

Программа дисциплины «Физика конденсированного состояния» 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 2015г;
- Программа кандидатского минимума и паспорт научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 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».

Составитель: д.ф.-м.н. Каневский В.М.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения аспирантами дисциплины «Физика конденсированного состояния» является изучение физических явлений в различных конденсированных средах, включая диэлектрики, полупроводники, металлы, гетерогенные твердотельные структуры, плёнки и композитные материалы. Предполагается освоение фундаментальных закономерностей, связанных с динамикой кристаллических решёток, со свойствами электронных и экситонных возбуждений в твёрдых телах, с гальваническими явлениями в металлах и полупроводниках, с магнитными явлениями в твёрдых телах, с эффектом сверхпроводимости, с фазовыми переходами в конденсированных средах и др.

Задачами данной дисциплины являются:

- формирование базовых знаний в области физики конденсированного состояния как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей фундамент знаний в области современных сфер деятельности и нанотехнологий;
- изучение фундаментальных понятий, законов и теорий, относящихся к физике конденсированного состояния вещества, а также методов физических исследований физики конденсированного состояния

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ

2.1. Учебная дисциплина «Физика конденсированного состояния» входит в Блок 1 (Обязательные дисциплины) и относится к вариативной части ООП по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, направленность «Физика конденсированного состояния» (01.04.07). Индекс дисциплины по учебному плану – Б1.В.ОД.3.

2.2. Актуальность курса обусловлена большой практической значимостью физических явлений в конденсированных средах и необходимостью создания различного рода устройств и приборов, основанных на использовании явлений в твёрдых телах, гетерогенных структурах и кристаллах. Изучение данной дисциплины базируется на следующих дисциплинах подготовки бакалавров, специалистов или магистров: «Физика»; «Химия»; «Кристаллография»; «Физика твердого тела»; «Информатика»; «Программирование».

3. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.

4. ГОД И СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ (если есть)

Третий год, первый и второй семестры обучения.

5. ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ.

Процесс обучения по дисциплине «Физика конденсированного состояния» включает в себя:

- аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения)
- самостоятельная работа аспирантов
- контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию
- экзамен кандидатского минимума

Обучение по дисциплине ведется с применением как традиционных методов, так и с использованием инновационных подходов: активное участие аспирантов в научных семинарах, представление докладов на научные конференции, подготовка научных статей, подготовка презентаций по литературе и по теме исследований, освоение новых средств автоматизации и компьютеризации выполняемых научных исследований.

Виды самостоятельной работы: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на компьютерах с доступом к базам данных и ресурсам Интернет, в лабораториях с доступом к лабораторному оборудованию и приборам.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, учебное и научное программное обеспечение, ресурсы Интернет.

Вариативная часть, в т.ч.:	<u>4</u> зач. ед.
Лекции	<u>24</u> часа
Семинары и практические занятия	<u>16</u> часов
Лабораторные работы	<u>нет</u> часов
индивидуальные занятия с преподавателем	<u>нет</u> часов
Самостоятельные занятия	<u>96</u> часов
Экзамен/зачет	<u>8</u> часов
ВСЕГО	4 зач. ед., 144 часа

6. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины «Физика конденсированного состояния» 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);
- способностью планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

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);

– способность к планированию и организации теоретических и экспериментальных исследований структуры и механических, электрических, магнитных, оптических, тепловых свойств природных и искусственно полученных неорганических, органических и биоорганических материалов, а также планированию и организации работы по модернизации современных и созданию новых экспериментальных методов изучения физических свойств кристаллов, поликристаллических материалов, в том числе с пониженной размерностью, микро- и нанодисперсных (ПК-4).

Профессиональные компетенции выпускника программы аспирантуры по направлению подготовки «Физика и астрономия», направленность «Физика конденсированного состояния» (01.04.07) осваиваются в течение всего периода обучения в рамках дисциплин вариативной части и научно-исследовательской практики независимо от формирования других компетенций, и обеспечивают реализацию обобщенной трудовой функции «Проводить научные исследования и реализовывать проекты». Для того, чтобы формирование профессиональных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры, должен: **ЗНАТЬ:** физическую, естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, основные тенденции развития физики конденсированного состояния.

УМЕТЬ: осуществлять отбор материала, характеризующего область физики конденсированного состояния, с учетом конкретной научной или технической задачи.

ВЛАДЕТЬ: навыками работы в научном коллективе; приемами целеполагания, планирования, реализации необходимых видов деятельности, оценки и самооценки результатов деятельности по решению задач физики конденсированного состояния.

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

В результате освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния» обучающийся должен:

знать:

- основные закономерности формирования конденсированных сред;
- основные методы изучения кристаллических структур;
- методы теоретических подходов в описании и изучении явлений в физике конденсированного состояния;
- методы обработки полученных данных;
- принципы анализа взаимосвязи между структурой, условиями образования и свойствами перспективных кристаллических материалов.

уметь:

- осуществлять сбор, обработку и систематизацию научной информации по заданному направлению профессиональной деятельности, применять для этого современные информационные технологии;
- описывать и качественно объяснять основные состояния в твердом теле;
- применять методы описание кристаллических структур;
- анализировать результаты теоретических и экспериментальных исследований;
- интерпретировать полученные результаты и оформлять их в виде научных публикаций, докладов на конференциях, заявок на изобретения;
- моделировать физические процессы;
- критически анализировать накопленный опыт и совершенствовать свои подходы к изучению свойств вещества.

владеть:

- опытом понимания качества исследований, относящихся к области физики конденсированного состояния;
- опытом самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики конденсированного состояния вещества;
- навыками понимания качества исследований, относящихся к области физики конденсированного состояния;
- навыками планирования и обработки результатов научного эксперимента;
- навыками работы с информационными ресурсами.

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

Формируемые компетенции <i>(код компетенции, уровень освоения)</i>	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-1	31 (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. У1 (УК-1)- Уметь анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов. У2 (УК-1) – Уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений. В1 (УК-1)- Владеть навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях. 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

	<p>областях.</p>
<p>УК-3</p>	<p>31 (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>
<p>УК-4</p>	<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>ках</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>З1 (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>З1 (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>З1 (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>З1 (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>
ПК-4	<p>З1 (ПК-4)-1 Знать теоретические основы и экспериментальные методы исследований структуры и</p>

механических, электрических, магнитных, оптических и искусственно полученных неорганических, органических и биоорганических материалов.

32 (ПК-4)-2 **Знать** планирование, организацию работы по модернизации современных и созданию новых экспериментальных методов изучения физических свойств кристаллов, поликристаллических материалов, в том числе с пониженной размерностью, микро- и нанодисперсных.

У1 (ПК-4)-1 **Уметь** применять теоретические основы и экспериментальные методы исследований структуры и механических, электрических, магнитных, оптических и искусственно полученных неорганических, органических и биоорганических материалов для решения задач профессиональной деятельности.

У2 (ПК-4)-2 **Уметь** разрабатывать методы и приёмы для модернизации современных и созданию новых экспериментальных методов изучения физических свойств кристаллов, поликристаллических материалов, в том числе с пониженной размерностью, микро- и нанодисперсных.

В1 (ПК-4)-1 **Владеть** методами планирования и организации теоретических и экспериментальных методов исследований структуры и механических, электрических, магнитных, оптических и искусственно полученных неорганических, органических и биоорганических материалов для решения задач профессиональной деятельности.

В2 (ПК-4)-2 **Владеть** навыками разработки методов и приемов для модернизации современных и созданию новых экспериментальных методов изучения физических свойств кристаллов, поликристаллических материалов, в том числе с пониженной размерностью, микро- и нанодисперсных

9. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Структура дисциплины

Перечень разделов дисциплины и распределение времени по темам:

№ темы и название	Количество часов
1. Симметрия твердых тел	14
2. Силы химической связи в твердых телах.	14
3. Динамика решетки и фазовые переходы	14
4. Дифракция в кристаллах	14
5. Дефекты в твердых телах	12

6. Тепловые свойства твердых тел	10
7. Электронные свойства твердых тел	12
8. Магнитные свойства твердых тел	12
9. Электрические свойства твердых тел	12
10. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел	12
11. Сверхпроводимость	10
12. Экзамен/зачет	8
ВСЕГО (часов)	144

Вид занятий

Лекции:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	Связь симметрии и физических свойств кристаллов	2
2	Основы тензорного и симметричного описания физических свойств кристаллов	2
3	Фазовые переходы, динамика решетки - основные понятия	2
4	Основы теории дифракции в кристаллах	2
5	Геометрическая кристаллография	2
7	Силы химической связи в твердых телах. Общая и описательная кристаллохимия	4
8	Методы анализа кристаллической структуры	2
9	Метод поликристалла	2
10	Дефекты в кристаллах, динамика дислокаций, механизмы пластичности	2
11	Взаимодействие дефектов в кристаллах	2
12	Магнитные свойства твердых тел.	2
ВСЕГО (часов)		24 часа

Практические занятия:

№ темы и название	Количество часов
Простые формы кристаллов	4
Методы дифракции электронов в структурном анализе наноматериалов	4
Некоторые практические примеры применения метода поликристалла	4
Методы анализа кристаллической структуры	4
ВСЕГО (часов)	16 часов

Самостоятельная работа:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	- изучение теоретического курса – выполняется самостоятельно каждым аспирантом по итогам каждой из лекций, результаты контролируются преподавателем на лекционных занятиях, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, методические пособия.	52
2	- выполнение тестовых заданий – выполняются задания, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий и сдаются в конце семестра, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, а также сборники задач, включая электронные, учебно-методические пособия.	26
3	Подготовка к экзамену	18
ВСЕГО (часов)		96 часов

Содержание разделов дисциплины

№	Наименование раздела	Содержание раздела	Объем	
			Аудиторная работа (часы)	Самостоятельная работа (часы)
1.	Симметрия твердых тел	<p><u>Геометрическая кристаллография.</u> <u>Симметрия и операции симметрии.</u> Кристаллические и аморфные твердые тела. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.</p> <p><u>Элементы симметрии и точечные группы</u></p> <p><u>Точечные группы симметрии</u> Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Точечные группы (кристаллические классы).</p> <p><u>Простые формы кристаллов.</u></p> <p><u>Пространственные группы симметрии</u> Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура.</p>	6	8

		<p>Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера Зейтца. Решетка Браве. Классификация решеток Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна. Пространственные группы симметрии.</p>		
2.	Силы химической связи в твердых телах.	<p><u>Строение и свойства атомов</u> Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность.</p> <p><u>Связь атомов в кристалле и энергия кристаллической решетки</u> Классификация структур по типам химической связи. Типы сил связи в конденсированном состоянии. Металлическая связь. Ковалентная связь. Ионная связь. Ван-дер-ваальсова связь.</p> <p><u>Основные типы кристаллических структур неорганических соединений</u> Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с направленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров. Структура веществ с ковалентными связями. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах.</p> <p><u>Структурные типы неорганических структур и способы их описания и изображения.</u></p>	4	10
3	Динамика решетки и фазовые переходы	<p><u>Энергетическая кристаллохимия.</u> <u>Зонная теория.</u> Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.</p> <p><u>Фазовые переходы.</u> Основы феноменологической теории фазовых переходов. Термодинамическая теория Ландау. Полиморфизм. Фазовые переходы и второго рода. Уравнения состояния. Фазовые диаграммы. Структура и фазовые переходы первого рода.</p>	4	10

		<p>Фазовые переходы типа упорядочения. Фазовые переходы второго рода. Типы фазовых переходов второго рода. Симметричное описание. Изменение свойств кристалла при фазовых переходах.</p> <p>Домены, как следствие фазовых переходов. Исходная фаза и парафаза, критерии поисков парафазы.</p>		
4	Дифракция в кристаллах	<p><u>Основы теории дифракции. Дифракция от кристалла.</u></p> <p>Геометрическая теория дифракции на трехмерной решетке. Уравнение Лауэ. Уравнение Вульфа—Брегга. Обратная решетка. Основные рентгенодифракционные схемы в представлении обратной решетки. Интенсивность рентгеновских рефлексов. Атомная амплитуда. Структурная амплитуда. Интерференционная функция. Интегральная интенсивность. Связь симметрии кристалла и его дифракционной картины. Законы погасания.</p> <p><u>Рентгеноструктурный анализ монокристаллов. Эксперимент и поиск структуры.</u></p> <p>Основные экспериментальные задачи рентгеноструктурного анализа. Определение ранее неизвестной структуры. Синтез Фурье как принципиальный метод анализа атомной структуры кристаллов. Особенности постановки задач структурного анализа на ЭВМ. Автоматизация структурного анализа.</p> <p><u>Рентгеноструктурный анализ поликристаллов.</u></p> <p>Определение кристаллографических параметров на монокристаллических объектах. Фазовый анализ, структура реального кристалла. Рентгеновская дифракционная микроскопия.</p> <p><u>Динамическая теория.</u></p> <p>Дифракция на совершенных кристаллах. Основы динамической теории: эффекты экстинкции, аномального прохождения, маятниковое решение. Рентгеновская интерферометрия.</p> <p><u>Структурная электронография</u></p>	4	10

		<p>Дифракция электронов. Основные задачи структурной электронографии.</p> <p><u>Основы дифракции нейтронов.</u> Специфические задачи нейтронографии в исследовании атомной и магнитной структуры кристаллов.</p> <p><u>Электронная микроскопия.</u></p>		
5	Дефекты в твердых телах	<p><u>Механические свойства твердых тел. Дефекты строения кристаллических тел.</u></p> <p>Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.</p>	4	8
6	Тепловые свойства твердых тел	<p><u>Основы теплоемкости твердых тел.</u></p> <p>Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Классическая теория теплоемкости. Границы справедливости классической теории. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Тепловое расширение твердых тел. Ангармонические колебания. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.</p>	0	10
7	Электронные свойства твердых тел	<p><u>Электронные свойства твердых тел</u></p> <p>Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Основные приближения зонной теории. Квазиимпульс. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов. Заполнение энергетических зон.</p>	4	8

		ческих зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.		
8	Магнитные свойства твердых тел	<u>Магнитные свойства кристаллов.</u> Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля). Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков. Спиновые волны, магнаны.	4	8
9	Электрические свойства твердых тел	<u>Электрические свойства твердых тел.</u> Электрические свойства твердых тел. Введение. Пироэлектрические явления. Пьезоэлектрический эффект и электрострикция. Особенности электрических свойств сегнето- и антисегнетоэлектриков. Основы теории спонтанной поляризации.	4	8
10.	Оптические и магнитооптические свойства твердых тел	<u>Оптические свойства кристаллов.</u> Основы оптических свойств твердых тел. Плоские электромагнитные волны в анизотропной среде. Электрооптические, магнитооптические и пьезооптические свойства твердых тел. Рассеяние света в твердых телах. Лазерные кристаллы. <u>Явление переноса в кристаллах.</u> Электропроводность кристаллов. Теплопроводность кристаллов. Термоэлектрические эффекты. Гальвано- и термомагнитные эффекты.	4	8
11.	Сверхпроводимость	<u>Основы сверхпроводимости</u>	2	8

		Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Сверхпроводники первого и второго рода. Магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец. Эффект Джозефсона. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.		
--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

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

Цель контроля – получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

Предусмотрены следующие виды контроля и аттестации обучающихся при освоении дисциплины:

- текущий контроль успеваемости;
- промежуточная аттестация по завершению периода обучения;

Текущий контроль успеваемости обеспечивает оценивание хода освоения дисциплины, может проводиться в виде оценки участия обучающихся в научных и научно-методических мероприятиях, в т.ч. семинарах, дискуссиях, конференциях, исследовательской и публикационной активности, результативности исследовательской и преподавательской деятельности и т.д.

По ПК-4 контроль проводится, в основном, в виде оценки подготовленных по промежуточным результатам проведенных исследований материалов для участия в научных семинарах и конференциях, собственно участия в научных семинарах и конференциях, а также в виде оценки публикационной активности и результативности исследовательской деятельности.

Промежуточная аттестация имеет целью определить степень достижения запланированных результатов обучения по дисциплине и предусмотрена в форме экзамена кандидатского минимума.

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	«Физика конденсированного состоя-	+		+	+		+		+	+	+	+	

	плина	ния»																		
--	-------	------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

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).

10.2 Контрольные вопросы для проведения текущего контроля

1. Силы связи в твердых телах

Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.

Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO_3 .

Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

2. Симметрия твердых тел

Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера – Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.

Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

3. Дефекты в твердых телах

Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.

Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

4. Дифракция в кристаллах

Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

5. Колебания решетки

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

6. Тепловые свойства твердых тел

Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

7. Электронные свойства твердых тел

Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

8. Магнитные свойства твердых тел

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

Спиновые волны, магноны.

9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел

Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса—Кронига.

Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

10. Сверхпроводимость

Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

Эффект Джозефсона. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

Вопросы для промежуточной аттестации в форме экзамена кандидатского минимума приведены в программе Кандидатского экзамена по дисциплине «Физика конденсированного состояния» (01.04.07).

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 ИК РАН к Интернет. Для получения необходимой информации используются Web-ресурсы Интернет и локальная библиотека электронных материалов.

Залы, оснащенные компьютером с проектором, обычной доской - для проведения семинаров, лекционных и практических занятий.

Современные спектрометры, лазерные источники, интерферометры, дифракционные решётки, осциллографы, фотоумножители, многоэлементные приёмники излучения.

Перечень оборудования:

1. Просвечивающий электронный микроскоп FEI Osiris с X-FEG и SuperX детектором
2. Просвечивающий электронный микроскоп высокого разрешения Tecnai G30 STwin 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 S™ (Oxford)
6. Спектрофотометр Cary 5000 (Varian)
7. Порошковый рентгеновский дифрактометр X'PERT PROMPD (PANalytical)
8. Растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 3D FIB с ионной пушкой (FEI)
9. Рентгеновский дифрактометр SmartLab 9kW (Rigaku)
10. Растровый электронный микроскоп JSM-7401F с автоэмиссионным катодом (JEOL)
11. Рентгеновский малоугловой дифрактометр SAXS-2D (HECUS X-raysystem GmbH GRAZ) с двумя позиционно-чувствительными детекторами
12. Оптический лазерный конфокальный микроскоп Leica TCS SPE (Leica Microsystems)
13. Анализатор размера субмикронных частиц Delsa Nano (Beckman Coulter)
14. УФ-спектрофотометр Lambda 650 (PerkinElmer)
15. Атомно-силовой микроскоп SolverPro M (HT-МДТ)
16. Настольный рентгеновский дифрактометр Miniflex 600 (Rigaku)
17. Криогенный просвечивающий электронный микроскоп Tecnai G2 SPIRIT (FEI)
18. Установка молекулярно-лучевой эпитаксии Pfeiffer Vacuum
19. Масс-спектрометр на индуктивно связанной плазме ICapQ (ThermoScientific)
20. 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. Зипшль, Д. Роньян, Г. Фолькерс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 318с.:
12. Хельтье Х.-Д. Молекулярное моделирование: теория и практика / Х.-Д. Хельтье, В. Зипшль, 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. Телота. 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=General-Search&SID=F2LiEv3BvmxwoCqmOmV&preferencesSaved=
Scopus	https://www.scopus.com/home.uri
Google Scholar citations	https://scholar.google.ru/citations?user=NbJEoV8A-AAJ&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	http://link.springer.com/ http://www.springerprotocols.com/ http://materials.springer.com/ http://link.springer.com/search?facet-content-type=%22ReferenceWork%22

zbMATH Nature Journals Nano Database	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. // <i>Z. Kristallogr.</i> 229 (2014) 345-352.
Charge Flipping in Superspace	Palatinus, L. Ab Initio Determination of Incommensurately Modulated Structures by Charge Flipping in Superspace. // <i>Acta Crystallogr. A</i> 60 (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.