

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**

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

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.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
2	3	108	10	35	0		27	0	Э
Итого	3	108	10	35	0	0	27	0	

## АННОТАЦИЯ

В курсе обсуждены важнейшие свойства синхротронного излучения, дан обзор развития современных источников СИ в мире и в России, приведены данные о действующих и проектируемых станциях Курчатовского источника синхротронного излучения. Рассмотрены различные экспериментальные методики исследования наноматериалов с использованием СИ. Дано подробное описание двух наиболее информативных методов – XAFS- спектроскопии и фотоэлектронной спектроскопии.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс читается с целью ознакомления студентов, специализирующихся в области физики конденсированного состояния, физики наносистем и т.д. с возможностями использования синхротронного излучения (СИ) для исследования наноразмерной структуры вещества.

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

Данная дисциплина относится к числу специализирующих и может читаться параллельно с курсами физики твердого тела и взаимодействия излучения с веществом или подобных, или позже

### 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>
УК-4 [1] – Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	З-УК-4 [1] – Знать: правила и закономерности личной и деловой устной и письменной коммуникации; современные коммуникативные технологии на русском и иностранном языках; существующие профессиональные сообщества для профессионального взаимодействия У-УК-4 [1] – Уметь: применять на практике коммуникативные технологии, методы и способы делового общения для академического и профессионального взаимодействия В-УК-4 [1] – Владеть: методикой межличностного делового общения на русском и иностранном языках, с применением профессиональных языковых форм, средств и современных коммуникативных технологий

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

<b>Задача профессиональной</b>	<b>Объект или область знания</b>	<b>Код и наименование профессиональной</b>	<b>Код и наименование индикатора</b>
--------------------------------	----------------------------------	--	--------------------------------------

деятельности (ЗПД)		компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
<p>участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации; участие в обобщении полученных данных, формировании выводов, в подготовке научных и аналитических отчетов, публикаций и презентаций результатов научных и аналитических исследований; участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей; выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка математической модели явления, аналитические и численные расчеты;</p>	<p>природные и социальные явления и процессы, объекты техники, технологии и производства, модели, методы и средства фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области математики, физики и других естественных и социально-экономических наук по профилям предметной деятельности в науке, технике, технологиях, а также в сферах наукоемкого производства, управления и бизнеса.</p>	<p>ПК-1 [1] - Способен самостоятельно и (или) в составе исследовательской группы разрабатывать, исследовать и применять математические модели для качественного и количественного описания явлений и процессов и (или) разработки новых технических средств</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>З-ПК-1[1] - Знать основные методы и принципы научных исследований, математического моделирования, основные проблемы профессиональной области, требующие использования современных научных методов исследования для качественного и количественного описания явлений и процессов и (или) разработки новых технических средств. ; У-ПК-1[1] - Уметь ставить и решать прикладные исследовательские задачи, оценивать результаты исследований; проводить научные исследования и получать новые научные и прикладные результаты самостоятельно и в составе научного коллектива; В-ПК-1[1] - Владеть навыками выбора и использования математических моделей для научных исследований и (или) разработки новых технических средств самостоятельно и (или) в составе исследовательской группы.</p>

<p>создание программ и комплексов программ на базе стандартных пакетов для выполнения расчетов в рамках математических моделей, участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей; 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; подготовка данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций, участие во внедрении результатов исследований и разработок.</p>	<p>природные и социальные явления и процессы, объекты техники, технологии и производства, модели, методы и средства фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области математики, физики и других естественных и социально-экономических наук по профилям предметной деятельности в науке, технике, технологиях, а также в сферах наукоемкого производства, управления и бизнеса.</p>	<p>ПК-2 [1] - Способен критически оценивать применяемые методики и методы исследования</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.001</p>	<p>З-ПК-2[1] - Знать методики оценки и выбора методов исследования.; У-ПК-2[1] - Уметь критически оценивать применяемые методики и методы исследования; В-ПК-2[1] - Владеть навыками оценки методов исследования по выбранным критериям.</p>
<p>производственно-технологический</p>			
<p>- квалифицированное использование исходных данных, материалов, оборудования, методов математического и физического моделирования производственно-</p>	<p>природные и социальные явления и процессы, объекты техники, технологии и производства, модели, методы и средства фундаментальных и прикладных</p>	<p>ПК-9 [1] - Способен проводить математическое и компьютерное моделирование объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области</p>	<p>З-ПК-9[1] - Знать основные методы и принципы математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области. ;</p>

<p>технологических процессов и характеристик наукоемких технических устройств и объектов, включая использование алгоритмов и программ расчета их параметров</p>	<p>исследований и разработок в области математики, физики и других естественных и социально-экономических наук по профилям предметной деятельности в науке, технике, технологиях, а также в сферах наукоемкого производства, управления и бизнеса.</p>	<p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>У-ПК-9[1] - Уметь применять методы математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области; В-ПК-9[1] - Владеть навыками математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений</p>
<p>экспертно-аналитический</p>			
<p>сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий;</p>	<p>природные и социальные явления и процессы, объекты техники, технологии и производства, модели, методы и средства фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области математики, физики и других естественных и социально-экономических наук по профилям предметной деятельности в науке, технике, технологиях, а также в сферах наукоемкого производства, управления и бизнеса.</p>	<p>ПК-10 [1] - Способен к построению аналитических и количественных моделей процессов в природе, технике и обществе и к выбору на их основе путей решения теоретических и практических проблем природного, экологического, технико-технологического характера</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>З-ПК-10[1] - Знать основные методы построения аналитических и количественных моделей процессов в природе, технике и обществе. ; У-ПК-10[1] - Уметь применять методы и принципы построения аналитических и количественных моделей процессов в природе, технике и обществе для решения теоретических и практических проблем природного, экологического, технико-технологического характера; В-ПК-10[1] - Владеть навыками построения аналитических и количественных моделей процессов в природе, технике и обществе и к выбору на их основе путей решения теоретических и практических</p>

			проблем природного, экологического, технико-технологического характера
--	--	--	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	6/18/0		25	КИ-8	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10, 3-УК-4, У-УК-4, В-УК-4
2	Часть 2	9-15	4/17/0		25	КИ-15	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10, 3-УК-4, У-УК-4, В-УК-4
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		10/35/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1,

							3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10, 3-УК-4, У-УК-4, В-УК-4
--	--	--	--	--	--	--	--

\* – 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
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	10	35	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	6	18	0
1	<b>Тема 1. Свойства синхротронного излучения.</b> Определение синхротронного излучения (СИ). Основные свойства СИ. Мощность СИ. Спектрально-угловое распределение мощности. Формула Шота. Малая расходимость. Высокая яркость. Высокая интенсивность. Когерентность СИ. Временная структура СИ. Динамика электрона, движущегося в накопительном кольце. Эмиттанс СИ. Синхротроны первого, второго и третьего поколений.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Тема 2. Способы повышения энергии излучаемого СИ.</b> Способы повышения энергии излучаемого СИ. Специализированные магнитные устройства - ондуляторы (undulator - образующий волны) и вигглеры. Фокусировка рентгеновского излучения. Схемы фокусировки СИ. Зеркала скользящего падения. Брегг-френелевские линзы. Композитные рефракционные линзы. Источники синхротронного излучения Европы, США, Японии, Китая, Индии, Южной Кореи, Тайваня, Бразилии, России.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 3. Курчатовский источник синхротронного излучения – КИСИ.</b> Курчатовский источник синхротронного излучения - КИСИ. Устройство накопительных колец "Сибирь-1" и	Всего аудиторных часов		
		1	5	0
		Онлайн		
		0	0	0

	"Сибирь-2". Описание экспериментальных станции КИСИ.			
5	<b>Тема 4. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.</b> Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Рассеяние и поглощение рентгеновского излучения. Комбинированные явления неупругого и аномального рассеяния. Неупругие потери энергии рентгеновского фотона, связанные с возбуждением коллективных колебаний атомных ядер в кристаллической решетке (фононов), связанные с возбуждением носителей заряда - электронов и дырок (плазмонов), возбуждением и переходом электронов валентной зоны на вакантные уровни (созданием электрон-дырочных пар), а также с ионизацией внутренних электронных оболочек в легких атомах (рентгеновское комбинационное, или рамановское рассеяние). Рентгеновская эмиссия, аномальное рассеяние, резонансное неупругое рассеяние.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6 - 7	<b>Тема 5. Рентгеновские методы диагностики и исследования наноструктур.</b> Рентгеновские методы диагностики и исследования наноструктур с использованием синхротронного излучения. Рентгеновская дифракция. Дифракционное рассеяние рентгеновских лучей на кристаллах представляет собой процесс интерференции пучков, отраженных различными плоскостями кристаллической решетки. Закон Брэгга-Вульфа. Типы дифракции: дифракция на макромолекулах, порошковая дифрактометрия, малоугловая дифракция, двух- и трехкристалльная дифрактометрия, многоволновая дифракция, двумерная (поверхностная) дифракция, метод стоячих рентгеновских волн, рентгеновская интерферометрия, рентгеновская топография. Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей.	Всего аудиторных часов		
		1	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Тема 6. Рентгеновская спектроскопия поглощения</b> Рентгеновская спектроскопия поглощения - XAFS - спектроскопия (X-ray Absorption Fine Structure). Основные преимущества XAFS-спектроскопии. Две области XAFS-спектроскопии: околопороговая структура рентгеновского спектра поглощения - XANES (X-Ray Absorption Near Edge Structure) и протяженная тонкая структура рентгеновского спектра поглощения - EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure).	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	<b>Часть 2</b>	4	17	0
9 - 10	<b>Тема 7. Физические основы EXAFS и XANES спектроскопии.</b> Физические основы EXAFS- спектроскопии. Вид экспериментально определяемого коэффициента поглощения рентгеновского излучения. Понятие коэффициента поглощения "свободного атома". Физические причины возникновения осциллирующей структуры коэффициента поглощения. Определение	Всего аудиторных часов		
		1	5	0
		Онлайн		
		0	0	0

	EXAFS- функции. Типы представлений EXAFS- функции. Последовательность шагов при извлечении EXAFS- функции из экспериментального спектра. Амплитуда и фаза обратного рассеяния фотоэлектронов, зависимость от волнового вектора. Фактор Дебая-Валлера в EXAFS- спектроскопии. Методы моделирования EXAFS- функции. Извлекаемые из EXAFS- спектров параметры локальной атомной структуры. Физические основы XANES - спектроскопии.			
11 - 12	<b>Тема 8. Экспериментальные методики регистрации EXAFS-спектров.</b> Экспериментальные методики регистрации EXAFS- спектров. Основные режимы: на пропускание, по выходу флуоресценции. Дополнительные режимы: по полному выходу электронов, по коэффициенту рентгеновского отражения, по выходу ионов (PSID, Photon-Stimulated Ion Desorption), по выходу оптической люминесценции (XEOL, X-ray Excited Optical Luminescence), по спектральной зависимости электропроводности, по спектральной зависимости интенсивности дифракционных линий (аномальная дисперсия). Принципиальная схема EXAFS- спектрометра. Достижения XAFS- спектроскопии при исследовании локальной структуры нанокластеров, нанотрубок и других наносистем.	Всего аудиторных часов		
		1	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Тема 9. Физические принципы фотоэлектронной спектроскопии.</b> Физические принципы фотоэлектронной спектроскопии. Уравнение фотоэффекта. Способы извлечения количественной информации об энергиях связи различных уровней в результате измерения кинетической энергии вышедшего из образца фотоэлектрона. Принципиальные схемы фотоэлектронных спектрометров. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS). Оже-спектроскопия. Фотоэлектронная спектромикроскопия. Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES). Достижения фотоэлектронной спектроскопии при исследовании электронной структуры нанокластеров, нанотрубок и других наносистем.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
14 - 15	<b>Тема 12. Лазеры на свободных электронах.</b> Лазеры на свободных электронах. Процесс самоусиления спонтанного излучения электронов, движущихся в переменном магнитном поле в ондуляторе, причины возникновения когерентного излучения. Перспективы использования уникальных возможностей излучения рентгеновского лазера на свободных электронах для исследования внутримолекулярных и внутриатомных процессов.	Всего аудиторных часов		
		1	5	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

<b>Обозначение</b>	<b>Полное наименование</b>
--------------------	----------------------------

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 и самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашних заданий. Для того чтобы дать современное состояние изучаемого курса, 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:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1	З-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-10	З-ПК-10	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-10	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-10	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-9	З-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
УК-4	З-УК-4	Э, КИ-8, КИ-15
	У-УК-4	Э, КИ-8, КИ-15
	В-УК-4	Э, КИ-8, КИ-15

## 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:

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

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. 621.38 Д55 Ускорители заряженных частиц в экспериментальной физике высоких энергий : текст лекций, Добрецов Ю.П., Москва: МИФИ, 2008
3. ЭИ М50 Физические основы лазерной технологии : учебное пособие для вузов, Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н., Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
4. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : лабораторный практикум, Троян В.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
5. 539.2 Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, Троян В.И. [и др.], Москва: МИФИ, 2008
6. 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. И L47 Accelerator physics : , Lee S.Y., New Jersey [and oth.]: World scientific, 2012
2. И N50 Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science Part 1 General, , Weinheim: Wiley-VCH, 2008
3. И N50 Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science Part 2 Methods, , Weinheim: Wiley-VCH, 2008
4. И N50 Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science Part 3 New and Emerging. Part 4: Industrial applications, , Weinheim: Wiley-VCH, 2008
5. 621.38 И88 Введение в физику ускорителей заряженных частиц : курс лекций, Иссинский И.Б., Дубна: ОИЯИ, 2012
6. 535 М50 Лабораторная работа "Лазерная технология" : , Менушенков А.П., Жиряков Б.М., Петровский В.Н., М.: МИФИ, 2006
7. 621.37 М50 Лазерная технология Ч.1 , Менушенков А.П., М.: МИФИ, 1992
8. 537/.8 М30 Лазеры на свободных электронах : , Маршалл Т., М.: Мир, 1987
9. 539.2 П75 Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции : учебное пособие, Чижов П.С. [и др.], Москва: МФТИ, 2011
10. 537 Т35 Синхротронное излучение и его применение : Учеб. пособие для вузов, Халилов В.Р., Тернов И.М., Михайлин В.В., М.: МГУ, 1985
11. 548 Ф45 Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ : учебное пособие для вузов, Фетисов Г.В., Москва: Физматлит, 2007
12. 539.2 В88 Современные методы исследования поверхности : , Делчар Т., Вудраф Д., М.: Мир, 1989

13. 537 Ф71 Стохастическая теория излучения : нелитературный текст, Флейшман Г.Д., Москва. Ижевск: Институт компьютерных исследований. Регулярная и хаотическая динамика, 2008
14. 538.9 3-56 Физика поверхности : , Зенгуил Э., М.: Мир, 1990
15. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.3 Методы исследования структурно-фазового состояния материалов, , Москва: МИФИ, 2008
16. 535 К23 Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия : , Карлсон Т.А., Ленинград: Машиностроение, 1981
17. 621.37 Ф33 Электрон в сильном световом поле : , Федоров М.В., М.: Наука, 1991

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<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 изучении данной учебной дисциплины необходимо твердо усвоить основные понятия, характеризующие свойства синхротронного излучения: яркость, расходимость, спектральный диапазон, спектрально-угловое распределение мощности, поляризационные свойства, эммитанс. Необходимо ознакомиться с основными принципами работы синхротронных источников и устройств, обеспечивающих инжекцию и накопление заряженных частиц в накопительном кольце: линейных ускорителей, ВЧ-резонаторов, ускорительных промежутков, поворотных магнитов, вигглеров, ондуляторов. Иметь представление о развитии синхротронных центров Европы, Японии, Китая, США и России. Обладать информацией о возможностях Курчатовского центра синхротронных исследований и нанотехнологий. Необходимо глубоко разобраться в процессах взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Понимать физические причины рассеяния и поглощения рентгеновского излучения. Отличать комбинированные явления неупругого и аномального рассеяния. Следует изучить рентгеновские методы диагностики и исследования наноструктур с использованием синхротронного излучения, включая рентгеновскую дифракцию и малоугловое рассеяние рентгеновских лучей.

При изучении метода рентгеновской спектроскопии поглощения - XAFS – спектроскопии (X-ray Absorption Fine Structure) студенты должны понимать причины разделения спектров на две области- околопороговую структуру рентгеновского спектра поглощения – XANES (X-Ray Absorption Near Edge Structure) и протяженную тонкую структура

рентгеновского спектра поглощения – EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure). Необходимо знать физические основы EXAFS- спектроскопии, понятие коэффициента поглощения «свободного атома», определение EXAFS- функции, типы представлений EXAFS- функции, последовательность шагов при извлечении EXAFS- функции из экспериментального спектра. Надо иметь представление о зависимости амплитуды и фазы обратного рассеяния фотоэлектронов от волнового вектора, понимать отличие физического значения фактора Дебая-Валлера в EXAFS- спектроскопии от аналогичного понятия в рентгеновской дифракции, знать методы моделирования EXAFS- функции и способы извлечения из EXAFS- спектров параметров локальной атомной структуры. Надлежит знать физические основы XANES – спектроскопии вследствие многократного отражения фотоэлектронной волны от атомов ближайшего окружения атома-поглотителя рентгеновского кванта. Иметь понятие о чувствительности XANES – спектроскопии к симметрии кристаллической решетки, или в отсутствие таковой в аморфных структурах – к симметрии взаимного расположения атомов. Разбираться в экспериментальных методиках регистрации EXAFS- и XANES- спектров, уметь составить принципиальную схему EXAFS- спектрометра, привести примеры достижений XAFS- спектроскопии при исследовании локальной структуры нанокластеров, нанотрубок и других наносистем.

При изучении метода фотоэлектронной спектроскопии необходимо знать физические процессы при поглощении веществом излучения с энергией квантов в рентгеновской области, или в области вакуумного ультрафиолета с последующей эмиссией фотоэлектрона, уравнение фотоэффекта. Необходимо понимать процессы возникновения и заполнения вакансий на внутренних оболочках, физику оже-процессов. Следует знать методы извлечения информации из фотоэлектронных спектров, процедуру калибровки фотоэлектронного спектрометра, уметь составить принципиальную схему фотоэлектронного спектрометра. Иметь представление об особенностях рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и спектроскопия в области вакуумного ультрафиолета (UPS), фотоэлектронной спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES).

При изучении раздела «Лазеры на свободных электронах» необходимо понимать причины возникновения когерентного излучения при движении сгустков электронов в ондуляторе. Требуется досконально изучить процесс самоусиления спонтанного излучения. Необходимо иметь представление об уникальных возможностях излучения рентгеновского лазера на свободных электронах для исследования внутримолекулярных и внутриатомных процессов.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

При изучении курса необходимо твердо усвоить основные понятия, характеризующие свойства синхротронного излучения: яркость, расходимость, спектральный диапазон, спектрально-угловое распределение мощности, поляризационные свойства, эммитанс. Необходимо ознакомиться с основными принципами работы синхротронных источников и устройств, обеспечивающих инжекцию и накопление заряженных частиц в накопительном кольце: линейных ускорителей, ВЧ-резонаторов, ускорительных промежутков, поворотных магнитов, вигглеров, ондуляторов. Иметь представление о развитии синхротронных центров Европы, Японии, Китая, США и России. Обладать информацией о возможностях Курчатовского центра синхротронных исследований и нанотехнологий. Необходимо глубоко

разобраться в процессах взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Понимать физические причины рассеяния и поглощения рентгеновского излучения. Отличать комбинированные явления неупругого и аномального рассеяния. Следует изучить рентгеновские методы диагностики и исследования наноструктур с использованием синхротронного излучения, включая рентгеновскую дифракцию и малоугловое рассеяние рентгеновских лучей.

При изучении метода рентгеновской спектроскопии поглощения - XAFS – спектроскопии (X-ray Absorption Fine Structure) студенты должны понимать причины разделения спектров на две области- околопороговую структуру рентгеновского спектра поглощения – XANES (X-Ray Absorption Near Edge Structure) и протяженную тонкую структура рентгеновского спектра поглощения – EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure). Необходимо знать физические основы EXAFS- спектроскопии, понятие коэффициента поглощения «свободного атома», определение EXAFS- функции, типы представлений EXAFS- функции, последовательность шагов при извлечении EXAFS- функции из экспериментального спектра. Надо иметь представление о зависимости амплитуды и фазы обратного рассеяния фотоэлектронов от волнового вектора, понимать отличие физического значения фактора Дебая-Валлера в EXAFS- спектроскопии от аналогичного понятия в рентгеновской дифракции, знать методы моделирования EXAFS- функции и способы извлечения из EXAFS- спектров параметров локальной атомной структуры. Надлежит знать физические основы XANES – спектроскопии вследствие многократного отражения фотоэлектронной волны от атомов ближайшего окружения атома-поглотителя рентгеновского кванта. Иметь понятие о чувствительности XANES – спектроскопии к симметрии кристаллической решетки, или в отсутствие таковой в аморфных структурах – к симметрии взаимного расположения атомов. Разбираться в экспериментальных методиках регистрации EXAFS- и XANES- спектров, уметь составить принципиальную схему EXAFS- спектрометра, привести примеры достижений XAFS- спектроскопии при исследовании локальной структуры нанокластеров, нанотрубок и других наносистем.

При изучении метода фотоэлектронной спектроскопии необходимо знать физические процессы при поглощении веществом излучения с энергией квантов в рентгеновской области, или в области вакуумного ультрафиолета с последующей эмиссией фотоэлектрона, уравнение фотоэффекта. Необходимо понимать процессы возникновения и заполнения вакансий на внутренних оболочках, физику оже-процессов. Следует знать методы извлечения информации из фотоэлектронных спектров, процедуру калибровки фотоэлектронного спектрометра, уметь составить принципиальную схему фотоэлектронного спектрометра. Иметь представление об особенностях рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и спектроскопия в области вакуумного ультрафиолета (UPS), фотоэлектронной спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES).

При изучении раздела «Лазеры на свободных электронах» необходимо понимать причины возникновения когерентного излучения при движении пучков электронов в ондуляторе. Требуется досконально разобрать процесс самоусиления спонтанного излучения. Необходимо иметь представление об уникальных возможностях излучения рентгеновского лазера на свободных электронах для исследования внутримолекулярных и внутриатомных процессов.

Автор(ы):

Менушенков Алексей Павлович, д.ф.-м.н.,  
профессор