взаимности
5. Двумерная дифракция. Кристалл конечной толщины и соотношение неопределенностей.
6. Одномерная кристаллическая сверхрешетка. Сверхрешетка на вихревой поверхности. Двумерная модуляция.
7. Функция Патерсона. Гомометрические структуры.
8. Простейшие структурные типы и две плотнейшие упаковки.
9. Точечные группы симметрии кристалла, решетки Браве, пространственные группы симметрии.
10. Иерархия кристаллического совершенства вещества (аморфное тело, поликристалл, текстура, мозаичный монокристалл, идеальный монокристалл). Обратное пространство поликристалла. Осевая текстура. Прямая и обратная полюсные фигуры.
11. Дифракционное исследование эпитаксиальных гетероструктур. Анализ мозаичной структуры.
12. Твердые растворы замещения, коэффициент деформации решетки примесью.
13. Начальная, упругая и пластическая деформации в слое; их анализ по сдвигу дифракционных пиков.
14. Интенсивность отражения от кристаллической пластинки.
15. Кинематическое и динамическое рассеяние. Графики дю-Монда.
16. Диагностика дефектов эпитаксиальных гетероструктур по кривым качания.

#### 6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

### 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.04.02 «Физика», профиль «Физика конденсированного состояния».

Автор(ы):

к.ф.-м. н., научный сотрудник научно-исследовательского физико-технического института, отдел твердотельной электроники и оптоэлектроники, лаборатории физики и технологии тонких пленок, П.А. Юнин.

Зав. каф. "Физика наноструктур и наноэлектроника" \_\_\_\_\_

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.