

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 12.07.2024 11:19:35  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

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

Утверждаю:



Руководитель ООП

Б.Б.Педько

«21»

мая

2024 г.

Рабочая программа дисциплины

## Микромагнетизм

Закреплена за  
кафедрой:

**Физики конденсированного состояния**

Направление  
подготовки:

**03.03.03 Радиофизика**

Направленность  
(профиль):

**Материалы и устройства радиоэлектроники  
(беспилотные системы, программно-аппаратные)**

Квалификация:

**Бакалавр**

Форма обучения:

**очная**

Семестр:

**8**

Программу составил(и):

*д-р физ.-мат. наук, проф., Пастушенков Юрий Григорьевич*

Тверь, 2024

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### Цели освоения дисциплины (модуля):

Целью изучения дисциплины «Микромагнетизм» является освоение одного из наиболее эффективных современных методов анализа структурно-чувствительных характеристик магнитных материалов, позволяющего выполнять анализ природы высококоэрцитивного состояния магнитных материалов и целенаправленно формировать заданные свойства новых функциональных материалов для широкого круга применений.

### Задачи:

Задачей освоения дисциплины является овладение знаниями, умениями и навыками в рамках микромагнитного подхода к решению актуальных практических задач физики конденсированного состояния вещества.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

### Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Интегральные уравнения

Дифференциальные уравнения

Математический анализ

Теория вероятностей и математическая статистика

Обработка и анализ данных физического эксперимента

Численные методы и математическое моделирование

Электричество и магнетизм

Оптика

Электродинамика

Методы математической физики

Физический практикум по электричеству и магнетизму

Физика конденсированного состояния вещества

Физика магнитных явлений

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

Преддипломная практика

Резонансные методы исследования вещества

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>Общая трудоемкость</b>	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
<b>в том числе:</b>	
аудиторные занятия	52
самостоятельная работа	65
часов на контроль	27

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

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

ПК-4.4: Решает аналитические задачи в области физического материаловедения

УК-1.5: Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки

**5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ**

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	8

**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. Микромагнитный подход					
1.1	История возникновения микромагнитного подхода в теории магнетизма. Терминология, предмет исследования, основные направления, микромагнитные задачи.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1 Л2.2	
1.2	Постановка задачи микромагнетизма. Уравнения Брауна.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3Л2.1 Л2.2	
1.3	Примеры использования микромагнитного подхода.	Лаб	8	4	Л1.2 Л1.3	
1.4	Линеаризованные уравнения Брауна. Применение линеаризованных уравнений. Анализ процесса перемагничивания цилиндрических ферромагнитных частиц.	Лек	8	4	Л1.2 Л1.3	
1.5	Основы микромагнитного подхода в описании магнетиков	Ср	8	24		
	Раздел 2. 2. Магнитная доменная структура					
2.1	Задача о доменной границе. Типы доменных границ. Основные микромагнитные параметры магнетиков.	Лек	8	4		
2.2	Магнитная структура мелких ферромагнитных частиц. Однодоменное состояние. Понятие абсолютной однодоменности.	Лек	8	4		

2.3	Определение параметров доменной структуры магнетиков разного типа, описание геометрии доменных структур, экспериментальное определение параметров ДС, оценка микромагнитных параметров.	Лаб	8	10		
2.4	Анализ микромагнитных параметров доменной структуры массивных магнетиков и тонких магнитных пленок.	Ср	8	24		
	Раздел 3. 3. Микромагнитное описание магнитного гистерезиса					
3.1	Микромагнитное описание петель гистерезиса. Петли гистерезиса материалов с задержкой образования и роста доменов обратного знака и с задержкой смещения доменных границ, сравнение результатов расчетов с экспериментом.	Лек	8	4		
3.2	Микромагнитное описание гистерезисных свойств новых функциональных материалов, в том числе наноструктурных и композиционных.	Лек	8	2		
3.3	Микромагнитное описание петель гистерезиса реальных магнетиков.	Лаб	8	12		
3.4	Анализ механизмов перемагничивания магнетиков в рамках микромагнитного описания.	Ср	8	17		
	Раздел 4. 4. Контроль					
4.1	Микромагнетизм	Экзамен	8	27		

### 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

Всего за семестр можно набрать 60 баллов.

За первый модуль предусмотрено 30 баллов.

За второй модуль также предусмотрено 30 баллов.

Модульные контрольные мероприятия включают теоретический опрос по изученным темам и письменное практическое задание.

На экзамен выносятся 40 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: <a href="http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&amp;ids=5467135">http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&amp;ids=5467135</a>
Л1.2	Замкова, Жандун, Драганюк, Овчинников, Физика твердого тела. Электронные свойства твердых тел, Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022, ISBN: 978-5-7638-4653-9, URL: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=432992">https://znanium.com/catalog/document?id=432992</a>
Л1.3	Чжан А. В., Процессы перемагничивания и доменная структура ферромагнетиков, Красноярск: КрасГАУ, 2017, ISBN: 978-5-94617-418-3, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/130146">https://e.lanbook.com/book/130146</a>

#### 9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Белов К. П., Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах, Москва, Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951, ISBN: , URL: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=116168">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=116168</a>
Л2.2	Акулов Н. С., Ферромагнетизм, Москва, Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1939, ISBN: , URL: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=132729">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=132729</a>

#### 9.3.1 Перечень программного обеспечения

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

### 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

### 10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-40	комплект учебной мебели, вольтметр, 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

### 11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Форма проведения промежуточной аттестации: студенты, освоившие программу курса могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ».

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ»

Вопросы для самоподготовки.

1. История возникновения микромагнитного подхода в теории магнетизма. Терминология, предмет исследования, основные направления, микромагнитные задачи.
2. Постановка задачи микромагнетизма. Уравнения Брауна.
3. Линеаризованные уравнения Брауна. Применение линеаризованных уравнений.
4. Анализ процесса перемагничивания цилиндрических ферромагнитных частиц.
5. Магнитная доменная структура. Задача о доменной границе. Типы доменных границ. Основные микромагнитные параметры магнетиков.
6. Магнитная структура мелких ферромагнитных частиц. Однодоменное состояние. Понятие абсолютной однодоменности.
7. Микромагнитное описание петель гистерезиса. Петли гистерезиса материалов с задержкой образования и роста доменов обратного знака и с задержкой смещения доменных границ, сравнение результатов расчетов с экспериментом.
8. Микромагнитное описание гистерезисных свойств новых функциональных материалов, в том числе наноструктурных и композиционных.

## Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

### Типовые контрольные задания

1. Оценить энергию обменного взаимодействия в железе, кобальте и никеле.
2. Рассчитать в магнетонах Бора магнитный момент, приходящийся на один атом в Fe.
3. Перечислить возможные моды перемагничивания цилиндрических однодоменных частиц.
4. Рассчитать основные критические размеры, определяющие характер процессов перемагничивания в цилиндрических однодоменных частицах.
5. Записать формулу для магнитного момента кругового тока.
6. Записать формулу для намагниченности вещества.
7. Записать формулу для оценки энергии электростатического взаимодействия точечных зарядов.
8. Записать формулу для энергии взаимодействия магнитных моментов.
9. Оценить, к какому классу материалов по характеру анизотропии относятся Fe, Co и Ni.
10. Определить фактор качества для Fe, Co и Ni.
11. Определить поле анизотропии основных магнитотвердых материалов  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ .
12. Рассчитать в магнетонах Бора магнитный момент, который приходится на одну формульную единицу в интерметаллиде  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ .
13. Записать классическое уравнение Брауна и пояснить физический смысл входящих в него членов.
14. Записать уравнение Брауна для случая когерентного вращения.
15. Записать уравнение Брауна, адаптированное для описания гистерезисных свойств реального магнита с задержкой зародышеобразования.
16. Каким образом в выражении для поля зародышеобразования учитывают особенности микроструктуры материалов?
17. Что надо сделать, чтобы определить энергетическое произведение постоянного магнита?
18. Как узнать теоретический предел коэрцитивной силы магнитотвердого материала?

### Вопросы и задания для подготовки к рейтинг-контролю.

1. Покажите, что единицей измерения величины, определяемой выражением  $\frac{2K_1}{\mu_0 I_s}$ , в системе СИ является Тесла. Как называется эта величина?
2. Покажите, что единицей измерения величины, определяемой выражением  $\frac{2K_1}{I_s}$ , в системе СГС является Эрстед. Как называется эта величина?
3. Покажите, что единицей измерения величины, определяемой выражением  $\mu_0 I_s$ , в системе СИ является Тесла.
4. Покажите, что фактор качества  $q = \frac{K}{2\pi I_s^2}$  (СГС) является безразмерной величиной.
5. Покажите, что фактор качества  $q = \frac{K}{2\pi\mu_0 I_s^2}$  (СИ) является безразмерной величиной.
6. Покажите, что энергетическое произведение  $(BH)_{\max}$  измеряется в Дж/м<sup>3</sup>.
7. Найдите коэффициент перехода от системы СИ к системе СГС для энергетического произведения постоянного магнита  $(BH)_{\max}$ .
8. Рассчитайте фактор качества для кобальта.
9. Запишите значения намагниченности железа, кобальта и никеля.
10. Запишите значения температур Кюри железа, кобальта и никеля.
11. Запишите значения первой константы анизотропии железа, кобальта и никеля.
12. Запишите выражение для поверхностной плотности энергии 180-градусной доменной границы Блоха и рассчитайте ее энергию в железе.
13. Запишите выражение для поверхностной плотности энергии 180-градусной доменной границы Блоха и рассчитайте ее энергию в кобальте.
14. Запишите выражение для поверхностной плотности энергии 180-градусной доменной границы Блоха и рассчитайте ее энергию в никеле.
15. Запишите выражение для толщины 180-градусной доменной границы Блоха и рассчитайте ее энергию в железе.
16. Запишите выражение для толщины 180-градусной доменной границы Блоха и рассчитайте ее энергию в кобальте.
17. Запишите выражение для толщины 180-градусной доменной границы Блоха и рассчитайте ее энергию в никеле.
18. Запишите выражение для определения критического радиуса однодоменного состояния ферромагнитной частицы и рассчитайте его для железа.
19. Запишите выражение для определения критического радиуса однодоменного состояния ферромагнитной частицы и рассчитайте его для кобальта.



19. Записать выражение для теоретического предела энергетического произведения постоянного магнита?
20. Какова должна быть коэрцитивная сила магнита, чтобы можно было реализовать его максимальное энергетическое произведение?
21. В чем состоит континуальный подход в микромагнетизме?
22. Основная характеристика магнетика в микромагнетизме.
23. Почему микромагнетизм называют мезоскопической теорией?
24. Сформулируйте достоинства и недостатки модели Френкеля-Гейзенберга для описания свойств магнетиков.

### **Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

#### 1) Вопросы для самоподготовки.

1. История возникновения микромагнитного подхода в теории магнетизма. Терминология, предмет исследования, основные направления, микромагнитные задачи.
2. Постановка задачи микромагнетизма. Уравнения Брауна.
3. Линеаризованные уравнения Брауна. Применение линеаризованных уравнений.
4. Анализ процесса перемагничивания цилиндрических ферромагнитных частиц.
5. Магнитная доменная структура. Задача о доменной границе. Типы доменных границ. Основные микромагнитные параметры магнетиков.
6. Магнитная структура мелких ферромагнитных частиц. Однодоменное состояние. Понятие абсолютной однодоменности.
7. Микромагнитное описание петель гистерезиса. Петли гистерезиса материалов с задержкой образования и роста доменов обратного знака и с задержкой смещения доменных границ, сравнение результатов расчетов с экспериментом.
8. Микромагнитное описание гистерезисных свойств новых функциональных материалов, в том числе наноструктурных и композиционных.

#### 2) Требования к рейтинг-контролю.

За первый модуль предусмотрено 30 баллов.

За второй модуль также предусмотрено 30 баллов.

20. Запишите выражение для определения критического радиуса однодоменного состояния ферромагнитной частицы и рассчитайте его для никеля.
21. Запишите формулу Брауна для поля зародышеобразования в эллипсоидальной ферромагнитной частице.
22. Запишите выражение, определяющее теоретический предел энергетического произведения постоянного магнита и определите его для случая магнитов типа Nd-Fe-B. Индукция насыщения магнитов этого типа равна 1,3 Тл.
23. Запишите выражение, определяющее теоретический предел энергетического произведения постоянного магнита и определите его для случая магнитов типа Nd-Fe-B. Индукция насыщения магнитов этого типа равна 1,0 Тл.
24. Как связаны между собой значение энергетического произведения постоянного магнита и объемная плотность энергии создаваемого им магнитного поля?