

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



О.А. Алексеева
О.А. Алексеева

« 22 » *сентября* 2020г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

ДИСЦИПЛИНЫ
«РОСТ КРИСТАЛЛОВ»

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Направленность: «Физика конденсированного состояния» (01.04.07)
«Кристаллография, физика кристаллов» (01.04.18)

Квалификация выпускника: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения: очная

Срок обучения: 4 года

Москва
2020

Программа дисциплины «Рост кристаллов» 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.;
- Программы кандидатского минимума и паспорта научных специальностей 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и 01.04.18 – Кристаллография, физика кристаллов, разработанные 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».

Составитель: к.ф.-м.н. Маноменова В.Л.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Рост кристаллов» ставит своей **целью**: приобретение аспирантами теоретических и практических навыков, необходимых для использования и разработки методов получения кристаллических материалов, включая создание новых кристаллических материалов высокого структурного совершенства.

Задачами данного курса являются:

1) *теоретический компонент*: получить базовые представления о современных методах выращивания кристаллов и управления их дефектной структурой; о перспективах развития в области управления процессами кристаллизации;

2) *практический компонент*: осуществлять сбор экспериментальных данных о механизмах роста кристаллов, проводить выращивание монокристаллов и оптимизацию процесса; сформировать основные практические навыки в области использования средств диагностики кристаллов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Рост кристаллов» входит в Блок 1 (Обязательные дисциплины) и относится к вариативной части ООП по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, направленности «Кристаллография, физика кристаллов» (01.04.18), «Физика конденсированного состояния» (01.04.07). Индекс дисциплины по учебному плану – Б1.В.ОД.4

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.:	3 зач. ед.
Лекции	16 часов
Семинары и практические занятия	16 часов
Лабораторные работы	нет часов
Индивидуальные занятия с преподавателем	нет часов
Самостоятельные занятия	72 часа
Экзамен/зачет	4 часа
ВСЕГО	3 зач. ед., 108 часов

6. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины «Рост кристаллов» 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 «Рост кристаллов» обучающийся должен:

1. Знать:

- фундаментальные основы процесса кристаллизации;
- принципиальные механизмы влияния условий роста кристаллов на их реальную структуру;
- современные методы выращивания монокристаллов и кристаллических пленок из жидкой и паровой фазы;
- современные оптические, микроскопические и рентгеновские методы исследования процессов кристаллизации;
- принципы анализа взаимосвязи между структурой, условиями образования и свойствами перспективных кристаллических материалов;
- математические модели анализа полученных результатов исследования;
- технологию эпитаксиального выращивания;
- масс-спектрометрический контроль потоков;
- механизмы роста тонких пленок;

- механизмы роста нитевидных кристаллов;
- кластерный механизм формирования наноразмерных структур;
- метод дифракции электронов и оборудование для его применения;
- методы электронной микроскопии и оборудование для их применений;
- методы обработки полученных дифракционных данных;
- методики зондовой микроскопии;
- методы роста тонких пленок и исследования структуры и морфологии поверхности;
- физико-химические принципы получения основных форм органических и биоорганических материалов и систем;
- основы оптических методов, методов рентгеновской и электронной кристаллографии для структурной диагностики органических и биоорганических материалов и систем;
- методы компьютерного моделирования органических и биоорганических материалов и систем.

2. Уметь:

- осуществлять сбор, обработку и систематизацию научной информации по заданному направлению профессиональной деятельности, применять для этого современные информационные технологии;
- подготавливать образцы для исследования;
- проводить эксперименты по выращиванию кристаллов;
- проводить характеризацию кристаллов и определять критические факторы процесса их роста;
- оптимизировать процесс выращивания кристаллов;
- осуществлять системный подход к анализу научных исследований;
- 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;
- осуществлять процесс эпитаксии и *in situ* контроль структуры пленок, сбор, обработку и систематизацию научной информации по заданному направлению профессиональной деятельности, применять для этого современные информационные технологии;
- подготавливать образцы для исследования;
- проводить дифракционный эксперимент;
- определять пробную модель структуры;
- строить модель зародышеобразования;
- работать с данными зондовой микроскопии;
- работать с данными электронной микроскопии;
- 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;
- выполнять компьютерное моделирование исследуемых объектов;
- изготавливать образцы органических и биоорганических материалов и систем;
- проводить структурные исследования образцов несколькими методами (оптическими, рентгеновскими и/или электронными);
- проводить обработку экспериментальных данных рентгеновских и/или электронных методов исследования.

3. Владеть:

- навыками работы с литературой по современным методам роста кристаллов;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории, в библиотеке и Интернете;
- культурой постановки и проведения экспериментов по росту кристаллов;
- 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), соотнесенные 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) - Знать 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)- Уметь анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов.</p> <p>У2 (УК-1) – Уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений.</p> <p>В1 (УК-1)- Владеть навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>В2 (УК-1)- Владеть 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) - Знать особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах.</p> <p>У1 (УК-3)- Уметь 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)- Уметь 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)- Владеть 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)- Владеть 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) - Знать современные методы и технологии научной комму-</p>

	<p>никации на государственном и иностранном языках.</p> <p>32 (УК-4) – Знать стилистические особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме на государственном и иностранном языках</p> <p>У1 (УК-4)- Уметь следовать основным нормам, принятым в научном общении на государственном и иностранном языках</p> <p>В1 (УК-4)- Владеть навыками анализа научных текстов на государственном и иностранном языках.</p> <p>В2 (УК-4)- Владеть навыками критической оценки эффективности различных методов и технологий научной коммуникации на государственном и иностранном языках</p> <p>В3 (УК-4)- Владеть различными методами, технологиями и типами коммуникаций при осуществлении профессиональной деятельности на государственном и иностранном языках.</p>
ОПК-1	<p>31 (ОПК-1)- Знать современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности.</p> <p>У1 (ОПК-1)- Уметь выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования.</p> <p>В1 (ОПК-1)- Владеть 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)- Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов</p> <p>В3 (ОПК-1)- Владеть навыками представления и продвижения результатов интеллектуальной деятельности</p>
ПК-1	<p>31 (ПК-1)- Знать современное состояние науки в соответствии с направленностью подготовки</p> <p>У1 (ПК-1)- Уметь рационально и эффективно использовать фундаментальные знания для постановки и осуществления теоретических и экспериментальных исследований.</p> <p>В1 (ПК-1)- Владеть методами планирования, подготовки, проведения научных исследований, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций по направленности подготовки.</p>
ПК-2	<p>31 (ПК-2)- Знать особенности составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, статей и докладов.</p> <p>У1 (ПК-2)- Уметь применять на практике навыки составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей.</p> <p>В1 (ПК-2)- Владеть навыками составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей.</p>
ПК-3	<p>31 (ПК-3)- Знать информационные технологии, программное обеспечение и ресурсы сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов.</p> <p>У1 (ПК-3)- Уметь 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)- Владеть 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.	Термодинамика, кинетика и механизмы кристаллизации.	12
2.	Методы выращивания кристаллов.	8
3.	Образование дефектов при росте кристаллов и взаимосвязь между условиями роста и реальной структурой кристаллов.	8
4.	Массоперенос при росте кристаллов и его влияние на процессы кристаллизации.	8
5.	Особенности образования кристаллов в многокомпонентных и многофазных системах.	8
6.	Методы роста тонких пленок. Принципы работы современных экспериментальных установок для молекулярно-лучевой эпитаксии.	8
7.	Механизмы роста тонких пленок. Кластерный механизм формирования наноразмерных структур.	8
8.	Метод дифракции электронов для исследования кристаллической структуры.	8
9.	Основные модели и теория роста нитевидных кристаллов.	12
9.1.	Механизмы роста нитевидных кристаллов.	
9.2.	Структурный анализ нитевидных кристаллов.	
9.3.	Прикладные свойства нитевидных кристаллов.	
10.	Физико-химические принципы создания и функционирования органических и биоорганических материалов и систем.	12
11.	Методы получения органических и биоорганических материалов и систем.	6
12.	Методы исследования структурной организации органических и биоорганических материалов и систем.	6
13.	Экзамен/зачет	4
ВСЕГО (часов)		108

Вид занятий

Лекции:

№ п/п	Название темы	Количество часов
1.	Термодинамика, кинетика и механизмы кристаллизации.	2
2.	Образование дефектов при послойном росте кристаллов	2
3.	Методы выращивания кристаллов	2
4.	Возможности получения совершенных кристаллов в условиях микрогравитации	2

5.	Образование дефектов при росте кристаллов и взаимосвязь между условиями роста и реальной структурой кристаллов. Особенности образования кристаллов в многокомпонентных и многофазных системах.	2
6.	Молекулярно-лучевая эпитаксия – технология получения тонких плёнок. Методы исследования МЛЭ. Методы роста тонких плёнок. Установка МЛЭ.	2
7.	Импедансная спектроскопия, введение.	2
8.	Дефекты в кристаллах, динамика дислокаций, механизмы пластичности. Взаимодействие дефектов, магнитопластический эффект.	2
ВСЕГО (часов)		16

Практические занятия:

№ п/п	Название темы	Количество часов
1.	Методы выращивания кристаллов.	8
2.	Молекулярно-лучевая эпитаксия – технология получения тонких плёнок. Методы исследования МЛЭ.	4
3.	Методы роста тонких плёнок. Установка МЛЭ.	4
ВСЕГО (часов)		16

Самостоятельная работа:

№ п /п	Название темы	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.	42
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.	18
3.	Подготовка к экзамену	12
ВСЕГО (часов)		72

Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела	Содержание раздела	Объем	
			Ауди-торная работа (часы)	Самосто-ятельная работа (часы)
1.	Термодинамика, кинетика и механизмы кристаллизации.	Фазовые равновесия и термодинамические функции. Фазовые переходы и зародышевое образование. Нормальный и послыйный рост кристаллов. Диффузионный и кинетический режимы роста. Пограничный слой. Источники ростовых ступеней. Кинетика ступеней.	2	10
2.	Методы выращивания кристаллов.	Аппаратура и методы выращивания кристаллов из растворов, расплава и газовой фазы. Молекулярно-пучковая эпитаксия. Скоростные методы выращивания кристаллов. Методы кристаллизации белков.	6	2
3.	Образование дефектов при росте кристаллов и взаимосвязь между условиями роста и реальной структурой кристаллов.	Основные типы ростовых дефектов: дислокации, включения, неоднородность состава. Особенности образования дефектов при различных условиях роста кристаллов: нормальный и послыйный рост, рост из расплава и растворов, рост из газовой фазы и молекулярных пучков. Влияние морфологии грани на образование дефектов при послыном росте: конкуренция источников роста, морфологическая нестабильность, движение макроступеней. Захват примеси. Взаимосвязь условий роста кристалла и распределения в нем дефектов структуры. Возможности восстановления условий роста кристалла по данным о его дефектной структуре. Возможности управления дефектной структурой кристалла.	2	6
4.	Массоперенос при росте кристаллов и его влияние на процессы кристаллизации.	Массоперенос при росте кристаллов. Термогравитационная и термокапиллярная конвекция. Влияние конвекции на вхождение примеси в кристалл: модели Тиллера и Бартона-Прима-Слихтера. Стационарный и переходный режимы. Возможность восстановления параметров роста кристаллов по данным о распределении примеси. Выращивание кристаллов в условиях микрогравитации. Бесконтактный рост. Кристаллизация белков в космосе.	0	8
5.	Особенности образования кристаллов в многокомпонентных и многофаз-	Смешанные кристаллы и понятие о реакции изоморфного замещения. Процессы, происходящие на начальной стадии эпи-	2	6

	ных системах.	таксии. Объемно-дефицитное и объемно-избыточное замещение. Механизмы реакции изоморфного замещения и их связь с параметрами системы. Влияние упругих напряжений. Метастабильное равновесие при изоморфном замещении. Мозаичная микронеоднородность смешанных кристаллов.		
6.	Методы роста тонких пленок. Принципы работы современных экспериментальных установок для молекулярно-лучевой эпитаксии.	Методы выращивания тонких пленок: вакуумное испарение, эпитаксиальное выращивание, перекристаллизация, термическое вакуумное напыление, катодное и ионно-плазменное напыление, анодирование, электрохимическое осаждение. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии. Устройство установки: вакуумная камера, насосы, манипулятор, молекулярные источники, криопанели, системы контроля ростовых параметров, автоматизация, подложки. Масс-спектрометрический контроль потоков.	4	4
7.	Механизмы роста тонких пленок. Кластерный механизм формирования наноразмерных структур.	Механизм послойного роста (Франка-ван дер Мерве), механизм островкового роста (Вольмера-Вебера), механизм роста Странского-Крастанова. Построение модели роста. Кластерный механизм формирования наноразмерных структур.	2	6
8.	Метод дифракции электронов для исследования кристаллической структуры.	Методы диагностики. Основы метода дифракция быстрых электронов на отражение. Устройство: электронная пушка; люминисцентный экран; регистрирующая система. Слежение в реальном времени за следующими параметрами роста: чистота поверхности; температура образца; ориентация подложки; скорость роста.	4	4
9.1.	Основные модели и теория роста нитевидных кристаллов (ВИСКЕРОВ). Механизмы роста нитевидных кристаллов	Кинетика роста нитевидных кристаллов по механизму пар-жидкость-кристалл. Роль жидкой фазы при росте НК. Диффузионно-капельная модель роста нитевидных кристаллов из газовой фазы. Управляемое выращивание нитевидных кристаллов.	2	4
9.2.	Структурный анализ нитевидных кристаллов (ВИСКЕРОВ).	Первичный анализ морфологии нитевидных кристаллов методом оптической микроскопии. Анализ морфологии и структуры нитевидных кристаллов методами электронной микроскопии (в растровом и просвечивающем режимах).	2	2
9.3.	Прикладные свойства нитевидных кристаллов (ВИСКЕРОВ).	Нитевидные кристаллы как идеальная модель с рекордными прочностными характеристиками. Актуальность структуры нитевидных кристаллов как одномерного	0	2

		нанообъекта для решения современных прикладных задач.		
10.	Физико-химические принципы создания и функционирования органических и биоорганических материалов и систем.	<p>Функциональные органические, биоорганические и гибридные материалы и системы.</p> <p><i>Органические и нанокомпозитные капсулы:</i> Типы органических капсул. Принципы формирования капсул, инкапсулирования целевых веществ и контролируемого высвобождения инкапсулированного материала. <i>Органические пленки:</i> Принципы формирования тонких органических пленок. Модели биологических мембран. Оптические свойства органических тонких пленок.</p> <p><i>Биомакромолекулы и их комплексы:</i> Физико-химические свойства белков, условия стабильности белковых растворов. Структурная организация белков. Закономерности структуры белков. Уровни структурной организации белков.</p>	2	10
11.	Методы получения органических и биоорганических материалов и систем.	<p><i>Органические и нанокомпозитные капсулы:</i> Способы создания полимерных капсул. Модификация оболочек капсул наночастицами и молекулами флуоресцентных красителей.</p> <p><i>Органические пленки:</i> Методы получения тонких органических пленок на различных подложках. Ленгмюровские монослои и пленки, методы получения.</p> <p><i>Биомакромолекулы и их комплексы:</i> Выделение и очистка белков. Методы ионообменной, аффинной, гидрофобной хроматографии, гель-электрофореза. Кристаллизация белков.</p>	2	4
12.	Методы исследования структуры и свойств органических и биоорганических материалов и систем.	<p><i>Органические и нанокомпозитные капсулы:</i> Исследование структуры оболочек капсул с использованием методов: конфокальной микроскопии, динамического светорассеяния, малоуглового рентгеновского рассеяния, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. Исследование проницаемости капсул и их устойчивости с использованием методов: спектрофотометрии, конфокальной микроскопии, динамического светорассеяния.</p> <p><i>Органические пленки:</i> Методы исследования органических пленок на поверхности жидкости: метод изотермы сжатия, измерение поверхностного потенциала, эллипсометрия, брьюстеровская микроскопия, метод стоячих рентгеновских волн в обла-</p>	2	4

		<p>сти полного внешнего отражения. Исследование структуры органических пленок на твердых подложках методами рентгеновской и электронной кристаллографии на лабораторных и синхротронных установках. Моделирование упаковки молекул в монослоях на поверхности жидкости и на подложках.</p> <p>Методы исследования оптических свойств органических пленок. Исследования устойчивости образцов к внешним воздействиям методами рентгеновской и электронной кристаллографии.</p> <p><i>Биомакромолекулы и их комплексы:</i></p> <p>Исследование пространственной структуры белков методом рентгеноструктурного анализа. Выращивание белковых кристаллов для структурного исследования.</p> <p>Сбор и обработка дифракционных данных. Методы решения пространственных структур: изоморфное замещение, молекулярное замещение.</p> <p>Интерпретация карт электронной плотности. Уточнение пространственных структур белков. Основы методов компьютерного молекулярного моделирования.</p> <p>Методы компьютерного молекулярного моделирования.</p>		
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

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

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

Вид дисциплины		Компетенции Наименование дисциплины	Универсальные компетенции					Обще-профессиональные 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	«Рост кристаллов»	+		+	+		+		+	+	+		

Критерии оценивания компетенций приведены в ООП по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Физика конденсированного состояния» (01.04.07), 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. Дайте определение термодинамического потенциала, свободной энергии и химического потенциала системы.
2. Сформулируйте правило фаз для изолированной равновесной термодинамической системы, состоящей из K компонентов и N фаз.
3. Дайте определение стабильной, метастабильной и лабильной областей существования фазы.
4. Какие факторы влияют на ширину метастабильной области?
5. Перечислите возможные положения атома или молекулы на поверхности растущей грани кристалла с простой кубической решеткой.
6. На какой из поверхностей растущей грани кристалла: атомно-гладкой или атомно-шероховатой возможен нормальный рост кристалла?
7. Сформулируйте критерий Джексона дайте примеры его значений в зависимости от вида жидкой фазы.
8. В каком из режимов роста кристаллов: кинетическом или диффузионном скорость роста грани лимитируется элементарными процессами встраивания частиц в растущую грань кристалла?
9. Какой одномерный дефект образует незарастающую ростовую ступень на поверхности грани кристалла?
10. Как зависит толщина диффузионного пограничного слоя раствора, образующегося вблизи растущей грани кристалла от коэффициентов диффузии и кинематической вязкости в растворе?
11. Как можно искусственно уменьшить толщину диффузионного слоя у растущей грани? Как должна измениться при этом скорость роста грани?
12. Как величина критического радиуса зародыша связана с величиной пересыщения?
13. Сформулируйте уравнение Гиббса-Томсона, показывающее зависимость химического потенциала частицы от ее размера.
14. Перечислите тигельные и бестигельные методы выращивания кристаллов из расплава.
15. Какой из методов выращивания кристаллов из расплава используется для химической очистки кристаллизуемого вещества?
16. Чем метод Киропулоса принципиально отличается от метода Чохральского?
17. Какой из методов выращивания кристаллов из расплава спустя более 100 лет с момента его изобретения не претерпел принципиальных изменений?
18. Назовите особенности метода объемной паровой фазы.
19. Как можно повысить активность поверхности подложки при кристаллизации из газовой фазы?
20. Какой из методов роста из газовой фазы позволяет формировать многослойные структуры с резкими границами между слоями (резкие p-n переходы)?
21. Перечислите методы физической конденсации и химические методы кристаллизации.
22. На какие группы по способу создания пересыщения делятся методы роста из раствора?
23. Какой из методов роста кристаллов из низкотемпературных растворов подходит для кристаллизации для соединений, обладающих ретроградной растворимостью?
24. Перечислите механизмы образования включений в кристаллах.

29. Что такое «мертвая зона»?
30. Каковы механизмы захвата включений различной природы при росте кристаллов из расплава и раствора?
31. Что подразумевается под барьером (частоколом) Кабрера и Вермили?
32. В чем сходство и отличие в построении фазовых изотермических диаграмм, построенных по способам Гиббса-Розебома и Скрейнмакера?
33. Назовите причины, определяющие зональность смешанных кристаллов.
34. Перечислите три стадии процесса роста кристалла при взаимодействии с жидкой фазой неравновесного ему состава.
35. Какой тип дефектов характерен в кристаллах смешанного состава при объемно-дефицитном замещении?
36. Назовите лимитирующую стадию процесса объемно-избыточного монокристаллического замещения.
37. При каких соотношениях растворимостей кристалл – растворенный компонент происходит процесс объемно-дефицитного замещения?
38. Перечислите механизмы образования дефектности смешанных кристаллов.
39. Каков механизм релаксации упругих напряжений несоответствия при гетероэпитаксиальном росте из расплава / раствора?
40. В чем причины возникновения мозаичной неоднородности смешанных кристаллов?
41. Какие явления обуславливают массоперенос при росте кристалла?
42. Какие виды конвекции Вам известны и что является их движущей силой?
43. Постановка краевой задачи для уравнения конвективной диффузии.
44. Как концентрация примеси в кристалле зависит от скорости его роста и интенсивности перемешивания жидкой фазы?
45. Какие факторы влияют на массоперенос при росте кристаллов в космосе?
46. При каких условиях может быть осуществлен бесконтактный рост кристаллов?
47. Какие факторы влияют на структурное совершенство кристаллов при выращивании их из расплава в космосе?
48. При каких условиях реализуются диффузионный и кинетический режимы роста кристаллов?
49. Как структурное совершенство кристалла связано с режимом его роста?
50. Почему в общем случае рост неорганических кристаллов из растворов в космосе приводит к снижению их структурного совершенства?
51. Почему в общем случае рост кристаллов белков в космосе приводит к повышению их структурного совершенства?
52. Назовите методы современной микроэлектроники, которые являются вспомогательными для метода ПЖК при создании заданных структур на основе нитевидных кристаллов? (ответ: фото-, электроно-, рентгено- и контактная литографии; жидкостное или сухое травление; напыление материалов растворителя, окислительно-диффузионные реакции).
53. Назовите прикладные направления, основанные на тех или иных свойствах нитевидных кристаллов (ответ: механические, автоэмиссионные и опто-электрические).
54. Перечислите известные вам конкретные существующие прикладные решения на основе нитевидных кристаллов (ответ: тензодатчики, сверхпрочные материалы, дисплеи, элементная база СВЧ-приборов, элементная база фотовольтаики, ключевой расходный материал для сканирующей зондовой микроскопии – вискерный зонд/кантилевер).
55. Методы получения тонких пленок (термическое испарение на подложках осаждаемых веществ в вакууме, осаждение из молекулярных пучков, катодное распыление и его модификации, химическое осаждение и др.).
56. Методы характеристики тонких пленок (зондовая и электронная микроскопия, рентгеновская и электронная дифракция, и др.).
57. Физические модели начальных стадий конденсации на базе модели Френкеля.

58. Теория образования зародышевых кристаллов Родина-Уолтона и их ориентация на подложках.
59. Явление эпитаксии. Гомогенная и гетерогенная эпитаксия.
60. Химическое взаимодействие осадка с поверхностью подложки и его роль при эпитаксиальном наращивании пленки.
61. Динамика роста островков в процессе присоединения атомов.
62. Особенности роста металлических осадков и полупроводников.
63. Влияние геометрических неровностей поверхности подложки на процесс роста осадков.
64. Явление декорирования ступеней поверхностей образующимися островками.
65. Образование ориентированных островков на регулярном рельефе поверхностей подложек. Явление графоэпитаксии.
66. Изоморфизм и эпитаксия.
67. О возможности псевдоморфизма при эпитаксии.
68. Анодные окисные пленки металлов.
69. Роль дислокаций и точечных дефектов поверхностей подложек при кристаллизации различных веществ.
70. Образование дислокаций и дефектов упаковки в зоне раздела пленка-подложка.
71. Миграция адатомов, кластеров и наноструктур по поверхности подложки и ее роль при эпитаксии.
72. Каковы механизмы развития напряжений в системе пленка-подложка?
73. Каковы особенности механизмов роста Франка-ван дер Мерве, Вольмера-Вебера, Странского-Крастанова?
74. Какова зависимость изменения свободной энергии от размера зародыша при кристаллизации?
75. Механизмы синтеза нитевидных нанокристаллов на подложках.
76. Что является критерием степени покрытия подложки монослоем в технологии Ленгмюра-Блоджетт?
77. Какой зависимостью описывается состояние ленгмюровского монослоя при постоянной температуре?
78. Перечислите основные фазовые превращения, которые претерпевает монослой в процессе сжатия.
79. Перечислите основные методы переноса ленгмюровских монослоев на твердые подложки.
80. Какие свойства подложки будут оказывать наибольшее влияние на процесс переноса и структуру органического монослоя в ленгмюровской технологии?
81. Какие органические молекулы способны формировать монослой на границе раздела жидкость/воздух?
82. Сколько аминокислот образует все многообразие белков?
83. Перечислите основные методики кристаллизации белков.
84. Перечислите основные пути решения фазовой проблемы рентгеноструктурного анализа белковых кристаллов.
85. Перечислите основные методы исследования структуры белков.
86. Назовите основное ограничение применения рентгеноструктурного анализа для исследования белков.
87. Перечислите уровни структурной организации белков.
88. Насколько скорость роста белковых кристаллов меньше скорости роста неорганических кристаллов?

10.2.2. Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена/зачета.

Фазовые равновесия с учетом поверхностной энергии. Движущая сила кристаллизации. Гомогенное и гетерогенное образование зародышей. Критерий Джексона.

Форма роста, источники слоев и скорости роста граней. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации.

Образование дислокаций при росте кристаллов из растворов и расплава. Кинетика дислокационного роста и двумерного образования зародышей. Захват примесей: механизмы релаксации кристалла. Зонарное и секториальное строение кристалла. Механизмы захвата включений различной природы. Экспериментальные методы исследования реальной структуры кристаллов, поверхностей, кристаллизационных сред и процессов. Оптические, рентгеновские, электронномикроскопические методы. Методы кристаллизации из растворов, расплавов, паровой фазы.

Выращивание кристаллов из газовой фазы. Общие физико-химические закономерности. Методы роста тонких пленок. Методы молекулярных пучков, объемной паровой фазы. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии. Основные узлы установки для проведения молекулярно-лучевой эпитаксии.

Механизм послойного роста (Франка-ван дер Мерве). Механизм островкового роста (Вольмера-Вебера). Механизм Странского - Крастанова.

Построение модели роста. Кластерный механизм формирования наноразмерных структур. В чем суть метода ПЖК? Какой прикладной ресурс для создания структур он дает?

Три фактора управляемости при использовании метода ПЖК.

Как зависит скорость роста нитевидных кристаллов от их радиуса?

Коэффициент эффективности жидкой фазы при росте нитевидного кристалла.

Какую грань используют для формирования ориентированной структуры нитевидного кристалла?

Методы химического транспорта. Механизм роста пар-жидкость-кристалл (ПЖК).

Выращивание кристаллов из растворов. Гидротермальный синтез.

Выращивание кристаллов из раствора в расплаве.

Механизмы рекристаллизации при отжиге кристаллов.

Основные методы выращивания кристаллов из расплава. Методы Киропулоса и Чохральского, Стокбаргера-Бриджмена, Вернейля. Зонная плавка.

Основы метода дифракция быстрых электронов на отражение. Основы зондовой микроскопии. Основы электронной микроскопии.

Слежение в реальном времени за следующими параметрами роста: чистота поверхности; температура образца; ориентация подложки; скорость роста.

Уравнение конвективной диффузии. Конвекция Марангони.

Свойства диаграмм Скрейнмакера. Критерий объемно-дефицитного и объемно-избыточного замещения. Причины, определяющие зонарность смешанных кристаллов.

Принципы органической кристаллохимии. Строение органических молекул и их упаковка в кристалле. Кристаллы полимеров. Биологические структуры.

Типы и принципы формирования органических капсул и тонких пленок (в том числе упорядоченных органических тонких пленок). Молекулярная организация и свойства биологических мембран. Особенности организации органических пленок на поверхности жидкости. Технология Ленгмюра-Блоджетт, молекулярная самосборка. Оптические, рентгеновские и электронографические методы структурной диагностики органических капсул и упорядоченных тонких пленок.

Белки, их строение, свойства, функции. Уровни структурной организации белков. Для чего необходимо знать трехмерные структуры белков.

Физико-химические свойства белковых растворов. Основные методы кристаллизации белков. Кристаллизация белков методом диффузии паров растворителя в висячей капле. Кристаллизация белков методом встречной диффузии. Свойства белковых кристаллов.

Основные этапы исследования пространственной структуры белков методом рентгеноструктурного анализа. Комплексы программ для решения задач белковой кристаллографии на ЭВМ. Возможности программ Mosfilm, Phaser, Refmac, Coot, PyMol.

11. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий:

При выполнении лабораторных 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, в том числе:

1. Просвечивающий электронный микроскоп FEI Osiris с X-FEG и SuperX детектором
2. Просвечивающий электронный микроскоп высокого разрешения Tecnai G30 STwin 300кВ Tecnai G30 ST 300кВ (FEI)
3. Исследовательский комплекс NTEGRA prima (HT-МДТ)
4. Высокорастворяющий автоэмиссионный растровый электронный микроскоп FEI Scios с ионной пушкой (FEI)
5. Рентгеновский дифрактометр Xcalibur STM (Oxford)
6. Растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 3D FIB с ионной пушкой (FEI)
7. Растровый электронный микроскоп JSM-7401F с автоэмиссионным катодом (JEOL)
8. Рентгеновский малоугловой дифрактометр SAXS-2D (HECUS X-raysystem GmbH GRAZ) с двумя позиционно-чувствительными детекторами
9. УФ-спектрофотометр Lambda 650 (PerkinElmer)
10. Атомно-силовой микроскоп SolverPro M (HT-МДТ)
11. Криогенный просвечивающий электронный микроскоп Tecnai G2 SPIRIT (FEI)
12. Установка молекулярно-лучевой эпитаксии Pfeiffer Vacuum
13. Нанотвердомер Nanoscan 3D (ТИСНУМ)

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. Зишль, Д. Роньян, Г. Фолькерс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 318с.:
12. Хельтье Х.-Д. Молекулярное моделирование: теория и практика / Х.-Д. Хельтье, В. Зишль, 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.:

РИНЦ	https://elibrary.ru/orgs.asp
Web of Science	http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=F2LiEv3BvmxwoCqmOmV&preferencesSaved=
Scopus	https://www.scopus.com/home.uri
Google Scholar citations	https://scholar.google.ru/citations?user=NbJEoV8A-AAAJ&hl=ru
IOP Institute of Physics материалы компании IOP Publishing Limited, а именно, база данных IOP Journal	http://www.iop.org/
AIP материалы компании American Institute of Physics	https://www.aip.org/
CASC материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных CASC	https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases
APS Журналы Американского физического общества база данных APS Online Journals	https://www.aps.org/
IEEE материалы компании The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, а именно, база данных IEEE/IEL	http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp
RSC материалы Royal Society of Chemistry	http://pubs.rsc.org/
Wiley материалы компании John Wiley & Sons Ltd., а именно база данных Wiley Journals	http://onlinelibrary.wiley.com/
Inspec материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных INSPEC	https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases/inspec
ProQuest материалы компании и PROQUEST LLC, а именно база данных Proquest Dissertations and Theses Global	https://www.proquest.com/products-services/pqdtglobal.html
SpringerNature	

Зарубежные электронные ресурсы издательства, а именно: Springer Journals Springer Protocols Springer Materials Springer Reference zbMATH Nature Journals Nano Database	http://link.springer.com/ http://www.springerprotocols.com/ http://materials.springer.com/ http://link.springer.com/search?facet-content-type=%22ReferenceWork%22 http://zbmath.org/ http://npg.com/ https://nano.nature.com
Elsevier B.V. Science Direct Complete Freedom Collection зарубежные электронные ресурсы издательства Elsevier «Freedom Collection» и коллекция электронных книг «Freedom Collection eBook collection», размещенных на платформе Science Direct	https://www.elsevier.com/
CCDC - Cambridge Crystallographic Data Centre Зарубежные электронные ресурсы Кембриджского центра структурных данных	https://www.ccdc.cam.ac.uk/
Scifinder База данных	https://scifinder.cas.org

Программное обеспечение:

Наименование программного обеспечения	Официальный сайт
CrysAlisPro Software System, Version 1.171.39.46, Rigaku	Rigaku Oxford Diffraction, <i>CrysAlisPro Software System</i> , Version 1.171.39.46, Rigaku Corporation, Oxford, UK).
Crystallographic Computing System JANA2006 SHELX	Petricek, V.; Dusek, M.; Palatinus, L. Crystallographic Computing System JANA2006: General Features. // Z. Kristallogr. 229 (2014) 345-352.
Charge Flipping in Superspace	Palatinus, L. Ab Initio Determination of Incommensurately Modulated Structures by Charge Flipping in Superspace. // Acta Crystallogr. A60 (2004) 604-610.
GROMACS	http://www.gromacs.org
CCP4	http://www.ccp4.ac.uk/
Phenix	https://www.phenix-online.org
XDS	http://xds.mpimf-heidelberg.mpg.de

Autodock Vina	http://vina.scripps.edu
Pymol	https://pymol.org
Nova Px	https://www.ntmdt-si.com/
JEMS (Java Electron Microscopy Simulation)	http://www.jems-saas.ch/Home/jemsWebSite/jems.html
АнНа (Анализатор Наночастиц)	https://crys.ras.ru/struktura-instituta/nauchnye-podrazdeleniya/otdel-elektronnoj-kristallografii/laboratoriya-elektronografii

13. Язык преподавания - русский.