

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

« 22 »

2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

ДИСЦИПЛИНЫ

«ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ»

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

Москва
2020

Программа дисциплины «Физические свойства реальных 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.;
- Программа кандидатского минимума и паспорта 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: к.ф.-м.н. Фролов К.В.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Физические свойства реальных кристаллов» ставит своей **целью**: приобретение аспирантами теоретических и практических навыков, необходимых для моделирования структуры и исследования свойств неорганических и органических материалов, включая механические, оптические, электрические, магнитные, в том числе методами мессбауэровской спектроскопии и атомно-силовой микроскопии.

Задачами данного курса являются:

- изучение базовых представлений о современных методах моделирования структуры и свойств неорганических и органических материалов;
- изучение базовых представлений о современных методах исследования механических свойств кристаллов;
- ознакомление с базовыми представлениями об актуальных проблемах физики сегнето-электричества;
- ознакомление с базовыми представлениями о применении и основах физики жидких кристаллов, современными методами исследования их свойств;
- ознакомление с базовыми представлениями о исследовании конденсированного состояния с использованием ядерных резонансных методов исследования конденсированного состояния;
- ознакомление с базовыми представлениями о различных современных методиках атомно-силовой микроскопии для исследования поверхности кристаллов и пленок;
- формирование у аспирантов способности использовать полученные знания при сборе экспериментальных данных, их обработке, анализе полученных результатов, проведении анализа связи между реальной структурой кристаллов и их физическими свойствами.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Физические свойства реальных кристаллов» входит в Блок 1 (Дисциплины по выбору) 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.ДВ.1

3. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.

4. ГОД И СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ (если есть)

Второй год, первый и второй семестры обучения.

5. ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ.

Вариативная часть, в т.ч.:	5 зач. ед.
Лекции	36 часов
Семинары и практические занятия	16 часов
Лабораторные работы	нет часов

Индивидуальные занятия с преподавателем	нет часов
Самостоятельные занятия	120 часов
Экзамен/зачет	8 часов
ВСЕГО	5 зач. ед., 180 часов

6. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины «Физические свойства реальных 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);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- готовность 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 «Физические свойства реальных кристаллов» обучающийся должен:

1. **Знать:**

- современные методы моделирование дифракции фотонов и нейтронов в средах сложной структуры;
- современные методы многомасштабного моделирования физических процессов в

- конденсированных средах;
- методы моделирования функциональных свойств перспективных оптических материалов;
- микроскопическую теорию конденсированных сред с магнитным упорядочением;
- теорию упругости анизотропных сред;
- основы теоретической кристаллоакустики;
- о различных дефектах решетки кристаллов и основах «инженерии дефектов»;
- о дислокациях и их роли в механических свойствах кристаллов;
- о методах механических испытаний кристаллов;
- о магнитоэластическом эффекте в немагнитных кристаллах;
- основные представления о средах без центра симметрии;
- феноменологическую теорию сегнетоэлектрических фазовых переходов;
- о существовании доменов и переполяризации в сегнетоэлектриках;
- природу электрооптического и нелинейно-оптического эффектов в сегнетоэлектриках;
- принципы практического использования сегнетоэлектриков;
- природу образования жидкокристаллических фаз;
- физические свойства ЖК и методы их исследования;
- электрооптические и фотонные свойства жидких кристаллов;
- принципы практического применения жидких кристаллов;
- особенности резонансных методов исследования конденсированного состояния;
- метод Ядерного магнитного резонанса и Мёссбауэровской спектроскопии;
- физические основы метода мультимодовой атомно-силовой микроскопии;
- устройство атомно-силового микроскопа;
- основы методологии атомно-силового микроскопии, выбора режима, выявления артефактов;
- принципы обработки АСМ-изображений;
- особенности применения АСМ для исследования локальных характеристик различных поверхностей (в том числе гетерогенных, электростатически неоднородных).

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 теоретического и экспериментального исследования структуры и свойств неорганических и органических материалов;
- достигать цели при получении необходимых теоретических и экспериментальных результатов;
- оценивать возможности и целесообразность применения различных методов атомно-силового микроскопии при исследовании поверхностей различных объектов;
- подготавливать образцы для исследования;
- проводить эксперимент;
- моделировать структуру перспективных материалов;
- 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 моделированию структуры и исследованию свойств неорганических и органических материалов;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории, в библиотеке и Интернете;
- культурой постановки и проведения эксперимента при исследовании свойств неорганических и органических материалов;
- 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), соотношенные 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</p>

	<p>деятельности по решению научных и научно-образовательных задач, в том числе ведущейся на иностранном языке</p>
УК-4	<p>31 (УК-4) - Знать современные методы и технологии научной коммуникации 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:

№ темы и название	Количество часов
1. Современные методы моделирования структуры и свойств неорганических и органических материалов.	16
2. Механические свойства кристаллов	34
3. Актуальные проблемы физики сегнетоэлектричества	34
4. Основы физики и применение жидких кристаллов	24
5. Ядерные резонансные методы исследования конденсированного состояния	24
6. Методы атомно-силовой микроскопии для исследования поверхности кристаллов и пленок	40
7. Экзамен/зачет	8
ВСЕГО (часов)	180

Вид занятий

Лекции:

№ п/п	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1.	Импедансная спектроскопия, введение	4
2.	Пьезо-, пиро- и сегнетоэлектричество в кристаллах	6
3.	Дефекты в кристаллах, динамика дислокаций, механизмы пластичности	6
4.	Взаимодействие дефектов, магнитоэлектрический эффект	4
5.	Основы мёссбауэровской спектроскопии	4
6.	Введение. Современная кристаллография и кристаллофизика в материаловедении	4
7.	Фазовые переходы - основные понятия	4
8.	Основы тензорного и симметричного описания физических свойств кристаллов	4
	ВСЕГО (часов)	36

Практические занятия:

№ п/п	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1.	Изучение механических свойств кристаллических поверхностей методами наноиндентирования и склерометрии	8
2.	Применение атомно-силовой микроскопии для исследования корреляции нанорельефа подложек и пленочных покрытий	8
ВСЕГО (часов)		16

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.	64
2.	Решение задач по заданию преподавателя. Решаются задачи, 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.	38
3.	Подготовка к зачету.	18
ВСЕГО (часов)		120

Содержание дисциплины

№ п/п	Название раздела	Название темы	Содержание	Объем	
				Ауди-торная работа (часы)	Самостоятельная работа (часы)

1.	I. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	Моделирование дифракции фотонов и нейтронов в средах сложной структуры	Рассеяние фотонов и нейтронов как метод исследования кристаллов с учетом сложных тензорных свойств и симметрии рассеивающих центров. Дифракция в резонансной области вблизи краев поглощения элементов и при наличии магнитного упорядочения. Поляризационные явления в оптике синхротронного излучения и нейтронов.	2	2
2.		Методы многомасштабного моделирования физических процессов в конденсированных средах	Теория функционала плотности: основы и практическая реализация (уравнения Кона-Шэма, аппроксимация обменно-корреляционной энергии, использование псевдопотенциала). Метод молекулярной динамики и его приложения к моделированию реальной структуры кристаллов. Расчеты структуры и энергии дефектов решетки с использованием межатомных потенциалов.	2	2
3.		Моделирование функциональных свойств перспективных оптических материалов	Теория формирования оптических свойств конденсированных сред. Оптические свойства композитов на основе металлических и полупроводниковых наночастиц и наноструктур. Квазистатистический подход к моделированию наноразмерных объектов.	2	2
4.		Микроскопическая теория конденсированных сред с магнитным упорядочением	Обменное взаимодействие и магнитное упорядочение в кристаллах. Моделирование пространственно неоднородных магнитных структур хиральных и фрустрированных магнетиков. Магнитоэлектрический эффект, мультиферроики I и II типов.	2	2
1.	II. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ	Теория упругости анизотропных сред	Термодинамика упругости. Связь симметрии кристаллов с физическими свойствами. Пьезоэлектричество и пьезомагнетизм. Уравнения движения и уравнения связи. Краевые условия. Структура материальных тензоров.	2	4
2.		Основы теоретической кристаллоакустики	Объемные волны. Уравнение Кристоффеля. Поперечные и продольные нормали. Типы акустических осей. Коническая и клиновая рефракция. Поверхностные, квазиобъемные и оттекающие волны. Отражение волн. Чистые и конверсионные отражения. Резонансные отражения в кристаллах.	2	4
3.		Дефекты решетки в кристаллах	Точечные дефекты: межузельные атомы и вакансии, межузельные «гантели» и бивакансии, примеси замещения и внедрения, комплексы. Линейные дефекты: дислокации и дисклинации. Атомные модели ядра дислокации. Основы «инженерии дефектов». Плоские дефекты: границы зерен, дефекты упаковки и двойники. Объемные дефекты: трещины,	2	4

			поры и включения. Искусственные границы зерен. Методы наблюдения дефектов.		
4.		Дислокации и их роль в механических свойствах кристаллов	Дальнодействующие упругие поля дислокаций. Релаксация внутренних напряжений. Механизмы движения дислокаций. Динамика дислокаций в кристаллах разных типов. Роль термоактивации и вязкого торможения. Методы экспериментального исследования подвижности индивидуальных дислокаций. Микро- и макропластичность. Линии и полосы скольжения.	2	4
5.		Методы механических испытаний кристаллов	Активная деформация и активное нагружение. Ползучесть. Релаксация напряжений. Предел текучести и предел упругости. Особенности высокотемпературной пластичности кристаллов: суперлокализация деформации. Микро- и нанотвердость материалов. Бездислокационные механизмы пластичности. Роль двойников в пластичности некоторых типов кристаллов и механохимии.	2	4
6.		Магнитоэластический эффект в немагнитных кристаллах	Магнитоэластичность в постоянном магнитном поле. Эффект <i>in situ</i> на уровне индивидуальных дислокаций и его макропроявления. Условия наблюдения и основные свойства. Эффекты магнитной памяти в разных материалах и в различных условиях. Резонансные проявления магнитоэластичности в условиях типа ЭПР. Особенности резонансов в сверхнизких магнитных полях (напр., поле Земли) с радиочастотной накачкой.	2	2
1.	III. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСТВА	Основные представления о средах без центра симметрии	Связь симметрии кристаллов с физическими свойствами. Пьезо-, пиро-, и сегнетоэлектрики.	2	4
2.		Феноменологическая теория сегнетоэлектриков, фазовые переходы	Термодинамический потенциал Ландау-Гинзбурга-Девоншира (ЛГД). Сегнетоэлектрические фазовые переходы I и II рода. Сегнетоэлектрики типа смещения и порядок-беспорядок. Границы применимости феноменологической теории. Размерные эффекты в сегнетоэлектричестве.	2	4
3.		Сегнетоэлектрическая переполаризация	Феноменологическая теория ЛГД и диэлектрический гистерезис. Переключения с образованием доменов. Модельное	2	4

		оптический эффект в сегнетоэлектриках	флект, фотоупругость. Нелинейно-оптический эффект, принципы преобразования частоты излучения.		
5.		Принципы практического использования сегнетоэлектриков, актуальные материалы	Устройства энергонезависимой памяти на сегнетоэлектрических пленках (PZT, BST, PTO). Применения сегнетоэлектриков в оптике электрооптические модуляторы; интегральная оптика; преобразование частоты излучения на сегнетоэлектрических доменах.	2	6
1.	IV. ОСНОВЫ ФИЗИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ	Жидкокристаллические фазы	История открытия жидких кристаллов (ЖК). Симметрия и структура жидкокристаллических фаз. Классификация жидкокристаллических фаз. Нематические и смектические ЖК. Хиральные ЖК. Сегнетоэлектричество в ЖК.	2	4
2.		Физические свойства ЖК и методы их исследования	Анизотропия физических свойств ЖК. Тензор диэлектрической анизотропии, коэффициенты упругости и вязкости. Континуальная теория жидких кристаллов. Граничные условия и способы ориентации ЖК. Жидкокристаллическая ячейка. Ориентационный переход Фредерикса. Методы измерения констант упругости, низкочастотной диэлектрической анизотропии и главных показателей преломления.	2	4
3.		Электрооптика и фотонные свойства жидких кристаллов	Электрооптические эффекты в однородно-ориентированных слоях ЖК и твист-структурах. Фотонные ЖК. Фотонные ЖК с люминесцирующими красителями и лазерный эффект.	2	4
4.		Применения жидких кристаллов	Жидкокристаллические модуляторы света. Принципы создания информационных жидкокристаллических дисплеев. Жидкие кристаллы в системах стереоскопического телевидения.	2	4
1.	V. ЯДЕРНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	Особенности резонансных методов исследования конденсированного состояния	Особенности резонансных методов исследования конденсированного состояния. Таблица характерных энергий. Момент количества движения ядра. Магнитный момент ядра. Гиромагнитное отношение. Квадрупольный момент ядра. Таблица ЯМР-ядер. Макроскопическая намагниченность. Вращающаяся система координат. Параметры ВЧ импульса. Основные импульсы. Метод спинового эха. Сигнал свободной индукции (FID). Фурье-спектроскопия. Блок-схема спектрометра ЯМР. Квадратурное детектирование. Датчик ЯМР. Практическая реализация.	2	6
2.		Метод ядерного магнитного резонанса	Спин-решеточная и спин-спиновая релаксация. Уравнение Блоха. Форма линии ЯМР. Химический сдвиг. Спектр	2	6

			ЯМР в монокристалле и порошке. Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР). Схема энергетических уровней для ядер со спином $I = 3/2$ в присутствии Зеемановского и квадрупольного взаимодействия различной интенсивности. Применение ЯМР в исследовании высокотемпературных сверхпроводников: вихревая магнитная решетка; магнитная структура в АФ-состоянии; исследование механизмов спаривания в ВТСП. Исследование основного состояния низкоразмерных спиновых систем.		
3.		Мёссбауэровская спектроскопия	Особенности резонансных методов исследования конденсированного состояния. История открытия эффекта Мёссбауэра. Элементарная теория эффекта Мёссбауэра. Основы мёссбауэровской (ЯГР) спектроскопии. Виды мёссбауэровской спектроскопии. Основные сверхтонкие параметры ЯГР спектров и их взаимосвязь со структурными, электронными и спиновыми состояниями мёссбауэровского атома. Изомерный (химический) сдвиг. Квадрупольное расщепление. Магнитное сверхтонкое поле на ядре и квадрупольный сдвиг. Классические мёссбауэровские эксперименты. Исследование методом ЯГР спектроскопии магнитных материалов. Исследование методом ЯГР спектроскопии физических свойств материалов при высоких давлениях. Исследование методом ЯГР спектроскопии наночастиц и наноструктур.	2	6
1.	VI. МЕТОДЫ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ	Физические основы метода мультимодовой атомно-силовой микроскопии. Устройство атомно-силового микроскопа	Основы физики локального взаимодействия атомно-силового зонда с поверхностью исследуемых материалов в различных средах (вакуум, газы, жидкости) на микроскопическом уровне. Устройство и принципы работы атомно-силового микроскопа. Зондовые датчики атомно-силовых микроскопов и их конструктивные параметры. Основные области применения АСМ и задачи, решаемые с помощью этого метода.	2	10
2.	КРИСТАЛЛОВ И ПЛЕНОК	Основы методологии атомно-силовой микроскопии. Выбор режима, выявление артефактов	Принципы формирования изображения. Зависимость силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца от расстояния. Особенности экспериментальных методик, использующихся в каждой из областей применения; различные модификации метода. Контактный режим, спектроскопия и резонансные режимы сканирования. Электрические модификации АСМ, магнитно-	2	10

			силовая микроскопия. Артефакты изображений, их классификация. Артефакты сканера и конволюционные артефакты. Контроль позиционирования зонда относительно образца. Капиллярные силы. Адсорбированный слой. Статический электрический заряд. Методы учета и исключения артефактов в процессе эксперимента и при анализе его результатов.		
3.		Обработка АСМ-изображений	Математический аппарат, используемый в методах обработки и анализа экспериментальных данных в АСМ. Визуализация данных АСМ. Методы фильтрации. Статистический анализ АСМ данных. Система параметров, характеризующая топографию поверхности. Методика статистического исследования рельефа наноструктурированных поверхностей материалов с помощью функции спектральной плотности мощности.	2	6
4.		Применение АСМ для исследования локальных характеристик различных поверхностей (в том числе гетерогенных электростатически неоднородных).	Подготовка образцов. Физическое материаловедение металлических, полупроводниковых, диэлектрических, оптических, пьезоэлектрических, полимерных материалов и наноструктур. Диагностика поверхности сегнетоэлектриков. Визуализация сегнетоэлектрических доменов. АСМ как инструмент нанотехнологий. Зондовая нанолитография. Применение в области молекулярной биологии: исследование вирусов, клеточных мембран, ДНК, белковых и др. органических молекул.	2	6
ВСЕГО (часов)				52	120

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	«Физические свойства ре-	+		+	+		+		+	+	+		

	плина	альных кри- сталлов».																		
--	-------	--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

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.

Раздел I. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Тема 1

Кинематическая и динамическая теория дифракции, пределы применимости. Двухволновое и многоволновое приближения. Резонансная дифракция вблизи краев поглощения и при наличии магнитного упорядочения. Запрещенные рефлексy в кристаллах сегнетомагнетиков. Сходство и различие поляризационных явлений для фотонов и нейтронов.

Тема 2

Вариационный принцип Хоэнберга-Кона. Приближение локальной плотности для обменно-корреляционной энергии. Принципы построения нормосохраняющих псевдопотенциалов в теории функционала плотности. Метод суперячеек для расчета электронной структуры неперодических систем.

Тема 3

Механизм формирования оптических свойств конденсированных сред. Теория локального поля. Квазистатическое приближение в оптике наноразмерных объектов. Оптические свойства композитов на основе наноразмерных частиц и структур. Функциональные свойства метаматериалов и субволновых решеток.

Тема 4

Обменное взаимодействие и магнитное упорядочение в кристаллах. Магнитоэлектрический эффект, симметрии, для которых он возможен. Мультиферроики I и II типов. Пространственно неоднородные магнитные структуры.

Раздел II. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ.

Тема 1

Сколько классов точечной симметрии кристаллов вы знаете? Приведите пример ацентрических (пьезоэлектрических) классов. Во что превращается закон Гука при переходе к пьезоэлектрикам? Что такое электрострикция и магнитоэлектричество? Существует ли пьезомагнетизм? Что такое линейаризованный пьезомагнетизм? Как выглядит динамическое уравнение упругости с учетом вязкости среды? Какого ранга тензор вязкости? Чему равна плотность упругой энергии деформированного тела? А кинетической энергии? Как выглядит механический вектор Пойнтинга? А с учетом вязкости?

Тема 2

Что такое поперечная нормаль, продольная нормаль, акустическая ось? Каково максимально возможное число продольных нормалей в кристалле? А поперечных нормалей? А акустических осей? Возможны ли кристаллы без продольных осей? А без поперечных нормалей? А без акустических осей? Напишите спектральное разложение тензора Кристоффеля. Как оно выглядит вдоль акустической оси? Что такое поверхностная волна? А оттекающая? А квазиобъемная? Каково максимальное число поверхностных волн (для одного среза) возможно в упругой среде? А в пьезоэлектрике? А в пьезоэлектрике-пьезомагнетике? Что такое особая объемная волна?

Бывают ли сверхзвуковые поверхностные волны? Что такое чистое отражение? А конверсионное? Как связаны между собой фазовая, групповая и лучевая скорости объемной волны в кристалле? А для поверхностной волны? Что такое волны Стоунли, Лява и Лэмба?

Тема 3

Что такое вакансии и межузельный атом? Как соотносится их число в кристалле? Чем отличается примесь замещения от примеси внедрения? Как точечные дефекты перемещаются по кристаллу? Что для них является движущей силой? Чем различаются краевая, винтовая и смешанная дислокации? А геликоидальная? Что такое дислокационное скопление? А дислокационная стенка? Как определяется дисклинация? Какова дислокационная модель дисклинации? Что такое частичные дислокации? Какое отношение они имеют к границам зерен? Можно ли создать искусственную границу зерна? Что такое дефект упаковки? А двойник? Как происходит пластическая деформация двойникованием? Чем отличается поря от трещины? Какие физические процессы в материалах определяются порями, а какие трещинами? Как растут первые, и как вторые?

Тема 4

Как спадает поле напряжений прямолинейной дислокации с удалением от нее? Чем в основном определяется релаксация напряжений в кристаллах? Что такое скольжение дислокации? А переползание? Что такое линия скольжения? А полоса скольжения? Как их наблюдают? Какие типы термоактивационных движений дислокаций вы знаете? Что такое динамическое торможение дислокаций? Как зависит скорость дислокации от напряжения и температуры при термоактивационном движении? А при надбарьерном движении? В каких условиях реализуется первое, и в каких – второе? Как экспериментально изучают динамику дислокаций?

Тема 5

Как экспериментально реализуется активная деформация кристаллов? А активное нагружение? В чем разница? А как ставятся эксперименты по ползучести кристаллов? Как изучают релаксацию напряжений? Для каких целей применяют каждый из методов испытаний? Что такое предел текучести кристалла? Как его измерить? От каких физических параметров испытаний он зависит и что характеризует? Что такое зуб текучести, площадка текучести? Какие стадии на кривых деформации вы знаете? Какие виды упрочнения вам известны? В чем особенности высокотемпературной деформации кристаллов? Как и при каких условиях проявляется в эксперименте суперлокализация пластической деформации? Как измеряют микро- и нанотвердость кристаллов? Какие механизмы бездислокационной пластичности вы знаете? В каких кристаллах и при каких условиях они реализуются?

Тема 6

Как зависит средний пробег дислокаций в магнитном поле от температуры, индукции магнитного поля, времени экспозиции, концентрации примеси? Какова физическая интерпретация этих зависимостей? Как зависит предел текучести кристалла при его активной деформации в магнитном поле от скорости этой деформации и величины магнитной индукции? Какие процессы определяют магнитный поря магнитопластичности? Чем отличаются эффекты *in situ* от эффектов магнитной памяти? Чем определяется резонансная частота магнитного поля накачки в опытах ЭПР типа? Зависит ли она от типа кристалла? А от его индивидуальных характеристик? А от его ориентации?

Раздел III. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСТВА.

Тема 1

32 класса точечной симметрии, ацентрические (пьезоэлектрические) классы. Тензорное описание свойств, тензоры четных и нечетных рангов; пьезоэлектрический эффект и электрострикция. Особая полярная ось, спонтанная поляризация, обращение спонтанной поляризации (сегнетоэлектричество). Принцип Неймана - Кюри.

Тема 2

Свободная энергия Гиббса, уравнения состояния с учетом нелинейных членов. Термодинамический потенциал Ландау-Гинзбурга, спонтанная поляризация как параметр порядка. Вид ЛГД потенциала для фазовых переходов I и II рода. Диэлектрический P-E гистерезис. Закон Кюри-Вейсса. Сегнетоэлектрики типа смещения (перовскиты) и порядок-беспорядок (KDP). Электрофизические методы исследования сегнетоэлектрических свойств и фазовых переходов.

Тема 3

Переполяризация реального сегнетоэлектрического кристалла, поле деполяризации; причина возникновения доменов. Энергия доменных стенок. Активационная модель переключения: механизм нуклеации, критический размер зародыша, механизм бокового движения доменной стенки. Связь формы доменов с симметрией кристалла. Методы исследования статики и динамики доменов (электрофизические, оптические, зондовая микроскопия).

Тема 4

Тензоры линейного и квадратичного электрооптического эффекта для кристаллов низших симметрий. Оптическая индикатриса, ее изменение при приложении поля в одноосных кристаллах. Связь электрооптических коэффициентов со спонтанной поляризацией в сегнетоэлектриках. Нелинейная поляризация. Условия фазового синхронизма и квазисинхронизма, преобразование излучения.

Тема 5

Применения сегнетоэлектриков: принцип сегнетоэлектрической памяти; электрооптические модуляторы; оптические волноводы на сегнетоэлектриках; преобразование частоты и пространственная модуляция лазерного излучения на доменных структурах, созданных различными методами.

Раздел IV. ОСНОВЫ ФИЗИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ.

Тема 1

Фазовые переходы в жидкокристаллических средах. Нематические и смектические ЖК фазы. Хиральные ЖК. Сегнетоэлектричество в хиральных смектиках.

Тема 2

Основы континуальной теории нематических ЖК (свободная энергия нематических ЖК). Методы измерения коэффициентов упругости и компонент тензора диэлектрической проницаемости. Положительная и отрицательная диэлектрическая анизотропия. Двухчастотные ЖК. ЖК в электрическом поле (переход Фредерикса). Главные показатели преломления ЖК и оптическая задержка. Использование рефрактометра Аббе для измерения главных показателей преломления.

Тема 3

Электрооптика однородно ориентированных слоев ЖК. Твист-эффект в ЖК. Оптические свойства холестерических жидких кристаллов. Понятие фотонной стоп-зоны. Лазерный эффект в холестерических ЖК.

Тема 4

Оптические элементы жидкокристаллических дисплеев (ЖКД). Способы формирования электрического поля в ЖКД. Типы электрооптических эффектов, используемых в ЖКД.

Раздел V. ЯДЕРНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.

1. Чем определяется квадрупольное взаимодействие?
2. Для каких ядер возможно наблюдение эффекта ЯКР, а для каких невозможно?
3. Наблюдается ли ЯКР в жидкостях?
4. Нарисуйте диаграмму уровней энергии и рассчитайте резонансную частоту для ядер со спином $I = 3/2$ в случае аксиально-симметричного градиента электрического поля.
5. Какова величина расщепления уровней энергии ядра со спином $3/2$ в кристаллическом поле (в кельвинах), если в эксперименте наблюдается сигнал на частоте 25 МГц?

6. Как определяется резонансная частота колебательного контура?
7. Как соотносятся квадрупольные частоты изотопов одного ядра?
8. Изменяется ли резонансная частота ЯКР с температурой?
9. Сколько резонансных линий наблюдается в ЯКР спектре фосфора ^{31}P ($I = 1/2$), хлора ^{35}Cl ($I = 3/2$)?
10. Какие ядра обладают магнитным моментом?
11. Как соотносятся частоты ЯМР изотопов одного ядра?
12. Каково отношение заселённостей уровней энергии ядра, находящегося в магнитном поле, если $T = 50 \text{ K}$ и резонансная частота 50 МГц ?
13. Сколько резонансных линий наблюдается в ЯМР спектре для протонов ^1H ($I = 1/2$), ядер висмута ^{209}Bi ($I = 9/2$) в кристаллографической позиции, обладающей кубической симметрией?
14. Сколько резонансных линий наблюдается в ЯМР спектре для ядер со спином $1/2$ и $3/2$, если: а) $\text{ГЭП} = 0$; б) $\text{ГЭП} \neq 0$?
15. На какой частоте будет наблюдаться сигнал для ядер фтора ^{19}F , фосфора ^{31}P , углерода ^{13}C , если эксперимент проводится в магнитном поле 7 Т ?
16. Каково соотношение интенсивностей ЯМР сигналов двух изотопов меди?
17. Каково соотношение частот ЯКР ядер ^{63}Cu и ^{65}Cu ?
18. Каково соотношение частот ЯМР ядер ^{63}Cu и ^{65}Cu ?
19. Какое выражение определяет частоту ЯМР?

$$\text{а) } \omega = \omega_Q \sqrt{1 + \eta^2/3}; \quad \text{б) } \omega = \frac{3e^2 Qq}{2I(2I-1)}; \quad \text{в) } \omega = \frac{e}{2mc} H; \quad \text{г) } \omega = \gamma \frac{H^2}{2e}$$

20. Для соединения NaCl какие спектры могут быть получены ($I(^{23}\text{Na}) = 3/2$, $I(^{35}\text{Cl}) = 3/2$)?
 - а) ЯКР ^{23}Na , ЯМР ^{35}Cl ;
 - б) ЯМР ^{23}Na , ЯКР ^{35}Cl ;
 - в) ЯМР ^{23}Na , ЯМР ^{35}Cl ;
 - г) ЯКР ^{23}Na , ЯКР ^{35}Cl .
21. Общая схема ядерных превращений в эффекте Мёссбауэра (схема, процессы ядерных превращений). Схема ядерных превращений для мёссбауэровского изотопа ^{57}Fe (схема, ядерные уровни, значения ядерных характеристик). Основные характеристики мёссбауэровских изотопов (название, обозначение, порядки величин).
22. Потеря энергии свободно покоящимся ядром на отдачу. Энергия отдачи (порядок величины, сравнение со временем жизни возбужденного состояния). Доплеровское уширение линии испускания ядра, участвующего в тепловом движении (форма и интегральная ширина линии, порядки величин).
23. Вероятность эффекта и колебательный спектр ядра (формула, физический смысл входящих в формулу величин, определение).
24. Схема проведения эксперимента. Мёссбауэровский спектрометр (функциональная схема, составные части спектрометра, основные режимы работы, схемы регистрации спектра).
25. Линии испускания и поглощения ядрами в твердом теле (рисунки, форма и ширина линий). Вероятность эффекта Мёссбауэра (формула).
26. Вероятность эффекта и площадь мёссбауэровской линии. Случай тонкого образца (формулы, физический смысл входящих в формулы величин).
27. Мёссбауэровский спектр (определение, рисунок). Огибающая мёссбауэровского спектра (формула, физический смысл входящих в формулу величин). Видимая и относительная величины эффекта, стандартное отклонение статистических ошибок интенсивности счета, эффективная толщина образца (формулы).
28. Электрическое монополярное взаимодействие и сдвиг мёссбауэровской линии (формулы, схема уровней, изомерный сдвиг, калибровочная константа, вид спектра).

29. Квадрупольное взаимодействие и сверхтонкая структура ядерных уровней (квадрупольный момент ядра, константа квадрупольного взаимодействия, гамильтониан, собственные значения, ядерные переходы, мёссбауэровский спектр).
30. Магнитный момент и спин ядра (орбитальный и спиновые моменты нуклонов, g-факторы, величина магнитного момента ядра).
31. Магнитное дипольное взаимодействие и сверхтонкая структура ядерных уровней (гамильтониан, собственные значения, константа сверхтонкого магнитного дипольного взаимодействия, схема уровней, ядерные переходы, мёссбауэровский спектр).
32. Особенности проведения ядерно-резонансных экспериментов при низких температурах. Использование криостатов.
33. Особенности проведения ядерно-резонансных экспериментов при высоких давлениях. Устройство специализированных камер высокого давления.

Раздел VI. МЕТОДЫ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ И ПЛЕНОК.

Тема 1

Физические основы метода мультимодовой атомно-силовой микроскопии. Устройство и принципы работы атомно-силового микроскопа. Принцип работы обратной связи. Зондовые датчики атомно-силовых микроскопов. Основные режимы работы АСМ. Возможности АСМ.

Тема 2

Формирование АСМ-изображения. Зависимость силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца от расстояния. Особенности экспериментальных методик сканирования в каждой из областей применения. Контактный режим, спектроскопия и резонансные режимы сканирования. Разрешающая способность АСМ. Электрические модификации АСМ. Классификация артефактов. Методы учета и исключения артефактов в процессе эксперимента и при анализе экспериментальных данных.

Тема 3

Методы обработки и анализа экспериментальных данных в АСМ. Визуализация данных АСМ. Методы коррекции изображений. Система параметров, характеризующая топографию поверхности. Шероховатость поверхности. Статистический анализ АСМ данных. Применение метода АСМ для исследования и контроля поверхности наноструктурированных поверхностей диэлектриков.

Тема 4

Особенности проведения экспериментов с поверхностью жестких и податливых материалов: подготовка образцов, подбор режимов работы и типа зондов. Диагностика электрически неоднородных поверхностей. Визуализация рельефа поверхности и доменной структуры сегнетоэлектриков. Микроскопия пьезоэлектрического отклика. Зондовая нанолитография. Применение метода АСМ для исследования полимерных материалов, наноструктур и объектов молекулярной биологии.

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.

Для осуществления научной деятельности аспирантам предоставляется рабочее место с возможностью использования персонального компьютера для необходимых расчетов, чте-

ния электронной литературы и доступа к интернет-ресурсам; также доступна библиотека ИК РАН. Для получения экспериментальных данных может быть использовано оборудование лабораторий Института и Центра коллективного пользования ИК РАН: **масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP-Q** (Предназначен для определения качественного и количественного состава образцов в жидком и твердом агрегатном состояниях. Позволяет определять микропримеси); **комбинированный ТГ-ДСК анализатор STA 449 F1 Jupiter** (Сочетает методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии в одном измерении); **исследовательский комплекс Ntegra Prima для атомно-силовой микроскопии в комплексе с чистой климатической зоной** (Для исследования пространственного распределения электрических, магнитных, механических, адгезионных свойств поверхности).

Для проведения практических занятий имеется набор стандартных и оригинальных методик:

- для исследования механических свойств кристаллов:

1) методики исследования индивидуальных дислокаций в кристаллах; 2) методики склерометрии и микроиндентирования; 3) методики активной деформации образцов на установке Instron; 4) методики внутреннего трения и дефекта модуля; 5) методики твердофазного срачивания кристаллов и создания искусственных межзеренных границ; 6) методики исследования магнитопластичности.

- для исследования свойств сегнетоэлектриков:

1) диэлектрические и оптические методы измерения T_c , параметров ЛГД потенциала, P-E гистерезиса; 2) электрофизические, оптические и нелинейно-оптические методы исследования переполяризации; 3) набор методик наблюдения доменной структуры.

- для выполнения работ по тематикам модуля «Ядерные резонансные методы исследования конденсированного состояния» используется необходимое оборудование Отдела ядерных методов и магнитных структур ИК РАН.

- для выполнения работ по тематикам модуля «Методы атомно-силовой микроскопии для исследования поверхности кристаллов и пленок» используется сканирующий зондовый микроскоп Солвер Р47, сканирующая головка может использоваться в конфигурации Stand-alone для измерения сверхбольших образцов (до 100 мм), и может использоваться для модифицирования поверхностей, манипуляции частицами до 50 нм в диаметре и литографии высокого разрешения (10 нм).

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. Зиппель, Д. Роньян, Г. Фолькерс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 318с.:
12. Хельтье Х.-Д. Молекулярное моделирование: теория и практика / Х.-Д. Хельтье, В. Зиппель, 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=NbJEoV8AAAJ&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	http://link.springer.com/ http://www.springerprotocols.com/

Springer Protocols Springer Materials Springer Reference zbMATH Nature Journals Nano Database	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

13. Язык преподавания - русский.