

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич
Должность: врио ректора
Дата подписания: 10.08.2023 16:00:50
Уникальный программный ключ:
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Б.Б.Педько

«30»

мая

2023 г.



Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

Доменная структура магнетиков

Направление подготовки

03.03.02 Физика

профиль

Физика конденсированного состояния вещества

Для студентов

4 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Семенова Е.М.

Тверь, 2023

I. Аннотация

1. Цель и задачи дисциплины

Целью освоения дисциплины является изучение основных вопросов теории и практики доменной структуры магнетиков. Рассматриваются вопросы теоретического и экспериментального обоснования существования магнитных доменов. Изучается доменная структура различного типа и ее связь с кристаллической структурой магнетиков, доменные границы в массивных образцах и тонких магнитных пленках. Студентами практически осваиваются различные методики расчета параметров доменной структуры магнетиков.

Задачами освоения дисциплины являются формирование и развитие у обучающихся компетенций: способность осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач; способность выполнять экспериментальную работу в области физики и оформлять результаты исследований и разработок; способность сопровождать типовые технологические процессы в области материаловедения и технологии материалов.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Доменная структура магнетиков» изучается в модуле «Магнетизм» Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Содержательно дисциплина связана с дисциплинами «Физика магнитных явлений», «Магнетизм в конденсированных средах», «Процессы перемагничивания магнетиков», «Микромагнетизм». Для успешного освоения дисциплины необходимы знания основных законов общей и теоретической физики. Дисциплина является основой общего физического практикума, производственной и преддипломной практик.

Профессиональные компетенции, сформированные при изучении данной дисциплины, необходимы для успешной работы обучающегося при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. Объем дисциплины: 3 зачетные единицы, 108 академических часов,

в том числе:

контактная аудиторная работа: лекции 30 часов, лабораторные работы 30 часов;

самостоятельная работа: 48 часов, в том числе контроль 27 часов.

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие.
ПК-2. Способен выполнять экспериментальную работу в области физики и оформлять результаты исследований и разработок.	ПК-2.1. Проводит экспериментальные исследования с применением научно-исследовательского оборудования в соответствии с утвержденными методиками. ПК-2.2. Анализирует физические явления и процессы в области физики конденсированного состояния и составляет отчет по теме исследования или по результатам проведенных экспериментов.
ПК-3. Способен сопровождать типовые технологические процессы в области материаловедения и технологии материалов.	ПК-3.1. Осуществляет анализ структуры материалов.

5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Экзамен в 7 семестре.

6. Язык преподавания: русский.

II. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час)	Контактная работа (час.)				Самостоятельная работа, в т.ч. контроль (час.)
		Лекции		Лабораторные работы		
		всего	в т.ч. практическая подготовка	всего	в т.ч. практическая подготовка	
Лекции						
Введение. Домены в магнитоупорядоченных кристаллах. Особенности процессов намагничивания ферромагнетиков. Гипотеза Вейсса о существовании ферромагнитных доменов. Экспериментальные доказательства существования доменов в ферромагнетиках.	2	2				
Экспериментальные методы исследования доменной структуры. Оптические методы. Метод эффекта Керра. Виды эффектов Керра: полярный, меридиональный и экваториальный. Схема образования керровского контраста. Преимущества и недостатки метода. Метод эффекта Фарадея и границы его применимости. Метод магнитных порошковых осадков Акулова–Битера. Преимущества и недостатки метода. Метод царапин. Экспериментальные методики реализации метода порошковых осадков. Метод нейтронографии и применение его для исследования магнитных структур и доменной структуры магнитоупорядоченных кристаллов. Метод лоренцовской электронной микроскопии. Метод магнитно-силовой микроскопии.	6	2				4

<p>Основные типы взаимодействий в магнитоупорядоченных кристаллах. Обменное взаимодействие, его природа и энергия. Взаимодействие ферромагнетика с внешним магнитным полем, его природа и энергия. Собственное размагничивающее поле ферромагнетика. Магнитостатическая энергия. Размагничивающий фактор. Явление магнитной кристаллографической анизотропии (МКА). Оси легкого и трудного намагничивания. Поле анизотропии. Формы записи энергии МКА для кристаллов различных сингоний. Положения преимущественных направлений намагничивания. Диаграммы МКА для кубических, одноосных и тетрагональных кристаллов. Различные типы МКА в одноосных магнетиках. Экспериментальные данные о величине констант и типе МКА ферромагнитных материалов. Другие виды магнитной анизотропии. Анизотропия формы. Наведенная ориентационная анизотропия. Обменная однонаправленная анизотропия. Поверхностная анизотропия. Упругие и магнитоупругие взаимодействия в ферромагнетиках. Явление магнитоstriction, его проявления и физическая природа. Магнитоstrictionная деформация. Магнитоупругая и упругая энергии.</p>	12	6				6
<p>Экспериментальные данные о доменных структурах в ферромагнетиках. Доменные структуры кристаллов с одноосной симметрией и МКА типа «легкая ось». Структура «звездочек» и «полос» в массивном кристалле. Изменение конфигурации доменов в зависимости от ориентации поверхности наблюдения относительно кристаллографической оси <i>c</i>. «Лабиринтная», «сотовая» и «спиральная» структура тонких пленок. Конфигурации доменных структур в реальных кристаллах. Особенности и многообразие доменных структур в одноосных кристаллах с МКА типа «легкая ось» и «легкая плоскость». Характерные конфигурации основной и поверхностной доменных структур в кубических магнетиках. Зависимость вида доменной структуры от кристаллографической ориентации поверхности наблюдения.</p>	4	2				2

<p>Основные понятия теории доменной структуры. Магнитные домены. Доменные границы и их типы. Доменная структура магнетика и ее параметры. Классификация моделей доменных структур. Влияние доменной структуры на физические свойства ферромагнетиков. Равновесное состояние массивных магнитоупорядоченных кристаллов. Общая постановка задачи о доменной структуре. Модельный и микромагнитный подход.</p>	4	2				2
<p>Доменные границы в массивных кристаллах. Модель плоских доменных границ в массивных ферромагнетиках. Две модели разворота вектора намагниченности внутри доменной границы. Приближенная оценка энергии и ширины доменных границ. Строгое рассмотрение задачи о доменных границах в массивных кристаллах в модели Ландау–Лифшица. Ограничения модели. Типы доменных границ в одноосных и кубических кристаллах. Влияние ориентации плоскости границы на ее энергию. Условие отсутствия магнитных полюсов на доменной границе. Выбор системы координат, связанной нормалью к плоскости границы. Схема разворота вектора намагниченности внутри границы. Решение задачи о доменной границе с учетом двух энергий: обменной и МКА. Выражения для расчета поверхностной плотности энергии и ширины доменных границ любого типа. Общая методика расчета поверхностной плотности энергии границ различных типов. Энергия 180°-ной границы в одноосном кристалле. Запись выражения для энергии МКА кубического кристалла в системе координат, связанной с нормалью к плоскости границы. Энергия 90°-ных границ типа (100); (110) и (111) в кубических кристаллах. Энергия 180°-ных границ в кубических кристаллах и их преимущественная ориентация. Расчет ширины 180°-ной границы в одноосном кристалле. Эффективная ширина и методы ее определения. Доменные границы бесконечной ширины в кубическом кристалле. Влияние магнитострикции на ширину и энергию доменных границ.</p>	12	6				6

<p>Доменные границы в тонких магнитных пленках. Тонкие магнитные пленки (ТМП). Магнитостатическая энергия доменной границы в ТМП. Доменные границы с различным типом разворота вектора намагниченности внутри границы: границы Блоха и Нееля. Решение задачи о границах Блоха и Нееля в модели Нееля. Оценка критической толщины ТМП пермаллоя. Доменные границы с поперечными связями в ТМП. Структура границ с поперечными связями.</p>	6	4				2
<p>Модели основной доменной структуры в массивных кристаллах. Принципы построения моделей доменной структуры. Классификация моделей. Магнитные фазы. Модель Киттеля – модель полосовой доменной структуры одноосных магнетиков. Ограничения модели. Магнитостатическая энергия структуры. Зависимость ширины 180°-ных доменов размагниченого кристалла от его толщины. Энергетическая выгодность образования доменной структуры в массивных кристаллах. Однодоменное состояние магнетика. Экспериментальные подтверждения модели. Модель сотовой доменной структуры. Параметры и энергия структуры. Понятие о μ^*-поправке. Учет объемных магнитных зарядов внутри низкоанизотропных магнетиков. Вывод формулы для оценки μ^*-поправки. Замкнутые доменные структуры в кубических кристаллах. Модель Ландау–Лифшица. Учет магнитоупругого вклада в общую энергию структуры. Ограничения модели. Зависимость ширины доменов от толщины кристалла.</p>	8	4				4
<p>Поверхностные доменные структуры. Модель поверхностной доменной структуры одноосных кристаллов. Изменения основной полосовой структуры при приближении к поверхности массивного кристалла. Критические толщины кристалла. Доменная структура с волнистыми границами. Параметры волнистости структуры. Волнистая доменная структура с дополнительными доменами. Зависимости ширины доменов от толщины кристалла и их</p>	4	2				2

экспериментальные подтверждения. Поверхностные доменные структуры в кубических кристаллах. Причины возникновения. Основные модели структур. Плоская модель разветвленной доменной структуры и ее параметры. Зависимости ширины доменов от толщины кристаллов. Структура «елочек» и ее модификации. Изменение конфигурации «елочек» в зависимости от кристаллографической ориентации плоскости наблюдения.						
Лабораторные работы						
Работа №1. Освоение методики приготовления металлографических шлифов для исследования доменной структуры.	6			6		
Работа №2. Изучение приемов оптической микроскопии в исследованиях доменной структуры.	8			4		4
Работа №3. Изучение доменной структуры магнетиков методом порошковых осадков.	8			4		4
Работа №4. Изучение доменной структуры магнетиков магнитооптическим методом полярного эффекта Керра.	10			6		4
Работа №5. Изучение доменной структуры магнетиков методом эффекта Фарадея.	8			4		4
Работа №6. Изучение доменной структуры магнетиков методом магнитно-силовой микроскопии.	10			6		4
ИТОГО	108	30		30		48

III. Образовательные технологии

Учебная программа-наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
Введение.	Лекция	Традиционная лекция Презентация

Экспериментальные методы исследования доменной структуры.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Основные типы взаимодействий в магнитоупорядоченных кристаллах.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Экспериментальные данные о доменных структурах в ферромагнетиках.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Основные понятия теории доменной структуры.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Доменные границы в массивных кристаллах.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Доменные границы в тонких магнитных пленках.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Модели основной доменной структуры в массивных кристаллах.	Лекция	Традиционная лекция Презентация
Поверхностные доменные структуры.	Лекция	Традиционная лекция Презентация

IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации

Типовые задания для оценки уровня формирования компетенций.

УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.

Задание: Рассчитать величины поверхностной плотности энергии и эффективную ширину доменных границ для монокристаллов:

- кобальта;
- соединения SmCo_5 ;
- соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

ПК-2. Способен выполнять экспериментальную работу в области физики и оформлять результаты исследований и разработок.

Задание: В выражении для объемной плотности энергии МКА одноосного кристалла учесть только первую константу МКА. Определить направления легких и трудных осей намагничивания в зависимости от K_1 . Назвать тип МКА. Определить энергию МКА вдоль легких и трудных осей намагничивания. Построить диаграмму МКА.

ПК-3. Способен сопровождать типовые технологические процессы в области материаловедения и технологии материалов.

Задание: По заданным температурным зависимостям констант МКА образца определить изменения его типа МКА и точки спин-переориентационных переходов.

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендуемая литература

а) основная литература:

1. Чжан А.В. Процессы перемагничивания и доменная структура ферромагнетиков [Электронный ресурс]: монография. – Красноярский государственный аграрный университет, 2017. – 152 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/130146>.
2. Матухин В. Л. Физика твердого тела [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 224 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/262>.

б) дополнительная литература:

1. Вонсовский С. В. Магнетизм: монография / С. В. Вонсовский – Москва: Наука, 1971. – 1032.
2. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений: учебное пособие / Г. С. Кринчик – Москва, издательство МГУ, 1976. – 367 с.

3. Хуберт А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах: монография / А. Хуберт – Москва: Мир, 1977. – 306 с.

Электронные библиотечные системы:

1. ЭБС «ИНФРА-М» <http://www.znaniium.com>
2. ЭБС «Университетская библиотека ОН-ЛАЙН» <http://www.biblioclub.ru>
3. ЭБС «ЛАНЬ» <http://e.lanbook.com>
4. Сервер информационно-методического обеспечения учебного процесса ТвГУ <http://edc.tversu.ru>

VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины

Вопросы для подготовки к письменным опросам рейтингового контроля.

1. Дайте полное определение следующим понятиям:
 - ферромагнитный домен;
 - доменная граница;
 - доменная структура.
2. Напишите выражение для энергии магнитокристаллической анизотропии для магнетиков следующих типов:
 - кубических;
 - тетрагональных;
 - гексагональных.
3. Сколько осей легкого намагничивания имеют магнетики следующих типов:
 - одноосные с $K_1 > 0$;
 - кубические с $K_1 > 0$;
 - кубические с $K_1 < 0$?
4. Перечислите возможные типы доменных границ магнетиков следующих типов:

- одноосных с $K_1 > 0$;
 - кубических с $K_1 > 0$;
 - кубических с $K_1 < 0$.
5. Чему равна поверхностная плотность энергии доменных границ следующих типов:
- 180° -ных ДГ в одноосных кристаллах с $K_1 > 0$;
 - 90° -ных ДГ в кубических кристаллах с $K_1 > 0$ ($\mathbf{n} \parallel \langle 100 \rangle$);
 - 180° -ных ДГ в кубических кристаллах с $K_1 > 0$ ($\mathbf{n} \parallel \langle 100 \rangle$)?
6. Чему равна эффективная ширина доменных границ следующих типов:
- 180° -ных ДГ в одноосных кристаллах с $K_1 > 0$;
 - 180° -ных ДГ в кубических кристаллах с $K_1 > 0$ ($\mathbf{n} \parallel \langle 100 \rangle$);
 - 180° -ных ДГ в кубических кристаллах с $K_1 < 0$ ($\mathbf{n} \parallel \langle 111 \rangle$)?
7. Кратко опишите структуру доменных границ следующих типов и укажите в каких магнетиках они реализуются:
- ДГ Блоха;
 - ДГ Нееля;
 - ДГ с поперечными связями.
8. Кратко опишите теоретические следующие модели доменной структуры.
- модель Киттеля;
 - модель сотовой ДС;
 - модель Ландау-Лифшица.
9. Какова зависимость ширины доменов (l) от толщины кристалла (D) для доменных структур следующих типов:
- основной ДС Киттеля;
 - основной ДС Ландау-Лифшица;
 - поверхностной ДС одноосных кристаллов?
10. Перечислите конфигурации доменных структур, которые экспериментально наблюдаются в магнетиках следующих типов:
- в массивных одноосных магнетиках;
 - в тонких пленках одноосных магнетиков;

– в кубических магнетиках.

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Свойства ферромагнетиков и гипотеза Вейсса.
2. Экспериментальные методы исследования доменной структуры.
3. Экспериментальные данные о доменной структуре ферромагнетиков.
4. Основные понятия теории доменной структуры. Домены, доменные границы, доменная структура.
5. Два подхода к решению задачи о доменной структуре.
6. Приближенная оценка энергии и ширины доменных границ в массивных кристаллах.
7. Типы доменных границ в одноосных и кубических кристаллах.
8. Общее решение задачи о доменных границах в массивных кристаллах.
9. Энергия 180° -ных доменных границ в одноосном кристалле.
10. Энергия 90° -ных доменных границ в кубическом кристалле.
11. Энергия 180° -ных доменных границ в кубическом кристалле.
12. Ширина доменных границ в массивных кристаллах.
13. Влияние магнитострикции на ширину и энергию доменных границ в кубических кристаллах.
14. Доменные границы в тонких магнитных пленках. Границы Блоха и Нееля.
15. Границы смешанного типа в тонких магнитных пленках.
16. Основная доменная структура одноосных кристаллов. Модель Киттеля.
17. Понятие о μ^* -поправке.
18. Основная доменная структура кубических кристаллов. Модель Ландау-Лифшица.
19. Поверхностная доменная структура одноосных кристаллов.
20. Поверхностная доменная структура кубических кристаллов.

Требования к рейтинг-контролю

В семестре проводится два контрольных модуля.

I модуль – 20 баллов. Письменный опрос по теории (10 вопросов) – 20 баллов: по 2 балла – за правильный ответ на каждый вопрос, по 1 баллу – за неполный ответ.

II модуль – 40 баллов. Письменный опрос по теории (10 вопросов) – 20 баллов: по 2 балла – за правильный ответ на каждый вопрос, по 1 баллу – за неполный ответ. Лабораторные работы (6 работ) – 20 баллов.

VII. Материально-техническое обеспечение

Для проведения лекционных занятий необходима аудитория, оборудованная мультимедийным проектором. Для обеспечения лабораторных занятий используются металлографические микроскопы Neophot 30 и Axiovert 200 MAT, а также персональные компьютеры.

VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			