

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)



УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

«13» 04 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

**ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа дисциплины «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах» составлена на основании основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников (далее – программа аспирантуры)

### **1. Цель освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах» являются формирование у аспирантов научного кругозора в физике твердого тела, понимания механизмов фазовых переходов и природы фазовых состояний различного типа в твердотельных системах различной размерности, умения применять эти знания для создания и исследования новых материалов, перспективных в плане практического применения.

### **2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Дисциплина «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах» входит в обязательную часть образовательного компонента программы аспирантуры и направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена.

Курс изучается аспирантами на 2-м году обучения. Обучение ведется в форме аудиторных занятий (лекций) и самостоятельной подготовки.

В результате прохождения курса обучения по данной программе, аспирант должен освоить базовые принципы физики твердого тела в русле проблематики лаборатории (группы), где работает его научный руководитель, и где будет проходить самостоятельная научная работа аспиранта. Изучение данной дисциплины и специфика подачи отдельных вопросов может варьироваться в зависимости от индивидуального плана работы аспиранта, согласованного с его научным руководителем в целях оптимального соответствия решаемым задачам.

### **3. Компетенции аспиранта, формируемые в результате освоения дисциплины «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах»**

Процесс изучения дисциплины «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах» направлен на формирование следующих компетенций:

#### ***3.1. Универсальные компетенции:***

- 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);

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с

использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);

- 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);

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

### ***3.2. Общепрофессиональные компетенции:***

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

- готовность к преподавательской деятельности по образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

### ***3.3. Профессиональные компетенции:***

- способность планировать и организовывать работу, направленную на разработку экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами, новых физических принципов работы и создание приборов на базе полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых структур, разработку методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур (ПК-1);

- способность к теоретическому и экспериментальному изучению физических свойств различных конденсированных сред, исследованию воздействия различных видов излучений, других внешних воздействий на природу изменений физических свойств конденсированных веществ (ПК-2);

- способность к разработке математических моделей построения физических моделей и прогнозированию изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения (ПК-3);

- способность получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методики и средства решения поставленных задач (ПК-4).

В результате освоения дисциплины аспирант должен демонстрировать и применять углубленные знания в профессиональной деятельности.

#### **знать:**

основные разделы научной дисциплины «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах»:

- основные явления и эффекты, обусловленные наличием фазовых превращений, и их теоретическое описание;
- теорию Ландау фазовых переходов II рода и фазовых переходов I рода, близких к переходам II рода;
- методы экспериментального исследования основных свойств, обусловленных фазовыми переходами в упорядоченную фазу;
- области практического применения материалов, которые имеют важные для практики свойства, приобретаемые за счет реализации фазовых состояний при фазовых переходах (в сегнетоэлектрических, магнитных, мультиферроидных и других материалах).

**уметь:**

- самостоятельно изучать и понимать научную литературу, связанную с фазовыми переходами и фазовыми состояниями в твердых телах;
- проводить расчеты в рамках теории Ландау симметрии фаз, реализуемых в результате фазовых переходов;
- феноменологически описывать различные эффекты, обусловленные упорядочением при фазовых переходах различного типа (структурных, сегнетоэлектрических, магнитных и др.);
- работать со специальной литературой и применять теоретические знания для интерпретации результатов эксперимента;

профессионально излагать результаты своих исследований и представлять их в виде научных публикаций, информационно-аналитических материалов и презентаций.

**владеть:**

- свободно владеть знаниями по фундаментальным разделам физики конденсированных сред, необходимыми для решения научно-исследовательских задач, научной терминологией, основными понятиями физики твердого тела в пределах, необходимых для понимания специальной научной литературы, связанной с проблемами физики фазовых переходов и фазовых состояний в твердых телах.

**4. Структура и содержание дисциплины «Фазовые переходы и фазовые состояния в твердых телах»:**

общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы (72 часа).

**4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:**

Вид учебной работы	Трудоемкость (в ак. часах)
Лекции	28
Самостоятельная работа аспиранта	44
<b>ИТОГО</b>	<b>72</b>
Вид итогового контроля	зачет

## 4.2. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в ак. часах)		Контроль
		Лек	СР	
1	Введение. Основные понятия и определения.	2	3	
2	Феноменологические характеристики процесса фазового перехода.	2	3	
3	Теория Ландау фазовых переходов II рода.	4	6	
4	Флуктуации параметра порядка при фазовом переходе второго рода. Критические явления.	4	4	
5	Структурные и сегнетоэлектрические фазовые переходы и фазовые состояния.	4	8	
6	Магнитные фазовые переходы	2	4	
7	Ферроики и мультиферроики	2	4	
8	Фазовый переход в сверхпроводящее состояние	2	4	
9	Мартенситные фазовые превращения.	2	4	
10	Применение в устройствах микро- и нанoeлектроники свойств твердых тел, обусловленных фазовыми превращениями и управлением фазовыми состояниями.	2	4	
	<b>Всего по дисциплине</b>	<b>28</b>	<b>44</b>	<b>Зачет</b>

## 5. Содержание разделов (тем) дисциплины

### 5.1. Содержание аудиторных занятий

**Тема 1.** Введение. Основные понятия и определения.

Общие понятия и определения. Фазы вещества. Фазовые переходы первого (I) и второго (II) рода. Фазовые переходы типа порядок-беспорядок и типа смещения. Дисторсионные и реконструктивные фазовые переходы. Спонтанные и индуцированные фазовые переходы. Примеры фазовых переходов. Параметр порядка. Фазовая диаграмма. Общее определение критических явлений. Критические точки.

**Тема 2.** Феноменологические характеристики процесса фазового перехода.

Функция распределения состояний квазизамкнутой подсистемы. Теорема Лиувилля. Микроканоническое распределение в классической и квантовой статистике. Статистическое определение энтропии и ее выражение через функцию распределения состояний. Скачок энтропии при фазовом переходе. Определение температуры фазового перехода. Средние значения термодинамических величин. Давление. Равенство температур и давлений контактирующих фаз. Теплота фазового перехода. Термодинамические неравенства.

Тепловая функция. Свободная энергия и ее поведение при фазовом переходе. Термодинамический потенциал. Соотношения между производными термодинамических величин. Химпотенциал. Распределение Гиббса.

### **Тема 3.** Теория Ландау фазовых переходов II рода.

Фазовый переход, как изменение симметрии. Элементы теории симметрии кристаллов. Определение группы симметрии. Точечные и пространственные группы симметрии. Неприводимые представления групп симметрии. Основные положения теории Ландау. Термодинамический потенциал как функционал функции плотности кристалла. Определение параметра порядка. Симметрия коэффициентов разложения термодинамического потенциала по степеням параметра порядка. Фазовые переходы II рода, описываемые однокомпонентным параметром порядка. Скачек теплоемкости. Температурная зависимость параметра порядка и других макроскопических физических характеристик кристалла при фазовых переходах II рода. Влияние внешнего поля на фазовый переход. Сильное и слабое поле. Восприимчивость.

**Тема 4.** Флуктуации параметра порядка при фазовом переходе второго рода. Критические явления.

Флуктуации параметра порядка при фазовом переходе второго рода. Корреляционный радиус. Функция корреляции. Учет флуктуаций параметра порядка в теории Ландау. Область применимости теории Ландау для фазовых переходов II рода. Параметр Гинзбурга - Леванюка. Критические явления. Критические индексы и соотношения между ними. Понятие масштабной инвариантности. Изолированные и критические точки непрерывного фазового перехода; трикритическая точка.

**Тема 5.** Структурные и сегнетоэлектрические фазовые переходы и фазовые состояния.

Классификация сегнетоэлектриков (собственные, несобственные, псевдособственные), основные характеристики. Антисегнетоэлектрики. Принцип Кюри. Прогнозирование сегнетоэлектрических фазовых переходов и симметрии фаз на основе теории Ландау и принципа Кюри. Прафаза. Теоретическое описание аномалий физических свойств сегнетоэлектриков на основе теории Ландау: спонтанная поляризация, диэлектрическая проницаемость, энтропия, теплоемкость, объемная сжимаемость, тепловое расширение. Влияние электрического поля на аномалии физических свойств сегнетоэлектриков. Релаксоры. Виртуальные сегнетоэлектрики. Индуцированная примесями сегнетоэлектрическая фаза в квантовых параэлектриках. Доменная структура. Возникновение доменов при сегнетоэлектрическом фазовом переходе. Структура доменной стенки. Процессы переключения. Динамика сегнетоэлектрических фазовых переходов. Диэлектрическая проницаемость и мягкая мода. Соотношение Лиддана-Сакса-Теллера.

Сегнетоэластики. Фазовые переходы I рода, близкие к переходам II рода. Трикритическая точка. Сегнетоэлектрические тонкие пленки. Деформационная инженерия сегнетоэлектрических тонких пленок: индуцированное деформациями возрастание температуры перехода в параэлектрическую фазу; фазовые диаграммы пленок в координатах деформация – температура; специфические сегнетоэлектрические фазы, стабилизированные деформациями решетки.

#### **Тема 6.** Магнитные фазовые переходы.

Спонтанные и индуцированные магнитные фазовые переходы. Фазовые переходы в ферромагнетиках, антиферромагнетиках, ферримагнетиках. Приближение молекулярного поля. Применение теории Ландау для магнитных переходов. Индуцированные магнитным полем ориентационные магнитные фазовые переходы.

#### **Тема 7.** Ферроики и мультиферроики.

Определение и классификация ферроиков (полные ферроики, частичные ферроики, неферроики), примеры ферроиков. Сегнетомагнетики (магнитоэлектрические мультиферроики), магнитоэлектрики. Сосуществование сегнетоэлектричества и магнетизма в однофазных кристаллах (феррит висмута, манганиты, борациты и т.д.); термодинамика мультиферроиков; магнитоэлектрические эффекты деформационного происхождения в композитных материалах и гетероструктурах; практические применения магнитоэлектрических мультиферроиков.

#### **Тема 8.** Фазовый переход в сверхпроводящее состояние.

Открытие сверхпроводимости. Квантование магнитного потока. Эффекты Джозефсона. Эффект Мейсснера. Магнитные свойства сверхпроводников первого и второго рода. Термодинамика сверхпроводников: критическое термодинамическое магнитное поле. Энтропия сверхпроводника. Теплоемкость и свободная энергия. Теория Гинзбурга - Ландау: плотность свободной энергии; уравнение Гинзбурга - Ландау; градиентная инвариантность; длина когерентности; эффект близости. Основные положения БКШ. Высокотемпературная сверхпроводимость.

#### **Тема 9.** Мартенситные фазовые превращения.

Определение мартенситного превращения. Образование зародышей твердой фазы. Признаки мартенситного превращения. Выводы теории мартенситных превращений. Фазовый переход металл - полупроводник (ФПМП) как пример мартенситного фазового превращения. Оптические явления, сопровождающие ФПМП: скачки оптических констант, интерференционные эффекты, смягчение комбинационных частот. Внутренняя структура петли температурного гистерезиса. Функция распределения коэрцитивных температур. ФПМП в тонких пленках. Применения ФПМП.

#### **Тема 10.** Применение в устройствах микро- и наноэлектроники свойств твердых тел,

обусловленных фазовыми превращениями и управлением фазовыми состояниями.

Запись и считывание информации. Модуляторы и другие магнито- и электрооптические устройства. Конденсаторы. Пироприемники. Позисторы. Гибридные структуры. Резистивное переключение. Мемристоры.

### **5.2. Самостоятельная работа аспиранта**

Самостоятельная работа аспиранта включает повторение лекционного материала по темам, чтение рекомендованной литературы и научной периодики, а также изучение методических рекомендаций к работе в лаборатории.

## **6. Оценочные средства для текущего контроля и промежуточной аттестации**

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

### **6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

### **6.2. Аттестация**

Аттестация проводится в форме зачета с оценкой. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

#### **Контрольные вопросы для аттестации:**

<b>№</b>	<b>Контрольные вопросы</b>
1.	Фазы вещества. Фазовые переходы первого (I) и второго (II) рода. Фазовые переходы типа порядок-беспорядок и типа смещения. Дисторсионные и реконструктивные фазовые переходы. Спонтанные и индуцированные фазовые переходы. Примеры фазовых переходов. Параметр порядка.
2.	Функция распределения состояний квазизамкнутой подсистемы. Микроканоническое распределение в классической и квантовой статистике.
3.	Определение группы симметрии. Точечные и пространственные группы симметрии. Неприводимые представления групп симметрии.
4.	Основные положения теории Ландау фазовых переходов II рода. Определение параметра порядка. Разложение термодинамического потенциала по степеням параметра порядка.
5.	Фазовые переходы II рода, описываемые однокомпонентным параметром порядка. Скачек теплоемкости. Температурная зависимость параметра порядка при фазовых переходах II рода.
6.	Влияние внешнего поля на фазовый переход II рода в рамках теории Ландау. Сильное и слабое поле. Восприимчивость.
7.	Учет флуктуаций параметра порядка в теории Ландау. Область применимости теории Ландау для фазовых переходов II рода.
8.	Критические явления. Основы теории подобия. Критические индексы.
9.	Сегнетоэлектрические фазовые переходы из centrosymmetric группы



	$\frac{4}{mm}$
10.	Фазовые переходы с возникновением спонтанной поляризации в кристалле кубического класса $m\bar{3}m$ .
11.	Аномалии тепловых и электрических свойств при собственных сегнетоэлектрических фазовых переходах (однокомпонентный параметр порядка), влияние электрического поля.
12.	Фазовые переходы I рода, близкие к переходам II рода.
13.	Виртуальные сегнетоэлектрики. Индуцированная примесями сегнетоэлектрическая фаза в квантовых параэлектриках.
14.	Деформационная инженерия сегнетоэлектрических тонких пленок.
15.	Фазовые переходы в ферромагнетиках. Приближение молекулярного поля. Теория Ландау.
16.	Фазовые переходы в антиферромагнетиках. Приближение молекулярного поля.
17.	Фазовые переходы в антиферромагнетиках. Теория Ландау.
18.	Индукцированные магнитным полем ориентационные магнитные фазовые переходы.
19.	Определение и классификация ферроиков. Мультиферроики. Сосуществование сегнетоэлектричества и магнетизма в однофазных кристаллах.
20.	Термодинамика мультиферроиков. Практические применения магнитоэлектрических мультиферроиков
21.	Сверхпроводимость. Квантование магнитного потока. Эффекты Джозефсона, Мейсснера. Магнитные свойства сверхпроводников первого и второго рода.
22.	Теория Гинзбурга – Ландау для сверхпроводников: плотность свободной энергии; уравнение Гинзбурга – Ландау.
23.	Основные положения БКШ для сверхпроводящих металлов.
24.	Высокотемпературная сверхпроводимость.
25.	Фазовый переход металл – полупроводник, как пример мартенситного фазового превращения.
26.	Оптические явления, сопровождающие фазовый переход металл – полупроводник.

## 7. Образовательные технологии

В процессе обучения применяются следующие образовательные технологии:

1. Сопровождение лекций показом визуального материала;
2. Использование компьютерных моделей физических процессов в полупроводниках;
3. Выполнение учебно-научных работ с использованием современного научного оборудования.

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Учебные, учебно-методические и иные библиотечно-информационные ресурсы обеспечивают учебный процесс и гарантируют возможность качественного освоения аспирантом образовательной программы. ФТИ им. А.Ф.Иоффе располагает обширной библиотекой, включающей общенаучную и специальную литературу.

## 9. Литература

**Основная литература:**

1. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособие: для вузов. В 10 т. Том V. Статистическая физика. Часть 1 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005 – 616 с.

2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособие: для вузов. В 10 т. Том VIII. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001 – 656 с.

3. Tagantsev Alexander K. Domains in Ferroic Crystals and Thin Films / Alexander K. Tagantsev, L. Eric Cross, Jan Fousek - Springer New York Dordrecht Heidelberg London Springer Science+Business Media, 2010, - 831 p.

4. Струков Б.А. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах: Учеб. пособие: Для вузов / Б.А. Струков, А.П. Леванюк - М.: Наука. Физматлит, 1995 - 304 с.

5. Боков В.А. Физика магнетиков: учебное пособие для вузов / В.А. Боков - Санкт-Петербург:- Невский диалект, 2002 г- 271 с.

6. Калиникос Б.А./Б.А. Калиникос, А.Б. Устинов, С.А. Баруздин/Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Москва, Радиотехника, 2013 г.

7. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Учебное руководство, 2-е изд./ Ч. Киттель. – 2006. М. ООО «МедиаСтар».

8. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М., Наука, 2000.

9. Электронные и рукописные варианты конспектов лекций преподавателей.

#### *Дополнительная литература*

1. Изюмов Ю.А., Фазовые переходы и симметрия кристаллов / Ю.А. Изюмов, В.Н. Сыромятников – Москва: Наука, 1984, - 247 с.

2. М. Лайнс, А. Гласс, Сегнетоэлектрики и родственные материалы / М. Лайнс, А. Глас - М.: Мир, 1981 – 736 с.

3. Смоленский Г.А. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исупов, Н.Н. Крайник, Р.Е. Пасынков, А.И. Соколов, Н.К. Юшин – Л.: Наука, 1985 – 396 с.

4. Паташинский А.З. Флуктуационная теория фазовых переходов / А.З. Паташинский, В.Л. Покровский – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982 – 382 с.

#### **10. Программное обеспечение**

Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Характеристики и свойства. База данных разработана и поддерживается сектором теоретических основ микроэлектроники: <http://www.matprop.ru/>

#### **11. Интернет-ресурсы**

Отечественные журналы:

1. Физика твердого тела, электронная версия;
2. Физика и техника полупроводников, электронная версия;
3. ЖЭТФ; электронная версия;
4. Письма в ЖЭТФ электронная версия;
5. Успехи физических наук электронная версия;

Иностранные журналы:

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия;
4. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer);
5. Central European Journal of Physics The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer) ;
6. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия;
7. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия; доступ с 1958 по 2009.
8. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics ) электронная версия;
9. Nanotechnology (UK Institute of Physics ) электронная версия;
10. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия;
11. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия;
12. New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия;
13. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия;
14. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group) электронная версия;
15. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
16. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
17. Physica Status Solidi A (Wiley) электронная версия;
18. Physica Status Solidi B (Wiley) электронная версия;
19. Physica Status Solidi C (Wiley) электронная версия;
20. Physica Status Solidi RRL (Wiley) электронная версия;
21. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct) электронная версия;

## **12. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН располагает материально-технической базой, соответствующей санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренной учебным планом.

***Наименование оборудования для проведения занятий по дисциплине:***

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер

Лаборатория оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах, имеющая современное оборудование для исследования явлений при фазовых переходах в сегнетоэлектрических и магнитных материалах.

Лаборатория кинетических явлений в твердых телах при низких температурах, имеющая современный криомагнитный комплекс измерения физических свойств конденсированных сред PPMS-14, позволяющий обеспечить измерения физических свойств в интервале температур (0.4-400) К и магнитных полей до 14Т в круглосуточном режиме. Оборудование позволяет осуществлять комплексную характеризацию электрических, сверхпроводящих, магнитных, тепловых, термоэлектрических свойств новых материалов в различном фазовом состоянии и композитных систем для создания элементов электронной и сенсорной техники.

Лаборатория физики ферроиков, имеющая современное оборудование для исследования сверхбыстрых магнитных индуцированных фазовых превращений.

Лаборатория физики сегнетоэлектричества и магнетизма, имеющая современное оборудование для исследования диэлектрических характеристик твердых тел при фазовых переходах в широком диапазоне температур.

Программа разработана:

вед.н.с., д-р физ.-мат. наук, Шадрин Е.Б.,  
вед.н.с., д-р физ.-мат. наук, Н.А. Перцев