

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**КОГЕРЕНТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.04.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	KCP, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
3	3	108	32	0	0		76	0	3
Итого	3	108	32	0	0	0	76	0	

## **АННОТАЦИЯ**

В курсе дается систематическое изложение основных теоретических и экспериментальных методов когерентного взаимодействия лазерного рентгеновского и синхротронного излучения (СИ) с конденсированным состоянием вещества. Особое внимание уделяется уникальным когерентным свойствам и использованию временной структуры лазерного излучения, что позволяет проводить эксперименты с временным разрешением до 10 фемтосекунд. Приведены основы теории распространения, излучения и поглощения коротковолновых лазерных фотонов. Описаны основные экспериментальные схемы, в том числе pump & probe и "рентгеновское кино". Дается введение в рентгеновскую оптику и микроскопию, динамическую и кинематическую теорию рассеяния рентгеновских лучей, генерацию синхротронного и рентгеновского лазерного излучения. Проведено сравнение источников СИ и рентгеновских лазеров на свободных электронах (XFEL), работающих в жестком и мягком диапазоне рентгеновского излучения. Обсуждаются возможности использования рентгеновского излучения для исследования конденсированного состояния вещества и биологических объектов, и формирования рентгеновских волновых полей в кристаллах на примере существующих лазерных машин (FLASH, LCLS) и XFEL GmbH. Представлены основные научные задачи и миссии 6 научно-исследовательской станции XFEL в Гамбурге.

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Показать возможности одного из современных экспериментальных методов исследования твердого тела, дать навык оценки и расчета необходимых параметров.

### **2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО**

Дисциплина входит в число специализирующих. При освоении дисциплины предполагается, что студенты знакомы с содержанием таких курсов, как уравнения математической физики, теория поля, квантовая механика, атомная физика, спектроскопия, физика твердого тела, электротехника и электроника.

### **3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ**

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

<b>Код и наименование компетенции</b>	<b>Код и наименование индикатора достижения компетенции</b>
---------------------------------------	---

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

<b>Задача профессиональной деятельности (ЗПД)</b>	<b>Объект или область знания</b>	<b>Код и наименование профессиональной компетенции; Основание</b>	<b>Код и наименование индикатора достижения профессиональной</b>
---	----------------------------------	---	--

		(профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	компетенции
экспертно-аналитический			
Изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования, сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; участие в обобщении полученных данных, формировании выводов, в подготовке научных и аналитических отчетов, публикаций и презентаций результатов научных и аналитических исследований; подготовка данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций, участие во внедрении результатов	<p>Научная и аналитическая информация, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования; научные и аналитические отчеты, публикации и презентации по результатам исследований.</p>	<p>ПК-20.2 [1] - Способен ориентироваться в современных экспериментальных достижениях физики конденсированного состояния, в возможностях современных пучковых и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур, основных экспериментальных фактах физики сверхпроводимости и техники низких температур, их применениях в экспериментальной технике и промышленности.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>З-ПК-20.2[1] - последние теоретические и экспериментальные достижения физики конденсированного состояния, применения современных сверхпроводящих материалов, фазовых переходов в современных материалах, применения современных сверхпроводящих материалов, возможности современных пучковых и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур;</p> <p>У-ПК-20.2[1] - уметь предложить и обосновать схему эксперимента по лазерной обработке материалов, лазерному напылению тонких пленок, исследованию поверхности, твердотельных материалов или наноструктур, для исследования фазовых переходов в современных материалах;</p> <p>В-ПК-20.2[1] - владеть современными экспериментальными данными в области</p>

исследований и разработок.			физики взаимодействия излучения оптического диапазона с веществом в конденсированном состоянии, методов исследования структурных и электронных свойств твердых тел
----------------------------	--	--	--

#### научно-исследовательский

Проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий.	Запланированные этапы исследования; результаты наблюдений и измерений.	ПК-3 [1] - Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области в соответствии с целями программы специализированной подготовки магистра  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003	З-ПК-3[1] - Знать основные методы исследований, принципы работы приборов и установок в избранной предметной области ; У-ПК-3[1] - Уметь выбирать необходимые технические средства для проведения экспериментальных исследований в избранной предметной области, обрабатывать полученные экспериментальные результаты; В-ПК-3[1] - Владеть навыками работы с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области
--	--	---	---

#### инновационный

Сбор и анализ информационных источников и исходных данных для планирования и разработки исследовательских проектов; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных	Научно-технические и организационные решения.	ПК-5 [1] - Способен применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых научкоемких	З-ПК-5[1] - Знать физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования, принципы экспертизы продукции для постановки задач по развитию, внедрению и
--	---	---	---

<p>решений на основе экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и инновационной направленности в команде исполнителей.</p>		<p>технологий</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003</p>	<p>коммерциализации новых научноемких технологий ; У-ПК-5[1] - Уметь применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых научноемких технологий; В-ПК-5[1] - Владеть навыками теоретического и экспериментального исследования, математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых научноемких технологий</p>
--	--	--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>3 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	24/0/0		25	КИ-8	3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5
2	Часть 2	9-12	8/0/0		25	КИ-12	3-ПК-20.2,

						У-ПК-20.2, В-ПК-20.2, З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5
	<i>Итого за 3 Семестр</i>		32/0/0	50		
	<b>Контрольные мероприятия за 3 Семестр</b>			50	3	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, З-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
3	Зачет

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>3 Семестр</i>	32	0	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	24	0	0
1	<b>Вводная лекция</b> Рентгеновский лазер на свободных электронах (XFEL). Свойства э/м излучения, относящегося к рентгеновскому и ВУФ диапазонам. Основные процессы рассеяния, поглощения и испускания коротковолнового излучения. Рассеяние, дифракция и преломление. Электронные уровни атомов и разрешенные переходы .	Всего аудиторных часов 3 Онлайн 0	0 0 0	0
2	<b>Рассеяние и рефракция рентгеновских волн. Уравнения Максвелла.</b> Уравнения Максвелла и распространение волн в свободном пространстве и материальных средах. Индекс рефракции. Отражение плоской волны от плоской границы раздела. Явление полного внешнего отражения. Рефлектометрия в рентгеновском диапазоне.	Всего аудиторных часов 3 Онлайн 0	0 0 0	0

3	<b>Дифракция в кристаллах: Идеальные кристаллы</b> Динамическая дифракция и уравнения Такаги-Топена . Двухвольное приближение. Дифракция по Лауэ. Волновые поля в кристалле и маятниковое решение Влияние поглощения. Эффект Бормана и подавление аномального прохождения в неидеальных кристаллах	Всего аудиторных часов		
		3	0	0
4	<b>Дифракция в кристаллах. Метод Стоячих рентгеновских волн (CPB)</b> Отражение по Брэггу. Рентгеновская интерферометрия. Рассеяние в реальных кристаллах: дефекты как источник диффузного рассеяния. Метод стоячих рентгеновских волн: определение когерентной позиции и фракции.	Всего аудиторных часов		
		3	0	0
5	<b>Неидеальные кристаллы</b> Влияние тепловых колебаний: средняя решетка и фактор Дебая- Валлера. Динамическая теория рассеяния в деформированных и колеблющихся кристаллах. Рентгеновская оптика скользящего падения. Дифракционная рентгеновская оптика.	Всего аудиторных часов		
		3	0	0
6	<b>Источники синхротронного излучения</b> Источники СИ и их основные характеристики. Сравнение излучения поворотных магнитов, ондуляторов и виглеров. Стандартная оптика станции СИ.	Всего аудиторных часов		
		3	0	0
7	<b>Рентгеновская микроскопия и дифракционная оптика.</b> Обзор методик формирования рентгеновского пучка для проведения экспериментов в современном материаловедении. Френелевские зонные пластинки. Дифракция излучения от отверстия (Pinhole) и зонные пластинки. Фокусировка и монохроматизация при дифракционном отражении (изогнутые и плоские кристаллы).	Всего аудиторных часов		
		3	0	0
8	<b>Рентгеновский лазер на свободных электронах (РЛСЭ)</b> Общие принципы генерации когерентного излучения РЛСЭ. Основные элементы РЛСЭ и их характеристики. Временная структура излучения и детекторы: особенности эксперимента. Временная и пространственная когерентность излучения РЛСЭ	Всего аудиторных часов		
		3	0	0
9	<b>Особенности экспериментов с РЛСЭ</b> Эксперименты pump& probe. Эксперименты, требующие высокой когерентности. Приготовление пучка: монохроматизация, фокусировка, пространственная и временная фильтрация. Статистическое описание волнового поля.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
10	<b>Обзор станций РЛСЭ: Жесткий рентген</b> Исследования вещества при экстремальных условиях с	Всего аудиторных часов		
		2	0	0

	использованием рентгеновского излучения (высокие давления, температуры, взрывные процессы, плотная плазма (HED High Energy density Matter). Структурные исследования наносистем и динамика на уровне наночастиц (Materials Imaging and Dynamics MID)	Онлайн	0	0	0
11	<b>Обзор станций РЛСЭ: Жесткий рентген</b> Структурные исследования отдельных биомолекул и наночастиц: современное состояние. Сверхбыстрая когерентная дифракционная визуализация одиночных частиц, кластеров и биомолекул (SPB single particles and biomolecules)	Всего аудиторных часов	2	0	0
		Онлайн	0	0	0
12	<b>Обзор станций РЛСЭ: Мягкий рентген</b> Исследования атомов, ионов и частиц в интенсивных пучках и нелинейные эффекты (SQS Small Quantum systems). Исследования структуры и свойств атомов и биологических объектов, используя мягкое рентгеновское излучение (SCS Soft x-ray Coherent Scattering)	Всего аудиторных часов	2	0	0
		Онлайн	0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия в виде лекций и самостоятельная работа студентов, заключающаяся в изучении пройденного материала и подготовке к письменным тестам. Для того чтобы дать современное состояние физики и эксперимента рентгеновского излучения, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме. Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, в том числе, проводимых в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

<b>Компетенция</b>	<b>Индикаторы освоения</b>	<b>Аттестационное мероприятие (КП 1)</b>
ПК-20.2	З-ПК-20.2	З, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-20.2	З, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-20.2	З, КИ-8, КИ-12
ПК-3	З-ПК-3	З, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-3	З, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-3	З, КИ-8, КИ-12
ПК-5	З-ПК-5	З, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-5	З, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-5	З, КИ-8, КИ-12

### **Шкалы оценки образовательных достижений**

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

<b>Сумма баллов</b>	<b>Оценка по 4-х балльной шкале</b>	<b>Отметка о зачете</b>	<b>Оценка ECTS</b>
90-100	5 – «отлично»		A
85-89			B
75-84	4 – «хорошо»	«Зачтено»	C
70-74			D
65-69			E
60-64	3 – «удовлетворительно»		
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	«Не зачтено»	F

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и

навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. ЭИ S98 Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers : Accelerator Physics, Instrumentation and Science Applications, , Cham: Springer International Publishing, 2016
2. ЭИ У 88 Основы физической теории дифракции : , Уфимцев П. Я., Москва: Лаборатория знаний, 2020
3. ЭИ У 88 Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Введение в физическую теорию дифракции : учебное пособие, Уфимцев П. Я., Москва: Лаборатория знаний, 2020
4. 621.37 М50 Физические основы лазерной технологии : учебное пособие, Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н., Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
5. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, Троян В.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2014

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 535 М50 Лабораторная работа "Лазерная технология" : , Менушенков А.П., Жиряков Б.М., Петровский В.Н., М.: МИФИ, 2006
2. 621.37 М 15 Основы взаимодействия ультракороткого лазерного излучения с конденсированными средами Ч.1 , Макин В.С., Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2013
3. 535 У88 Основы физической теории дифракции : , Уфимцев П.Я., Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2012
4. 539.2 П75 Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции : учебное пособие, Чижов П.С. [и др.], Москва: МФТИ, 2011
5. 539.2 Ф94 Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов : , Хау Дж.М., Фульц Б., Москва: Техносфера, 2011
6. 621.37 Э45 Рентгеновские лазеры : , Элтон Р., М.: Мир, 1994
7. 548 Ф45 Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ : учебное пособие для вузов, Фетисов Г.В., Москва: Физматлит, 2007

8. 537 У88 Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Введение в физическую теорию дифракции : , Уфимцев П.Я., Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2012

9. 539.2 Ф50 Физические основы методов исследованияnanoструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, Троян В.И. [и др.], Москва: МИФИ, 2008

10. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.3 Методы исследования структурно-фазового состояния материалов, , Москва: МИФИ, 2008

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. сайт кафедры №70 НИЯУ МИФИ (<http://kaf70.mephi.ru/>)

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При освоении дисциплины предполагается, что студенты знакомы с содержанием таких курсов, как уравнения математической физики, теория поля, электродинамика, квантовая механика, атомная физика, спектроскопия, физика твердого тела, электротехника и электроника, взаимодействие излучения с веществом.

Программой курса предусмотрено, что студент должен освоить основные понятия и закономерности, относящиеся к физическим явлениям, лежащим в основе использования рентгеновского излучения в современном физическом эксперименте. Курс должен помочь студенту научиться использовать полученные теоретические знания для описания и оценочных расчетов реальных процессов.

Студент должен четко представлять свойства электромагнитного излучения, относящегося к рентгеновскому и вакуумному ультрафиолетовому диапазонам, основные процессы рассеяния, поглощения и испускания, роль внутриатомных переходов. Студент должен иметь представление о распространении волн в кристаллических и некристаллических материалах, индексе рефракции, явлении полного внутреннего отражения, методах создания слоистых структур, сверхрешеток и френелевских зонных пластинок.

В результате изучения курса студент должен знать основные свойства источников синхротронного излучения, параметры установок в НИЦ «Курчатовский институт», Spring 8 (Япония), BESSY (Германия), владеть идеями, лежащими в основе рентгеновского лазера на свободных электронах, знать методики формирования рентгеновского пучка для проведения экспериментов в современном материаловедении.

Интерактивная форма занятий может включать кратковременный внутрисеместровый контроль усвоения знаний по читаемому курсу в форме решения задач (условия формулируются в конце лекции, обсуждение предлагаемого решения в начале следующей) или ответов на качественные вопросы.

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Необходимо дать студентам возможность усвоить основные понятия, характеризующие излучение РЛСЭ в сравнении с лабораторными источниками (трубками) и источниками синхротронного излучения: яркость, спектр излучения, временная и пространственная когерентность, спектрально-угловое распределение мощности, поляризационные свойства, эммитанс и трансформация пучка на удалении от источника. В ходе курса студенты должны ознакомиться с основными принципами работы источников РЛСЭ и устройств, обеспечивающих инжекцию электронов и генерацию э/м излучения: фотоинжекторов, линейных ускорителей, ондуляторов, экспериментальных станций. Дать представление о тенденциях в развитии синхротронных центров в мире и в России, информацию о возможностях НИЦ «Курчатовский институт» (Курчатовский центр синхротронных исследований и нанотехнологий) и институтов РАН.

Особое внимание в курсе лекций следует уделить процессам взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, рентгеновским методам диагностики и исследования наноструктур с использованием мощного рентгеновского излучения.

Изложение должно строиться на основе фундаментальных свойства э/м излучения, относящегося к рентгеновскому и ВУФ диапазонам, и ранее прочитанных курсов. Должно быть приведено детальное описание основных процессов рассеяния, поглощения и испускания коротковолнового излучения, включая рассеяние, дифракцию и преломление рентгеновских волн.

Основные формулы должны быть выведен из уравнения Максвелла и описывать распространение волн в свободном пространстве и материальных средах. В связи с широким распространением рентгеновской оптики должно быть уделено особое внимание двум принципам функционирования рентгенооптических устройств: полному внешнему отражению и дифракции, что включает в себя

- отражение плоской волны от плоской границы раздела (s и p поляризации) и явление полного внешнего отражения. Рефлектометрия и определение шероховатости поверхности.

- понятие о динамической и кинематической дифракции. Динамическая дифракция и уравнения Такаги-Топена . Двухвольновое приближение. Дифракция по Лауз. Волновые поля в кристалле и маятниковое решение. Влияние поглощения. Эффект Бормана и подавление аномального прохождения в неидеальных кристаллах.

Важным методом рентгеновской нанодиагностики является Метод Стоячих рентгеновских волн (СРВ), применяемый как с лабораторными источниками излучения, так и с лазерами на свободных электронах и источниками СИ. Ключевым понятием для данных экспериментов является: рентгеновская интерферометрия и рассеяние в реальных кристаллах. Важно довести до слушателей, что основными характеристиками распределения примеси в слое являются: когерентной позиции и фракция.

Особое внимание следует уделить влияние тепловых колебаний и понятиям о усредненной решетке и факторе Дебая- Валлера и переходу к импульсным источникам электромагнитного излучения.

В связи с тем, что на источнике РЛСЭ будет использовано оборудование, схожее с оборудованием источников синхротронного излучения следует дать сравнительное описание стандартной оптики станции СИ и станции РЛСЭ.

В целях ознакомления с возможностями рентгенодифракционного эксперимента курс должен содержать обзор рентгеновской микроскопии и дифракционной оптики и обзор методик формирования рентгеновского пучка для проведения экспериментов в современном материаловедении. Дано понятие о Френелевских зонных пластинках, дифракция излучения от отверстия (Pinhole) и фокусировке и монохроматизации при дифракционном отражении (изогнутые и плоские кристаллы).

Особо следует остановиться на особенностях экспериментов с РЛСЭ, таких как pump& probe, когерентной дифракционной визуализации, рассеянии на некристаллических образцах, в том числе в струе и взвеси. Эксперименты, требующие высокой когерентности. Приготовление пучка

Должен быть дан обзор станций РЛСЭ для жесткого и мягкого рентгеновского излучения. 1) Исследования вещества при экстремальных условиях с использованием рентгеновского излучения (высокие давления, температуры, взрывные процессы, плотная плазма (HED High Energy density Matter)).

2) Структурные исследования наносистем и динамика на уровне наночастиц (Materials Imaging and Dynamics MID).

3) Структурные исследования отдельных биомолекул и наночастиц: современное состояние. Сверхбыстрая когерентная дифракционная визуализация одиночных частиц, кластеров и биомолекул (SPB single particles and biomolecules).

4) Исследования атомов, ионов и частиц в интенсивных пучках и нелинейные эффекты (SQS Small Quantum systems).

5) Исследования структуры и свойств атомов и биологических объектов, используя мягкое рентгеновское излучение (SCS Soft x-ray Coherent Scattering).

Автор(ы):

Носик Валерий Леонидович, к.ф.-м.н.