

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМ. Н.С. КУРНАКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИОНХ РАН)



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИОНХ РАН

акад. РАН

В.К. Иванов

2026 г.

Рабочая программа дисциплины Химия твердого тела

Шифр и наименование области науки: 1. Естественные науки

Шифр и наименование группы научных специальностей: 1.4. Химические науки

Шифр и наименование научной специальности:

1.4.15. Химия твердого тела

Форма обучения: очная

Нормативный срок обучения: 4 года

Москва
2026 г.

1. Общие положения

Рабочая программа дисциплины Химия твердого тела разработана в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными Минобрнауки России от 20 октября 2021 г. № 951.

Изучение дисциплины Химия твердого тела в соответствии с учебными планами подготовки аспирантов осуществляется в течение 2-го курса обучения в аспирантуре и завершается сдачей кандидатского минимума.

Целью учебного курса Химия твердого тела является расширение и углубление знаний аспирантами основных понятий о процессах дефектообразования в твердых телах, о реакционной способности твердых тел, их химической связи в процессе превращений.

Основными задачами изучения учебного курса являются формирование у аспирантов углубленных знаний по основным разделам химии твердого тела, связанной с процессами дефектообразования.

2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Дисциплина Химия твердого тела относится к образовательному компоненту программы аспирантуры, является обязательной для освоения.

В курсе рассматриваются понятия и принципы дефектообразования координационной химии, химии кластеров, обсуждаются общие закономерности химии твердого тела, систематизируются знания обучающихся по методам создания основных типов дефектов. Основной целью изучения дисциплины является углубленное ознакомление аспирантов с основополагающими принципами дефектообразования.

3. Структура и основное содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 8 зачётных единиц (288 часов).

3.1. Структура дисциплины

№ п/п	Наименование дисциплины	Объем учебной работы (в часах)						Сам. работа	Вид итогового контроля
		Всего	Всего аудит.	Из аудиторных					
				Лекц.	Лаб.	Пр.	КСР		
1.	Химия твердого тела	288	116	60	56	-	-	172	Кандидатский экзамен по дисциплине

3.2. Содержание дисциплины

3.2.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы, и трудоемкость (в часах)				Самостоятельная работа
		Лек.	Лаб.	Пр.	КСР	
1	Дефекты в твердых телах	10	9	-	-	29
2	Диффузия в твердых телах	10	9	-	-	28
3	Кристаллические решетки и упаковки	10	9	-	-	29
4	Твердофазные реакции	10	10	-	-	29
5	Методы исследования твердых тел	10	10	-	-	29
6	Магнитные свойства твердых тел	10	9	-	-	28

3.2.2. Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела (темы)	Трудоем кость (в часах)	Форма проведени я занятий
1.	Дефекты в твердых телах			
1.1.	Совершенные и несовершенные кристаллы	Типы дефектов упаковки в кристаллах. Разупорядочение по Шоттки и по Френкелю. Вакансии и внедренные атомы. Символика Крегера и Винка. Ориентационное разупорядочение.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
1.2.	Типы дефектов в твердых телах	Дефекты замещения. Вакансии и междоузельные дефекты. Электронные дефекты. Антиструктурные дефекты. Центры окраски. Ассоциация дефектов. Дислокация. Дефект упаковки. Междоузельная граница. Поверхность. Пores и трещины.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
1.3.	Термодинамика образования дефектов Шоттки и Френкеля	Термодинамика образования дефектов. Соотношение Больцмана. Конфигурационная энтропия. Зависимость концентрации дефектов от температуры.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
1.4.	Дислокации, механические свойства твердых тел	Типы протяженных дислокаций. Формирование линейной и винтовой дислокации. Образование линейных дислокаций при изгибе и переход их в поверхность раздела при отжиге. Линейные дислокации и точечные дефекты на поверхности раздела. Перемещение линейных дислокаций под действием нагрузки.	9	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
1.5.	Взаимодействие дефектов	Термодинамика процессов ассоциации дефектов. Формирование сверхструктуры и структурные изменения в кристаллах. Формирование структур сдвига.	9	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта

2.	Диффузия в твердых телах			
2.1.	Общие законы диффузии. Неравновесная термодинамика	Общие представления о процессах диффузии. Движущая сила диффузии. Первый закон Фика. Коэффициент диффузии. Описание процессов диффузии с точки зрения неравновесной термодинамики. Принцип взаимности Онзагера.	12	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
2.2.	Механизм диффузии в твердых телах.	Механизмы диффузии. Диффузия по вакансионному механизму. Диффузия по междоузлиям. Эстафетная диффузия.	12	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
2.3.	Микроскопическая теория диффузии. Направленная диффузия.	Микроскопическая теория диффузии. Коэффициент диффузии. Уравнение Нерста-Энштейна. Разность химического потенциала. Взаимная диффузия.	12	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
2.4.	Диффузия в материалах, претерпевающих фазовые переходы, и в материалах, содержащих примеси.	Изменение коэффициентов диффузии в кристалле в отсутствие и при наличии фазовых переходов, а также в кристаллах, содержащих гетеровалентные примеси. Несобственная диффузия.	11	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
3.	Кристаллические решетки и упаковки			
3.1.	Точечные и пространственные группы симметрии	Точечные группы симметрии. Центросимметричные и нецентросимметричные точечные группы. Общие и частные позиции в кристаллах. Пространственные группы симметрии. Примеры пространственных групп симметрии, и кристаллических структур простейших соединений. Структура NaCl, рутила, перовскита.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
3.2.	Описание кристаллических структур	Плотные шаровые упаковки. Структуры с кубической и гексагональной плотнейшими упаковками (КПУ и ГПУ). Материалы, обладающие структурой с плотнейшей упаковкой: металлы, сплавы, ионные структуры, структуры с ковалентными решетками, молекулярные структуры.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
3.3.	Некоторые наиболее важные структурные типы	Структуры типа каменной соли NaCl, цинковой обманки ZnS и антифлюорита Na ₂ O. Структурные типы вюртцита ZnS и арсенида никеля NiAs. Структуры типа хлорида цезия и рутила	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
3.4.	Факторы, влияющие на структуру кристаллов	Стехиометрия и валентность элементов. Координационные числа. Типы химической связи. Размеры атомов или ионов. Ионные структуры. Ионы и ионные радиусы. Ионные структуры. Общие закономерности. Правила о соотношениях радиусов. Энергия решетки ионных кристаллов. Уравнение Капустинского.	9	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
3.5.	Энергия	Силы взаимодействия молекул и ионов в	9	Лекции,

	кристаллической решетки	кристаллах. Энергия кристаллической решетки атомных и ионных кристаллов. Влияние электронной структуры на энергию кристаллической решетки.		лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
4.	Твердофазные реакции			
4.1.	Общие принципы твердофазных реакций	Реакционная способность твердых тел. Площадь поверхности твердых тел. Реакции, контролируемые диффузией. Кинетические уравнения. Термодинамика зародышеобразования. Топотаксические и эпитаксиальные реакции. Структура поверхности и реакционная способность.	12	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
4.2.	Экспериментальное осуществление твердофазных реакций	Исходные вещества для реакций. Приготовление реакционной смеси. Материалы контейнеров. Термообработка.	12	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
4.3.	Кинетика твердофазных реакций	Основные понятия и методы изучения кинетики твердофазных реакций. Особенности кинетики реакций с участием твердых фаз. Методы Изучения кинетики твердофазных реакций. Кинетические модели и уравнения политермической и изотермической кинетики. Формальное уравнение кинетики и способы определения его параметров. Диффузионные модели. Уравнение сжимающихся сферы и цилиндра. Модели реакций, лимитируемых процессами на границе раздела фаз. Модели зародышеобразования.	13	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
4.4.	Активное состояние твердофазных реагентов и продуктов	Активация твердофазных процессов под воздействием излучения. Механохимическая активация индивидуальных реагентов и процессов. Влияние химической и термической предыстории. Активация твердых фаз введением микродобавок. Активация реакционных смесей в процессе твердофазного взаимодействия.	12	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
5.	Методы исследования твердых тел			
5.1.	Методы исследования поверхности веществ	Сканирующая зондовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия. Автоионная микроскопия. Методы электронной микроскопии. ИК и КР спектроскопия. Дифракционные методы исследований. Ядерный магнитный резонанс. Электронный магнитный резонанс. Мессбауэровская спектроскопия.	17	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
5.2.	Термический анализ твердых тел	Термогравиметрический анализ. Дифференциально-термический анализ и дифференциальная сканирующая калориметрия. Способы регистрации результатов анализа. Особенности конструкции ячеек. Обработка полученных данных. Некоторые особые области применения (Стекла, полиморфные превращения и построение фазовых диаграмм)	16	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
5.3.	Рентгенофазовый и	Рентгеновское излучение. Способы его генерации. Длины волн рентгеновского	16	Лекции, лабораторн

	рентгеноструктурный анализ	излучения для наиболее распространенных анодных материалов. Дифракционная решетка и дифракция света. Кристаллы и дифракция рентгеновских лучей. Уравнения Лаурэ. Закон Брэгга.		ые работы, самостоятельная работа аспиранта
6.	Магнитные свойства твердых тел			
6.1.	Теория магнетизма	Поведение вещества в магнитном поле. Зависимость магнитной восприимчивости от температуры. Классификация магнитных материалов. Влияние температуры. Законы Кюри и Кюри-Вейсса. Расчет величины магнитного момента. Домены. Температура Кюри.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
6.2.	Механизм ферро- и антиферромагнитного взаимодействия	Упорядочение магнитных моментов отдельных ионов, содержащих неспаренные электроны. Неспаренные d- и f-электроны. Особенности электронной конфигурации. Коэрцитивная сила. Петля гистерезиса. Остаточная намагниченность. Магнитострикция. Магнитная подрешетка.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
6.3.	Примеры магнитных материалов, их структура и свойства	Металлы и сплавы с магнитными свойствами. Метамагнетизм. Супермагнетизм. Переходы из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Магнитомягкие и магнитожесткие материалы	9	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
6.4.	Оксиды переходных металлов	Простые оксиды, характеризующиеся различным типом магнитного состояния. EuO , Fe_2O_3 , CoO , NiO . Нормальные и обращенные шпинели. Магнитная структура антиферромагнитной и ферромагнитной шпинелей. Гранаты. Илмениты и перовскиты.	10	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта
6.5.	Применение магнитных материалов	Сердечники трансформаторов. Прямоугольная петля гистерезиса. Запоминающие устройства. Элементы памяти. Спинтроника. Магноника.	8	Лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа аспиранта

3.2.3. Самостоятельная работа

Рабочей программой дисциплины Химия твердого тела предусмотрена самостоятельная работа аспиранта.

Самостоятельная работа распределяется по видам учебных занятий следующим образом:

- проработка лекционного материала по конспекту и учебной литературе;
- проработка актуальных вопросов, чтение и конспектирование первоисточников.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций. Основные виды самостоятельной работы: в читальном зале библиотеки, в домашних условиях с доступом к ресурсам Интернет.

3.2.4. Образовательные технологии

Основными образовательными технологиями, используемыми при реализации учебной работы, являются лекции, семинары ведущих отечественных и зарубежных ученых и консультации с преподавателями; проведение практических работ, участие обучаемых в научной работе и выполнение исследовательских проектов.

4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

4.1. Текущий контроль успеваемости

Основной контроль знаний осуществляется в процессе участия в лекционных и лабораторных занятиях.

Текущий контроль проводится в форме вопроса-ответа в рамках участия обучающихся в дискуссиях и различных мероприятиях, осуществляющим преподавателем, ведущим дисциплину.

Вопросы текущего занятия № ...

1. Деление материалов по способности проводить электрический ток. Их зонные схемы.
2. Нарисовать схему образования электронной примесной и дырочной примесной фотопроводимостей в полупроводниках.
3. Назовите экспериментальный метод, с помощью которого можно различить дырочную и электронную проводимость в полупроводниках.
4. Какие общие требования предъявляются к твердым материалам, используемым в лазерах.
5. Определить положение уровня Ферми в запрещенной зоне германия и кремния
6. Определить концентрацию электронов и дырок в кремнии и германии при 300 и 500К.
7. Определите волновой вектор, импульс и энергию электрона, находящегося на поверхности Ферми металлического натрия при $T=0K$, для $m^* \ell_z \hbar = m_0$
8. Определить эффективную плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне германия и кремния при 300 и 500К.

Вопросы текущего занятия № ...

1. Основные проблемы кинетики твердофазных реакций.
2. Поверхностные уровни Тамма и Шокли.
3. Оценка энергетического положение дефектов замещения в галогенидах щелочных металлов.
4. Расчет энергии связи кристаллов инертных элементов.
5. Основные типы разупорядочения в ионных кристаллах.
6. Конфигурационная энтропия.
7. Определение параметров ионного разупорядочения заданных соединений.
8. Расчет констант скоростей дрейфовых стадий в заданных соединениях.
9. Электрон-фононное взаимодействие.
10. Принцип детального равновесия.
11. Нанотехнологии и наноматериалы.
12. Процессы генерации электронных возбуждений внешним воздействием.

Вопросы текущего занятия № ...

1. Классификация твердых тел: по расположению атомов или ионов; по типу химической связи.
2. Уравнение Шредингера для кристалла: адиабатическое приближение, валентная аппроксимация, сведение многоэлектронной задачи к одноэлектронной. Общий вид волновой функции для электрона в кристалле.
3. Рассмотрение уравнения Шредингера для электрона в приближении сильно связанных электронов. Спектр энергии электрона в кристалле.

4. Образование зон энергии из энергетических уровней изолированных атомов при их объединении в кристалл. Классификация твердых тел с точки зрения зонной теории. Движение свободных носителей заряда в твердом теле.
5. Неравновесные носители заряда. Фотопроводимость. Типы генерации. Механизмы рекомбинации. Центры прилипания. Демаркационные уровни.
6. Характеристика движения электронов в периодическом поле кристаллической решетке: квазиимпульс. Зоны Бриллюэна, эффективная масса, длина и время свободного пробега, подвижность носителей заряда.
7. Поглощение света полупроводником. Оптические константы. Типы оптического поглощения.
8. Теплоемкость твердых тел. Различные подходы к интерпретации экспериментальных данных.
9. Люминесценция в полупроводниках, ее типы и характеристики. Принцип работы рубинового лазера.
10. Колебания атомов в кристаллической решетке: колебания одноатомной линейной цепочки.
11. Рассеяние носителей заряда в полупроводниках. Эффективное сечение рассеяния. Типы рассеивающих центров.
12. Примесные состояния в полупроводниках. Донорный, акцепторный и компенсированный полупроводники.
13. Колебания атомов в кристаллической решетке: колебания двухатомной линейной цепочки.
14. Колебания атомов в трехмерной решетке. Понятие фононов. Статистика фононов в кристалле.
15. Диэлектрическая проницаемость твердого тела. Время диэлектрической релаксации.
16. Электрические свойства диэлектриков: виды поляризации, ее величина, диэлектрическая восприимчивость и проницаемость, поляризуемость.
17. Диффузионная длина и длина экранирования Дебая в полупроводниках.
18. Статистики электронов и дырок в полупроводниках: общий подход к определению концентрации.
19. Связь диэлектрической проницаемости и поляризуемости. Диэлектрические потери.
20. Диффузионные и дрейфовые токи в полупроводниках. Соотношение Эйнштейна.
21. Уравнение непрерывности в полупроводниках. Релаксация фотопроводимости.
22. Подвижность носителей заряда. Связь подвижности с температурой.
23. Теория электропроводности. Классификация твердых тел по типу проводимости.
25. Протекание электрического тока через контакт металла с полупроводником. Понятие инжекции. Выпрямляющие свойства барьера Шоттки.
26. Контакт двух полупроводников различного типа. Контактные явления в полупроводниках. Приповерхностный загиб зон. Работа выхода.
27. Ток термоэлектронной эмиссии. Контакт металл с полупроводником.

4.2. Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины

Промежуточная аттестация по дисциплине Химия твердого тела проводится на 3 курсе в форме экзамена (кандидатского экзамена по дисциплине), предусматривающего ответы на вопросы.

Вопросы для подготовки к сдаче экзамена (кандидатского экзамена) по дисциплине Химия твердого тела приведены в Программе кандидатского экзамена по Химии твердого тела. С целью оценки уровня знаний на экзамене (кандидатском экзамене) используется 5-балльная система в соответствии с критериями, представленными в таблице:

Критерии оценки

«Отлично»	Аспирант показал творческое отношение к обучению, в совершенстве овладел всеми вопросами дисциплины, показал все требуемые умения и навыки
-----------	--

«Хорошо»	Аспирант овладел всеми вопросами дисциплины, показал основные умения и навыки
«Удовлетворительно»	Аспирант имеет недостаточно глубокие знания по разделам дисциплины, показал не все основные умения и навыки
«Неудовлетворительно»	Аспирант имеет проблемы по отдельным разделам дисциплины и не владеет основными умениями и навыками

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1. Рекомендуемая литература

При изучении дисциплины аспиранты используют основную и дополнительную литературу, рекомендованную преподавателем. Кроме того, преподаватель может рекомендовать аспиранту ознакомиться с дополнительными материалами методического характера.

Название электронного или печатного ресурса (основная или дополнительная)	Тип	Кол-во экз.
Основная литература:		
Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. Т.2.1988. М. Мир. 1988	печ.	2
Третьяков Ю.Д., Кнотько А.В. Химия твердого тела. Уч.пособие-М.;ACADEMIA,2006-302с.	печ.	1
Кукушкин Ю.Н. Термические превращения координационных соединений в твердой фазе -176с. Л.; Изд-во ЛГУ,1981	печ.	2
Уэллс А. Структурная неорганическая химия. М.: Мир. 1987. т.1-3.	печ.	3
Кукушкин Ю.Н. Химия координационных соединений. М., 1985.	печ.	1
Хьюи Дж. Неорганическая химия: строение вещества и реакционная способность. М.: Химия. 1987.	печ.	2
Дополнительная литература:		
Драго, Рассел С. Физические методы в химии:в 2х т-М.;Мир,1981	печ.	3
Турова Н.Я. Справочные таблицы по неорганической химии. -М.; «Химия»,1977-116с.	печ.	3
Третьяков Ю.Д. Неорганическая химия. Химия элементов:в 2 кн.-М.;2001	печ.	1
Кукушкин Ю.Н. Кукушкин Ю.Н. Теория и практика синтеза координационных соединений –М.;1990-260с.	печ.	2
Третьяков Ю.Д.Путляев В.И. Введение в химию твердофазных материалов . М. Наука. 2006	печ.	1
Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М., 1971.	печ.	4
Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. 3-е изд.М.: Высш.шк. 1998, 2005, 2008.	печ.	3
Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Общая и неорганическая химия. М.: Химия. 2000.	печ.	3
Суворов А.В., Никольский А.Б. Общая химия. М.: Мир. 1994, 1995 , 2007.	печ.	3
Турова Н.Я. Справочные таблицы по неорганической химии –М.; «Химия»,1977-116с.	печ.	3
Гиллеспи Р., Харгиттай И. Модель отталкивания электронных пар валентной оболочки и строение молекул. М.: Мир. 1992.	печ.	3
Драго А. Физические методы в химии. М.: Мир. 1981. тт.1-2.	печ.	3
Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Строение вещества. М.: Высш.шк. 1978.	печ.	3
Спицын В.И., Мартыненко Л.И. Неорганическая химия. М.: Изд. Моск.ун-та. 1991, 1994. т.1,2.	печ.	2
Турова Н.Я. Неорганическая химия в таблицах. М.: ВХК РАН. 2009.	печ.	1
Угай Я.А. Общая и неорганическая химия. М.: Высш.шк. 2005, 2007.	печ.	1

Фримантл М. Химия в действии. М.: Мир. 1991, 1998. т.1,2.	печ.	2
Майер Вероника Р. Практическая высокоэффективная жидкостная хроматография / Майер В.Р.; Петухов Иван Алексеевич [и др.] (пер.). — Изд. 5-е. — М.: Техносфера, 2017	печ.	1
Естественные и технические науки (БАК), RUS, 2016 (10, 11), Журнал	печ.	1
Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем: структурный подход / Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. — М.: Техносфера, 2016	печ.	1

5.2. Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:

1. Федеральный портал «Российское образование» - <http://www.edu.ru/>;
2. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU - <https://www.elibrary.ru/>.

6. Требования к материально-техническому обеспечению программы

ИОНХ РАН располагает материально-технической базой, соответствующей требованиям материального обеспечения дисциплины.

Аудитории для проведения занятий оснащены компьютерами и проекторами для показа мультимедийных презентаций. Компьютеры, объединенные в локальную сеть с выходом в Интернет и подключенные к международным и российским научным базам данных и электронной библиотеке с основными международными научными журналами.

Лаборатории оснащены современными приборами для синтеза неорганических соединений и материалов: стеклянная и пластиковая химическая посуда отечественного и иностранного производства, спектральное и лабораторное оборудование для рутинных измерений, реакционные установки, вакуумные системы, лабораторные печи, хроматографы.

Материально-техническая база соответствует действующим противопожарным правилам и нормам и обеспечивает проведение всех видов дисциплинарной и междисциплинарной подготовки, практической и научно-исследовательской работы аспирантов.

Автор(ы) программы:

Гл.н.с. ИОНХ РАН
Д.х.н.

Зав. Учебным центром




А.В. Егорышева

А.Н. Терехова