

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна
Должность: проректор по образовательной деятельности
Дата подписания: 25.08.2025 16:35:16
Уникальный программный ключ:
6cb002877b2a1ea640fdebb0cc541e4e05322d13

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Е.В. Барабанова

«26» июня 2025 г.



Рабочая программа дисциплины

Доменная структура магнетиков

Закреплена за кафедрой:	Физики конденсированного состояния
Направление подготовки:	03.03.03 Радиофизика
Направленность (профиль):	Материалы и устройства радиоэлектроники (беспилотные системы, программно-аппаратные комплексы, системы автоматизированного проектирования)
Квалификация:	Бакалавр
Форма обучения:	очная
Семестр:	7

Программу составил(и):

канд. физ.-мат. наук, доц., Семенова Елена Михайловна

Тверь, 2025

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины (модуля):

Целью освоения дисциплины является изучение основных вопросов теории и практики доменной структуры магнетиков.

Задачи:

Задачами освоения дисциплины являются формирование и развитие у обучающихся представлений о доменных структурах различного типа, а также о связи ДС с кристаллической структурой магнетиков, доменных границах в массивных образцах и тонких магнитных пленках. Практическое освоение студентами различных методик расчета параметров доменной структуры магнетиков.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Дифференциальные уравнения

Обработка и анализ данных физического эксперимента

Численные методы и математическое моделирование

Электричество и магнетизм

Электродинамика

Физика конденсированного состояния вещества

Физика магнитных явлений

Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:

Научно-исследовательская работа

Преддипломная практика

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе:	
аудиторные занятия	52
самостоятельная работа	56

4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-2.1: Использует техническую документацию при работе с радиоэлектронной аппаратурой при проведении научно-исследовательских и прикладных работ

ПК-2.2: Осуществляет работу с современными средствами измерения, применяемыми в эксперименте

ПК-4.1: Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований

5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
зачеты	7

6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

Язык преподавания: русский.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. 1. Введение					
1.1	Домены магнитоупорядоченных кристаллах. Особенности процессов намагничивания ферромагнетиков. Гипотеза Вейсса о существовании ферромагнитных доменов. Экспериментальные доказательства существования доменов в ферромагнетиках.	Лек	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 2. 2. Экспериментальные методы исследования доменной структуры.					
2.1	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 лоренцевской электронной микроскопии. Метод магнитно-силовой микроскопии.	Лек	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
2.2	Экспериментальные методы выявления доменной структуры магнетиков	Ср	7	8	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 3. 3. Основные типы взаимодействий в магнитоупорядоченных кристаллах					

3.1	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 магнитострик-ции, его проявления и физическая природа. Магнитострикционная деформация. Магнитоупругая и упругая энергии.	Лек	7	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
3.2	Обменное взаимодействие . Магнитокристаллическая анизотропия	Ср	7	8	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 4. 4. Экспериментальные данные о доменных структурах в ферромагнетиках					

4.1	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 с. «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.	Лек	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
4.2	Анализ доменной структуры магнетиков с МКА типа "ось легкого намагничивания"	Ср	7	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4Л2.1 Л2.2	
	Раздел 5. 5. Основные понятия теории доменной структуры					
5.1	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.	Лек	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
5.2	Теория доменной структуры магнетиков	Ср	7	4		
	Раздел 6. 6. Доменные границы в массивных кристаллах					

6.1	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	Лек	7	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4Л2.1 Л2.2	
-----	--	-----	---	---	---------------------------------------	--

	ширину и энергию доменных границ.					
6.2	Структура доменных границ.	Ср	7	4		
	Раздел 7. 7. Доменные границы в тонких магнитных пленках					
7.1	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.	Лек	7	4		
7.2	Доменные границы в тонких магнитных пленках	Ср	7	2		
	Раздел 8. 8. Модели основной доменной структуры в массивных кристаллах					

8.1	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 размагниченного 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 ΔE-поправке. Учет объемных магнитных зарядов внутри низкоанизотропных магнетиков. Вывод формулы для оценки ΔE-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.	Лек	7	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1 Л2.2	
8.2	Модели доменных структур в одноосных магнетиках	Ср	7	2		
	Раздел 9. 9. Поверхностные доменные структуры					

9.1	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 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.	Лек	7	2	Л1.3 Л1.4Л2.1 Л2.2	
9.2	Поверхностные доменные структуры	Ср	7	4		
	Раздел 10. 10. Лабораторные работы					
10.1	Освоение методики приготовления металлографических шлифов для исследования доменной структуры.	Лаб	7	4	Л1.1 Л1.2 Л1.4Л2.2	
10.2	Изучение приемов оптической микроскопии в исследованиях доменной структуры.	Лаб	7	4		
10.3	Изучение доменной структуры магнетиков методом порошковых осадков	Лаб	7	4		
10.4	Изучение доменной структуры магнетиков магнитооптическим методом полярного эффекта Керра.	Лаб	7	4		

10.5	Изучение доменной структуры магнетиков методом эффекта Фарадея.	Лаб	7	4		
10.6	Изучение доменной структуры магнетиков методом магнитно-силовой микроскопии	Лаб	7	6		
10.7	Экспериментальные методы выявления и регистрации доменных структур магнетиков. Анализ полученных экспериментальных данных.	Ср	7	20		

Список образовательных технологий

1	Активное слушание
2	Информационные (цифровые) технологии
3	Технологии развития критического мышления

8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

См. Приложение 1

8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

См. Приложение 1

8.3. 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.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

9.1. Рекомендуемая литература

9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Гречишкин, Иванова А. И., Зигерт, Малышкина, Сошин, Магнитные свойства и доменная структура сплавов Гейслера, Тверь: Тверской государственный университет, 2021, ISBN: , URL: http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=5467135
Л1.2	Карпенков, Карпенков, Дунаева, Ховайло, Каплунов, Зонные ферро- и ферримагнетики, Тверь: Тверской государственный университет, 2021, ISBN: , URL: http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=5277274

Л1.3	Матухин В. Л., Ермаков В. Л., Физика твердого тела, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-0923-5, URL: https://e.lanbook.com/book/210305
Л1.4	Чжан А. В., Процессы перемагничивания и доменная структура ферромагнетиков, Красноярск: КрасГАУ, 2017, ISBN: 978-5-94617-418-3, URL: https://e.lanbook.com/book/130146

9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Кудреватых, Волегов, Физика металлов. Редкоземельные металлы и их соединения, Москва: Юрайт, 2022, ISBN: 978-5-9916-9977-8, URL: https://urait.ru/bcode/492228
Л2.2	Пейсахович Ю. Г., Филимонова Н. И., Физика конденсированного состояния. Фазовые переходы. Магнетики. Свойства диэлектриков, Новосибирск: НГТУ, 2018, ISBN: 978-5-7782-3612-7, URL: https://e.lanbook.com/book/118468

9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
2	Adobe Acrobat Reader
3	Google Chrome
4	WinDjView
5	OpenOffice
6	Mozilla Firefox
7	Origin 8.1 Sr2
8	MATLAB R2012b

9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	ЭБС «ZNANIUM.COM»
2	ЭБС «ЮРАИТ»
3	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
4	ЭБС IPRbooks
5	ЭБС «Лань»
6	ЭБС BOOK.ru
7	ЭБС ТвГУ
8	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (подписка на журналы)
9	Репозиторий ТвГУ

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-40	комплект учебной мебели, вольтмет, экран настенный, контроллер, сканеры для вольтметра, двухфазные Lock-in усилители, компьютеры, установка "Мишень"
3-38	комплект учебной мебели, печь трубчатая, мониторы, проектор, фотомикроскоп, вакуумные посты, весы лабораторные, коммутатор,

3-24	комплект учебной мебели, микроскопы, компьютеры, СТМ головка с предусилителем, колпак акустический виброзащиты, комплект блоков для
3-26	комплект учебной мебели, комплект оборудования "Система для зонной очистки полупроводников", пресс гидравлический, электропечи, установка "Донец-1",

11. 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 $K_1 > 0$ ($n \parallel \langle 100 \rangle$);
- 180° -ных ДГ в кубических кристаллах с $K_1 > 0$ ($n \parallel \langle 100 \rangle$)?

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 $K_1 > 0$ ($n \parallel \langle 100 \rangle$);
- 180° -ных ДГ в кубических кристаллах с $K_1 < 0$ ($n \parallel \langle 111 \rangle$)?

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.

Приложение

Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации

Типовые задания для оценки уровня формирования компетенций.

Задание 1: Рассчитать величины поверхностной плотности энергии и эффективную ширину доменных границ для монокристаллов:

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

Задание 2: 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.

Задание 3: По заданным температурным зависимостям констант МКА образца определить изменения его типа МКА и точки спин-переориентационных переходов.