

Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный научно-исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника»  
Российской академии наук»

Принято на Ученом совете ИК РАН  
Протокол № 5 от 22.09.2020 г.

«Утверждаю»

Директор



*Алексеева* О.А. Алексеева

«22» *сентября* 2020г.

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

ДИСЦИПЛИНЫ

«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ»

**Направление подготовки:** 03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность:** «Кристаллография, физика кристаллов» (01.04.18)

**Квалификация выпускника:** Исследователь. Преподаватель-исследователь

**Форма обучения:** очная

**Срок обучения:** 4 года

Квалификация  
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Москва

2020

1

Программа дисциплины «Современные методы анализа кристаллической структуры» разработана на основании следующих нормативных документов:

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования, утвержденный приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 876 от «30» июля 2014 г. по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», с изменениями и дополнениями от 30 апреля 2015 г.;
- Программа кандидатского минимума и паспорт научной специальности 01.04.18 – Кристаллография, физика кристаллов, разработанный экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства в связи с утверждением приказа Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 октября 2017 г. №1027 «Об утверждении Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени».

Составители: д.ф.-м.н., профессор Клечковская В.В.

д.х.н. Сорокина Н.И.

д.ф.-м.н. Жигалина О.М.



## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Современные методы анализа кристаллической структуры» ставит своей целью: приобретение аспирантами теоретических и практических навыков, необходимых для использования и разработки методов определения строения реальных кристаллов, исследований структурного совершенства и элементного анализа кристаллических и поликристаллических материалов, планарных органических и неорганических микро- и наносистем, систем с использованием методов высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии, включая рентгеноакустику, рентгенофлуоресцентный анализ и метод стоячих рентгеновских волн, а также методов электронной микроскопии (в том числе аналитической и высокоразрешающей ЭМ) и электронной дифракции.

**Задачами данного курса являются:**

- изучение базовых представлений о современных методах анализа кристаллической структуры с использованием рентгеновского, нейтронного и синхротронного излучений;
- изучение базовых представлений о современных методах анализа кристаллической структуры с использованием пучков электронов;
- ознакомление с базовыми представлениями о современных методах анализа тонкоплёночных планарных систем с использованием лабораторных и синхротронных источников рентгеновского излучения;
- ознакомление с базовыми представлениями о современных методах анализа микро- и наносистем или объектов с использованием лабораторных электронных микроскопов и электронографов;
- формирование у аспирантов способности использовать полученные знания при сборе экспериментальных данных, их обработке, проведении расшифровки и уточнения кристаллических структур, анализе полученных результатов.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Современные методы анализа кристаллической структуры» входит в Блок 1 (Обязательные дисциплины) и относится к вариативной части ООП по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, направленность «Кристаллография, физика кристаллов» (01.04.18). Индекс дисциплины по учебному плану – Б1.В.ОД.2.

## 3. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.

## 4. ГОД И СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ (если есть)

Первый год, первый и второй семестры обучения.

## 5. ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ.

Вариативная часть, в т.ч.:	5 зач. ед.
Лекции	46 часов
Семинары и практические занятия	26 часов
Лабораторные работы	нет часов



Индивидуальные занятия с преподавателем	нет часов
Самостоятельные занятия	100 часов
Экзамен/зачет	8 часов
<b>ВСЕГО</b>	<b>5 зач. ед., 180 часов</b>

## 6. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины «Современные методы анализа кристаллической структуры» направлено на формирование следующих универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций аспиранта:

а) универсальные (УК):

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- готовностью участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- готовностью использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-4).

б) общепрофессиональные (ОПК):

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

в) профессиональные (ПК):

- способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы с применением современных и перспективных методов исследования и решению профессиональных задач с учетом мировых тенденций развития области науки в соответствии с направленностью программы (ПК-1);
- способность анализировать результаты научных исследований и представлять их в виде докладов, статей, готовность применять на практике навыки составления и оформления научных отчетов и научно-технической документации (ПК-2);
- способность использовать профессионально-профилированные навыки и знания в области информационных технологий, программного обеспечения и ресурсов сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов (ПК-3).

## 7. КОНКРЕТНЫЕ ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ И НАВЫКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины «Современные методы анализа кристаллической структуры» обучающийся должен:

1. **Знать:**

- принципы работы современных экспериментальных установок на основе лабораторных и синхротронных источников рентгеновского излучения, основные экспериментальные схемы;
- методы определения элементного состава;



- методы получения и обработки экспериментальных данных;
- методы получения и уточнения профиля распределения электронной плотности и профилей распределения элементов по нормали к поверхности;
- современные методы поиска и уточнения структурной модели;
- новые возможности исследования структуры реальных кристаллов по данным брегговского и диффузного рассеяния;
- принципы анализа взаимосвязи между структурой, условиями образования и свойствами перспективных кристаллических материалов;
- основные методы характеристики шероховатых поверхностей с помощью рентгеновского излучения;
- устройство рентгеновских томографов и рефлекторов;
- статистические методы описания неупорядоченных систем;
- теоретические и экспериментальные основы просвечивающей и растровой электронной микроскопии и микроанализа;
- принципы работы современных электронных микроскопов и электронных дифрактометров;
- способы получения количественной информации о распределении электростатического потенциала и его топологического анализа;
- новые возможности исследования структуры реальных кристаллов по прецизионным данным электронной дифракции;
- принципы анализа взаимосвязи между структурой, условиями образования и свойствами перспективных кристаллических материалов;
- устройство электронных микроскопов и электронографов.

## 2. Уметь:

- осуществлять сбор, обработку и систематизацию научной информации по заданному направлению профессиональной деятельности, применять для этого современные информационные технологии;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и экспериментальных результатов;
- оценивать возможности и целесообразность применения различных методов электронно-микроскопического анализа при исследовании структуры объектов;
- подготавливать образцы для исследования;
- проводить эксперимент;
- определять пробную модель структуры;
- уточнять модель структуры;
- измерять распределение интенсивностей в электронограммах;
- интерпретировать полученные результаты и оформлять их в виде научных публикаций или докладов на конференциях;
- критически анализировать накопленный опыт и совершенствовать свои подходы к изучению строения вещества.

## 3. Владеть:

- навыками работы с литературой по современным рентгеновским методам анализа кристаллической структуры;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории, в библиотеке и Интернете;
- культурой постановки и проведения эксперимента при использовании различных излучений;



- навыками грамотной обработки результатов экспериментов и сопоставления с теоретическими и литературными данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

**8. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы (заполняется в соответствии с картами компетенций)**

Формируемые компетенции (код компетенции, уровень освоения)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-1	<p>З1 (УК-1) - <b>Знать</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>У1 (УК-1)- <b>Уметь</b> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов.</p> <p>У2 (УК-1) – <b>Уметь</b> при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений.</p> <p>В1 (УК-1)- <b>Владеть</b> навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>В2 (УК-1)- <b>Владеть</b> навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p>
УК-3	<p>З1 (УК-3) - <b>Знать</b> особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах.</p> <p>У1 (УК-3)- <b>Уметь</b> следовать нормам проведения научно-исследовательской деятельности, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач.</p> <p>У2 (УК-3)- <b>Уметь</b> осуществлять личностный выбор в процессе работы в российских и международных исследовательских коллективах, оценивать последствия принятого решения и нести за него ответственность перед собой, коллегами и обществом.</p> <p>В1 (УК-3)- <b>Владеть</b> навыками анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера, возникающих при работе по решению научных и научно-образовательных задач в российских или международных исследовательских коллективах</p> <p>В2 (УК-3)- <b>Владеть</b> технологиями оценки результатов коллективной деятельности по решению научных и научно-образовательных задач, в том числе ведущейся на иностранном языке</p>
УК-4	<p>З1 (УК-4) - <b>Знать</b> современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.</p> <p>З2 (УК-4) – <b>Знать</b> стилистические особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме на государственном и иностранном языках</p>



	<p>У1 (УК-4)- <b>Уметь</b> следовать основным нормам, принятым в научном общении на государственном и иностранном языках</p> <p>В1 (УК-4)- <b>Владеть</b> навыками анализа научных текстов на государственном и иностранном языках.</p> <p>В2 (УК-4)- <b>Владеть</b> навыками критической оценки эффективности различных методов и технологий научной коммуникации на государственном и иностранном языках</p> <p>В3 (УК-4)- <b>Владеть</b> различными методами, технологиями и типами коммуникаций при осуществлении профессиональной деятельности на государственном и иностранном языках.</p>
ОПК-1	<p>З1 (ОПК-1)- <b>Знать</b> современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности.</p> <p>У1 (ОПК-1)- <b>Уметь</b> выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования.</p> <p>В1 (ОПК-1)- <b>Владеть</b> навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований.</p> <p>В2 (ОПК-1)- <b>Владеть</b> навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов</p> <p>В3 (ОПК-1)- <b>Владеть</b> навыками представления и продвижения результатов интеллектуальной деятельности</p>
ПК-1	<p>З1 (ПК-1)- <b>Знать</b> современное состояние науки в соответствии с направленностью подготовки</p> <p>У1 (ПК-1)- <b>Уметь</b> рационально и эффективно использовать фундаментальные знания для постановки и осуществления теоретических и экспериментальных исследований.</p> <p>В1 (ПК-1)- <b>Владеть</b> методами планирования, подготовки, проведения научных исследований, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций по направленности подготовки.</p>
ПК-2	<p>З1 (ПК-2)- <b>Знать</b> особенности составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, статей и докладов.</p> <p>У1 (ПК-2)- <b>Уметь</b> применять на практике навыки составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей.</p> <p>В1 (ПК-2)- <b>Владеть</b> навыками составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей.</p>
ПК-3	<p>З1 (ПК-3)- <b>Знать</b> информационные технологии, программное обеспечение и ресурсы сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов.</p> <p>У1 (ПК-3)- <b>Уметь</b> использовать профессионально-профилированные знания в области информационных технологий, программного обеспечения и ресурсов сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов.</p> <p>В1 (ПК-3)- <b>Владеть</b> знаниями в области информационных технологий, программного обеспечения и ресурсов сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов.</p>

## 9. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ



### Структура дисциплины

#### **Перечень разделов дисциплины и распределение времени по темам:**

№ п/п	Название темы	Количество часов
1.	Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Методы рентгеновских исследований.	14
2.	Методы генерации, управления и регистрации рентгеновского излучения.	12
3.	Принципы работы современных экспериментальных установок на основе лабораторных, синхротронных и FEL источников рентгеновского излучения.	12
4.	Методы обработки полученных экспериментальных данных.	8
5.	Современные методы поиска и уточнения структурной модели кристаллов. Особенности строения реальных кристаллов. Анализ взаимосвязи между структурой и условиями образования кристаллических материалов.	14
6.	Рентгеновская рефлектометрия.	4
7.	Рентгеновская томография.	4
8.	Рентгеновское малоугловое рассеяние.	4
9.	Методы высокоразрешающей дифрактометрии.	4
10.	Рентгеноакустика.	4
11.	Рентгенофлуоресцентный анализ.	4
12.	Метод стоячих рентгеновских волн.	4
13.	Принципы работы современных электронографов и электронных микроскопов для структурных исследований.	24
14.	Методы обработки полученных экспериментальных данных.	8
15.	Современные методы поиска и уточнения структурной модели кристаллов.	8
16.	Пробоподготовка различных типов объектов для электронной микроскопии.	8
17.	Основные принципы РЭМ и ее применение при исследовании микро- и наноструктур.	8
18.	Применение методов просвечивающей электронной микроскопии для исследования микро- и наносистем различной размерности.	12
19.	Особенности строения реальных тонкопленочных и наноструктурированных объектов. Анализ взаимосвязи между структурой, условиями образования материалов.	16
20.	Экзамен/зачет	8
	ВСЕГО (часов)	180

Лекции:

Вид занятий



№ п/п	Название темы	Трудоёмкость (количество часов)
1.	Поглощение рентгеновских лучей.	4
2.	Рентгеновская микротомография.	4
3.	Рентгеновская рефлектометрия.	4
4.	Рентгеноспектральные методы исследования: Рентгенофлуоресцентный анализ. Метод стоячих рентгеновских волн.	4
5.	Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов: методы интерпретации данных.	2
6.	Когерентное взаимодействие ультракоротких рентгеновских импульсов с веществом	2
7.	Геометрическая кристаллография.	4
8.	Современная кристаллография и кристаллофизика в материаловедении.	4
9.	Современные методы анализа кристаллической структуры.	4
10.	Общая и описательная кристаллохимия. Эффект Яна-Теллера в кристаллохимии	4
11.	Методы электронной дифракции для анализа структуры нанобъектов.	2
12.	Основы теории дифракции	2
13.	Методы электронной микроскопии для визуализации и анализа структуры микро- и наносистем.	4
14.	Метод поликристалла (Дебая-Шеррера) с использованием характеристического излучения.	2
ВСЕГО (часов)		46

**Практические занятия:**

№ п/п	Название темы	Количество часов
1.	Рентгеновская микротомография.	4
2.	Рентгеновская рефлектометрия.	4
3.	Рентгенофлуоресцентный анализ. Метод стоячих рентгеновских волн.	4
4.	Современные методы анализа кристаллической структуры.	4
5.	Методы электронной дифракции для анализа структуры нанобъектов.	4
6.	Методы электронной микроскопии для визуализации и анализа структуры микро- и наносистем.	4
7.	Некоторые практические примеры применения метода поликристалла.	2
ВСЕГО (часов)		26

**Самостоятельная работа:**



№ п/п	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1.	Изучение теоретического курса. Выполняется самостоятельно каждым аспирантом по итогам каждой из лекций, результаты контролируются преподавателем на лекционных занятиях, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, методические пособия.	52
2.	Выполнение тестовых заданий. Выполняются задания, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий и сдаются в конце семестра, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, а также сборники задач, включая электронные, учебно-методические пособия.	30
3.	Подготовка к зачету.	18
ВСЕГО (часов)		100

#### Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела	Содержание раздела	Объем	
			Ауди- торная работа (часы)	Само- стоя- тельная работа (часы)
1.	Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Методы рентгеновских исследований.	Основные сведения о рентгеновском излучении. Рассеяние свободным электроном, поляризационный множитель. Атомный и структурный факторы. Форм-фактор и величина узлов обратной решетки. Формула Лауэ и формула Вульфа-Брегга. Прямая и обратная решетка. Сфера Эвальда. Рентгеноструктурный анализ и фазовая проблема. Основные механизмы поглощения рентгеновского излучения. Методы исследования материалов, где используется поглощение рентгеновских лучей. Комплексные диэлектрическая проницаемость и показатель преломления среды. Коэффициент поглощения. Формулы Френеля. Полное внешнее отражение (ПВО). Критический угол ПВО. Глубина проникновения излучения. Отражение от двух- и многослойных покрытий.	6	8
		Устройство рентгеновской трубки и ее спектр излучения. Рентгеновские аппараты с вращающимся анодом. Синхротронные источники, поворотные магниты, Виглеры,	6	6



2.	Методы генерации, управления и регистрации рентгеновского излучения.	ондуляторы. Основные виды рентгенооптических элементов. Их назначение. Зеркальная оптика скользящего падения. Критический угол ПВО. Эффект «шепчущей галереи». Капиллярная оптика. Достоинства и недостатки. Многослойные зеркала. Принцип действия. Зонные пластинки. Отражательные зонные пластинки. Составные преломляющие линзы. Рентгеновские детекторы и принципы их работы. Сцинтилляционный детектор, устройство, принципы работы, кривая амплитудного разрешения, скорость счета.		
3.	Принципы работы современных экспериментальных установок на основе лабораторных, синхротронных и FEL источников рентгеновского излучения.	Источники рентгеновского излучения: отпаянные рентгеновские трубки, микрофокусные трубки, трубки с вращающимся анодом, синхротронные источники, лазеры на свободных электронах (FEL). Лабораторные дифрактометры, синхротронные и FEL станции. Детекторы ионизирующих излучений: сцинтилляционные, энергодисперсионные, CCD и др. Основные рентгенооптические элементы.	6	6
4.	Методы обработки экспериментальных данных.	Общие положения. Систематическая ошибка и методы ее устранения. Виды статистических оценок полученных измерений. Критерии достоверности результатов структурного исследования. Выбор оптимальной тактики съемки. Коррекция недостатков штатного программного обеспечения коммерческих дифрактометров. Программа CrysAlis для управления дифрактометром. Классификация видов аппаратных искажений интенсивности. Влияние граничных условий образца на измерения. Шкалирование интенсивностей. Поправка Лорентца. Поправка на поляризацию излучения. Поправка на поглощение излучения. Поправка на тепловое диффузное рассеяние. Поправка на дрейф аппаратуры. Усреднение эквивалентных и повторных рефлексов. Выбор весовой схемы.	2	6
	Современные методы поиска и уточнения структурной модели кристаллов.	Пакеты программ структурного анализа кристаллов. Пакеты программ Shelx, Jana, XD, ASTRA. Их специализация, преимв-	6	8



		<p>Диффузное рассеяние как источник информации о ближнем порядке в кристаллах. Методы регистрации диффузного рассеяния и проблемы эксперимента. Нанокластеры и диффузное рассеяния. Построение реальной модели кристалла методом Монте-Карло.</p> <p>Примеры исследований взаимосвязи структуры и свойств, выполненные в ЛРМА и СИ.</p>		
6.	Рентгеновская рефлектометрия.	<p>Методы исследования шероховатостей поверхностей. Рассеяние РИ на шероховатых поверхностях. PSD-функция поверхности. Эффективная высота шероховатости. Влияние переходного слоя на отражение и рассеяние РИ. Эффект Ионеды. Связь рельефа подложки и нанесенной на нее пленки. Обратная задача рентгеновской рефлектометрии.</p>	2	2
7.	Рентгеновская томография.	<p>Рентгеновская томография, медицинские компьютерные томографы. Основные типы рентгеновской томографии. Принципы восстановления внутренней структуры по данным рентгеновской томографии. Типы рентгеновских микротомографов. Выбор длины волны зондирующего излучения и разрешение лабораторных микротомографов. Шкала Хаунсфелда. Артефакты рентгеновской томографии.</p>	2	2
8.	Рентгеновское малоугловое рассеяние.	<p>Особенности дифракции на неупорядоченных структурах. Понятия автокорреляционной и корреляционной функций. Формула Дебая как основа методов моделирования строения рассеивающих объектов. Рассеяние на монодисперсных системах частиц, определение интегральных структурных параметров: объем частицы, радиус инерции, максимальный размер. Методы моделирования формы частиц по данным рассеяния. Анализ полидисперсных систем по данным малоуглового рассеяния: методы расчета распределений по размерам, понятие формфактора. Особенности рассеяния от разбавленных и концентрированных систем.</p>	2	2
9.	Методы высокоразрешающей дифрактометрии.	<p>Основные положения и экспериментальные схемы высокоразрешающей дифрактометрии. Дифракционная диагностика неоднородностей кристаллической решетки. Измерение параметра. Многоволновая дифракция. Метод квазимноговолновой</p>	2	2



		дифракции. Проведение расчетов в программном пакете «Квази пьезо» для нахождения требуемых пар и отбор подходящих рефлексов. Расчет рентгенооптических схем для выбранных рефлексов. Проведение экспериментов.		
10.	Рентгеноакустика.	Основные положения и экспериментальные схемы. Классификация рентгеноакустических взаимодействий. Рентгеноакустические взаимодействия в области длинноволнового ультразвука. Ультразвуковые резонаторы: объемные и поверхностные волны, изгибные и продольные деформации. Управление пространственными и спектральными характеристиками рентгеновских пучков с помощью длинноволнового ультразвука.	2	2
11.	Рентгенофлуоресцентный анализ.	Основные положения и экспериментальные схемы. Количественный и качественный элементный анализ. Обработка спектров в программном пакете РумСА.	2	2
12.	Метод стоячих рентгеновских волн.	Основные положения и экспериментальные схемы. Метод стоячих рентгеновских волн в области полного внешнего отражения и в области брэгговской дифракции.	2	2
13.	Принципы работы современных электронных микроскопов и электронографов для структурных исследований.	Устройство электронных микроскопов. Методы электронной дифракции с использованием электронного микроскопа. Типы электронных дифрактометров. Методы измерения дифракционных картин: фотографический, CCD-камеры, изображающие пластины, ФЭУ со сцинтиллятором. Устройство электронографа. Низкотемпературные и высокотемпературные приставки к электронографу.	8	16
14.	Методы обработки полученных экспериментальных данных.	Математические методы обработки экспериментальных данных. Общие положения. Систематическая ошибка и методы ее устранения. Виды статистических оценок полученных измерений. Критерии достоверности результатов структурного исследования. Переход от интенсивностей рефлексов к структурным амплитудам, разные типы электронограмм. Динамическое рассеяние: общий многоволновой случай, двухволновое рассеяние и поправки по Блэкману, учет систематического многоволнового рассеяния с помощью потенциалов Бете. Выбор оптимальной тактики съемки. Определение некогерентного фона рассея-	4	4



		ния. Шкалирование интенсивностей. Выбор весовой схемы. Уточнение общих тепловых параметров атомов. Влияние микроструктуры образца на измерения.		
15.	Современные методы поиска и уточнения структурной модели кристаллов. (К)	Пакеты программ Digital Micrograph, JEMS. Пакеты программ структурного анализа кристаллов Crystal, Jana, ASTRA. Их специализация, преимущества и недостатки. Расшифровка модели строения. Charge flipping - эффективный метод решения фазовой проблемы. Уточнение атомной модели.	4	4
16.	Пробоподготовка различных типов объектов для электронной микроскопии. (ж)	Пробоподготовка массивных материалов для ПЭМ и ВРЭМ (резание, механическая шлифовка и полировка, ионное и электрохимическое травление, методы приготовления поперечных срезов и реплик). Пробоподготовка порошков. Методы подготовки биологических объектов: ультратомирование и негативное контрастирование, замораживание). Использование фокусированных ионных пучков.	2	6
17.	Основные принципы РЭМ и ее применение при исследовании микро- и наноструктур. (ж)	Принципы работы растрового микроскопа. Взаимодействие электронного пучка с образцом. Вторичные и обратнорассеянные электроны. Режимы получения изображений. Использование внутренней среды и низковольтного режима для особых объектов. Рентгеновский микроанализ в растровой микроскопии: виды спектрометров (энергодисперсионный и волновой). Детекторы. Качественный и количественный анализ. Картирование. Устройство ионных источников ФИП. Применение ФИП в исследованиях материалов. Манипулирование объектами в камере РЭМ. Применение ионной литографии для создания микро- и наноструктур.	4	4
18.	Применение методов просвечивающей электронной микроскопии для исследования микро- и наносистем различной размерности. (ж)	Получение ВРЭМ изображений кристаллической решетки и дефектов кристаллического строения (дислокации, дефекты упаковки, двойники, антифазные границы). Картины Муара и их использование для визуализации дефектов. Моделирование изображений кристаллической решетки. Методика анализа с помощью EDX-спектрометра, карты распределения химических элементов, элементный анализ в точке, от области и вдоль выделенной ли-	6	6



		нии, количественный и качественный элементный анализ. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (EELS). Просвечивающе-растровая электронная микроскопия (STEM), в том числе с атомным разрешением. Широкоугольный детектор тёмного поля (HAADF), z-контраст. Примеры использования методов HAADF STEM, электронной томографии для анализа наноструктур различной размерности.		
19.	Особенности строения реальных тонкопленочных и наноструктурированных объектов. Анализ взаимосвязи между структурой, условиями образования материалов. (к)	Методы построения распределений электростатического потенциала и электронной плотности. Использование аналитических моделей. Топологический анализ распределений. Теоретические методы расчета распределений потенциала и электронной плотности из «первых принципов». Методы расчетов физических свойств по экспериментальным данным. Примеры исследований взаимосвязи структуры и свойств, выполненные в лаборатории электронографии. Нанокластеры, агрегаты длинноцепных молекул и др. Построение реальной модели кристалла методом моделирования структуры молекул и их агрегатов.	4	12

**10. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

10.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина (модуль), и их «карты»

Вид дисциплины		Компетенции Наименование дисциплины	Универсальные компетенции					Общепрофессиональные компетенции		Профессиональные компетенции				
			УК-1	УК-2	УК-3	УК-4	УК-5	ОПК-1	ОПК-2	ПК-1	ПК-2	ПК-3	ПК-4	ПК-5
Вариативная часть	Обязательная дисциплина	«Современные методы анализа кристаллической структуры»	+		+	+		+		+	+	+		

Критерии оценивания компетенций приведены в ООП по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Кристаллография, физика кристаллов» (01.04.18).



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

**10.2.1. Тестовое задание**

1. Каков диапазон рентгеновских длин волн и энергий?
2. Охарактеризуйте отличительные особенности рентгеновского излучения.
3. Опишите основные виды взаимодействия рентгеновского излучения с веществом?
4. Что такое атомный и структурный факторы рассеяния?
5. Что такое обратная решетка?
6. Что описывают формулы Лауэ и Вульфа-Брегга?
7. Что такое сфера Эвальда?
8. В чем заключается метод рентгеноструктурного анализа?
9. Назовите основные методы рентгеновских исследований?
10. Что такое комплексная диэлектрическая проницаемость среды?
11. Что такое комплексный показатель преломления?
12. Чем определяется коэффициент поглощения рентгеновского излучения в веществе?
13. Что такое формулы Френеля и что они описывают?
14. Что такое эффект полного внешнего отражения (ПВО)?
15. Что такое критический угол ПВО?
16. Чем определяется критический угол ПВО?
17. Чем определяется глубина проникновения рентгеновского излучения в вещество?
18. Назовите известные Вам виды источников рентгеновского излучения.
19. Опишите принцип работы рентгеновской трубки.
20. В чем заключается и каковы преимущества технологии вращающегося анода в рентгеновской трубке?
21. Опишите принцип работы синхротронного источника.
22. Для чего используются поворотные магниты, виглеры и ондуляторы в синхротронном источнике?
23. Назовите основные виды рентгенооптических элементов.
24. В чем заключается эффект «шепчущей галереи»?
25. Что такое многослойное рентгеновское зеркало?
26. Опишите принцип действия многослойных зеркал.
27. Чем определяется эффективность многослойных зеркал?
28. Что такое рентгеновская зонная пластинка?
29. Опишите принцип действия зонных пластинок.
30. Чем определяется эффективность зонной пластинки?
31. Что такое отражательная зонная пластинка?
32. Что такое составные преломляющие линзы?
33. Опишите принцип составной преломляющей оптики.
34. Чем определяется составной преломляющей оптики?
35. Какие способы регистрации рентгеновского излучения Вам известны?
36. Опишите принцип работы сцинтилляционного детектора.
37. Каковы преимущества и недостатки рентгеновского рассеяния перед атомно-силовой микроскопией?
38. Сущность PSD-функции и её связь с рельефом поверхности.
39. Как связаны одномерная и двумерная PSD-функции?
40. Как связаны PSD-функция и эффективная высота шероховатости?
41. Как связаны среднеквадратичная и эффективная высота шероховатости?
42. Чем ограничена пространственная частота эффективной шероховатости?
43. Сущность эффекта Ионеды (аномальное рассеяние).



44. В чём заключается фазовая проблема рефлектометрии?
45. Каков механизм возникновения осцилляций Киссига?
46. Как учесть вклад рассеяния на шероховатостях в кривую отражения?
47. Как связаны изменение плотности в переходном слое и кривая отражения?
48. Перечислите основные подходы к решению обратной задачи.
49. Объяснить суть всех типов томографии (РКТ, МРТ и др.), указав их сходства и различия.
50. Перечислите недостатки обычной рентгенографии.
  - a. В чём заключается идея РКТ?
  - b. Охарактеризовать 5 поколений рентгеновских томографов.
  - c. Записать закон Бэра.
  - d. Записать и интерпретировать преобразование и уравнение Радона.
  - e. Изложить метод преобразования Фурье решения уравнения Радона на основе теоремы о слое.
  - f. Изложить метод свёртки и обратных проекции решения уравнения Радона на основе теоремы о слое.
  - g. Дать историческую справку о развитии РКТ.
  - h. Сформулировать задачи с неполными данными.
51. В чём заключается принципиальное отличие рассеяния на монокристаллах от рассеяния на неупорядоченных или частично упорядоченных структурах?
52. Проблема однозначности решения обратных задач восстановления структуры объекта по данным рассеяния.
53. Информативность данных малоуглового рассеяния, применение теоремы Котельникова-Шеннона.
54. Физический смысл функции парных расстояний и структурные параметры, которые можно из нее определить.
55. Что такое метод вариации контраста и способы его осуществления?
56. Вывод формул для структурных инвариантов.
57. Основные формулы для расчета интенсивности малоуглового рассеяния от однородных частиц и атомных моделей.
58. Способы проверки систем рассеивающих частиц на монодисперсность по данным рассеяния.
59. В чём различие рассеяния от разбавленных и концентрированных систем частиц. Структурный фактор.
60. Принципы расчета распределений по размерам частиц в полидисперсных системах, применяемые подходы.
61. Достоинства и ограничения метода малоуглового рассеяния.
62. Основные особенности конструкции малоугловых дифрактометров.
63. Преимущества и недостатки используемых в дифракционных экспериментах источников излучения, рентгеновских и нейтронных.
64. Чем определяется предел разрешения просвечивающего электронного микроскопа и какова его величина?
65. Назовите основные виды источников электронов для электронного микроскопа.
66. Какой вид источника обычно применяется для получения изображений высокого разрешения в просвечивающем электронном микроскопе и почему?
67. Опишите основные виды aberrации электромагнитных линз и способы их устранения.
68. Каково общее устройство колонны просвечивающего электронного микроскопа?
69. Назвать режимы работы просвечивающего электронного микроскопа и объяснить, в каких случаях их применяют.
70. Охарактеризовать основные типы электронограмм.
71. Что такое постоянная прибора? Указать факторы, определяющие масштаб дифракционной картины.



72. Из чего складывается погрешность при измерении межплоскостных расстояний по электронограммам и по изображениям высокого разрешения?
73. Как определить ориентировку кристалла в электронном микроскопе?
74. По каким признакам точечной дифракционной картины можно сказать, что ось зоны параллельна направлению падающего пучка?
75. Нарисуйте схему хода лучей в микроскопе в режиме изображения и микродифракции.
76. Как осуществляется смена режимов работы микроскопа: светлопольный-темнопольный режим дифракции?

### 10.2.2. Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена.

1. Рентгеновское, синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах (FEL) – получение и свойства.
2. Теоретические основы дифракции и рассеяния рентгеновского излучения.
3. Устройства коллимации и монохроматизации рентгеновского излучения.
4. Методы регистрации ионизирующих излучений и виды детекторов.
5. Экспериментальная база структурных исследований - лабораторные дифрактометры, синхротронные и FEL станции.
6. Математические методы обработки экспериментальных данных.
7. Виды экспериментальных ошибок.
8. Методы минимизации.
9. Современные методы поиска и уточнения структурной модели кристаллов.
10. Двух и трехкристальные схемы.
11. Угловая и спектральная расходимость.
12. Коллимация и монохроматизация рентгеновского пучка.
13. Двух и более кристальный монохроматор.
14. Параллельная, непараллельная и антипараллельная геометрия. Двухкристальная кривая дифракционного отражения (КДО). Трехкристальная КДО. Многоволновая КДО.
15. Рентгеноакустика. Классификация рентгеноакустических взаимодействий. Особенности коротковолнового, средневолнового, длинноволнового диапазона взаимодействий.
16. Типы деформаций, рентгеноакустические резонаторы. Свойства рентгеноакустических резонаторов.
17. Управление параметрами рентгеновского излучения: интенсивность, длина волны, угол. Стробоскопическая техника и методы регистрации.
18. Вторичные процессы при взаимодействии рентгеновского излучения с веществом.
19. Характеристический спектр атомов. Энерго- и волнодисперсионные схемы рентгенофлуоресцентного анализа.
20. Методы качественного и количественного элементного анализа.
21. Отражение, преломление и поглощение рентгеновского излучения, явление полного внешнего отражения.
22. Условия формирования волнового поля стоячей рентгеновской волны в области полного внешнего отражения и в условиях брегговской дифракции.
23. Схема экспериментальной реализации метода стоячих рентгеновских волн. Влияние геометрических факторов (угловой расходимости и особенностей экспериментальной схемы) и спектральной неоднородности на экспериментальные результаты. Возможности применения метода стоячих рентгеновских волн.
24. Особенности строения реальных кристаллов. Анализ взаимосвязи между структурой, условиями образования кристаллических материалов.
25. Понятие разрешения оптического микроскопа. Что ограничивает разрешение в оптическом микроскопе.
26. Типы сигналов, генерируемых электронами при взаимодействии с атомами образца.
27. Что ограничивает разрешение в просвечивающей электронной микроскопии.



28. Перечислите преимущества использования ПЭМ, по сравнению с другими методиками исследования.
29. Радиационные повреждения образцов в ПЭМ.
30. Упругое рассеяние на атоме. Формула Резерфорда для дифференциального сечения рассеяния.
31. Виды рентгеновского излучения при взаимодействии электронов с веществом. Характеристическое и тормозное рентгеновское излучение. Критическая энергия ионизации.
32. Основные различия между электронной и рентгеновской дифракциями.
33. Каковы основные различия между дифракцией от выделенной области и дифракцией в сходящемся пучке электронов. Динамические эффекты дифракции электронов.
34. Физические принципы изменения контраста вблизи дислокации. Определение вектора Бюргерса дислокации.
35. Метод слабых пучков в исследовании дефектов структуры.
36. Источники электронов, яркость, когерентность, стабильность. Пути повышения когерентности электронов.
37. Магнитные линзы. Сферическая и хроматическая аберрации, астигматизм. Разрешение ПЭМ. Глубина резкости.
38. Детекторы электронов. Полупроводниковые детекторы, сцинтилляторы-ФЭУ и их преимущества и недостатки.
39. Вакуумная система электронно- и ионно-зондовых приборов, виды вакуумных насосов. Дифференциальная вакуумная система, работа в режимах естественной среды.
40. Сфера Эвальда, обратная решетка, Лауэ-зоны.
41. Получение изображений кристаллической решетки. Картины Муара.
42. Толщинные и изгибные контуры.
43. Изображение дефектов упаковки. Трансляционные дефекты. Антифазные границы.
44. Стереомикроскопия и томография.
45. Энергодисперсионный спектрометр. Волновой спектрометр. Количественный анализ. ZAF коррекция.
46. Спектр потерь энергии электронов. Спектрометр. Разрешение.
47. Количественный анализ спектра потерь энергии электронов. Картирование. Тонкая структура спектра.
48. Монохроматоры.
49. Принципы работы растрового микроскопа.
50. Системы растрового микроскопа.
51. Влияние энергии электронов на изображение. Обратнорассеянные электроны. Вторичные электроны. Получение изображений и их интерпретация.
52. Режимы получения изображений в растровой микроскопии. Низковакуумные приборы.
53. Микроанализ в растровой микроскопии.
54. Устройство ионных источников ФИП. Применение ФИП в исследованиях материалов. Трехмерная реконструкция.

## **11. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Необходимое оборудование для лекций и практических занятий:**

При выполнении практических работ используются компьютеры с характеристиками не ниже Pentium 4 - 3Гц/512Мб/80Гб с 17-дюймовыми мониторами, объединенные в локальную сеть, подключенную через сеть института к Интернет. Для получения необходимой информации используются Web-ресурсы Интернет и локальная библиотека электронных материалов. При чтении лекции используются: ноутбук, проектор, экран, маркерная доска.

Для получения экспериментальных данных может быть использовано кристаллизационное оборудование лабораторий ИК РАН, электронографы, оптические, атомно-силовые и электронные микроскопы лабораторий и Центра коллективного пользования ИК РАН.



Специализированная лаборатория, оснащённая рабочими местами и оборудованием для проведения занятий по курсу, располагает для структурных исследований электронными микроскопами Tescna12 с энергодисперсионным анализом (EDX), Tescna Osiris с быстрым энергодисперсионным анализом и широкоугловым детектором темного поля – HAADF при ускоряющих напряжениях 120 и 200 кВ соответственно, растровыми электронными микроскопами FEI Quanta3D с энергодисперсионным анализом и FEI Scios с ионной пушкой, установками для ионного утонения (Gatan PIPs 691) и утонения объектов методом механической шлифовки, пиллой с алмазной проволокой и другими приспособлениями для приготовления образцов.

Для анализа и моделирования ПЭМ и ВРЭМ изображений – программное обеспечение Digital, Tescna Image@Analysis, ES Vision, JEMS, Image Score, приложения к Digital для анализа структуры границ раздела.

## **12. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература:**

1. Современная кристаллография. В четырех томах. Вайнштейн Б.К. 1979 г. Издательства Наука.
2. Проблемы кристаллологии. Издательство Московского Университета. 1971 г.
3. Проблемы кристаллографии. 1987 г. Издательство «Наука».
4. Физика конденсированного состояния. Учебное пособие. Байков Ю.А., Кузнецов В.М. 2014г. Издательство Бином. Лаборатория знаний. 293 с.
5. Павлов Павел Васильевич, Хохлов Александр Федорович  
Физика твердого тела: Учебник. Изд. 4-е. – М.: ЛЕНАНД. 2015. – 496с.
6. Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. Добросвет. Издательство «КДУ». Москва, 2014.
7. Наука и жизнь: моя конвергенция. Избранные научные труды. М.В. Ковальчук. 2011 г. Москва, ИКЦ «Академкнига». Тома 1 и 2.
8. Теоретическая физика. В 10-и томах. Том 5. Статистическая физика. В 2-х частях. Часть 1. Учебное пособие. Гриф МО РФ. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц 2013г. Издательство Физматлит, 293 с.
9. Теоретическая физика. Учебное пособие. В 10-и томах. Том IX: Статистическая физика. Часть 2: Теория конденсированного состояния. Гриф МО РФ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц 2015г. Издательство Физматлит, 440 с.
10. Дифракционный структурный анализ. А.С. Илюшин, А.П. Орешко. 2013 г. М.: физический факультет МГУ, Издательский дом «Крепостновъ». 616 с.
11. Хельтье Х.-Д. Молекулярное моделирование: теория и практика / Х.-Д. Хельтье, В. Зиппль, Д. Роньян, Г. Фолькерс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 318с.:
12. Хельтье Х.-Д. Молекулярное моделирование: теория и практика / Х.-Д. Хельтье, В. Зиппль, Д. Роньян, Г. Фолькерс; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 319с.
13. Кристаллография. Лабораторный практикум. Под редакцией Е.В. Чупрунова. Москва. Физматлит, 2005.

### **Дополнительная литература:**

1. Структурные исследования кристаллов. 1996 г. Наука Физматлит.
2. Б. К. Вайнштейн. Кристаллография и жизнь. 2012 г. Москва Физматлит.



3. Жидкие кристаллы Структура и свойства Л. М. Блинов 2015 г. Издательство Либроком. 484 с.
4. Кристаллология. Основные представления о кристаллах, кристаллических веществах и методах их изучения. Задачи по геометрической кристаллографии и анализ их решений. Завьялов Е.Н. 2016г. Издательство Книжный дом «Университет» (КДУ), 314 с.
5. Фейнман Ричард Ф., Лейтон Роберт Б., Сэндс Мэтью  
Фейнмановские лекции по физике: Вып.1, 2: Современная наука о природе. Законы механики. Пространство. Время. Движение: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 11-е. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 448с.; Вып.3: Излучение. Волны. Кванты: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 10-е. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 256с.; Вып.4: Кинетика. Теплота. Звук: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 10-е. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. - 272с.; Вып.5: Электричество и магнетизм: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. стереотип. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016. - 304с.; Вып.6: Электродинамика: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 8-е. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. - 360с.;  
Вып.7: Физика сплошных сред: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 8-е. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016. - 288с.;  
Вып.8, 9: Квантовая механика: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 8-е. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. - 528с.
6. Фейнман Ричард Ф., Лейтон Роберт Б., Сэндс Мэтью  
Фейнмановские лекции по физике: Задачи и упражнения с ответами и решениями к вып. 1-4: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. и с предисл. А.П.Леванюка. Изд. 9-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. - 280с; Задачи и упражнения с ответами и решениями к вып. 5-9: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. А.П.Леванюка. Изд. 9-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016. - 272с.

**Периодические издания, электронные ресурсы, включая доступ к базам данных и**

т.д.:

<b>РИНЦ</b>	<a href="https://elibrary.ru/orgs.asp">https://elibrary.ru/orgs.asp</a>
<b>Web of Science</b>	<a href="http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&amp;search_mode=GeneralSearch&amp;SID=F2LiEv3BvmxwoCqmOmV&amp;preferencesSaved=">http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&amp;search_mode=GeneralSearch&amp;SID=F2LiEv3BvmxwoCqmOmV&amp;preferencesSaved=</a>
<b>Scopus</b>	<a href="https://www.scopus.com/home.uri">https://www.scopus.com/home.uri</a>
<b>Google Scholar citations</b>	<a href="https://scholar.google.ru/citations?user=NbJEoV8A AAAJ&amp;hl=ru">https://scholar.google.ru/citations?user=NbJEoV8A AAAJ&amp;hl=ru</a>
<b>IOP</b> Institute of Physics материалы компании IOP Publishing Limited, а именно, база данных IOP Journal	<a href="http://www.iop.org/">http://www.iop.org/</a>
<b>AIP</b> материалы компании American Institute of Physics	<a href="https://www.aip.org/">https://www.aip.org/</a>
<b>CASC</b> материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных	<a href="https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases">https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases</a>



CASC	
<b>APS</b> Журналы Американского физического общества база данных APS Online Journals	<a href="https://www.aps.org/">https://www.aps.org/</a>
<b>IEEE</b> материалы компании The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, а именно, база данных IEEE/IEL	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp">http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp</a>
<b>RSC</b> материалы Royal Society of Chemistry	<a href="http://pubs.rsc.org/">http://pubs.rsc.org/</a>
<b>Wiley</b> материалы компании John Wiley & Sons Ltd., а именно база данных Wiley Journals	<a href="http://onlinelibrary.wiley.com/">http://onlinelibrary.wiley.com/</a>
<b>Inspec</b> материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных INSPEC	<a href="https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases/inspec">https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases/inspec</a>
<b>ProQuest</b> материалы компании и PROQUEST LLC, а именно база данных Proquest Dissertations and Theses Global	<a href="https://www.proquest.com/products-services/pqdtglobal.html">https://www.proquest.com/products-services/pqdtglobal.html</a>
<b>SpringerNature</b> Зарубежные электронные ресурсы издательства, а именно: Springer Journals Springer Protocols Springer Materials Springer Reference zbMATH Nature Journals Nano Database	<a href="http://link.springer.com/">http://link.springer.com/</a> <a href="http://www.springerprotocols.com/">http://www.springerprotocols.com/</a> <a href="http://materials.springer.com/">http://materials.springer.com/</a> <a href="http://link.springer.com/search?facet-content-type=%22ReferenceWork%22">http://link.springer.com/search?facet-content-type=%22ReferenceWork%22</a> <a href="http://zbmath.org/">http://zbmath.org/</a> <a href="http://npg.com/">http://npg.com/</a> <a href="https://nano.nature.com">https://nano.nature.com</a>
<b>Elsevier B.V. Science Direct Complete Freedom Collection</b> зарубежные электронные ресурсы издательства Elsevier «Freedom Collection» и коллекция электронных книг «Freedom Collection eBook collection», размещенных на платформе Science Direct	<a href="https://www.elsevier.com/">https://www.elsevier.com/</a>
<b>CCDC - Cambridge Crystallographic Data Centre</b> Зарубежные электронные ресурсы Кембриджского центра структурных данных	<a href="https://www.ccdc.cam.ac.uk/">https://www.ccdc.cam.ac.uk/</a>



**Scifinder**  
База данных

<https://scifinder.cas.org>

**13. Язык преподавания - русский.**