

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт Проблем машиноведения
Российской академии наук
(ИПМаш РАН)

Одобрено на Ученом совете
ИПМаш РАН

Протокол №5/24
«04» июня 2024г.



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИПМаш РАН

д.т.н.

В.А. Полянский

«04» июня 2024г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
«ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ»

Образовательная программа
«ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ»

Научная специальность:

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Программу разработал: С. А. Кукушкин

Форма обучения:

очная

Санкт-Петербург
2024

АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Фазовые переходы» реализуется в рамках элективной (обязательной) дисциплины основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) для аспирантов очной формы обучения по образовательной программе «Физика конденсированного состояния», научные специальности: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Рабочая программа разработана в соответствии с «Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 30.11.2021 № 2122) и «Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов» (утверждены приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 20.10.2021 № 951), и учебным планом программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по образовательной программе «Физика конденсированного состояния», научные специальности: 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин; 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Программа дисциплины «Фазовые переходы» по учебному плану предусматривает: лекции, в том числе аудиторные занятия в интерактивной форме; самостоятельную работу. Текущая аттестация проводится в соответствии с заданиями и формами контроля, предусмотренными настоящей программой. Промежуточная аттестация осуществляется в период зачетно-экзаменационной сессии в форме экзамена.

Дисциплина «Фазовые переходы» реализуется на втором курсе, продолжительность обучения – 2 семестра. Экзамен проводится в 4 семестре.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями изучения дисциплины «Фазовые переходы» является приобретение обучающимися знаний, умений и навыков в области физики фазовых превращений, критических явлений, физики образования конденсированных сред, фундаментальных процессов зарождения и роста кристаллов и тонких пленок, эволюции наноструктур, фундаментальных основ выращивания полупроводниковых пленок и применений для успешной профессиональной деятельности.

Существенное внимание уделяется термодинамике и кинетике зарождения новой фазы, вводятся основные фундаментальные, основополагающие понятия и кинетические уравнения, позволяющие не только рассчитать эволюцию процессов зарождения новой фазы, но и заранее предсказывать и рассчитать структуру, состав и свойства синтезируемых наноструктур и тонких пленок.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В ООП

Учебная дисциплина «Фазовые переходы» входит в элективную часть ОП «» по направлению подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИППМаш РАН.

Для изучения данной дисциплины необходимы знания, умения и навыки в области математики и механики, сформированные у обучающихся в процессе освоения программы аспирантуры.

Дисциплина «Фазовые переходы» служит основой для написания выпускной квалификационной работы, а также для осуществления дальнейшей профессиональной деятельности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение дисциплины «Фазовые переходы» дает возможность расширения и углубления следующих компетенций:

Код	Результата обучения (компетенция) выпускника ООП
Общекультурные компетенции (ОК)	
ОК-2	способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности
Профессиональные компетенции (ПК)	
общепрофессиональные компетенции	
ПК-1	общепрофессиональные компетенции: способностью использовать результаты освоения фундаментальных и прикладных дисциплин ООП магистратуры
ПК-3	способностью понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения
ПК-4	способностью самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности
ПК-5	способностью к профессиональной эксплуатации современного оборудования

	и приборов (в соответствии с целями ООП магистратуры)
проектно-конструкторская деятельность	
ПК-7	способностью анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников
ПК-8	готовностью определять цели, осуществлять постановку задач проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ
ПК-9	способностью проектировать устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований
проектно-технологическая деятельность	
ПК-11	способностью разрабатывать технические задания на проектирование технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники
научно-исследовательская деятельность	
ПК-16	готовностью формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач
ПК-17	способностью разрабатывать с использованием современных языков программирования и обеспечивать программную реализацию эффективных алгоритмов решения сформулированных задач
ПК-18	готовностью осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени
организационно-управленческая деятельность	
ПК-22	готовностью участвовать в поддержании единого информационного пространства планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла производимой продукции
ПК-23	готовностью участвовать в проведении технико-экономического и функционально-стоимостного анализа рыночной эффективности создаваемого продукта

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

знать:

- различие между фазовыми превращениями первого и второго родов, влияние внешнего поля на фазовые переходы; различие между фазовыми превращениями первого и критическими явлениями; термодинамические методы расчета критических размеров зародышей новой фазы из паровой, жидкой и твердой фаз; причины стеклования расплавов; характерные времена зарождения новой фазы; общую систему уравнений, описывающую кинетику фазового превращения на стадии зарождения новой фазы, переходной стадии и на стадии Оствальдовского (коалесценции) созревания;

уметь:

- вычислять критическую работу образования новой фазы для любых систем, претерпевающих фазовое превращение в объемных средах и на поверхности подложек, уметь решать основную кинетическую систему уравнений, описывающую зарождение и эволюцию новой фазы; вычислять скорость нуклеации (скорость образования новой фазы) в любых системах, в которых происходят фазовые превращения; вычислять скорость зарождения наноструктур на поверхности твердых подложек; определять оптимальные условия для роста высокосовершенных полупроводниковых пленок;

владеть:

- самым современным математическим аппаратом теории фазовых переходов, навыками, позволяющими заранее прогнозировать получение наноструктур и тонких пленок с заданной структурой и свойствами;

- методами вычисления распределения новой фазы по размерам;

- методами, позволяющим оптимизировать технологические процессы роста новой фазы с целью получения тонких пленок и наноструктур с заданными свойствами.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Фазовые переходы» осваивается в 5 семестре.

Виды учебной работы
Лекции
Практические занятия, семинары
в том числе аудиторные занятия в интерактивной форме
Самостоятельная работа
Экзамены (подготовка, сдача)

Разделы дисциплины:

Наименование разделов и тем:
Тема 1. Фазовые переходы первого и второго рода. Параметр порядка. Классификация фазовых переходов по Эренфесту. Уравнение Эренфеста.
Тема 2. Порядок и беспорядок в расположении атомов. Внутренняя энергия, энтропия и свободная энергия твёрдого раствора. Дальний и ближний порядок.
Тема 3. Фазовые переходы второго рода.
Тема 4. Фазовые переходы I рода близкие к переходам II.
Тема 5. Общие закономерности фазовых диаграмм связанных с разложением свободной энергии по степеням параметра порядка.
Тема 6. Флуктуационная теория фазовых переходов. Критические индексы. Эффективный гамильтониан.
Тема 7. Общая теория фазовых переходов. Теория Янга и Ли. Модель Изинга. Теория Онсагера.
Тема 8. Термодинамика зарождения новой фазы. Образование зародышей при фазовых переходах. Минимальная работа образования зародыша новой фазы. Понятие о бинодали и

спинодали в системе пар-жидкость.
Тема 9. Кинетическая теория образования новой фазы по Фольмеру и Веберу. Теория зарождения новой фазы по Беккер и Дерингу.
Тема 10. Капиллярная теория зародышеобразования. Уравнение Зельдовича.
Тема 11. Коэффициент диффузии в “пространстве размеров”.
Тема 12. Зарождение новой фазы в однокомпонентных расплавах. Влияние вязкости расплава на скорость нуклеации.
Тема 13. Поздняя стадия фазовых переходов первого рода. Теория Лифшица-Слезова.
Тема 14. Фазовые переходы на поверхности. Классическая теория зарождения тонких пленок.
Тема 15. Управление процессами роста зародышей новой фазы на поверхности подложек. Рост квантовых точек и наноструктур.

Содержание разделов и результаты изучения дисциплины

Темы, разделы	Результаты освоения дисциплины
1 Фазовые переходы первого и второго рода. Параметр порядка. Классификация фазовых переходов.	Знание основных закономерностей фазовых переходов. Понимание различия между фазовыми переходами первого и второго рода. Понимание причин различия в поведении таких термодинамических функций как теплоемкость и энтропия при фазовых переходах первого и второго рода
2. Порядок и беспорядок в расположении атомов. Внутренняя энергия, энтропия и свободная энергия твёрдого раствора. Дальний и ближний порядок. Дальность порядка. Усовершенствование теории Брэгга-Вильямса. Теория Ландау.	Знание основных микроскопических причин различного поведения термодинамических функций при фазовых превращениях. Освоение навыками расчета и прогнозирования фазовых превращений в различных системах
3. Элементы термодинамики зарождения новой фазы. Образование зародышей при фазовых переходах. Минимальная работа образования зародыша новой фазы.	Умение вычислять свободную энергию, изобарно-термодинамический потенциал и другие термодинамические функции новой фазы. Умение вычислять величину энергетического барьера зарождения новой фазы
4. Введение в кинетическую теорию фазовых переходов первого рода.	Умение вычислять скорость зарождения новой фазы в любых системах. Умение предсказывать возможность задержки процесса зарождения и, тем самым прогнозировать и управлять структурой свойствами образующейся новой фазы
5. Кинетическая теория массового зарождения новой фазы	Знание современных математических методов решения уравнений эволюции новой фазы. Приобретение

	профессиональных навыков анализа и расчетов распределения новой фазы по размерам. Умение прогнозировать условия необходимые для получения зародышей новой фазы с заранее заданным распределением по размеру.
6. Поздняя стадия фазовых переходов первого рода. Теория Лифшица-Слезова.	Владение принципами расчета эволюции ансамбля выделений новой фазы. Умение определять механизмы массопереноса в твердых растворах и определять коэффициенты диффузии примесей по виду функций распределения новой фазы по размерам.
7. Фазовые переходы на поверхности. Классическая теория зарождения тонких пленок. Основные процессы, происходящие на поверхности подложки. Режимы роста тонких пленок. Краевой угол. Работа образования зародыша новой фазы на твердой подложке	Знание законов протекания фазовых переходов на поверхности твердых подложек. Умение вычислять основные термодинамические параметры образования новой фазы на поверхности подложек Понимание общих закономерностей образования новой фазы на твердых поверхностях
8. Управление процессами роста зародышей новой фазы на поверхности подложек. Рост квантовых точек и наноструктур	Понимание процессов протекающих при формировании кантовых точек и других наноструктур. Умение вычислять внешние потоки атомов на подложку с целью формирования пленок с заданной структурой и свойствами

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В преподавании курса используются следующие образовательные технологии:

- лекции;
- практические занятия;
- самостоятельная подготовка.

6. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

Не предусмотрены.

7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

В рамках преподавания курса предусмотрены 3 практических занятия.

8. ОРГАНИЗАЦИЯ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа студентов включает:

- работу с лекционными материалами;

- работу с учебной литературой;
- подготовку к практическим занятиям;
- подготовку к промежуточной аттестации.

Самостоятельная работа студентов обеспечена:

- материалами в электронном виде;
- имеющейся в библиотеке учебной литературой.

Примерное распределение времени самостоятельной работы студентов

Вид самостоятельной работы
Работа с лекционными материалами, с учебной литературой
Подготовка к практическим занятиям
Подготовка к промежуточной аттестации

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Интернет-ресурсы

База данных по полупроводниковым материалам: Термодинамика гетерогенных наноструктурных сред": <http://nano.fcior.edu.ru/start-download.action?id=9B928A9B-F64E-4AA9-8F51-549FB9E4272C>

9.2. Рекомендуемая литература

Основная литература

1. С.А.Кукушкин, В.В.Слезов. Дисперсные системы на поверхности твёрдых тел: механизмы образования тонких пленок (эволюционный подход). СПб: Наука, 1996.- 304с;
2. С.А.Кукушкин, А.В.Осипов. Термодинамика и кинетика фазовых переходов первого рода на поверхности твёрдых тел. Химическая физика, Т.15, № 9, С.5-104, 1996.
3. С.А.Кукушкин, А.В.Осипов. Процессы конденсации тонких плёнок Успехи физических наук, 1998,Т 168. № 10, С.1083-1116.
4. С.А.Кукушкин, А.В.Осипов. Фазовые переходы и зарождение каталитических наноструктур под действием химических, физических и механических факторов *Кинетика и Катализ*, т.49, № 1, стр. 85-98, (2008).
5. В.Г. Дубровский. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур М.: Наука, Главная ред.физ-мат. лит. 2009.- 351с..
6. Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Т.5. Статистическая физика. Часть1 М.: Наука, Главная ред.физ-мат. лит. 1976.- 584с..
7. В.П. Скрипов, М.З. Файзулин. Фазовые переходы кристалл-жидкость – пар и термодинамическое подобие М.: Наука, Главная ред.физ-мат. лит. 2006.- 159с.
8. Дж. Кристиан. Теория превращений в металлах и сплавах М., Мир, 1978.-807с.

10. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ И ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА

10.1. Критерии оценивания

По бальной-рейтинговой системе оценки освоение изучаемой дисциплины в полном объеме оценивается в 100 баллов, которые начисляются студенту следующим

образом:

- за сдачу экзамена – до 50 баллов за экзамен;
- за выполнение практической работы – до 10 баллов за каждую работу;
- за активность на занятиях – до 1 балла за занятие.

10.2. Оценочные средства

По результатам курса слушатели получают зачет или сдают экзамен в конце каждого семестра.

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Все этапы изучения дисциплины сопровождаются как групповыми, так и индивидуальными консультациями. Рекомендуется основной объем базовых знаний преподнести на лекциях и практических занятиях, а указанную литературу использовать для закрепления и расширения полученных знаний. Также рекомендуется больше внимания уделять самостоятельной работе аспирантов с тем, чтобы, ознакомившись на при самостоятельной работе с основной литературой, они имели возможность консультироваться у преподавателя.