

*Приложение к приказу первого проректора  
по учебной и научной работе*

от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**Правительство Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

*Теория взаимодействия синхротронного (рентгеновского) излучения с  
веществом*

*Theory of the interaction of X-ray radiation with materials*

**Язык(и) обучения**

Русский

Трудоёмкость (границы трудоёмкости) в зачетных единицах: 2

Регистрационный номер рабочей программы: 035116

Санкт-Петербург

2016

## Раздел 1. Характеристики учебных занятий

### 1.1. Цели и задачи учебных занятий

Курс рассчитан на студентов, обучающихся в магистратуре и нацелен на формирование у студентов общих представлений о теории рассеяния рентгеновского излучения в материалах и современных методах исследования структурного состояния вещества. В рамках курса рассматриваются кинематическая и динамическая теории дифракции рентгеновских лучей применительно к различным кристаллическим структурам, экспериментальные методики определения параметров решетки, структурных факторов, деформаций и дефектной структуры объектов. Особое внимание уделяется использованию синхротронного излучения.. Студенты научатся определять структурные и характеристики материалов с использованием современного программного обеспечения и смогут использовать полученные навыки для подготовки магистерской диссертации и в последующей профессиональной деятельности.

### 1.2. Требования к подготовленности обучающегося к освоению содержания учебных занятий (прerequisites)

Для успешного освоения программы дисциплины «Теория взаимодействия синхротронного (рентгеновского) и нейтронного излучения с веществом» студентам необходимо прослушать курсы лекций «Основы кристаллографии» и «Физика твердого тела»

### 1.3. Перечень результатов обучения (learning outcomes)

В результате освоения дисциплины студенты должны:

- знать основные положения теории дифракции
- знать методики исследования структурных свойств материалов
- уметь распознавать структурную и дифракционную информацию и анализировать экспериментальные данные
- уметь использовать программы моделирования дифракционных данных

### 1.4. Перечень активных и интерактивных форм учебных занятий

- Самостоятельная работа в присутствии преподавателя (21 часов)

## Раздел 2. Организация, структура и содержание учебных занятий

### 2.1. Организация учебных занятий

#### 2.1.1 Основной курс

Трудоёмкость, объёмы учебной работы и наполняемость групп обучающихся															
Период обучения (модуль)	Контактная работа обучающихся с преподавателем											Самостоятельная работа		Объём активных и интерактивных форм учебных занятий	Трудоёмкость
	лекции	семинары	консультации	практические занятия	лабораторные работы	контрольные работы	коллоквиумы	текущий контроль	промежуточная аттестация	итоговая аттестация под руководством преподавателя	в присутствии преподавателя	сам.раб. с использованием методических материалов	текущий контроль (сам.раб.)		
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>															
<b>очная форма обучения</b>															

Семестр 1 ( часов кол.студ.)	21							1			21	25		4		22	2
	1-10							1-10			1-10	1-1		1-1			
<b>ИТОГО</b>	<b>21</b>							<b>1</b>			<b>21</b>	<b>25</b>		<b>4</b>		<b>22</b>	<b>2</b>

Формы текущего контроля успеваемости, виды промежуточной и итоговой аттестации			
Период обучения (модуль)	Формы текущего контроля успеваемости	Виды промежуточной аттестации	Виды итоговой аттестации (только для программ итоговой аттестации и дополнительных образовательных программ)
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>			
<b>очная форма обучения</b>			
Семестр 1		зачет	

## 2.2. Структура и содержание учебных занятий

### Основной курс      Основная траектория      Очная форма обучения

Период обучения (модуль): **Семестр 1**

№ п/п	Наименование темы (раздела, части)	Вид учебных занятий	Количество часов
1	Содержание курса. Цель курса. История дифракционных исследований. Вклад советских и российских ученых. Рентгеновская, электронная и нейтронная дифракция.	лекция	2
2	Свойства рентгеновского излучения. Рентгеновские лучи, диапазон длин волн. Источники рентгеновского излучения. Тормозной и характеристический спектр. Синхротронное излучение.  Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Упругое рассеяние на электронах, фотоэлектрическое поглощение, неупругое (комптоновское) рассеяние. Вторичное излучение (флуоресценция, фотоэлектроны).	лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2

3	<p><b>Кинематическая теория дифракции.</b> Рассеяние от двух рассеивающих центров. Вектор рассеяния (дифракции), его геометрический смысл. Рассеяние одним электроном, рассеяние свободным атомом, атомный фактор рассеяния. Дисперсионные поправки. Рассеяние сложной элементарной ячейкой. Структурные факторы, амплитуда и фаза. Типы отражений для структур типа алмаза, сфалерита и вюрцита. Правило Фриделя и метод идентификации полярных граней кристалла.</p> <p>Дифракция на пространственной решетке. Интерференционная функция Лауэ и ее свойства. Главные и побочные максимумы. Узлы и вектора обратной решетки, распределение интенсивности рассеяния в обратном пространстве. Сфера Эвальда.</p> <p>Влияние температуры на дифракцию. Фактор Дебая-Валлера. Рентгеновская температура Дебая. Температурные факторы простого сложного кристаллов.</p>	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	6
	<p>Кристаллические пластины и геометрия дифракции (брэгговская, лауэвская, некомпланарная), симметричные и асимметричные отражения. Представление о трехволновой дифракции.</p> <p>Отражение от тонкой кристаллической пластины. Амплитуда отражения от одной атомной плоскости, от стопки кристаллических плоскостей. Коэффициент отражения, дифракционная кривая, главный и побочные максимумы. Интегральная отражающая способность.</p> <p>Учет фотоэлектрического поглощения, рассеивающая способность единицы объема, интегральное отражение в геометрии Брэгга и Лауэ.</p> <p>Противоречия кинематической теории и границы ее применения. Мозаичные кристаллы и понятие о первичной и вторичной экстинкции.</p>	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	6

4	<p><b>Динамическая теория дифракции</b>  Динамическая теория Дарвина.  Преломление рентгеновских лучей.  Полное внешнее отражение.</p> <p>Вывод основных уравнений динамической теории Лауэ, их свойства, связь между Фурье-компонентами поляризуемости и структурным фактором.</p> <p>Связь между волновыми векторами в кристалле. Волновые точки и дисперсионная поверхность. Случай двух сильных волн. Амплитуды и фазы волн. Поток энергии в кристалле.</p> <p>Ограниченный кристалл. Граничные условия для волновых векторов. Решение основных уравнений динамической дифракции для случая двух сильных волн. Волновые поля.</p> <p>Отражение от толстого слабопоглощающего кристалла, случай одного волнового поля. Коэффициент первичной экстинкции. Кривая отражения Дарвина. Интегральное отражение.</p> <p>Волновое поле на атомных</p>	лекции	6
---	---	--------	---

<p>плоскостей. Вторичные процессы в условиях дифракции и техника стоячих волн.</p> <p>Два волновых поля в кристалле. Граничные условия для амплитуд Лауэвская дифракция от тонкого непоглощающего кристалла. Маятниковые решения Брэгговская дифракция от тонкого непоглощающего кристалла. Кривая отражения, интегральное отражение, зависимость от толщины.</p> <p>Учет поглощения в динамической теории. Влияние поглощения на динамическую дифракцию в геометрии Брэгга.</p> <p>Поглощение в трансмиссионной геометрии и эффект Бормана, факторы, влияющие на коэффициент аномального поглощения, форма кривых отражения и прохождения в зависимости от толщины кристалла.</p> <p>Влияние статистически распределенных дефектов на картину дифракции по Кривоглазу. Дефекты первого и второго класса. Статический фактор смещений для различных типов дефектов.</p>	<p>Самостоятельная работа в присутствии преподавателя</p>	<p>6</p>
---	---	----------

5	<p><b>Экспериментальные методы исследования кристаллических структур</b></p> <p>Интегральные методы исследования дефектов в кристаллах. Влияние точечных дефектов, их скоплений, дислокаций на интегральную отражательную способность.</p> <p>Однокристалльный и двухкристалльные схемы дифрактометров. Влияние дисперсии, параллельная и антипараллельная схемы двухкристалльного дифрактометра. Свертка кривых отражения. Типы монохроматоров.</p> <p>Трехкристалльный дифрактометр. Точка (область) наблюдения, связь между углами поворота образца и анализатора и координатами обратного пространства. Моды сканирования, получение карт распределения интенсивности в обратном пространстве.</p> <p>Абсолютное измерение параметра решетки по методу Бонда и трехкристалльному методу.</p> <p>Схемы относительного измерения параметров решетки.</p> <p>Эпитаксиальные гетероструктуры. Деформация слоев и ее определение из двухкристалльных кривых отражения. Определение толщины эпитаксиальных слоев.</p>	лекции	6
---	---	--------	---

<p>Получение профиля распределения деформации по глубине кристалла из брэгговских кривых. Моделирование дифракционных кривых. Метод подгонки. Формы кривых отражения для различных поверхностных структур.</p> <p>Определение структурных параметров многослойных структур и сверхрешеток. Распределение интенсивности дифракции от многослойных структур в обратном пространстве. Определение степени релаксации.</p> <p>Исследование сильноорасогласованных эпитаксиальных систем. Сетки дислокаций и прорастающие дислокации. Анализ уширений рентгеновских рефлексов и определение плотности дислокаций.</p> <p>Диффузное рассеяние от точечных дефектов и их скоплений. Получение параметров дефектов из диффузного рассеяния. Методы измерения диффузного рассеяния.</p> <p>Pendellosung плоской и сферической волны и прецизионное измерение структурных факторов.</p> <p>Рентгеновская топография. Механизмы контраста изображений дефектов.</p> <p>Рентгеновская топография. Методы рентгеновской топографии.</p>	<p>Самостоятельная работа в присутствии преподавателя</p>	<p>6</p>
--	---	----------

### Раздел 3. Обеспечение учебных занятий

#### 3.1. Методическое обеспечение

##### 3.1.1 Методические указания по освоению дисциплины

Для освоения дисциплины студенту предоставляется адаптированная программа курса, содержащая разделы 2, 3.1 и 3.4 данной Рабочей программы, а также электронная презентация всех лекций в формате PPT или PDF.

##### 3.1.2 Методическое обеспечение самостоятельной работы

Для самостоятельной работы студенты должны обеспечиваться перечнем заданий для самостоятельной работы.

##### 3.1.3 Методика проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации и критерии оценивания



Общее максимальное количество баллов – 100, из них за посещение и работу на лекциях – 10 баллов, за работу, выполняемую в присутствии преподавателя – 20 баллов, за ответ на вопросы во время промежуточной аттестации – 70 баллов.

Экзаменационный билет содержит два вопроса, на каждый из которых студент должен привести развернутый конспект с планом ответа, необходимыми определениями, иллюстрациями, формулами и зависимостями. Для подготовки к ответу по билету дается не более 1 часа. Затем, в устной форме студент, пользуясь конспектом, должен связно и исчерпывающе изложить содержание ответа.

В ходе ответа преподавателем могут быть заданы студенту уточняющие вопросы по билету. На обдумывание ответа на дополнительные вопросы студенту дается не более 10 минут на каждый ответ. В общей сложности ответ студента не должен превышать 40 минут без учета времени на обдумывание дополнительных вопросов.

Методика оценки и система соответствия баллов:

	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично	Превосходно
Балльная система (100 баллов максимум)	< 30    31-49	50-59    60-70	71-80	81-90	91-100
Балльная система (5 баллов максимум)	2	3	4	5	5 с отличием

3.1.4 Методические материалы для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации (контрольно-измерительные материалы, оценочные средства)

#### **Перечень билетов для проведения аттестации студентов.**

##### Билет 1

Рассеяние рентгеновских лучей электроном, атомом, факторы рассеяния, дисперсионные поправки. Структурные факторы.

Однокристалльный и двухкристалльные схемы дифрактометров. Влияние дисперсии, параллельная и антипараллельная схемы двухкристалльного дифрактометра. Свертка кривых отражения. Типы монохроматоров

##### Билет 2

Интерференционная функция Лауэ и ее свойства. Распределение интенсивности дифракции в обратном пространстве, сфера Эвальда.

Геометрия дифракции (брегговская, лауэвская, некомпланарная, симметричные и асимметричные схемы).

##### Билет 3

Амплитуда отражения одной атомной плоскостью. Брегговская дифракция от тонкого кристалла, кривые отражения и интегральное отражение.

Трехкристалльный дифрактометр. Точка (область) наблюдения, связь между углами поворота образца и анализатора и координатами обратного пространства. Моды

сканирования, получение контуров распределения интенсивности в обратном пространстве.

Билет 4

Влияние температуры на дифракцию, факторы Дебая-Валлера простого и сложного кристалла.

Абсолютное измерение параметра решетки по методу Бонда и трехкристальному методу.

Билет 5

Противоречия кинематической теории и границы ее применения. Мозаичные кристаллы и понятие о первичной и вторичной экстинкции.

Волновое поле на атомных плоскостях и методика стоячих волн.

Билет 6.

Вывод основных уравнений динамической теории Лауэ, их свойства, связь между Фурье-компонентами поляризуемости и структурным фактором.

Схемы относительного измерения параметров решетки.

Билет 7

Одноволновой и двухволновой случаи динамической дифракции. Дисперсионная поверхность, амплитуды и фазы дифрагированных волн.

Pendellosung плоской и сферической волны и прецизионное измерение структурных факторов.

Билет 8

Решение основных уравнений динамической дифракции для случая двух сильных волн.

Метод определения поляриности грани кристалла.

Билет 9

Отражение от толстого слабопоглощающего кристалла, коэффициент первичной экстинкции. Кривая отражения Дарвина. Интегральное отражение.

Геометрия дифракции (брегговская, лауэвская, некомпланарная, симметричные и асимметричные схемы).

Билет 10

Поглощение в трансмиссионной геометрии и эффект Бормана, факторы, влияющие на коэффициент аномального поглощения, форма кривых отражения.

Деформация поверхностных слоев и ее определение из двухкристальных кривых отражения. Определение степени релаксации.

Билет 11

Влияние статистически распределенных дефектов на картину дифракции по Кривоглазу. Дефекты первого и второго класса. Статический фактор смещений для различных типов дефектов.

Интегральные методы исследования дефектов в кристаллах. Влияние точечных дефектов, их скоплений, дислокаций на интегральную отражательную способность.

Билет 12.

Лауэвская дифракция от тонкого не поглощающего кристалла. Маятниковые решения.

Диффузное рассеяние, контуры интенсивности, интегральное диффузное рассеяние. Какие параметры дефектов могут быть получены.

Билет 13.

Брэгговская дифракция от тонкого слабопоглощающего кристалла.

Рентгеновские интерферометры

Билет 14.

Учет фотоэлектрического поглощения в динамической теории – в геометрии Брэгга.

Получение профиля распределения деформации по глубине кристалла из брэгговских кривых. Формы кривых отражения для различных поверхностных структур.

3.1.5 Методические материалы для оценки обучающимися содержания и качества учебного процесса

**Анкета-отзыв** на дисциплину Теория взаимодействия синхротронного (рентгеновского) излучения с веществом

Просим Вас заполнить анкету-отзыв по прочитанной дисциплине. Обобщенные данные анкет будут использованы для ее совершенствования. По каждому вопросу проставьте соответствующие оценки по шкале от 1 до 10 баллов (**обведите** выбранный Вами балл). В случае необходимости впишите свои комментарии.

1. Насколько Вы удовлетворены содержанием дисциплины в целом?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

2. Насколько Вы удовлетворены общим стилем преподавания?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

3. Как Вы оцениваете качество подготовки предложенных методических материалов?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

4. Какой из модулей (разделов) дисциплины Вы считаете наиболее полезным, ценным с точки зрения дальнейшего обучения и/или применения в последующей практической деятельности?

Комментарий \_\_\_\_\_

5. Что бы Вы предложили изменить в методическом и содержательном плане для совершенствования преподавания данной дисциплины?

Комментарий \_\_\_\_\_

СПАСИБО!

**3.2. Кадровое обеспечение**

### 3.2.1 Образование и (или) квалификация преподавателей и иных лиц, допущенных к проведению учебных занятий

К чтению лекций должны привлекаться преподаватели, имеющие ученую степень и/или ученое звание, имеющие опыт планирования и организации учебного процесса, а также главные и ведущие специалисты в этой области.

### 3.2.2 Обеспечение учебно-вспомогательным и (или) иным персоналом

Требования не предъявляются

## 3.3. Материально-техническое обеспечение

### 3.3.1 Характеристики аудиторий (помещений, мест) для проведения занятий

Стандартно оборудованные лекционные аудитории для проведения интерактивных лекций: видеопроектор, экран настенный, интерактивная доска др. оборудование или компьютерный класс.

### 3.3.2 Характеристики аудиторного оборудования, в том числе неспециализированного компьютерного оборудования и программного обеспечения общего пользования

Для проведения занятия необходимы: видеопроектор, ноутбук, переносной экран. В компьютерном классе должны быть установлены средства MS Office 2007: Word, Excel, PowerPoint и др. (допустима версия MS Office 2003).

### 3.3.3 Характеристики специализированного оборудования

Рабочие места преподавателя и студентов должны быть оснащены оборудованием не ниже: Pentium III-800/ОЗУ-256 Мб / Video-32 Мб / Sound card – 16bit /Headphones / HDD 80 Гб / CD-ROM – 48x / Network adapter – 10/100/ Мбс / SVGA – 19”

### 3.3.4 Характеристики специализированного программного обеспечения

Не предусмотрено.

### 3.3.5 Перечень и объёмы требуемых расходных материалов

Фломастеры цветные, губки, бумага формата А4, канцелярские товары, картриджи принтеров, диски, флеш-накопители и др. в объёме, необходимом для организации и проведения занятий, по заявкам преподавателей, подаваемым в установленные сроки.

## 3.4. Информационное обеспечение

### 3.4.1 Список обязательной литературы

1. Р.Джеймс. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. - М. И.Л. 1951, 572 с.
2. В.И.Иверонова, Г.П.Ревкевич. Теория рассеяния рентгеновских лучей. –изд.МГУ, 1978, 276 с.
3. Дифракционные и микроскопические методы в материаловедении. –М. Металлургия, 1984, 502 с.
4. М.А.Кривоглаз. Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. – М. Наука, 1967. 336 с.
5. В.И.Пунегов. Высокора разрешающая дифракция в кристаллических структурах с квантовыми точками. УФН, 185, №5, с. 449-559.

### 3.4.2 Список дополнительной литературы

1. Max von Laue. Rontgenstrahl – interferenzen. Frankfurt, 1960. 476 p/

2. Р.Н.Кютт. Рентгенодифракционное определение параметров микроструктуры эпитаксиальных слоев. В сб Актуальные вопросы современного естествознания. Вып. 5, 2007 г.
3. З.Г.Пинскер. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. М.б Наука, 1974 368 с.
4. Д.Л.Боуен, Б.К.Таннер. Высокорастворяющая рентгеновская дифрактометрия и топография. – СПб, Наука, 2002. 274 с.
5. Прямые методы исследования дефектов в кристаллах. Пер. с англ. М., Мир, 1965
6. В.А.Бушуев, Р.Н.Кютт, Ю.П.Хапачев. Физические принципы рентгенодифрактометрического определения параметров реальной структуры многослойных эпитаксиальных пленок. – Нальчик, 1996. 180 с.
7. В.Б.Молодкин, А.Низкова, Р.Н.Кютт и др. Дифрактометрия наноразмерных дефектов и гетерослоев кристаллов. – Киев, Академперіодика, 2005.320 с.

### 3.4.3 Перечень иных информационных источников

#### Раздел 4. Разработчики программы

Фамилия, имя, отчество	Учёная степень	Учёное звание	Должность	Контактная информация (служебный адрес электронной почты, служебный телефон)
Кютт Регинальд Николаевич	докт.ф.м.н.	-	профессор	<a href="mailto:r.kyutt@mail.ioffe.ru">r.kyutt@mail.ioffe.ru</a> +7-921-9720737