

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 01.04.2025 10:00:27  
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 факультативной дисциплины (с аннотацией)

**Физика магнитных явлений**

Направление подготовки

03.03.03 Радиопизика

профиль

Физика и технологии материалов и устройств радиоэлектроники

Для студентов

3 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Карпенков А.Ю.

Тверь, 2024

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся базовых представлений о фундаментальных основах магнетизма, природы магнетизма различных материалов, физических характеристик и законов, описывающих магнитные состояния и свойства магнетиков.

Задачами освоения дисциплины являются:

- изучение классических теорий ферро-, антиферро-, ферромагнетизма и парамагнетизма Ланжевена; изучение основных типов взаимодействий в магнетиках (обменного, магнитокристаллического, магнитостатического, магнитоупругого, с внешним магнитным полем) и влияния каждого из них на основные магнитные свойства магнетиков; магнетокалорического эффекта, ферромагнитной аномалии теплоемкости; изучение физических принципов, лежащих в основе термодинамически равновесного распределения векторов спонтанной намагниченности в магнетиках, особенностей формирования равновесной доменной структуры и основных типах доменных границ.

- освоение методов анализа и решения базовых и оригинальных задач физики магнитных явлений.

### **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Факультативная дисциплина изучается в пятом семестре. Для ее освоения необходимы знания из курса общей физики («Механика», Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Кристаллография»).

**3. Объем дисциплины:** 3 зачетных единиц, 108 академических часов, в том числе:

**контактная аудиторная работа:** лекции 34 часов, в т.ч. практическая подготовка 17 часов, **самостоятельная работа:** 57 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
ПК-4. Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы	ПК-4.1. Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований ПК-4.2. Применяет методы анализа научно-технической информации ПК-4.4. Решает аналитические задачи в области физического материаловедения

**5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения**

зачет

**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.)				Контроль самостоятельной работы (в том числе курсовая работа)	Самостоятельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции		Семинарские/ Практические занятия/ Лабораторные работы ( <i>оставить нужное</i> )			
		всего	в т.ч. практич еская подгото вка	всего	в т.ч. практичес кая подготовк а		
Краткий исторический очерк развития учения о магнетизме. Роль русских ученых в развитии магнетизма.	4	2					2
Основные понятия и системы единиц в физике магнитных явлений. Системы единиц в физике магнитных явлений	10	2		2			6
Виды магнетиков. Понятие магнитной восприимчивости и проницаемости.	7	2		1			4
Петля гистерезиса. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы. Расчет 13 параметров магнитного материала из петли гистерезиса в системе СГС и в Международной системе единиц СИ.	13	4		2			7
Источники магнитного поля. Расчет магнитного поля соленоида.	8	2		2			4

Элементарные носители магнетизма. Определение спинового, орбитального и полного магнитного моментов 3d-металлов и 4f-металлов.	8	2		2			4
Магнетизм атомных ядер	6	2					4
Диамагнетизм. Парамагнетизм	6	2					4
Термодинамика магнитных явлений	8	2		2			4
Ферромагнетизм. Теория молекулярного поля Вейсса.	6	2					4
Полуклассическое описание обменного взаимодействия. Обменная энергия. Обменный параметр.	8	2		2			4
Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля.	6	2					4
Теория ферримагнетизма Нееля. Магнитные подрешетки. Основные типы температурных зависимостей намагниченности ферримагнетиков. Точка компенсации	6	2					4
Явление магнитокристаллической анизотропии. Физическая природа магнитокристаллической анизотропии. Природа магнитоупругого взаимодействия. Магнитоупругая энергия. Магнитострикция.	6	2					4

Магнитоэлектроника. Собственное размагничивающее поле магнетиков.	6	2		2			4
Доменная структура магнетиков.	8	2		2			4
ИТОГО	108	34		17			57

### III. Образовательные технологии

Учебная программа – наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
Краткий исторический очерк развития учения о магнетизме. Роль русских ученых в развитии магнетизма.	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дистанционные образовательные технологии</i>
Основные понятия и системы единиц в физике магнитных явлений. Системы единиц в физике магнитных явлений	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Виды магнетиков. Понятие магнитной восприимчивости и проницаемости.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Петля гистерезиса. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы. Расчет 13 параметров магнитного материала из петли гистерезиса в системе СГС и в Международной системе единиц СИ.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Источники магнитного поля. Расчет магнитного поля соленоида.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Элементарные носители магнетизма. Определение спинового, орбитального и полного магнитного моментов 3d-металлов и 4f-металлов.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Магнетизм атомных ядер	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация)</i>

Диамagnetизм. Парамагнетизм	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация)</i>
Термодинамика магнитных явлений	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Ферромагнетизм. Теория молекулярного поля Вейсса.	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дистанционные образовательные технологии</i>
Полуклассическое описание обменного взаимодействия. Обменная энергия. Обменный параметр.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля.	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация)</i>
Теория ферримагнетизма Нееля. Магнитные подрешетки. Основные типы температурных зависимостей намагниченности ферримагнетиков. Точка компенсации	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация)</i>
Явление магнитокристаллической анизотропии. Физическая природа магнитокристал- лической анизотропии. Природа магнитоупругого взаимодействия. Магнитоупругая энергия. Магнитострикция.	Лекция	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация)</i>
Магнитостатическая энергия. Собственное размагничивающее поле магнетиков.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>
Доменная структура магнетиков.	Лекция, практическое	<i>Лекция (традиционная, проблемная, лекция-визуализация) Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии</i>

#### **IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации**

##### **V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

###### 1) Рекомендуемая литература

###### а) Основная литература:

1. Гуфан, Гуфан, Физика магнитных явлений, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2020, ISBN: 978-5-9275-3552-1, URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=415229>
2. Боровик Е. С., Еременко В. В., Мильнер А. С., Лекции по магнетизму, Москва: Физматлит, 2005, ISBN: 978-5-9221-0577-9, URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=75475>.

###### б) Дополнительная литература

1. Карпенков, Карпенков, Дунаева, Ховайло, Каплунов, Зонные ферро- и ферримагнетики, Тверь: Тверской государственный университет, 2021, URL: <http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=5277274>
2. Карпенков, Карпенков, Ракунов, Ховайло, Каплунов, Теория зонного магнетизма. Зонные парамагнетики, Тверь: Тверской государственный университет, 2021, URL: <http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=5277273> .

###### 2) Программное обеспечение

	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
1	Google Chrome
1	Adobe Acrobat Reader

##### **Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

1. ЭБС «Лань»
2. ЭБС «ZNANIUM.COM»
3. ЭБС «ЮРАИТ»

4. ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
5. ЭБС IPRbooks
6. ЭБС ТвГУ

## VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины

### Тесты и задачи для практических занятий и самостоятельного решения

1. Что называется удельной намагниченностью ферромагнетика и в каких единицах она измеряется в СИ?

1. Магнитный момент единицы объема,  $A \cdot m^{-1}$ .
2. Магнитный момент единицы массы,  $Tл \cdot m^3 \cdot кг^{-1}$ .
3. Магнитный момент единицы массы,  $A \cdot m^2 \cdot кг^{-1}$ .

2. Закон Кюри-Вейсса для магнитной восприимчивости ферромагнетиков имеет вид

$$1. \chi = \frac{C}{T}, \quad 2. \chi = \frac{C}{T - T_c}, \quad 3. \chi = \frac{C}{T - \vartheta_a}.$$

3. Аналог закона Кюри-Вейсса для магнитной восприимчивости антиферромагнетиков имеет вид

$$1. \chi = \frac{C}{T - \vartheta_a}, \quad 2. \chi = \frac{C}{T - T_c}, \quad 3. \chi = \frac{C}{T}.$$

4. Физическая природа существования самопроизвольной намагниченности состоит в следующем:

1. Обменном взаимодействии спиновых магнитных моментов электронов соседних атомов вещества.
2. Взаимодействии магнитных моментов атомов (ионов) с внутрикристаллическим полем.
3. Взаимодействии между орбитальными и спиновыми магнитными моментами электронов в атоме.

5. Классическая теория ферромагнетизма Вейсса справедлива

1. в интервале температур  $0 < T < T_c$ ;
2. в узком интервале температур вблизи точки Кюри;
3. в области высоких температур  $T > T_c$ .

6. Не зависят от структурных особенностей магнетиков следующие из приведенных магнитных характеристик

1.  $I_s (B_s)$ , 2.  $H_c$ , 3.  $\mu$ , 4.  $(BH)_{\max}$ , 5.  $T_c$ , 6.  $I_r (B_r)$ .

7. Характерная температура, при которой магнитные моменты подрешеток двухподрешеточного ферромагнетика равны по величине называется

1. Температура Кюри.
2. Температура Нееля.
3. Температура компенсации.

8. В одноосных ферромагнетиках наблюдаются следующие типы доменных границ

1.  $180^\circ$ -ные.
2.  $90^\circ$ -ные.
3.  $45^\circ$ -ные.

9. Поверхностная плотность энергии  $180^\circ$ -ной доменной границы в одноосном ферромагнитном кристалле равна

$$1. \gamma = 2\sqrt{\frac{A}{K_1}}. \quad 2. \gamma = 4\sqrt{A \cdot K_1}. \quad 3. \gamma = 8\sqrt{\frac{K_1}{A}}.$$

10. Используя какую из перечисленных экспериментальных зависимостей можно приближенно оценить величину обменного параметра  $A$  ферромагнетика

1.  $\mu(H)$ .
2.  $I(H)$ .
3.  $I_s(T)$ .

### Примеры задач.

1. Рассчитать квантовые числа  $S$ ,  $L$ ,  $J$  для неполностью заполненных электронных оболочек следующих атомов:

3d – переходных металлов Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni; 4d - металлов Zr, Hf, W, Ir

4f – металлов Sm, Pr, Dy, Er, Yb.

Записать обозначения термов основного состояния этих атомов.

2. Определить спиновый, орбитальный и полный магнитные моменты следующих атомов:

Mg, Mn, V, Fe, Co, Ni, Pr, Ce, Nd, Sm, Dy, Y, Tb, Tm, Er.

Построить график зависимости величины полного магнитного момента от порядкового номера редкоземельного металла.

3. Оценить обменную энергию, ее объемную плотность и обменный параметр по температуре Кюри для следующих металлов:

Fe, Co, Ni, Gd, Dy. Составить таблицу с указанием значений рассчитанных величин и температур Кюри.

4. Определите поверхностную плотность магнитостатической энергии бесконечной пластины толщиной  $a$ , намагниченной до величины остаточной намагниченности  $I$  параллельно и перпендикулярно ее плоскости.

5. Оцените величину внешнего магнитного поля, необходимую для магнитного насыщения сферического образца железа.

6. На графике приведены температурные зависимости констант анизотропии  $K_1$  и  $K_2$  монокристалла гадолиния. Определить как меняется тип магнитокристаллической анизотропии Gd в интервале температур  $0 < T < 300$  К ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ). Схематично нарисовать зависимость угла  $\Theta$  между осью C гексагональной элементарной ячейки и направлением легкой оси намагничивания от температуры.

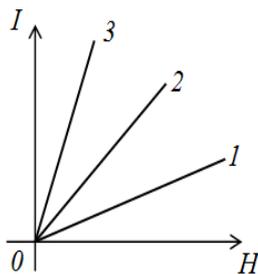
7. Оценить величину первой константы анизотропии одноосного монокристалла  $\text{SmCo}_5$ , если его поле анизотропии  $H_A = 430$  кЭ, удельная намагниченность насыщения  $\sigma_s = 100$  Гс·см<sup>3</sup>/г, а плотность  $\rho = 8,7$  г/см<sup>3</sup>.

8. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома церия имеет вид  $^3H_4$ . Определить основные квантовые числа его незаполненной 4f оболочки.

9. Как основные магнитные характеристики ( $I$ ,  $H$ ,  $CI$ ,  $CH$ ) определяются через основные термодинамические потенциалы  $F$ ,  $\Phi$ ,  $U$ ?

10. Записать формулы для магнетокалорического эффекта ферромагнетика через изменение намагниченности, и магнетокалорического эффекта парамагнетика через изменение напряженности магнитного поля. Где находят практическое применение эти формулы?

11. Какая из представленных ниже кривых намагничивания парамагнетика измерена при наименьшей температуре?



12. Во внешнем поле  $H = 100$  А/м сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности  $I = 270$  А/м. Чему равна магнитная восприимчивость материала в данном поле?

13. В чем состоит физическая причина возникновения собственного размагничивающего поля образца? Как направлено это поле по отношению к намагниченности? Чему равно

истинное (внутреннее) магнитное поле намагниченного образца? Почему на практике необходимо учитывать различие в значениях внешнего и внутреннего полей?

14. Определить эффективную ширину  $180^\circ$ -ной доменной границы в кобальте, если известны значения обменного параметра  $A = 0,75 \cdot 10^{-6}$  эрг/см и константы анизотропии  $K_1 = 4,3 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup>.

15. Во внешнем поле  $H$  сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности  $I_0$ . Образец сложной формы из данного материала в том же поле имеет намагниченность  $I_N$ . Рассчитайте размагничивающий фактор образца сложной формы.

16. Оценить обменную энергию, ее объемную плотность и обменный параметр по температуре Кюри для следующих металлов: Fe, Co, Ni, Gd, Dy. Составить таблицу с указанием значений рассчитанных величин и температур Кюри.

17. Найти величину магнитного момента шара радиуса  $R$  из материала с магнитной восприимчивостью  $\chi$  в магнитном поле  $H$ . Ответ представить в системах СИ и СГС. Рассмотреть также предельный случай при  $\chi \rightarrow \infty$ .

18. Ферромагнитный образец во внешнем поле  $H = 20$  А/м достигает намагниченности  $I = 15$  А/м. Какую форму имеет образец, если в данном поле восприимчивость материала  $\kappa = 1$ ?

#### **Примеры вопросов для самостоятельного изучения.**

1. Каковы особенности обменного взаимодействия в ферромагнетиках?
2. Как в модели ферромагнетизма определяется внутримолекулярное поле каждой из магнитных подрешеток?
3. Как зависит от температуры магнитная восприимчивость ферромагнетиков?
4. Объяснить смысл всех параметров, входящих в закон Кюри-Вейсса для ферромагнетиков? Для какой области температур он справедлив?
5. Учет собственных размагничивающих полей образцов конечной формы при магнитных измерениях. «Сдвиговая коррекция» кривых намагничивания и петель гистерезиса.
6. Экспериментальные методы исследования доменной структуры ферро- и ферримагнетиков.
7. Как оценить постоянную молекулярного поля экспериментальным путем? Какой порядок величины имеет внутримолекулярное поле? Сопоставить эти значения с реально достижимыми магнитными полями?

## **VII. Материально-техническое обеспечение**

<b>Аудит-я</b>	<b>Оборудование</b>
3-40	комплект учебной мебели, вольтмет, экран настенный, контроллер, сканеры для вольтметра, двухфазные Lock-in усилители, компьютеры, установка "Мишень"

## **VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

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