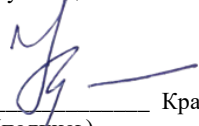




МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП

  
Крайнова Г. С.  
(подпись)  
« 19 » сентября 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Заведующий кафедрой  
физики низкоразмерных структур

  
Саранин А. А.  
(подпись)  
« 19 » сентября 2018 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Физика конденсированного состояния**  
**Направление подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**  
**Профиль Электроника и нанoeлектроника**

**Форма подготовки очная**

курс 3 семестр 5  
лекции 18 час.  
практические занятия - 18 час.  
лабораторные работы - 36 час.  
в том числе с использованием МАО лаб. 36 час.  
всего часов аудиторной нагрузки 72 час.  
в том числе с использованием МАО 16 час.  
самостоятельная работа 36 час.  
в том числе на подготовку к экзамену 0 час.  
контрольные работы 5 семестр  
курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены  
зачет 5 семестр  
экзамен не предусмотрен

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ, утвержденного приказом ректора от 18.02.2016 № 12-13-235 .

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физики низкоразмерных структур, протокол № 1 от «19» сентября 2018 г.

Заведующий кафедрой физики низкоразмерных структур Саранин А.А..

Составитель: к.ф.-м.н., профессор Крайнова Г. С.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Саранин А. А.  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Саранин А. А.  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## ABSTRACT

**Bachelor's degree in 11.03.04 Electronics and nanoelectronics**

**Course title: Physics of condensed state**

**Basic part of Block, 3 credits**

**Instructor:** G. S. Kraynova, Cand. of Phys. and math., Docent, Professor  
Department of physics of low-dimensional structures. School of Natural Sciences of  
Far Eastern Federal University.

### **Learning outcomes:**

GPC-1 - the ability to provide adequate current level of knowledge in the scientific picture of the world based on the knowledge of the basic provisions, laws and methods of natural Sciences and mathematics.

PC-2 - the ability convincingly to choose and implement effective methods of experimental research of parameters and characteristics of devices, circuits devices and systems electronics and nanoelectronics of various functional purposes.

### **Course description:**

The basis of this course is to study basic concepts in physics the crystalline state, the properties and characteristics of the main types of crystals, the motion of electrons in a solid, the energy conditioning structure. Part of the course "condensed matter Physics" aims at introducing students to the field of physics of disordered media: glassy, amorphous, silica and metallic glasses.

### **Main course literature:**

1. Anfimov, IM, Kobeleva, SP, Kononov, MP, Osipov, Yu.V., Orlova, M.N., Spitsyna, L.G. Solid State Physics: a collection of problems // M.: Publishing House MISiS, 2011. - 70 p.

<http://www.iprbookshop.ru/56591.html>

2. Baikov Yu., V. M. Kuznetsov. Condensed matter physics // M.: Binom. Laboratory of knowledge, 2011, 294 p.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:668131&theme=FEFU>

3. Physics of surface. Theoretical models and experimental methods / M. V. Mamonova, V. V. Prudnikov, and I. A. Prudnikova. Moscow, Fizmatlit, 2011. – 400 p.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:663084&theme=FEFU>

4. V.A. Goldade, L.S. Pinchuk. Condensed matter physics / Minsk: Belarus science, 2009. – 648 p.

<http://www.iprbookshop.ru/11505.html>

5. Yu.A. Strekalov, N.A. Tenyakova. Solid State Physics: Study Guide // Moscow: ITs RiOR: Infra-M Research Center, 2013. - 307 p.

<http://znanium.com/catalog/product/363421>

6. Belko V.N., Tutov E.A., Nikishina A.I., Abramov A.V. Physics of the condensed state in examples and tasks: a tutorial // Voro-nezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, EBS DIA, 2017. - 79 p.

<http://www.iprbookshop.ru/72951.html>

**Form of final knowledge control: exam.**

## АННОТАЦИЯ

Учебная дисциплина «Физика конденсированного состояния» разработана для студентов 3 курса бакалавриата по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 ЗЕ (108 часов). Учебным планом предусмотрены лекции (18 часов), лабораторные работы (36 часов), практические занятия (18 часов), самостоятельная работа студента (36 часов). Дисциплина «Физика конденсированного состояния» входит в базовую часть цикла дисциплин образовательной программы, реализуется на 3 курсе, в 5 семестре.

Основой данного курса является изучение основных понятий в области физики кристаллического состояния, свойств и характеристик основных типов кристаллов, движения электронов в твердом теле, зонной энергетической структуры. Часть курса «Физики конденсированного состояния» преследует цель введения студентов в область физики разупорядоченных сред: стеклоподобных, аморфных, кварцевых и металлических стёкол.

Изучение дисциплины «Физики конденсированного состояния» базируется на следующих межпредметных связях: необходимо знание термодинамики и статистической физики, электродинамики, квантовой механики и избранных вопросов по физической кинетике. Так же предполагается знание разделов математического анализа, линейной алгебры и геометрии. Требуется привлечение специальных методов математики, и, собственно, курсов специальности. С другой стороны, данная дисциплина является стартовым курсом при изучении профильных дисциплин электроники и наноэлектроники.

Дисциплина направлена на формирование общепрофессиональных и профессиональных компетенций выпускника.

**Цель** изучения дисциплины - формирование у студентов знаний, умений и навыков, соответствующих требованиям квалификационной

характеристики, введение студентов в область физики разупорядоченных сред: стеклоподобных, аморфных, кварцевых и металлических стёкол.

**Задачи:**

- установление связей между свойствами индивидуальных атомов и молекул и свойствами, обнаруживаемыми при объединении атомов или молекул в ассоциации в виде регулярно упорядоченных систем – кристаллов;
- объяснение свойств кристаллов и аморфных твердых тел, опираясь на простые физические модели;
- знание законов движения электронов в твердом теле, зонной энергетической структуры.

Для успешного изучения дисциплины «Физики конденсированного состояния» у обучающихся должны быть сформированы следующие общепрофессиональные и профессиональные компетенции:

ОПК-1, способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;

ПК-2, способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие элементы компетенций:

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ОПК-1, способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе	Знает	структуру твердых тел на атомном уровне и законы этого строения; формулировку и аналитический вид потенциалов взаимодействия различных твердых тел; законы, описывающие динамику кристаллической решетки; зонную теорию и другие свойства твердых тел
	Умеет	анализировать структуру твердых тел с последующим описанием их свойств на основе законов их

знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики		построения на атомном уровне, статистических закономерностей поведения электронного ансамбля
	Владеет	методами термодинамики и статистической физики для описания структуры твердых тел и их свойств
ПК-2, способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения	Знает	необходимые свойства твердых тел и связь их со структурой для использования их в электронике и нанoeлектронике
	Умеет	аргументировано формулировать свойства твердых тел для использования их в электронике и нанoeлектронике в связи с их структурой
	Владеет	законами и принципами построения твердых тел с уникальными физическими свойствами для использования их в определенных областях электроники и нанoeлектроники

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Физика конденсированного состояния» применяются следующие методы активного/ интерактивного обучения:

- лекция пресс-конференция
- коллективная мыслительная деятельность
- проблемная ситуация.

А также индивидуальные методы активного обучения:

- выполнение практических задач.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 ЧАСОВ)**

### **1. Введение (1 час).**

Современные проблемы физики твердого тела, связанные с электроникой и нанoeлектроникой. Перспективные материалы для электроники и нанoeлектроники.

### **2. Симметрия структуры кристаллов (2 часа).**

Пространственная решетка – главный элемент симметрии кристаллических структур. Типы решеток Браве. Определение элементарной ячейки – ячейки Браве. Примитивная, условная ячейки Браве.

Трансляционные элементы симметрии – плоскости скользящего отражения, винтовые оси. 230 пространственных группах симметрии кристаллов. Правильные системы точек, их характеристики.

### **3. Типы связей в кристаллах (3 часа).**

Кристаллы инертных газов: силы Ван-дер-Ваальса-Лондона, взаимное отталкивание атомов; равновесные постоянные решетки, энергия связи.

Ионные кристаллы: энергия Маделунга, вычисление постоянной Маделунга; объемный модуль упругости.

Ковалентные кристаллы, металлические кристаллы, кристаллы с водородными связями.

### **4. Элементы физической статистики (2 час).**

Способы описания макроскопической системы. Невырожденные и вырожденные коллективы. Число состояний для микрочастиц. Функция распределения для невырожденного газа. Функция распределения для вырожденного газа фермионов. Функция распределения для вырожденного газа бозонов.

### **5. Динамика решетки (3 часа).**



Понятие о нормальных колебаниях решетки. Спектр нормальных колебаний решетки. Понятие о фононах. Дисперсионные соотношения для фононов. Колебания в решетке из одинаковых атомов. Спектр колебаний в структуре со сложным базисом. Понятие о зонах Бриллюэна. Фонон-электронное рассеяние как источник электрического, теплового сопротивления.

Статистика фононов и теплоемкость решетки. Теория Дебая. Закон Дебая. Зависимость температуры Дебая от температуры. Область применимости теории Дебая

Теплоемкость электронного газа. Тепловое расширение твердых тел. Теплопроводность твердых тел.

#### **6. Зонная теория твердых тел (4 часа).**

Энергетические уровни свободных атомов. Обобществление электронов в кристалле. Теорема Блоха. Энергия Ферми. Уровень Ферми. Оценка зависимости энергии Ферми от температуры. Энергетический спектр электронов в кристалле. Зависимость энергии электрона от волнового вектора. Эффективная масса электрона. Заполнение зон электронами. Проводники, диэлектрики и полупроводники. Сверхпроводимость. Сверхтекучесть.

#### **7. Магнитные свойства твердых тел (3 час.)**

Магнитное поле в магнетиках. Магнитные свойства атомов. Природа диамагнетизма, парамагнетизма, ферромагнетизма. Антиферромагнетизм. Ферромагнетизм. Ферриты. Магнитный резонанс. Понятие о квантовой электронике.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (54 ЧАС.)**

### **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (36 часов)**

1. Описание симметрии кристаллических структур по их пространственным моделям – выбор элементарной ячейки, определение типа решетки Браве, подсчет числа формульных единиц, определение координационных чисел и многогранников, описание структуры кристалла в терминах плотнейших упаковок, определение типа связи.

2. Метод лоренцевой микроскопии в исследовании распределения вектора намагниченности планарных сред.

3. Корреляционный и аттрактивный анализ магнитной структуры планарных сред.

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (18 ЧАСОВ)**

#### **1. Основы кристаллохимии (6 часов).**

Атомные и ионные радиусы. Основные понятия кристаллохимии: координационное число, координационный многогранник, число формульных единиц.

Типы связи в кристаллических структурах, их различия. Гомодесмические и гетеродесмические структуры. Координационные многогранники.

Теория плотнейших упаковок шаров: двухслойные и трехслойные структуры.

#### **2. Основные типы химической связи (6 часов).**

Металлическая связь. Ковалентная связь. Ионные кристаллы. Кристаллы инертных газов – молекулярные кристаллы. Гомо- и

гетеродесмический типы связи. Сопоставление различных видов связи.  
Классификация твердых тел по характеру типа связи.

### **3. Тепловые свойства твердых тел (6 часов).**

Спектр нормальных колебаний решетки. Понятие о фононах.  
Теплоемкость твердого тела. Теплоемкость электронного газа. Тепловое расширение твердых тел. Теплоемкость твердых тел.

## **III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Физика конденсированного состояния» представлено в Приложении 1, включает в себя:

- характеристику заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;
- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

## **IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Тема 1. Симметрия структуры кристаллов	ОПК - 1, ПК-2	знает	выполнение лабораторной работы 1	экзамен, вопросы 1 - 7
			умеет	контрольные работы № 1-4	

			владеет	выполнение домашних заданий	
2	Тема 2. Типы связей в кристаллах.	ОПК - 1, ПК-2	знает	Дискуссия	экзамен, вопросы 8 - 12
			умеет	Работа на практических занятиях	
			владеет	выполнение домашних заданий	
3	Тема 3. Элементы физической статистики.	ОПК - 1, ПК-2	знает	индивидуальные задания	экзамен, вопросы 16 - 22
			умеет	контрольная работа	
			владеет	выполнение домашних заданий	
4	Тема 4. Динамика решетки.	ОПК - 1, ПК-2	знает	контрольная работа	экзамен, вопросы 13 - 15, 23 - 29
			умеет	дискуссия	
			владеет	выполнение домашних заданий	
5	Тема 5. Зонная теория твердого тела	ОПК - 1, ПК-2	знает	практические занятия	экзамен, вопросы 30 - 34
			умеет	дискуссия	
			владеет	выполнение домашних заданий	
6	Тема 6. Магнитные свойства твердого тела	ОПК - 1, ПК-2	знает	выполнение лабораторных работ 2, 3	экзамен, вопросы 35 - 45
			умеет	практические занятия	
			владеет	выполнение домашних заданий	

Вопросы и типы заданий к экзамену, типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели,

необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

## **V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

*(электронные и печатные издания)*

1. Анфимов И.М., Кобелева С.П., Коновалов М.П., Осипов Ю.В., Орлова М.Н., Спицына Л.Г. Физика твердого тела: сборник задач // М.: Издательский Дом МИСиС, 2011. – 70 с.  
<http://www.iprbookshop.ru/56591.html>
2. Ю.А. Байков., В.М. Кузнецов. Физика конденсированного состояния // М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011, 294 с.  
<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:668131&theme=FEFU>
3. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы / М. В. Мамонова, В. В. Прудников, И. А. Прудникова. М., Физматлит, 2011. – 400 с.  
<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:663084&theme=FEFU>
4. В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук. Физика конденсированного состояния / Минск: Белорусская наука, 2009. – 648 с.  
<http://www.iprbookshop.ru/11505.html>
5. Ю.А. Стрекалов, Н.А. Тенякова. Физика твердого тела: Учебное пособие // М.: ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. - 307 с.  
<http://znanium.com/catalog/product/363421>
6. Белко В.Н., Тутов Е.А., Никишина А.И., Абрамов А.В. Физика конденсированного состояния в примерах и задачах: учебное пособие // Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2017. – 79 с.  
<http://www.iprbookshop.ru/72951.html>

**Дополнительная литература**  
(печатные и электронные издания)

1. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела // Изд. М.: Мир, 1979.  
Часть 1, 2.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:67373&theme=FEFU>

2. Рыбкин В.В., Титов В.А., Смирнов С.А. Физика твердого тела: Структура и симметрия твердых тел. Колебания кристаллической решетки. Точечные дефекты. Электроны в твердом теле: Учебное пособие / Иван. гос. хим.-технол. университет. - Иваново, 2001. - 100 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:31459&theme=FEFU>

3. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела // Изд. М.: Мир, 1978, 792 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:63726&theme=FEFU>

2. А.А. Абрикосов. Основы теории металлов. М., Физматлит, 2009. – 589 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:288852&theme=FEFU>

3. Задачи по физике твердого тела. Под ред. Г. Дж. Голдсмида//Изд. М.:Наука, 1976, 432 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:669025&theme=FEFU>

4. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела // Изд. М.: Мир, 1974, 472 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:57998&theme=FEFU>

5. Дж. Блейкмор. Физика твердого тела // М. : Металлургия, 1988, 608 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:56763&theme=FEFU>

6. А.С. Давыдов. Теория твердого тела. Изд. М.: Наука, 1976, 640 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:61617&theme=FEFU>

7. Р. Уайт, Т. Джебелл. Дальний порядок в твердых телах. Изд. М.: Мир, 1982, 448 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:668967&theme=FEFU>

8. Ч. Киттель. Квантовая теория твердых тел // Изд. М.: Мир, 1967, 492 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:667883&theme=FEFU>

9. И.И. Павлов, А.Ф. Хохлов. Физика твердого тела. М., Высшая Школа, 2005, 494 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:14758&theme=FEFU>

10. Морозов А.И. Физика твердого тела. Кристаллическая структура. Фононы: Учебное пособие. - М.: МИРЭА, 2006. - 151 с.  
<http://window.edu.ru/resource/033/47033>

## VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

В общей трудоемкости дисциплины 108 час. (3 ЗЕ) аудиторные занятия составляют 72 часа, включая лекции (18 час.) и практические занятия (18 час.), лабораторные занятия (36 час.).

По дисциплине предусмотрена внеаудиторная самостоятельная работа в объеме 36 час. на весь курс дисциплины. Кроме того, в период экзаменационной сессии, планируется 36 часов на подготовку к экзамену.

Расписание аудиторных занятий включает в неделю 4 часа. Рекомендуется учащимся планировать внеаудиторную самостоятельную работу в объеме 2,0 часа в учебную неделю.

Для углубленного изучения теоретического материала курса дисциплины рекомендуются использовать основную и дополнительную литературу, указанную в приведенном выше перечне.

Рекомендованные источники доступны студентам в научной библиотеке (НБ) ДВФУ, а также в электронной библиотечной системе (ЭБС) IPRbooks.

Доступ к системе ЭБС IPRbooks осуществляется на сайте [www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru) под учётными данными вуза (ДВФУ): логин **dvfu**, пароль **249JWmhe**.

Для подготовки к экзаменам определен перечень вопросов, представленный ниже, в материалах фонда оценочных средств дисциплины.

## **VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Образовательный процесс по дисциплине проводится в лекционных аудиториях корпуса L и лаборатории материаловедения и кристаллографии кафедры физики низкоразмерных структур (Кампус ДВФУ) с возможностью использования презентаций. Задания для самостоятельной работы и некоторые главы лекционного курса предоставляются студентам в распечатанном виде.





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДВФУ)

---

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

**по дисциплине «Физика конденсированного состояния»**

**Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника  
Профиль Электроника и наноэлектроника**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток  
2018**

## **Лабораторный практикум. Практические занятия.**

В течение семестра студенты выполняют лабораторные работы, проводятся практические занятия.

На первом занятии преподаватель знакомит с правилами техники безопасности в лаборатории и с порядком выполнения лабораторных работ.

Перед каждым занятием студенты должны изучить теоретические основы работы, уяснить содержание, цель и порядок выполнения работы, заготовить необходимые таблицы.

В начале занятий проверяется готовность студентов к выполнению работы в объеме контрольных вопросов. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Включение лабораторных установок допускается только с разрешения преподавателя.

После выполнения работы студент предъявляет преподавателю полученные результаты. После подписи протокола эксперимента преподавателем студенты выключают лабораторную установку и сдают рабочее место.

Защита выполненных и оформленных лабораторных работ проводится в виде индивидуального собеседования по ее содержанию.

Практические занятия проводятся в соответствии с рабочей программой дисциплины в виде решения задач, рассмотрения некоторых глав теоретической части курса.

Перед каждым практическим занятием студенту выдается тема, по которой он должен подготовиться, поэтому обсуждение вопросов проходит в форме диалога, совместного решения поставленных задач. Контроль за усвоением материала осуществляется путем проведения контрольных работ.

## **Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению**

Задания и методические рекомендации для самостоятельной работы обеспечивают подготовку к контрольным работам, выполнение домашних заданий по определенным разделам дисциплины. Типовые домашние задания и вопросы к контрольным работам приведены в программе и методические указаниях.

### **Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы**

Результаты самостоятельной работы отражаются в письменных работах, отчетах по домашнему заданию, в защите контрольных работ.

Контрольные работы по дисциплине проводятся на аудиторных (практических) занятиях по определенным разделам дисциплины, сопровождается самостоятельной подготовкой студентов.

К представлению и оформлению отчета по домашним заданиям предъявляются следующие требования.

### **Структура отчета по практической работе**

Отчеты по домашним работам представляются в отдельной тетради, которая по требованию сдается преподавателю в течение семестра. Наличие выполненных домашних заданий является обязательным условием допуска к экзамену.

Отчет по домашней работе должен быть обобщающим документом, включать всю информацию по выполнению заданий, в том числе, построенные диаграммы, таблицы, графика и т. д. Обязательным условием является формулировка физических законов, используемых при решении определенных задач.

Рекомендуется в основной части отчета делать промежуточные пояснения при решении конкретных задач и выводе формул.

### **Критерии оценки выполнения самостоятельной работы**

*Оценивание домашних работ проводится по критериям:*

- полнота и качество выполненных заданий в соответствии с требованиями;
- качество оформления отчета;
- отсутствие фактических ошибок, в том числе арифметических.

*Для самостоятельного ознакомления студентам вынесены темы, которые были затронуты в других курсах направления подготовки «Электроника и наноэлектроника».*

#### 1. Упругие свойства кристаллов.

Упругие волны в кубических кристаллах. Экспериментальное определение упругих постоянных.

#### 2. Полупроводниковые кристаллы.

Собственная проводимость. Запрещенная зона. Концентрация собственных носителей. Примесная проводимость, примесные состояния. Энергетические зоны германия и кремния.

#### 3. Сверхпроводимость.

Экспериментальные факты. Теоретическое рассмотрение.

#### 4. Диамагнетизм и парамагнетизм.

Диамагнетизм, формула Ланжевена. Парамагнетизм, формула Ланжевена и закон Кюри. Получение низких температур методом адиабатического размагничивания парамагнитных солей.

#### 5. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм.

Ферромагнитный порядок. Магнитная структура ферромагнетиков. Магнитная структура антиферромагнетиков. Ферромагнитные домены.

6. Точечные дефекты в твердых телах.

Вакансии кристаллической решетки. Центры окраски. Процессы упорядочения.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

**по дисциплине «Физика конденсированного состояния»**

**Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника**  
**Профиль Электроника и наноэлектроника**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2018**

## Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<p>ОПК-1, способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики</p>	Знает	формулировку и аналитический вид физических законов по данному разделу; границы применения физических законов; методы решения конкретных физических задач
	Умеет	выделять основные данные исходных задач, анализировать полученные решения в контексте поставленной задачи; выбирать возможное правильное решение;
	Владеет	общей характеристикой научного отчета по данной конкретной тематике, разделу физики; технологией подготовки результатов работы к внешней оценке – публикации; технологиями подготовки краткого содержания своей работы в виде презентации
<p>ПК-2, способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения</p>	Знает	необходимые свойства твердых тел и связь их со структурой для использования их в электронике и нанoeлектронике
	Умеет	аргументировано формулировать свойства твердых тел для использования их в электронике и нанoeлектронике в связи с их структурой
	Владеет	законами и принципами построения твердых тел с уникальными физическими свойствами для использования их в определенных областях электронике и нанoeлектронике

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Тема 1. Симметрия структуры кристаллов	ОПК - 1, ПК-2	знает	выполнение лабораторной работы 1	экзамен, вопросы 1-7
			умеет	контрольные работы № 1-4	
			владеет	выполнение домашних заданий	
2	Тема 2. Типы связей в кристаллах.	ОПК - 1, ПК-2	знает	дискуссия	экзамен, вопросы 8 - 12
			умеет	Работа на практических занятиях	
			владеет	выполнение домашних заданий	
3	Тема 3. Элементы физической статистики.	ОПК - 1, ПК-2	знает	индивидуальные задания	экзамен, вопросы 16 - 22
			умеет	контрольная работа	
			владеет	выполнение домашних заданий	
4	Тема 4. Динамика решетки.	ОПК - 1, ПК-2	знает	контрольная работа	экзамен, вопросы 13 - 15, 23 - 29
			умеет	дискуссия	
			владеет	выполнение домашних заданий	
5	Тема 5. Зонная теория твердого тела	ОПК - 1, ПК-2	знает	практические занятия	экзамен, вопросы 30 - 34
			умеет	дискуссия	
			владеет	выполнение домашних заданий	



6	Тема 6. Магнитные свойства твердого тела	ОПК - 1, ПК-2	знает	выполнение лабораторных работ 2, 3	экзамен, вопросы 35 - 45
			умеет	практические занятия	
			владеет	выполнение домашних заданий	

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
ОПК-1, способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики	знает (пороговый уровень)	структуру твердых тел на атомном уровне и законы этого строения; формулировку и аналитический вид потенциалов взаимодействия различных твердых тел; законы, описывающие динамику кристаллической решетки; зонную теорию и физические свойства твердых тел	воспроизводить и объяснять учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты	способность показать базовые знания и основные умения в использовании: - подробный анализ и разбор основных задач всех разделов дисциплины; - применение соответствующих законов	удовлетворительно
	умеет (продвинутый)	выделять необходимые данные, анализировать структуру твердых тел; описывать свойства твердых тел на основе законов их построения на атомном уровне, статистических закономерностей поведения электронного ансамбля; делать аналитические преобразования с использованием ряда законов	решать типичные задачи на основе знания законов основных разделов; объяснять полученные результаты на лабораторных и практических занятиях	способность применить знания и практические умения в задачах, выбор и обоснование стратегии решений по всем разделам дисциплины, используя законы и математические преобразования	хорошо
	владеет (высокий)	глубоким знанием и пониманием всех законов дисциплины;	решать усложненные нетипичные задачи на основе	способность применить фактическое и теоретическое знание, практические умения по анализу и	отлично

		методами термодинамики и статистической физики для описания структуры твердых тел и их свойств	приобретенных знаний, умений и навыков	решению задач, используя знания законов построения твердых тел, умение объяснить полученные результаты	
ПК-2, способность аргументировано выбрать и реализовать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения	знает (пороговый уровень)	необходимые свойства твердых тел и связь их со структурой для использования их в электронике и нанoeлектронике	знает необходимые свойства твердых тел для электроники и нанoeлектроники с требуемой степенью точности и полноты	способность показать базовые знания и основные умения в использовании:	удовлетворительно
	умеет (продвинутый)	аргументировано формулировать свойства твердых тел для использования их в электронике и нанoeлектронике в соотношении с их структурой	решать задачи на основе знаний, законов на практике	способность применить полученные знания умения в практических задачах, выбор и обоснование стратегии решений по всем разделам дисциплины	хорошо
	владеет (высокий)	Законами и принципами построения твердых тел с уникальными физическими свойствами для использования их в определенных областях электроники и нанoeлектроники	решать усложненные нетипичные задачи на основе приобретенных знаний, умений и навыков	способность применить фактическое и теоретическое знание, практические умения по анализу и решению задач, реализовывать их на практике	отлично

### **Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков**

**Текущая аттестация студентов.** Текущая аттестация студентов по дисциплине «Физика конденсированного состояния» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Физика конденсированного состояния» проводится в форме контрольных мероприятий (защита практических (домашних), контрольных работ, тестирование) по оцениванию фактических результатов обучения студентов осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);

- степень усвоения теоретических знаний;

- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;

- результаты самостоятельной работы.

Оценивание результатов освоения дисциплины на этапе текущей аттестации проводится в соответствии с используемыми оценочными средствами.

### **Критерии оценки по контрольным работам**

Оценивание защиты контрольной работы проводится после написания работы на аудиторных занятиях, по двухбалльной шкале: «зачтено», «не зачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он представляет к защите контрольную работу, удовлетворяющую требованиям по поставленным заданиям, по оформлению, демонстрирует знание физических законов, владение навыками работы с формулами, умение объяснить полученный результат.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если он не знает физических законов, допускает существенные ошибки в работе, представляет отчет с существенными отклонениями от правил оформления письменных работ.

### **Критерии оценки практических (домашних) заданий**

Оценивание домашних заданий проводится индивидуально.

Все домашние задания представляются в отдельной тетради и оцениваются по системе «зачтено» / «не зачтено».

В рамках текущего контроля уровня усвоения знаний по дисциплине допускается результат не ниже 80% решенных задач, входящих в блок «Домашние задания».

**Промежуточная аттестация студентов.** Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Физика конденсированного состояния» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физика конденсированного состояния» проводится в виде зачета .

**Критерии выставления оценки студенту на экзамене по дисциплине «Физика конденсированного состояния»:**

Оценка экзамена (стандартная)	Требования к сформированным компетенциям
«зачтено»	Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал. Исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно применяет его, умеет тесно увязывать теорию с практическими вопросами. Свободно справляется с дополнительными вопросами по всем разделам дисциплины, проводит связь между ними, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий.
«не зачтено»	Оценка «незачтено» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями формулирует основные законы.

### **Оценочные средства для промежуточной аттестации**

#### **(вопросы к зачету)**

1. Кристаллическое состояние. Макроскопические характеристики: габитус кристалла, простая, комбинированная кристаллические формы, зона, ось зоны кристалла. I закон кристаллографии - закон постоянства углов (понятие идеально развитого, искаженного кристаллов). Доказательство закона Вульфа-Брэггов.

2. Понятие единичного направления. Кристаллографические категории, сингонии. Определение класса симметрии.

3. Пространственная решетка – главный элемент симметрии кристаллических структур. Типы решеток Браве.
4. Определение элементарной ячейки – ячейки Браве. Прimitивная, условная ячейки Браве.
5. Правильные системы точек, их характеристики. Общие представления о 230 пространственных группах симметрии.
6. Основные понятия кристаллохимии: координационное число, координационный многогранник, число формульных единиц.
7. Принцип плотнейшей шаровой упаковки. Двухслойные, трехслойные структуры. Примеры.
8. Основные типы связей в кристаллах. Кристаллы инертных газов. Силы Ван-дер-Ваальса. Потенциал Ленарда-Джонса.
9. Физические свойства инертных кристаллов: сжимаемость, объемный модуль упругости.
10. Основные типы связей в кристаллах. Ионные кристаллы. Энергия Маделунга. Объемный модуль упругости.
11. Основные типы связей в кристаллах. Ковалентные кристаллы.
12. Основные типы связей в кристаллах. Металлические кристаллы. Кристаллы с водородными связями.
13. Динамика решетки. Теплоемкость решетки при постоянном давлении, зависимость от температуры.
14. Колебания решетки из цепочки одинаковых атомов. Колебательные моды одноатомной решетки.
15. Колебания трехмерного кристалла. Дисперсионные кривые. Фононный спектр.
16. Элементы физической статистики. Фермионы, бозоны. Вырожденные, невырожденные коллективы. Плотность состояний.
17. Функция распределения Максвелла-Больцмана для невырожденного газа.

18. Вывод функции распределения Ферми-Дирака. Энергия Ферми. Функция распределения для вырожденного газа фермионов. Полная функция распределения Ферми-Дирака.

19. Влияние температуры на распределение Ферми-Дирака.

20. Зависимость химического потенциала вырожденного газа от температуры.

21. Снятие вырождения. Невырожденный электронный газ.

22. Вывод функции распределения Бозе-Эйнштейна. Функция распределения для вырожденного газа бозонов.

23. Тепловые свойства твердых тел. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Акустические. Оптические колебания.

24. Спектр нормальных колебаний решетки. Понятие о фононах.

25. Теплоемкость твердого тела. Закон Дюлонга-Пти, закон Дебая. Температура Дебая.

26. Теплоемкость электронного газа.

27. Тепловое расширение твердых тел.

28. Теплопроводность твердых тел (диэлектрики).

29. Теплопроводность твердых тел (металлы).

30. Зонная теория твердых тел. Энергетические уровни свободных атомов.

31. Обобществление электронов в кристалле. Энергетический спектр электронов в кристалле. Понятие энергетической зоны.

32. Энергетический спектр электронов в кристалле. Зависимость энергии электрона от волнового вектора.

33. Эффективная масса электрона.

34. Заполнение зон электронами. Проводники, диэлектрики, полупроводники.

35. Магнитные характеристики: магнитный момент, намагниченность. Магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость. Связь между ними

36. Ферромагнетики, диамагнетики, парамагнетики

37. Гистерезис. Коэрцитивная сила.
38. Виды магнетиков: магнитомягкие и магнито жесткие материалы, сильные и слабые магнетики.
39. Домены. Виды доменных структур. Поле размагничивания. Размагничивающий фактор.
40. Обменная энергия. Магнитостатическая энергия.
41. Магнитокристаллическая анизотропия. Понятие анизотропии типа легкая ось, легкая плоскость.
42. Ширина доменной границы, энергия доменной границы.
43. 180-градусные доменные границы Неля, Блоха. 180-градусные доменные границы с перетяжками
44. Методы наблюдения доменных структур. Лоренцева микроскопия сложных доменных структур.
45. Микромагнитная структура – рябь намагниченности

### Типовые задания к домашним работам

#### Домашнее задание № 3.

1. Характеристическая температура  $\Theta_D$  Дебая для вольфрама равна 310 К. Определить длину волны  $\lambda$  фононов, соответствующих частоте  $\nu=0,1 \nu_{\max}$ . Вычислить усредненную скорость звука в вольфраме. Дисперсией волн в кристалле пренебречь.
2. Определить относительную атомную массу  $A_r$  кристалла, если известно, что расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами равно 0,304 нм. Решетка объемно-центрированная кубической сингонии. Плотность кристалла равна 534 кг/м<sup>3</sup>.

3. Найти энергию  $\varepsilon$  фонона, соответствующего максимальной частоте  $\omega_{\max}$  Дебая, если характеристическая температура  $\Theta_D$  Дебая равна 250 К.

4. Вычислить энергию Ферми, отсчитанную от дна зоны проводимости, при температуре  $T=0\text{К}$  для валентных электронов натрия. Оценить максимальную скорость электронов  $V_{\max}$  при  $T=0\text{К}$ . Плотность натрия  $\rho=970$  кг/м<sup>3</sup>.

### **Домашнее задание № 5.**

1. Определить параметр  $a$  решетки и расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами кристалла кальция (решетка гранцентрированная кубической сингонии). Плотность  $\rho$  кристалла кальция равна  $1,55 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Определить квазиимпульс  $p$  фонона, соответствующего частоте  $\omega=0,1\omega_{\max}$ . Усредненная скорость  $v$  звука в кристалле равна 1380 м/с, характеристическая температура  $\Theta_D$  Дебая равна 100 К. Дисперсией звуковых волн в кристалле пренебречь.

3. Вычислить энергию Ферми, отсчитанную от дна зоны проводимости, при температуре  $T=0\text{К}$  для валентных электронов натрия. Оценить максимальную скорость электронов  $V_{\max}$  при  $T=0\text{К}$ . Плотность натрия  $\rho=970$  кг/м<sup>3</sup>.

## **Типовые задания к контрольным работам**

### **Контрольная работа №1**

1. Покажите на рисунке, какими основными трансляциями характеризуется кубическая объёмцентрированная решетка? Чему равен период повторяемости этой решетки в различных направлениях



2. Покажите на рисунке, какими основными трансляциями характеризуется кубическая гранецентрированная решетка? Чему равен период повторяемости этой решетки в различных?

3. Покажите на рисунке, какими основными трансляциями характеризуется ромбическая базоцентрированная решетка? Чему равен период повторяемости этой решетки в различных направлениях?

4. Сделайте проекцию нескольких смежных ячеек тетрагональной объемноцентрированной решетки на плоскости (xy) и (xz). Рассчитайте расстояние между ближайшими узловыми сетками серий {110} и {011}, если периоды повторяемости решетки в направлениях [100] и [001] равны, соответственно 3,2 и 5,6.

5. Покажите в виде проекции на горизонтальную плоскость систему точек, связанную вертикальной осью симметрии  $4_1$ , обозначая каждую точку координатой по оси Z.

6. Изобразите в проекции на плоскость (011) пространственную группу

P4. выведите правильные системы точек с координатами:  $\frac{1}{4} 00$ ,  $\frac{1}{4} \frac{1}{4} 0$ ,  $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$  и определите их кратность.

## Контрольная работа №2

### Записать структурные классы:

цепи или слоя (задача 1) и кристаллической структуры (задача 2), проекции которых показаны на рисунках. В обоих случаях рассмотреть два варианта: А и В - атомы разных элементов, А и В - атомы одного элемента. В задаче 2 указать тип решетки (дать пояснения).

Обоснованием решения является изображение расположения важнейших элементов симметрии на фоне расположения атомов (если при этом рисунок оказывается перегружен, можно изобразить расположение элементов симметрии отдельно). Следует иметь в виду, что в некоторых случаях для сопоставления построенного рисунка со стандартным изображением группы необходимо перенести начало координат. Нужно также учесть, что для простоты часто изображаются не все элементы симметрии, входящие в группу, а лишь "порождающие".

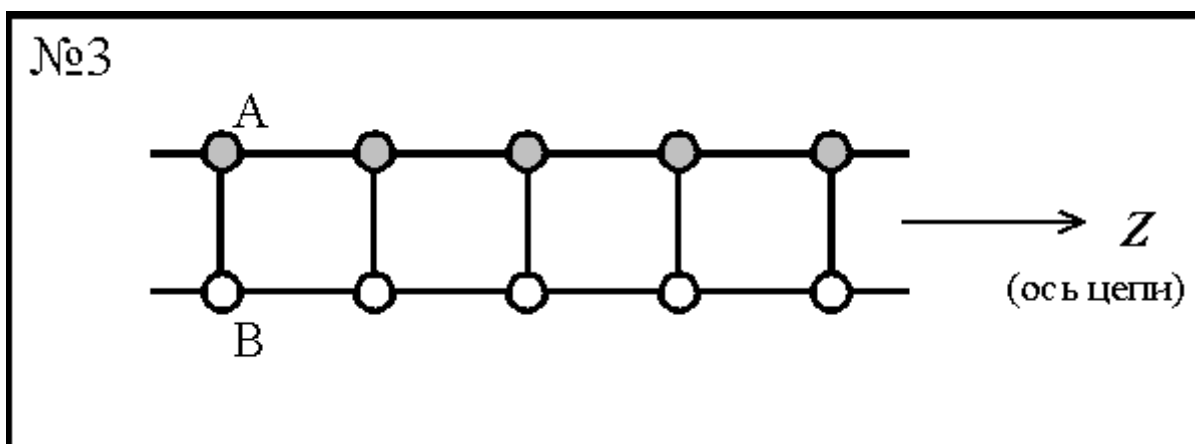
### Задача 1

Нарисовать проекцию ячейки, определить координационные числа и координационные многогранники в описанной ниже структуре; дать описание структуры в терминах ПШУ - ПШК, если оно возможно. Выразить плотность вещества через кристаллохимические радиусы (указать тип используемых радиусов).

### Задача 2

Нарисовать проекцию ячейки, определить тип решетки и характер структуры кристаллов, имеющих описанное ниже строение.

**Пример задания:**



## Контрольная работа №3

**Определение типа решеток Браве** (индивидуальные задания по карточкам).

Пример контрольного задания:

4.4. На рис. 4.3 приведены проекции элементарных ячеек тетрагональных кристаллов. Определить тип решеток Бравэ.

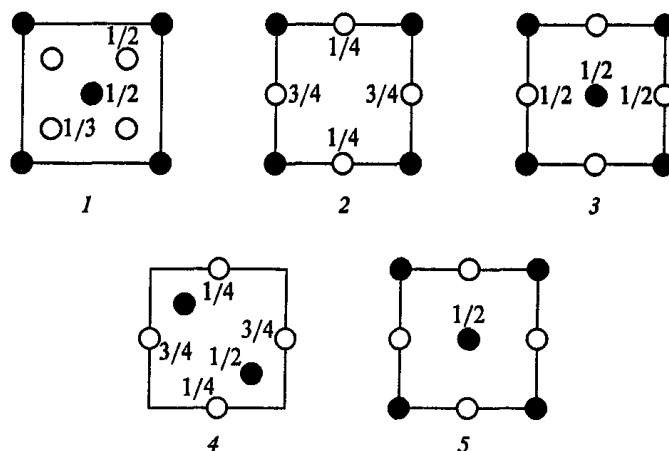


Рис. 4.3. К задаче 4.4

## Контрольная работа №5

### Вариант 1

1. Энергия связи. Провести сравнительный анализ энергии связи атомов для различных элементов периодической таблицы.

2. Записать потенциал взаимодействия атомов кристаллов инертных газов. Пояснить все величины. Чем обусловлено наличие сил притяжения и отталкивания в этих кристаллах?

3. Вычислить постоянную Маделунга для линейной цепочки атомов.

4. Кристаллы с водородными связями.

5. Перекись водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  и этилен  $\text{C}_2\text{H}_4$  вступают в реакцию с образованием этиленгликоля  $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ . Как изменится энергия связи? Расчет сделать для 1 моля.

6. Энергии связи: O-O 33 ккал/моль; C-C 83 ккал/моль; C-O 86 ккал/моль; C=C 162 ккал/моль.

## Контрольная работа №4

### Вариант 1.

1. Перечислите сингонии средней категории кристаллов. Дайте их общую характеристику.
2. Изобразите ОЦК решетку. Обозначьте индексы всех атомов.
3. Даны кристаллы триклинной, тригональной, моноклинной и кубической сингоний. Расставьте кристаллы по мере убывания их анизотропии.
4. Дайте определение примитивной элементарной ячейки.
5. Какая операция симметрии является тождественной или единичной операцией?

**Корреляционный и аттрактивный анализ  
магнитной структуры планарных сред**

Учебно-методическое пособие к  
лабораторной работе

Владивосток

2015 г.

## §1. Доменная структура и тонкое магнитное разбиение планарных сред

Сложные доменные структуры определяются неоднородностью структуры пленок, вызванной условиями их приготовления. В теории доменной структуры предполагается, что в кристалле имеются домены и переходной слой между доменами – доменная граница (ДГ) с бесконечно малой толщиной по сравнению с размерами доменов [1, 2]. Ширина доменной стенки и конфигурация спинов в ней определяются взаимной ориентацией спинов в соседних доменах, анизотропией, константой обменного взаимодействия, локальными неоднородностями и геометрией ферромагнетика.

В работе Ландау и Лифшица впервые была предложена равновесная конфигурация распределения вектора намагниченности, рис.1.1а, и четкая модель ДГ: вектор намагниченности  $\vec{M}$  меняет свое направление от точки к точке вдоль нормали к границе, а абсолютная величина его  $M = M_s$  остается постоянной. 180-градусными ДГ называются такие, которые разделяют два домена с противоположной ориентацией намагниченности, рис.1.1б.

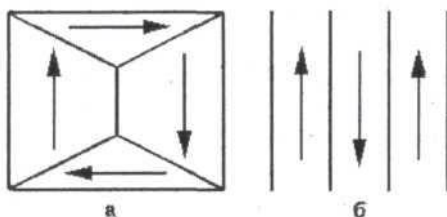


Рис.1.1. Типы доменных границ в магнитных средах.

90-градусной ДГ является та, в которой угол, образованный направлениями намагниченности доменов по обе стороны от нее равен  $90^\circ$  (рис.1.2). 360-градусными доменными границами называются такие, в которых вектор намагниченности поворачивается на  $360^\circ$ . Они могут принимать округленную форму и могут быть замкнутыми [3-7].

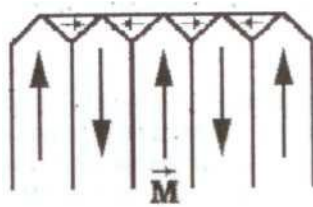


Рис.1.2. 90-градусная доменная граница.

180-градусные ДГ в зависимости от толщины образца подразделяются на несколько видов. В массивном образце [1, 2, 8, 9] **стенкой Блоха** называют такую, при переходе через которую нормальная составляющая спинов не испытывает изменений. Северный и южный полюсы на поверхности массивного образца расположены очень далеко друг от друга, и поэтому энергия полей рассеяния относительно мала.

Блох первым рассчитал толщину и энергию стенки [2]:

$$E = \int \left[ A \left( \frac{dQ}{dX} \right)^2 + K \sin^2 \vartheta \right] dV = 4\sqrt{AK_u} \quad (1.1)$$

$\vartheta$  – угол между  $\vec{M}$  и О.Л.Н. (ось легкого намагничивания);

$A$  – параметр обменного взаимодействия;

$K_u$  – постоянная анизотропии;

$X$  – координата, перпендикулярная поверхности стенки.

В тонких магнитных пленках (ТМП) из-за крайне малой по сравнению с другими линейными размерами толщины сильно выражена анизотропия формы. Полюсы на поверхности тонкой пленки разделены только расстоянием, равным толщине пленки, поэтому связанная с ними энергия полей рассеяния сравнительно велика, причем она возрастает с уменьшением толщины. Так как энергия размагничивающего поля в направлении, перпендикулярном пленке, очень велика  $(2\pi M_s^2)$  по сравнению с соответствующей энергией в плоскости пленки  $(2\pi M_s^2 D/l, D$  – толщина,  $l$  – линейный размер пленки) можно предположить, что спины будут располагаться в плоскости пленки.

Неель с помощью приближенного равенства [2] показал, что энергия очень тонких пленок минимальна, если отсутствует компонента вектора намагниченности, перпендикулярная поверхности пленки. Эти стенки названы **стенками Нееля**. Энергия доменной стенки Нееля

$$\gamma = 4\sqrt{A(K_u + M_s^2 / 2\mu_0)}. \quad (1.2)$$

Сравнивая (1.1) и (1.2), видим, что энергия стенки Нееля больше, чем Блоха. Было показано, что критическая толщина пленки, ниже которой для домена выгоднее неелевская стенка, равна  $3,9\sqrt{A/M_s}$ .

Для толстых пленок устойчивой является стенка Блоха, а для тонких – стенка Нееля. В области толщин, где оба эти случая эквивалентны, образуется доменная структура, в которой чередуются стенки Блоха и Нееля – доменная **граница типа «колючей проволоки»** (рис.1.3), т.е. внутри сложных доменных стенок имеются участки с противоположными направлениями вектора намагниченности.

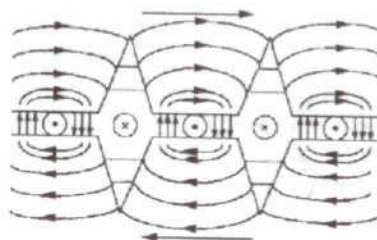


Рис.1.3. Структура доменной границы типа «колючей проволоки».

Области, разделяющие подобные участки [18, 19], называются блоховскими. В блоховских стенках они состоят из коротких участков неелевских стенок и, наоборот, в неелевских стенках – из коротких участков блоховских стенок (рис.1.3).



**Рябь намагниченности** (тонкая магнитная структура – ТМС) вместе с наличием сложного типа ДГ является особенностью магнитной структуры ТМП вследствие малого размера кристаллитов  $2b \sim 10^{-16}$  см. Эффективный радиус проявления обменного взаимодействия  $\delta \sim (\alpha/\beta_k)^{1/2}$ , где  $\alpha$  – константа обменного взаимодействия,  $\beta_k$  – константа кристаллографической анизотропии [2, 10]. Если  $b \gg \delta$ , то вектор намагниченности  $\vec{M}$  в каждом кристаллите устанавливается вдоль легкой оси. С уменьшением  $b$  возрастает взаимодействие кристаллитов, и  $\vec{M}$  в соседних кристаллитах стремится установиться параллельно друг другу, несмотря на противодействие кристаллографической анизотропии. При этом возникает рябь намагниченности ( $\vec{M}$  колеблется около среднего направления), которую можно рассматривать как микродоменное разбиение в планарных средах. В статическом случае уравнение, описывающее распределение намагниченности [10], имеет вид:

$$[\vec{M}\vec{H}_e] = 0,$$

$$H_e = \alpha \nabla^2 \vec{M} + \beta_k \vec{n}(\vec{n}, \vec{M}) + \vec{H} + \beta_k \vec{L}(\vec{L}, \vec{M}),$$

где  $\vec{H}_e$  – эффективное магнитное поле;

$\beta$  – константа одноосной анизотропии;

$\vec{n}$  – орт вдоль О.Л.Н.;

$\beta_k$  – константа кристаллографической анизотропии;

$L = L(\vec{r})$  – орт вдоль оси О.Л.Н., имеющий различное направление в различных кристаллах.

В работах Игнатченко, Гоффмана, Харта построена теория ряби намагниченности, основная цель которой – описать магнитные свойства вещества в зависимости от его реальной структуры. Различают линейную и нелинейную теории ряби. Линейная теория описывает не только малые отклонения магнитных свойств от поведения одного домена, но и включает случаи всех сильных отклонений, которые характерны для тонких пленок. Количественное объяснение дается нелинейной теорией, которая разработана только частично.

Все эффекты ряби намагниченности описываются дифференциальным уравнением (1.3):

$$-\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} - W_2^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{K_u}{A} h(\alpha) \varphi - \frac{M_S^2 C}{2H} \left[ \varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right)^2 \right] \varphi + \frac{K}{2H} f_1(r) = -Q \quad (1.3)$$

$H$  – внешнее поле.

$\alpha$  – угол между О.Л.Н. и  $\vec{H}$ ;

$\varphi$  – угол между О.Л.Н. и средней намагниченностью;

$M_S$  – средняя намагниченность;

$\varphi(\vec{r})$  – локальные отклонения намагниченности от среднего направления;

$x_1$  – направление средней намагниченности;

$x_2$  – перпендикулярно  $x_1$  в плоскости пленки;

$K_u$  – одноосная анизотропия;

$h(\alpha)$  – поле одного домена.

Для ряби задаются две ее компоненты а) *продольная* ( $\parallel x_1$ ), т.е. фронт волны колебаний намагниченности совпадает с направлением среднего намагничивания  $M_S$  (рис.1.4а); б) *поперечная* ( $\perp x_1$ ) – в которой [4,7,11] колебания  $\perp$  к среднему направлению намагниченности  $M_S$ .

Решение линейного дифференциального уравнения (1.3) дает флуктуации намагниченности  $\varphi(\vec{r})$ . Дальнейшее его решение показывает существование однородной области намагниченности в виде эллипса.

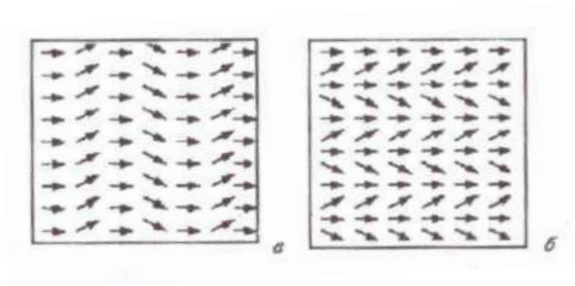


Рис. 1.4. Продольная (а) и поперечная (в) рябь намагниченности.

Меньшая полуось  $R_{gc}$  взаимодействия [10] эллипса проходит вдоль среднего направления намагниченности  $x_1$  и это соответствует длине взаимодействия обменной силы:

$$R_{gc} = \sqrt{\frac{A}{K_u} \frac{1}{h(\alpha)}} \quad (1.4)$$

Большая ось перпендикулярна средней намагниченности ( $R_{mc}$ ) и соответствует длине взаимодействия поперечного поля рассеяния:

$$R_{mc} = W_z \sqrt{\frac{A}{K_u} \frac{1}{h(\alpha)}} \quad (1.5)$$

Для 80-20% Fe-Ni пленок с  $K_u = 1,5 \cdot 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>,  $d = 1000$  Å,  $h(\alpha)=1$ ,  $R_{mc}/R_{gc} = W_z \approx 30$ . Это значит, что взаимодействующие области представляют собой узкополосные эллипсы, перпендикулярные  $x_1$ . Длина волны ряби  $\lambda_{LR}$  может быть выражена из длины взаимодействия  $R_{gc}$ :

$$\lambda_{LR} = 2\pi R_{gc} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{K_u h(\alpha)}}, \quad (1.6)$$

$\lambda_{LR}$  – длинноволновая компонента ряби намагниченности по (1.6) дает периодическое изменение ее по знаку дисперсии.

В последнее время в связи с миниатюризацией запоминающих устройств, увеличением плотности элементов в средах памяти встал вопрос о «тонкой» структуре магнитного разбиения. Микромагнетика анализирует закономерности распределения векторов намагниченности в кристалле [9]. В этом случае намагниченность представляется как некоторая функция координат и времени  $\vec{M}(x, y, z, t)$ . Из условия минимума свободной энергии при заданных условиях находятся параметры, позволяющие установить характер распределения векторов намагниченности  $\vec{M}$  в кристалле [9].

Микромагнетика имеет практическое значение. Основная задача ее – использование для записи информации субмикронных и еще более мелких доменов, т.е. когда размер доменов соизмерим с толщиной доменной стенки. Рассмотрим кристалл, О.Л.Н. которого совпадает с выделенной осью симметрии кристалла (рис.1.5).

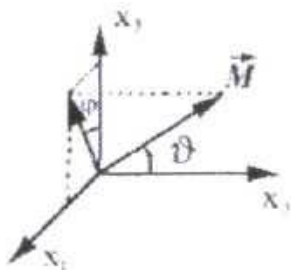


Рис.1.5. Модель поведения вектора намагниченности в пленке.

Плоскости доменных границ параллельны координационной плоскости  $(x_1, x_2)$ , а ось  $x_2$  совпадает с направлением нормали к границам. Ориентация  $\vec{M}$  задается полярным  $\vartheta$  и азимутальным  $\varphi$  углами (рис.1.5). Для ДГ Блоха векторы  $\vec{M}$  лежат в плоскостях, параллельных плоскости границ, нормальная компонента  $M_n = M_2 = 0$ ,  $\vartheta = \pi/2$ ,  $\varphi = \varphi(x_2)$ .

Известно [3, 11-13], что объемная плотность свободной энергии  $f$  имеет вид:

$$f = f_{обм} + f_a, \quad (1.7)$$

где  $f_{обм} = A \left( \frac{d\varphi}{dx_2} \right)^2$  – обменная энергия,  $f_a = kW(\varphi)$  – энергия анизотропии.

Решая вариационную задачу относительно  $\varphi(\xi)$ , можем записать уравнение Эйлера:

$$2 \left( \frac{d^2\varphi}{d\xi^2} \right) = \frac{dW(\varphi)}{d\varphi},$$

где  $\xi = x_2/\delta_0$ ,  $\xi_0 = D/\delta_0$ ,  $\delta_0^2 = A/K$  – ширина ДГ;  $D$  – полупериод магнитной структуры. Откуда

$$\xi + C_1 = \int_{\varphi(\xi)}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{W(\varphi) + C}}, \quad (1.8)$$

где  $\varphi(\xi)$  – значение угла  $\varphi$  при фиксированном  $\xi$ .

Исследование уравнения (1.8) для магнитоодноосного кристалла при учете постоянной магнитной анизотропии показывает, что  $W(\varphi)$  принимает наибольшее значение при  $\varphi = \pi/2 \cdot (2n-1)$  и наименьшее при  $\varphi = \pi/2 \cdot (2n+1)$ ,  $n = 0, +1, +2$ . Графически зависимость представлена на рис.1.6а. Выражение в (1.8), стоящее под знаком радикала, должно быть больше нуля, т.е.:

$$C \geq -W(\varphi) = -\sin^2 \varphi \quad (1.9)$$

Следовательно, предельное значение, которое может принимать  $C = -1$  [3].

При  $-1 < C < 0$  зависимость  $\left( \frac{d\varphi}{d\xi} \right)^2$  от  $\varphi$  на фазовой диаграмме представляет замкнутые кривые (рис.1.6б), ограниченные сепаратрисами, при  $C = 0$ ; центры соответствуют  $C = -1$ . При  $C > 0$  имеется система кривых вне сепаратрис.

Если  $-1 < C < 0$ , получается периодическое решение,  $\varphi$  меняется в пределах от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ , которые отличны от 0 и  $\pi$ :

$$C = -W(\varphi) = -\sin^2 \varphi \quad (1.10)$$

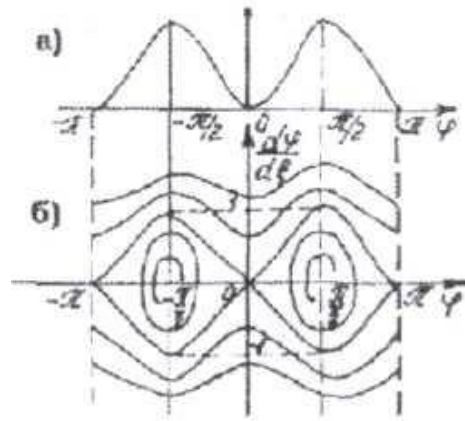


Рис.1.6. Изменение потенциальной энергии  $W(\varphi)$  (а) и азимутального угла  $\varphi$  (б) для доменной границы в магнитоодноосной пленке.

Распределение магнитных моментов для  $-1 < C < 0$  [3] представлено на рис.1.7а. Периодическую систему таких ДГ называют раскручивающей. При  $C > 0$  изменение направления  $\vec{M}$  происходит в одном направлении. Такого типа распределение принято называть закручивающей системой ДГ (рис.1.7б).

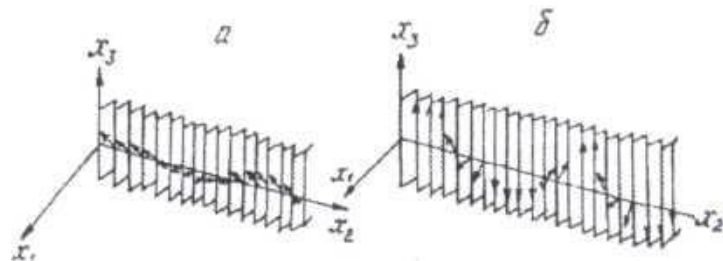


Рис.1.7. Распределение магнитных моментов в раскручивающей (а) и закручивающей (б) доменных границах.

ДГ, области вращения вектора намагниченности – вихри, линии и точки Блоха относятся в магнетиках к топологически устойчивым нелинейным возбуждениям [14] (дефектам). Эти возбуждения определяют целый ряд фундаментальных свойств магнитных материалов, а топологическая устойчивость, позволяющая считать их долгоживущими, открывает возможность использовать их в качестве элементов памяти запоминающих устройств. Магнитные топологические дефекты [14] соответствуют решениям нелинейного уравнения Ландау-Лифшица. Однако при определенных приближениях его удается свести к нелинейному уравнению синус-Гордона:

$$\Delta U = \sin pU, \quad \Delta = \partial_x^2 + \partial_y^2, \quad (1.11)$$

где  $U$  – некоторая величина, характеризующая параметр порядка (в случае ферритов это полярный или азимутальный углы, описывающие распределение  $\vec{M}$ );  $p = 1, 2, 4$  в зависимости от рассматриваемой задачи. Это уравнение описывает распределение намагниченности в тонких пленках с преобладающей анизотропией «легкая плоскость». Среди решений (1.11) особое место принадлежит топологическим дефектам или вихрям. Структура вихря оказывает существенное влияние на динамические свойства доменной границы. Вихревые распределения намагниченности, описываемые (1.11), характеризуются условием:

$$\int (\nabla u) dl = 2\pi k, \quad dl = (dx, dy),$$

где  $k$  – заряд вихря.

Для получения тонкой структуры ДГ и ядер вихревых состояний необходимо проанализировать сингулярность решения линейного уравнения:

$$\Delta U_0 = 0. \quad (1.12)$$

Решение этого уравнения численными методами [14] показало, что возможны следующие типы распределения намагниченности (рис.1.8). Конфигурации (а) и (д) представляют собой проекции вращающейся точки Блоха, для которой  $div\vec{M}=0$ ; (б) и (е) – проекции расходящейся и сходящейся точек Блоха,  $div\vec{M}\neq 0$ ; (в) и (ж), (г) и (з) – проекции противовращающихся точек Блоха,  $div\vec{M}\neq 0$ .

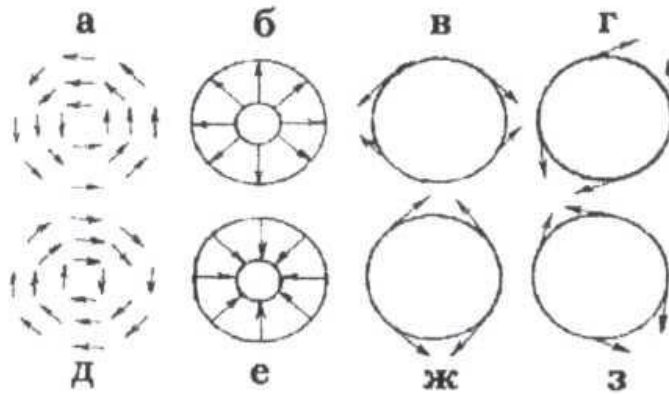


Рис.1.8. Типы распределения намагниченности, описываемые уравнением синус-Гордона.

Также были найдены вихреобразные структуры различных типов, простейшие из них имеют топологический заряд  $k = \pm 1$  [14]. Это полубесконечная  $360^\circ$ -ДГ, выходящая из центра вихря. Получены и более сложные одновихревые решения с  $k = \pm 2, \pm 3, \pm 4$ , которые представляют собой  $k$  полубесконечных  $360^\circ$ -ДГ, выходящих из центра вихря.

## **§1.2. Метод лоренцевой микроскопии в исследовании распределения вектора намагниченности.**



Как было показано выше, наряду с макроструктурой – доменами и доменными границами, в ТП можно выделить микродоменное разбиение – рябь намагниченности. Поэтому для планарных сред возможно ввести понятие поля вектора намагниченности, а также особенности этого поля. Среди различных методов исследования магнитной структуры (*M*-структуры) особое место занимает электронный микроскоп, позволяющий наиболее точно проследить распределение, структуру поля вектора намагниченности  $\vec{M}(\vec{r})$  в реальных тонких слоях. Для исследования *M*-структуры пленок, а также получения изображения и эффектов магнитного контраста используется метод лоренцевой микроскопии, который основан на явлении отклонения движущихся электронов под действием намагниченности образца [8, 13, 15].

Известно, магнитный поток  $\vec{B}$  приводит к возникновению силы Лоренца

$$\vec{F} = -e \frac{[\vec{v} \times \vec{B}]}{c},$$

которая действует под прямым углом к направлению движения электрона ( $v$  – скорость электрона,  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света). Следовательно, магнитное поле искривляет траекторию электрона, но энергия электрона остается постоянной.

Рассмотрим электрон, падающий нормально плоскости пленки (в направлении  $z$ ), однородная намагниченность  $\vec{M}$  которой имеет компоненты  $M_x, M_y, M_z$  вдоль трех осей (рис.1.2.1).

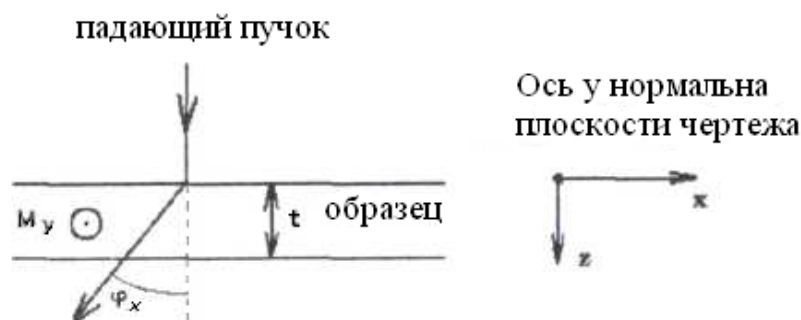


Рис.1.2.1. Отклонение электронного пучка пленкой, намагниченной в направлении  $y$ .

Компонента  $M_y$  приводит к ускорению в направлении  $x$ , задаваемому

выражением  $\dot{p}_x = \frac{4\pi e}{c} v M_y$ , где  $\dot{p}_x = m \dot{x}$ ,  $m$  – масса электрона при скорости  $v$ .

Поскольку отклонение мало, мы можем считать скорость  $v$  постоянной, тогда

$$\dot{x} = \frac{4\pi e}{mc} t M_y,$$

где  $t$  – длина проходимого пути. Угол отклонения в направлении  $x$  поэтому составляет,

$$\varphi_x = \frac{\dot{x}}{v} = \frac{4\pi e t}{m c v} M_y = \frac{4\pi e}{ch} \lambda t M_y = \frac{4\pi e t (1 - v^2/c^2)^{1/2}}{m_0 c v} M_y = \Psi \frac{M_y}{M}$$

где  $\lambda$  – длина волны и  $h$  – постоянная Планка. При ускоряющем напряжении 100 кВ длина волны электрона  $\lambda = 0,037 \text{ \AA}$ ; для типичных ферромагнитных материалов  $M \approx 10^3 \text{ Гс}$ , так что при толщине образца  $t \sim 2000 \text{ \AA}$ , подставляя соответствующие значения  $e$ ,  $c$ ,  $h$ , получаем  $\Psi \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ . Таким образом, эти отклонения достаточно малы. Но, несмотря на малую величину, отклонения в магнитном поле достаточны, чтобы вызвать важные эффекты на изображении.

Отклонение электронов в магнитном поле можно использовать для выявления магнитных доменов методом дефокусировки.

Рассмотрим тонкую магнитную пленку с 180-градусными доменами, в которой вектор намагниченности  $\vec{M}$  параллелен плоскости пленки и доменной границе и противоположен по направлению в чередующихся доменах (рис.1.2.2).

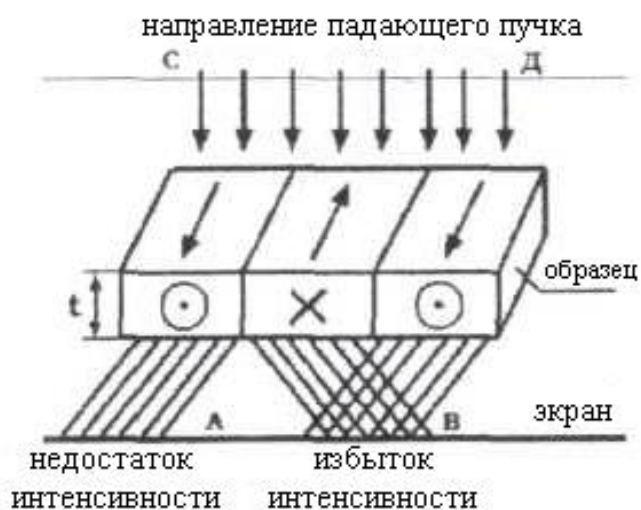


Рис. 1.2.2. Наблюдение магнитных доменов методом дефокусировки.

В смежных доменах пучок электронов будет отклоняться в противоположных направлениях, что приведет к недостатку электронов в точке  $A$  и к избытку электронов вследствие перекрытия в точке  $B$ . Поэтому при наблюдении магнитной структуры тонкой пленки методом дефокусировки в плоскости  $AB$  положения доменных стенок будут выявлены в виде темных (избыток электронов) или белых (недостаток электронов) линий. Такие ДГ соответственно называют конвергентные или дивергентные (рис.1.2.3).

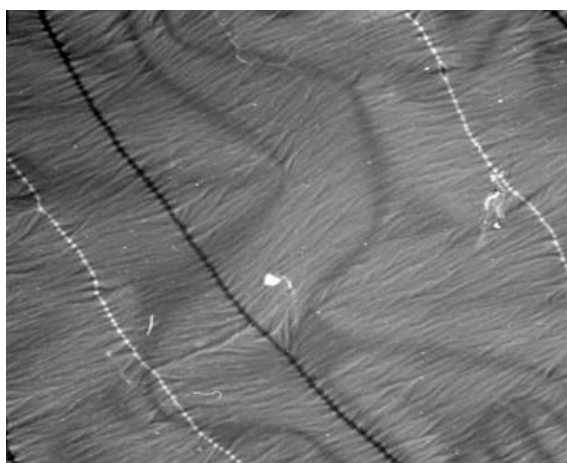


Рис.1.2.3. Лоренцмикроскопическое изображение магнитной структуры тонкой пленки.

Нужно отметить, что ширина изображенной стенки будет зависеть от степени дефокусировки и от распределения намагниченности внутри доменной стенки [8]. Причем, если изображение магнитной структуры недофокусировано (т.е. наблюдается в плоскости  $CD$ ), то белые (конвергентные) границы становятся черными (дивергентными), а если перефокусировать, то контраст будет обратный.

Метод лоренцевой микроскопии идеально подходит для исследования доменной структуры в тонких пленках, позволяя точно определить направление вектора намагниченности  $\vec{M}$  в конкретных доменах. Рядь намагниченности даст возможность определить локальное направление намагниченности непосредственно по изображению. В таких пленках вектор  $\vec{M}$  лежит не строго в направлении оси анизотропии, а испытывает некоторые флуктуации относительно нее в плоскости пленки (рис.1.2.4), что связано с мелкокристаллической структурой исследуемых объектов [1, 2, 10].

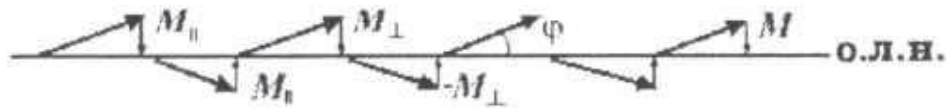


Рис. 1.2.4. Флуктуации вектора намагниченности  $\vec{M}$  в плоскости пленки относительно оси анизотропии ( $\varphi$  – угол дисперсии  $\vec{M}$ ).

В результате такого поведения вектор  $\vec{M}$  можно разложить на две компоненты:  $M_{//}$ , ответственную за формирование контраста доменных границ, и  $M_{\perp}$ , также вызывающую отклонение электронов от прямолинейного движения. При этом появляющийся черно-белый контраст микромагнитной структуры на лоренцевом изображении пленки и есть рябь намагниченности. Т.к. в формировании изображения «ряби» вносит вклад поперечная составляющая  $\vec{M}(\vec{r})$ , то в локальных участках пленки вектор намагниченности перпендикулярен «волокну» структуре, а сама рябь намагниченности, представляющая тонкую структуру вектора  $\vec{M}$ , перпендикулярна доменным границам. Струи ряби намагниченности, [10], образуют систему ромбов, малая диагональ которых и есть  $\lambda_{LR}$  – длинноволновая компонента [2], определяющая дисперсию намагниченности. Период черно-белых струй – коротковолновая компонента ряби  $\lambda_{LR}$ , которая отражает дисперсию анизотропии.

***Лабораторная работа выполняется в следующей последовательности:***

**Восстановление распределения вектора намагниченности.**

Используя лоренцмикроскопические изображения магнитной структуры тонких пленок в исходном и намагниченном (во внешнем перпендикулярном поле) состояниях, восстановить поле вектора намагниченности в образце.

Провести качественный анализ полученной магнитной структуры, обозначить особенности поведения вектора намагниченности в доменах и доменных границах.

Провести количественный анализ полученной магнитной структуры.

Сравнить характеристики магнитной структуры тонкой пленки в размагниченном (исходном) и намагниченном состояниях.

### **Корреляционный анализ.**

Используя линии сечения, получить несколько реализаций с растрового изображения магнитной структуры, например, вдоль ось легкого намагничивания и под различными углами к ней. Провести диагностику каждой реализации, используя понятие случайного процесса. Выбрать (пояснить свой выбор) реализации, приемлемые для аттрактивного анализа. Используя описание, предложенное к каждому лоренцмикроскопическому изображению, оценить длину реализации в микрометрах.

Получить на мониторе графики корреляционных функций случайного процесса. Объяснить их поведение и связать с характеристиками соответствующего случайного процесса.

### **Аттрактивный анализ.**

На выбранной реализации построить семейство фазовых траекторий (ФТ) и определить их структуру. Проследить динамику изменения фазового портрета в зависимости от сдвига  $\tau$ . По возможности обозначить оптимальный сдвиг  $\tau$ , после которого не происходит значительных изменений «клубка» ФТ. Объяснить, почему семейства ФТ называют псевдоаттрактивными множествами?

Используя главное сечение Пуанкаре, получить гистограммы распределения потока пересечений главного сечения Пуанкаре ФТ для нескольких сдвигов  $\tau$  (определенных преподавателем). Прокомментировать их динамику в соответствии с изменением фазовых кривых, п.1.

**Аттрактивный анализ. Количественные характеристики псевдоаттрактивных множеств.**

Объяснить, зачем вводятся интегральные функции меры Лебега (ИЛФМ). Построить ИЛФМ для различных  $\tau$ . Выбрать базовую кривую, пояснить свой выбор.

Провести метризацию лебеговских функций. Описать поведение кривой  $L(k)$ .

Вывести файл отчета. Используя длину конкретной реализации с растрового изображения, полученного в п.1, и информацию файла отчета, рассчитать магнитные параметры системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. // М: Мир. 1987. 41
2. Телеснин Р. В. Тонкие ферромагнитные пленки. //М: Мир. 1964 359с.
3. В. И. Арнольд. Теория катастроф. // М: Наука. 1990. 128с.
4. Р. Фокс. Энергия и эволюция жизни на земле. // М: Мир. 1992. 216с.
5. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. // М: Мир. 1990. 242с.
6. Е. Федер. Фракталы. //М: Мир. 1991. 240с.
7. Физический энциклопедический словарь. // М: 1984. 944с.
8. Петров В. И., Спивак Г. В., Павлюченко О. П. Электронная микроскопия магнитной структуры тонких пленок. // УФН. 197; №106. В.2. С.229-278.
9. Кандаурова Г. С, Опоприенко А. Г. Доменная структура магнетиков. Основные вопросы микромагнетики. //Свердловск 1986. 136с.
10. Hoffman Horst. Theory of magnetization ripple. // YEEE Trans, on Magnetics. V. Mag-4. №1. 1968. P. 32-38.
11. В. А. Гудков. Струи, вихри, турбулентность. //Природа. 1989. №11. С.33-37
12. Физическая энциклопедия. //М: 1988. Т. 1.2.3.
13. Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли., Уэлан М. Электронна) микроскопия тонких кристаллов. //М: Мир. 1968. 574с.

14. Борисов А. Б., Танкеев А. П., Шагалов А. Г. Новые типы двумерных вихреподобных состояний в магнетиках. // ФТТ. 198 Т. 31. В.5. С.140-147.

15. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. //М: Мир. 1970. 364с.

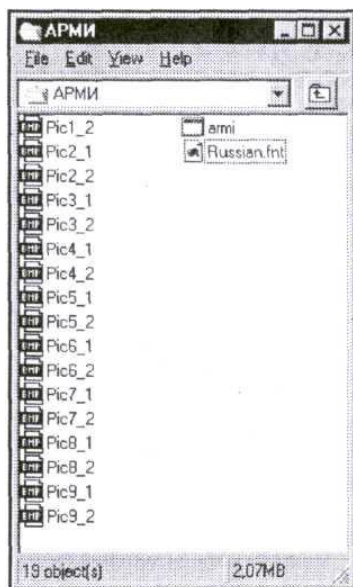
### Инструкция пользователя к программе «АРМИ»

Включите компьютер.

После загрузки рабочего экрана, на рабочем столе отыщите папку «АРМИ». Дважды щелкните курсором мышки на этой папке.



Затем в появившемся окне дважды щелкните мышкой на файл arm1.exe.



Далее произойдет загрузка программы.



В программе существует четыре окна. После того как вы выберете файл, в левом верхнем (ЛВ) окне будет представлено лоренцмикроскопическое растровое изображение. Правое верхнее (ПВ) окно будет содержать в себе график реализации, полученный при помощи линии сечения. Нижнее левое (НЛ) окно содержит пункты управления. В нижнем правом (НП) окне будут отображаться все последующие графики. Для начала работы выберите пункт в НЛ окне «открыть файл» Далее введите название файла (в виде `pic*_*.bmp`, где \* – это номера изображений). Для примера введите «pic3\_1.bmp» и нажмите кнопку «Enter» на клавиатуре, после этого вы сразу увидите лоренцмикроскопическое изображение в ЛВ окне.

Чтобы провести линию сечения, выберите пункт «Ввод координат» и нажмите «Enter» (далее ↵), в ЛВ окне появится красный курсор. При помощи курсорных клавиш и клавиши «Ctrl» переместите его в нужную точку изображения и нажмите ↵, это будет начало вашей линии сечения. Если вы будете перемещать курсор в какую-нибудь сторону, то вы увидите, как за курсором тянется красная полоса. Это и есть ваша линия сечения. Выберите конечную точку для вашего сечения и нажмите ↵. Сразу, как вы это проделали, в ПВ окне появится реализация, построенная по вашей линии сечения. *Примечание: длина линии сечения должна быть не меньше 3/4 всего изображения, т.е. примерно  $\geq 200$  точек.*

Для того чтобы увидеть корфункцию, выберите пункт «Корреляционная функция» и нажмите ↵.

Затем получим фазовый портрет при помощи пункта «Фазовый портрет». В данном случае существует возможность менять параметр сдвига при помощи курсорных клавиш «влево» и «вправо», и проследить динамику изменения фазовых траекторий. После того, как вы все просмотрели, надо нажать клавишу «Esc», чтобы прекратить работу с данным пунктом и перейти к следующему.

Выберите следующий пункт программы «Гистограмма потока пересечений». Данный пункт реализует в себе статистику пересечений главного сечения Пуанкаре, которую вы должны наблюдать на экране монитора. Как и в предыдущем случае, можно при помощи клавиш «влево» или «вправо» наблюдать статистику при разных  $\tau$ . Для окончания работы с этим пунктом также необходимо нажать клавишу «Esc».

Следующий пункт программы – построение мер Лебега. Выберем пункт «Меры Лебега» и нажмем ↵. На графике вы получите 10 кривых, при помощи курсорных клавиш «вверх» и «вниз» можно выбрать одну из кривых в качестве базовой, которая в программе выделена красным цветом. Когда выбор окончен, необходимо нажать клавишу ↵. Тем самым закрепляя выбор базовой кривой.

Далее необходимо выполнить пункт «Метризация» и получить результат на экране. Данный пункт является последним в плане сбора статистических данных для одного сечения.

Предпоследний пункт – «Вывод отчета в файл». Эту операцию необходимо производить, чтобы сохранить все данные о построенном вами сечении. Выберем этот пункт; появится меню, где необходимо присвоить имя для файла (пример: data1.txt).

Если необходимо провести еще несколько сечений по открытому вами изображению, то необходимо все выполнять так как описано с п.7.

Если нужно другое изображение, то необходимо выполнять с п.6.

### **Особенности программы.**

Производить построение данных можно в любой последовательности, кроме п.12.

Строить линию сечения так, чтобы она не попадала на подписи в фотографиях. Также следить, чтобы линия не пересекала какие-нибудь дефекты на изображениях.

Вывод данных в файл будет выполняться в том случае, если выполнен п.12. Данной инструкции достаточно для работы с программой.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

## **ГЛОССАРИЙ**

**по дисциплине «Физика конденсированного состояния»**

**11.03.04 – «Электроника и наноэлектроника»**

**Владивосток**

**2015 г.**

## Глоссарий

**Аморфные твердые тела** - это твердые тела, физические свойства которых одинаковы по всем направлениям (наблюдается изотропия свойств). Для них, как и для жидкостей, характерен ближний порядок в расположении частиц; у них в отличие от жидкостей подвижность частиц достаточно мала. Аморфные твердые тела (смола, стекло и др..) являются переохлажденными жидкостями и не имеют четко выраженных свойств кристаллов.

**Антиферромагнетизм** - магнитоупорядоченное состояние кристаллического вещества, в котором все или часть соседних атомных магнитных моментов направлены антипараллельно, что суммарный магнитный момент элементарной магнитной ячейки кристалла равен нулю (или составляет малую долю атомного момента). Ось, вдоль которой ориентированы антиферромагнитно-упорядоченные атомные магнитные моменты, называется осью антиферромагнетизма.

**Блоховская доменная стенка** - область (слой) внутри магнитоупорядоченного вещества, разделяющая смежные домены. Внутри этой области происходит поворот вектора намагниченности  $M$  от его направления в одном домене к направлению в соседнем домене. Поворот осуществляется при продвижении вдоль нормали к поверхности разделяющего слоя таким образом, что нормальная составляющая  $M$  остаётся непрерывной, т. е. на поверхности Блоховской доменной стенки не возникают магнитостатические полюсы.

**Бозон** - частица с целым значением спина. Бозоны подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна, которая допускает, чтобы в одном квантовом состоянии могло находиться неограниченное количество одинаковых частиц.

**Вакансия** - дефект кристалла, представляющий собой узел, в котором отсутствует атом (ион). Иначе говоря, вакансия — место, где в случае идеального кристалла должен располагаться атом (ион), но в действительности его в этом положении нет.

**Валентные электроны** - валентными электронами называют электроны, находящиеся на внешней (валентной) оболочке атома. Чем меньше валентных электронов имеет элемент, тем легче он отдаёт эти электроны. И наоборот, чем больше валентных электронов содержится в атоме химического элемента, тем легче он приобретает электроны. Полностью заполненные внешние электронные оболочки имеют инертные газы, которые проявляют минимальную химическую активность. Периодичность заполнения электронами внешней электронной оболочки определяет периодическое изменение химических свойств элементов в таблице Менделеева. Количество валентных электронов (максимальная валентность) равно номеру группы в периодической таблице Менделеева, в которой находится химический элемент (кроме побочных подгрупп).

**Вектор Бюргерса** - количественная характеристика, описывающая искажения кристаллической решётки вокруг дислокации.

**Высшая категория кристаллов** - кристаллы высшей категории не имеют единичных направлений, у них обязательно есть несколько осей порядка выше, чем 2. Это высоко симметричные кристаллы. Любому направлению в кристалле высшей категории соответствуют другие симметрично эквивалентные направления.

**Группы трансляций** - параллельные переносы, при сдвиге на которые кристаллическая структура совместится сама с собой. Трансляционная симметрия кристалла характеризуется решёткой Браве. В 3-мерном случае всего возможно 14 типов решёток Браве.

**Диамагнетизм** - свойство вещества намагничиваться навстречу направлению действующего на него внешнего магнитного поля.

**Дисперсионное соотношение** - это связь частоты и волнового вектора волны. Этот закон выражает связь временной и пространственной периодичности волны.

**Домены** - макроскопическая область в магнитном кристалле, в которой ориентация вектора спонтанной однородной намагниченности или вектора антиферромагнетизма (при температуре ниже точки Кюри или Нееля соответственно) определенным образом повернута или сдвинута относительно направлений соответствующего вектора в соседних доменах. Домены существуют в ферро- и антиферромагнитных, сегнетоэлектрических кристаллах и других веществах, обладающих спонтанным дальним порядком.

**Единичные направления** - единичным направлением в кристалле называется единственное не повторяющееся направление. В кристаллах может быть одно единичное направление, три, множество единичных направлений и ни одного.

**Закон Блоха - (закон  $3/2$ )** - температурная зависимость самопроизвольной намагниченности  $M$  для ферромагнетиков в области температур  $T \ll T_C$  ( $T_C$  - точка Кюри).

**Закон Видемана-Франца** - это физический закон, утверждающий, что для металлов отношение коэффициента теплопроводности (либо тензора теплопроводности) к удельной электрической проводимости (либо тензору проводимости) пропорционально температуре.

**Закон Дебая** - утверждает, что при низких температурах теплоёмкость твёрдого тела возрастает пропорционально кубу температуры. Закон Дебая справедлив для диэлектриков и полупроводников при температурах, намного меньших температуры Дебая.

**Закон Дюлонга и Пти** - (закон постоянства теплоёмкости) — эмпирический закон, согласно которому молярная теплоёмкость твёрдых тел при комнатной температуре близка к  $3R$ .

**Закон Кюри** - описывает магнитную восприимчивость парамагнетиков, которая при постоянной температуре для этого вида материалов приблизительно прямо пропорциональна приложенному магнитному полю. Закон Кюри постулирует, что при изменении температуры и постоянном внешнем поле, степень намагниченности парамагнетиков обратно пропорциональна температуре.

**Зона Бриллюэна** - отображение ячейки Вигнера-Зейтца в обратном пространстве. В приближении волн Блоха волновая функция для периодического потенциала решётки твёрдого тела полностью описывается её поведением в первой зоне Бриллюэна. Первая зона Бриллюэна (часто называемая просто зоной Бриллюэна) может быть построена как объём, ограниченный плоскостями, которые отстоят на равные расстояния от рассматриваемого узла обратной решётки до соседних узлов. Зона Бриллюэна — множество точек в обратном пространстве, которых можно достигнуть из данного узла, не пересекая ни одной брэгговской плоскости.

**Ионный радиус** - характерный размер шарообразных ионов, применяемый для вычисления межатомных расстояний в ионных соединениях. Понятие ионный радиус основано на предположении, что размеры ионов не зависят от состава молекул, в которые они входят. На него влияет количество электронных оболочек и плотность упаковки атомов и ионов в кристаллической решётке.

**Коэрцитивная сила** - напряжённость  $H_c$  магнитного поля, в котором ферромагнитный образец, первоначально намагниченный до насыщения, размагничивается.

**Кратность точек** - число точек общего положения, преобразующиеся друг в друга под действием всех операций симметрии группы, приходящееся на одну элементарную ячейку.

**Кристаллы ионные** представляют собой кристаллы, состоящие из ионов, связанных между собой электростатическим притяжением.

**Кристаллы ковалентные** - кристаллические вещества, в которых все атомы объединены ковалентными связями, образующими пространственный каркас (гомодесмическую кристаллическую структуру). Обычно имеют ажурную структуру, в них отсутствует плотная упаковка.

**Кристаллы металлические** - кристаллические вещества, все атомы которых объединены металлическими связями - валентные электроны металла делокализованы по всему пространству кристаллической решетки, образуемой его положительными ионами. Структуры кристаллов металлических характеризуются плотной и плотнейшей упаковками.

**Кристаллы молекулярные** - кристаллы, образованные молекулами, связанными силами межмолекулярного взаимодействия. Это главным образом ван-дер-ваальсовы силы.

**Магнетон Бора** - единица элементарного магнитного момента. Магнитный момент электрона кратен магнетону Бора  $\mu_B$ . Следовательно,  $\mu_B$  играет роль элементарного магнитного момента — «кванта» магнитного момента электрона.

**Магнитная анизотропия** - зависимость магнитных свойств ферромагнетика от направления намагниченности по отношению к структурным осям образующего его кристалла.

**Магнитострикция** - изменение формы и размеров тела при его намагничивании.

**Магнон** - квазичастица, соответствующая элементарному возбуждению системы взаимодействующих спинов. В кристаллах с несколькими магнитными подрешётками (например, антиферромагнетиках) могут существовать несколько сортов магнонов, имеющих различные энергетические спектры. Магноны подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна.

**Низшая категория кристаллов** - к низшей категории относятся кристаллы, у которых нет осей симметрии порядка выше чем 2, а единичных направлений несколько.



**Нормальные колебания** - набор характерных для колебательной системы типов гармонических колебаний. Каждое из нормальных колебаний физической системы, например, колебаний атомов в молекулах, характеризуется своей частотой. Такая частота называется нормальной частотой. Набор частот нормальных колебаний составляет колебательный спектр. Произвольное колебание физической системы можно представить в виде суперпозиции нормальных колебаний.

**Парамагнетизм** - свойство веществ (парамагнетиков), помещённых во внешнее магнитное поле, намагничиваться в направлении, совпадающем с направлением этого поля.

**Переходные металлы** - химические элементы Iб и VIIIб подгрупп периодической системы элементов. В переходных металлах. внутренние оболочки атомов заполнены только частично. Различают d-металлы, у которых происходит постепенное заполнение 3-d (от Sc до Ni), 4-d (от Y до Pd) и 5-d (от Hf до Pt) - подоболочек, и f-металлы, у которых заполняются 4f-подоболочки (редкие земли, или лантаноиды, от Ce до Lu) и 5f-подоболочки (актиноиды).

**Плотнейшая упаковка шаров** - если атомы представить в виде малых твердых несжимаемых шаров, между которыми действуют силы взаимного притяжения и отталкивания, то особенности строения большинства кристаллов можно условно рассматривать как пространственную упаковку таких шаров. Шары укладываются так, чтобы упаковка обладала наибольшей симметрией и компактностью. Это условие выполняется, если каждый шар соприкасается с шестью шарами. При этом в плоском слое каждый шар окружен шестью треугольными лунками (пустотами), а каждая из лунок – тремя шарами.

**Полуметаллы** - вещества, занимающие по электрическим свойствам промежуточное положение между металлами и полупроводниками. Для полуметаллов характерно слабое перекрытие валентной зоны и зоны проводимости, что приводит, к тому, что полуметаллы остаются проводниками вплоть до абсолютного нуля температуры и к малой (по сравнению с металлами) концентрации носителей тока ( $10^{18}$ — $10^{20}$  см<sup>-3</sup>).

**Полупроводники** - материал, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Основным свойством полупроводника является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

**Правильная система точек** - системой эквивалентных позиций - называется совокупность точек, полученная размножением исходной точки всеми операциями симметрии данной пространственной группы. При этом любая операция, переводящая одну точку в другую, принадлежащую этой же правильной системе, приведет к совмещению всех остальных точек данной системы, т. е. преобразует данную систему в самоё себя.

**Прямое обменное взаимодействие** - взаимодействие тождественных частиц в квантовой механике, приводящее к зависимости значения энергии системы частиц от её полного спина. Представляет собой чисто квантовый эффект, исчезающий при предельном переходе к классической механике.

**Распределение Бозе-Эйнштейна** - определяет распределение тождественных частиц с нулевым или целочисленным спином (такowymi являются, например, фотоны) по энергетическим уровням в состоянии термодинамического равновесия. Статистика Бозе-Эйнштейна связана с квантовомеханическим принципом неразличимости тождественных частиц.

**Распределений Ферми-Дирака** - квантовая статистика, применяемая к системам тождественных фермионов (частиц с полуцелым спином, подчиняющихся принципу запрета Паули); определяет статистическое распределение фермионов по энергетическим уровням системы, находящейся в термодинамическом равновесии; позволяет найти вероятность, с которой фермион занимает данный энергетический уровень.

**Решетка Браве** - называется набор элементарных трансляций или трансляционная группа, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решётка. Все кристаллические структуры описываются 14 решётками Браве, число которых ограничивается симметрией.

**Сингония** - (от греческих σύν, «согласно, вместе, рядом», и γωνία, «угол» — «сходноугольность») — классификация кристаллографических групп симметрии, кристаллов и кристаллических решёток в зависимости от системы координат (координатного репера). Группы симметрии с единой координатной системой объединяются в одну сингонию.

**Спонтанная намагниченность** - собственная намагниченность магнитного вещества, не зависящая от внешних условий.

**Температура Дебая** - температура, при которой возбуждаются все моды колебаний в данном твёрдом теле. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к появлению новых мод колебаний, а лишь ведёт к увеличению амплитуд уже существующих.

**Фазовые переходы** - переход вещества из одной термодинамической фазы в другую при изменении внешних условий. С точки зрения движения системы по фазовой диаграмме при изменении её интенсивных параметров (температуры, давления) фазовый переход происходит, когда система пересекает линию, разделяющую две фазы. Поскольку разные термодинамические фазы описываются различными уравнениями состояния, всегда можно найти величину, которая скачкообразно меняется при фазовом переходе.

**Фермион** - частица (или квазичастица) с полуцелым значением спина. Примеры фермионов: кварки, лептоны, электроны, дырки (квазичастицы в полупроводнике). Фермионы подчиняются статистике Ферми — Дирака: в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частицы (принцип Паули).

**Ферромагнетизм** - магнитоупорядоченное состояние вещества, при котором все магнитные моменты атомных носителей магнетизма в веществе параллельны и оно обладает самопроизвольной намагниченностью.

**Фонон** - квазичастица, представляет собой квант колебательного движения атомов кристалла. Спин фонона равен нулю (в единицах  $\hbar$ ). Фонон принадлежит к числу бозонов и описывается статистикой Бозе-Эйнштейна.

**Частота Дебая** - максимальная частота, с которой могут колебаться атомы около своих положений равновесия.

46. **Энергия Ферми** - энергия, ниже которой все состояния системы частиц или квазичастиц, подчиняющихся статистике Ферми - Дирака, заполнены, а выше - пусты в основном состоянии при абсолютном нуле температуры ( $T = 0$  К). Для идеального газа фермионов Энергия Ферми совпадает с химическим потенциалом при  $T = 0$  К, это увеличение энергии основного состояния системы при добавлении одной частицы. Энергия Ферми интерпретируется как максимальная энергия фермиона в основном состоянии при абсолютном нуле температур.

47. **Эффективная масса** - величина, имеющая размерность массы, характеризующая динамические свойства квазичастиц. Например, движение электрона проводимости в кристалле под действием внешней силы и сил, действующих со стороны кристаллической решётки, в ряде случаев может быть описано как движение свободного электрона, на который действует только сила  $F$ , но с Эффективной массой  $m^*$ , отличной от массы  $m$  свободного электрона. Это отличие отражает взаимодействие электрона проводимости с решёткой.

