

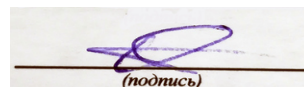
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины
«Физика магнитных явлений»**

Направление подготовки
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Форма обучения
очная

Программа рассмотрена
на заседании кафедры микроэлектроники и
общей физики физического факультета
от «17» апреля 2023 года, протокол № 5

Программа одобрена НМК
протокол № 5 от «25» апреля 2023 года

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физика магнитных явлений» являются

- ознакомление с основными магнитными явлениями, природой магнетизма в диа-, пара- и ферромагнетиках, статическими и динамическими явлениями намагничивания ферромагнетиков;
- приобретение знаний магнитных, электромагнитных и квантовых закономерностей поведения магнитоупорядоченных веществ в постоянных, переменных и импульсных магнитных полях;
- приобретение навыков использования полученных знаний для решения прикладных задач микро- и нанoeлектроники.

2. Место дисциплины в структуре ОП бакалавриата

Вариативная часть; дисциплины по выбору: Б1.В.ДВ.6.2

Дисциплина «Физика магнитных явлений» основывается на знаниях, полученных при изучении дисциплин «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Физика атома и атомных явлений». Знания и навыки, полученные при изучении дисциплины «Физика магнитных явлений» используются в лабораториях спецпрактикума «Магнитные измерения», а также могут быть использованы при изучении дисциплин «Физика полупроводников и низкоразмерных систем», «Физика конденсированного состояния», «Физическое материаловедение в электронике и нанoeлектронике», «Микroeлектроника».

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП бакалавриата

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
Общепрофессиональные компетенции		
ПК-2 Способен аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.	ИД_ПК-2.1 Знает методы и методики проведения исследований параметров и характеристик электронных приборов и схем. ИД_ПК-2.2 Демонстрирует навыки экспериментального определения характеристик устройств электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.	Знать: – физическую природу диа-, пара- и ферромагнетизма; - виды взаимодействий в ферромагнетиках; - механизмы намагничивания; - физические явления при намагничивании ферромагнетиков. Уметь: - описывать и объяснять магнитные явления; - проектировать структурные магнитные элементы с заданными параметрами. Владеть навыками: - расчёта доменных структур, кривых намагничивания и перемагничивания; - оценки энергии спиновой конфигурации тонких магнитных плёнок с различной ориентации оси лёгкого намагничивания относительно её плоскости; - конструирования магнитных систем, иметь представление о величинах магнитных полей, создаваемых различными устройствами.

4. Объем, структура и содержание дисциплины Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 академических часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости. Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные занятия	Самостоятельная работа	
1	Создание магнитных полей. Классификация магнетиков	5	1	2				5	

2	Диамagnetизм	5	1	2				3	
3	Парамагнетизм	5	1	3				3	
4	Магнитоупорядоченное состояние. Ферромагнетизм	5	2	4		1		4	Контрольная 1/3 часа на 1 студента
5	Энергия кристаллографической магнитной анизотропии	5	1	2				3	
6	Магнитоупругая энергия	5	1	1				4	
7	Магнитостатическая энергия	5	1	2				3	
8	Доменная граница	5	1	3		1		3	Контрольная 1/3 часа на 1 студента
9	Микромагнитная одномерная модель доменной границы	5	1	2				4	
10	Трехмерная модель доменной границы	5	1	1				3	
11	Доменная структура	5	1	2				3	Контрольная 1/3 часа на 1 студента
12	Теория технического намагничивания	5	1	4				3.7	
13	Динамика доменных границ	5	1	3				3	
14	Резонансные и высокочастотные явления в ферромагнетиках	5	1	2		1		5	
15	Магнитные материалы	5	2	1				4	
	Всего		17	34		3	0.3	53.7	зачёт

Содержание разделов дисциплины:

1. Создание магнитных полей. Классификация магнетиков.

Создание магнитных полей, их величины. Основные магнитные величины (в СИ и СГС, соотношения между ними). Феноменологическая и физическая классификация магнетиков. Магнитные свойства атомов. Магнетон Бора.

2. Диамagnetизм.

Ларморовская прецессия. Диамagnetизм. Классическая теория. Диамagnetная восприимчивость.

3. Парамагнетизм.

Парамагнетизм. Классическая теория. Функция Ланжевена. Парамагнетик в слабом магнитном поле. Закон Кюри. Молекулярное поле. Закон Кюри-Вейса. Парамагнетизм электронного газа. Функция плотности состояния свободного электронного газа. Электронный газ в магнитном поле. Парамагнетизм Паули.

4. Магнитоупорядоченное состояние. Ферромагнетизм.

Магнитоупорядоченное состояние. Ферромагнетизм. Теория молекулярного поля. Температура Кюри. Ферромагнетик в магнитном поле. Молекулярное поле Вейса. Понятие обменного взаимодействия. Необходимое условие ферромагнетизма, антиферромагнетизма.

5. Энергия кристаллографической магнитной анизотропии.

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии. Одноосный ферромагнетик. Ось лёгкого намагничивания. Ферромагнетик с кубической анизотропией.

6. Магнитоупругая энергия.

Магнитоупругая энергия. Магнитострикция. Магнитоупругая энергия изотропного магнетика.

7. Магнитостатическая энергия.

Магнитостатическая энергия. Размагничивающий фактор. Магнитные поверхностные заряды.

8. Доменная граница.

Доменная граница. Структура Ландау-Лифшица (Блоха), Нееля. Обменная энергия, энергия анизотропии, ширина и энергия 180-градусной доменной границы.

9. Микромагнитная одномерная модель доменной границы.

Микромагнитная одномерная модель доменной границы. Вариационная задача.

10. Трехмерная модель доменной границы.

Трехмерная модель доменной границы. Вертикальные, горизонтальные блоховские линии, блоховские точки, скрученные доменные границы.

11. Доменная структура.

Причины образования доменной структуры. Доменная структура с замыкающими доменами и без замыкающих доменов в одноосном ферромагнетике. Магнетизм микрочастиц. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.

12. Теория технического намагничивания.

Теория технического намагничивания. Однородное вращение намагниченности в одноосном кристалле, намагничиваемом вдоль оси лёгкого намагничивания. Однородное вращение намагниченности в одноосном кристалле, намагничиваемом вдоль оси трудного намагничивания. Однородное вращение намагниченности в кубическом кристалле, намагничиваемом вдоль оси $[110]$. Смещение доменных границ. Обратимое и необратимое смещение, эффект Баркгаузена. Элементы теории включений, теории напряжений. Кривая технического намагничивания.

13. Динамика доменных границ.

Динамика доменных границ. Уравнение движения 180-градусной доменной границы. Скорость доменной границы. Уравнение Ландау-Лифшица. Неоднородная прецессия спинов. Эффективная масса доменной границы. Предельная скорость доменной границы.

14. Резонансные и высокочастотные явления в ферромагнетиках.

Резонансные и высокочастотные явления в ферромагнетиках. Ферромагнитный резонанс, спиновые волны, магноны, резонанс доменных границ, блоховских линий.

15. Магнитные материалы.

Общая классификация магнитных материалов. Магнитомягкие, магнитотвёрдые, материалы специального назначения, магнитные материалы для микроэлектроники. Общие требования, предъявляемые к материалам. Вихревые токи. Скин-эффект. Глубина проникновения. Высокочастотные материалы. Ферриты. Ферромагнитный резонанс. Стабильность свойств ферритов. Аморфные материалы. Постоянные магниты.

5. Образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

Вводная лекция – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения дисциплины “Физика магнитных явлений”. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе

учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках дисциплины “Физика магнитных явлений”, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

Академическая лекция (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

Практическое занятие – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

Электронный учебный курс «Физика магнитных явлений» представлен в LMS Moodle на странице курса <https://moodle.uniyar.ac.ru/>

Курс предназначен для организации и методического сопровождения образовательного процесса в режиме on-line, для организации и информационного обеспечения самостоятельной работы обучающихся в очном режиме, а также для частичного обеспечения текущего и итогового контроля результатов освоения дисциплины.

6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса используются:

- электронный учебный курс «Физика магнитных явлений», представленный в LMS Moodle;
- для формирования текстов материалов для промежуточной и текущей аттестации используются программы Microsoft Office;

7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются: автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT» http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

1. Вонсовский С. В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро-, и ферримagnetиков. / С. В. Вонсовский - М.: Наука, 1971. - 1032 с.
2. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM.: учеб. пособие для вузов. / О. Б. Буль; УМО по образованию в обл. энергетики и электротехники - М.: Академия, 2005. - 335 с.

б) дополнительная литература:

1. Боков В.А. Физика магнетиков: Учебное пособие для вузов / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – СПб.: Невский Диалект; БХВ-Петербург, 2002. – 272 с.
2. Г.С.Кринчик. Физика магнитных явлений. – М., 1976. – 367 с.
3. В.И.Ивановский, Л.А.Черникова. Физика магнитных явлений. – М., 1981. – 288 с.
4. А.А.Преображенский, Е.Г.Бишард. Магнитные материалы и элементы. – М., 1986. – 352 с.
5. М.И.Каганов, В.М.Цукерник. Природа магнетизма. – М., 1982. – 192 с.
6. Д.Д.Мишин. Магнитные материалы. – М., 1991. – 335 с.
7. С.Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. – М., 1987. – 420 с.
8. В.Г.Барьяхтар, Б.А.Иванов. В мире магнитных доменов. – Киев, 1986. – 159 с.
9. Папорков В. А. Температурная зависимость магнитных параметров магнитоупорядоченных веществ: практикум. / В. А. Папорков; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова - Ярославль: ЯрГУ, 2017. - 27 с.

в) ресурсы сети «Интернет»

1. Материалы ЭУК в LMS Moodle <https://moodle.uniyar.ac.ru/>

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

1. Материалы ЭУК в LMS Moodle <https://moodle.uniyar.ac.ru/course/>

10. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Доцент кафедры микроэлектроники
и общей физики, к.ф.-м.н.

(подпись)

В.А.Папорков

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Физика магнитных явлений»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущей аттестации**

(проверка сформированности компетенции ПК-2, индикаторы: ИД_ПК-2.1, ИД_ПК-2.2)

Контрольные вопросы и задачи

1. Почему доменная граница имеет конечную ширину?
2. Объясните зависимость скорости доменной границы от её ширины.
3. Почему ширина доменной границы в кобальте меньше, чем в железе?
4. Оцените максимальную коэрцитивную силу постоянного магнита, изготовленного из мартенситной стали. Константа анизотропии $K \sim 10^6$ Эрг/см³, намагниченность насыщения $J_s = 1700$ Гс.
5. Почему после механической обработки (резка, штамповка и т.д.) пластины и ленты, предназначенные для изготовления трансформаторов, необходимо подвергать температурному воздействию, например, отжигу?
6. Почему начальная магнитная проницаемость технически чистого железа выше, чем проницаемость углеродистой стали?
7. При каких условиях в одноосных тонких магнитных плёнках с осью лёгкого намагничивания, ориентированной перпендикулярно их плоскости, вектор намагниченности отклоняется от оси лёгкого намагничивания на угол, близкий к $\pi/2$?
8. Найдите температуру Кюри ферромагнетика, если известно, что в парамагнитном состоянии его восприимчивость уменьшается в 6 раз при увеличении температуры от 1500 К до 2000 К.
9. Определите первую константу анизотропии K_1 одноосного ферромагнитного монокристалла, если известно, что при намагничивании его в направлении, перпендикулярном оси лёгкого намагничивания, намагниченность равна половине намагниченности насыщения при $H = 300$ Э. Принять: $J_s = 1500$ Гс, $K_2 \ll K_1$.
10. Поликристаллическая никелевая проволока (отрицательная константа магнитострикции насыщения), находящаяся под действием сильных растягивающих механических напряжений, намагничивается вдоль направления растяжения. Как изменится её магнитная восприимчивость при увеличении напряжений вдвое?
11. Поликристаллический железный стержень (положительная константа магнитострикции насыщения), находящийся под действием сильных растягивающих механических напряжений, намагничивается вдоль направления растяжения. Как изменится его магнитная восприимчивость при увеличении напряжений вдвое?
12. Определите магнитную восприимчивость тонкой ферромагнитной пластины, намагничиваемой перпендикулярно её плоскости, при условии, что первые константы анизотропии много меньше квадрата намагниченности насыщения, а магнитострикция отсутствует.

13. Определите магнитную восприимчивость тонкого ферромагнитного стержня, намагничиваемого перпендикулярно оси, при условии, что первые константы анизотропии много меньше квадрата намагниченности насыщения, а магнитострикция отсутствует.
14. В рамках модели смещения доменных границ получите зависимость $J(H)$ для случая, когда поверхностная плотность энергии доменной границы зависит от координаты следующим образом: $W = W_0 + W_1 \sin(Cx^2)$, где $0 < W_1 < W_0$, $C = \text{const}$.
15. Используя уравнение движения доменной границы, найдите зависимость её скорости от времени после отрыва от дефекта.
16. Используя решение предыдущей задачи, оцените время установления скорости доменной границы.
17. Используя решение задачи 15, оцените расстояние, проходимое доменной границей за время установления её скорости.
18. Используя уравнение движения доменной границы, определите расстояние, проходимое границей после выключения магнитного поля, если перед выключением поля она двигалась с постоянной скоростью.
19. Используя уравнение движения доменной границы, оцените время, в течение которого остановится доменная граница, после выключения магнитного поля, если перед выключением поля она двигалась с постоянной скоростью.
20. Сравните радиусы однодоменной и суперпарамагнитной частиц кобальта.

Список вопросов к зачёту

1. Создание магнитных полей, их величины. Основные магнитные величины (в СИ и СГС, соотношения между ними).
2. Классификация магнетиков.
3. Магнитные свойства атомов. Магнетон Бора.
4. Диамагнетизм. Классическая теория.
5. Парамагнетизм. Классическая теория. Функция Ланжевена.
6. Парамагнетик в слабом магнитном поле. Закон Кюри.
7. Парамагнетизм. Молекулярное поле. Закон Кюри-Вейса.
8. Электронный газ. Функция плотности состояния свободного электронного газа.
9. Электронный газ в магнитном поле. Парамагнетизм Паули.
10. Магнитоупорядоченное состояние. Ферромагнетизм. Теория молекулярного поля. Температура Кюри.
11. Ферромагнетик в магнитном поле. Молекулярное поле Вейса.
12. Магнитоупорядоченное состояние. Понятие обменного взаимодействия. Необходимое условие ферромагнетизма, антиферромагнетизма.
13. Энергия кристаллографической магнитной анизотропии.
14. Магнитоупругая энергия. Магнитострикция.
15. Магнитостатическая энергия. Размагничивающий фактор.
16. Доменная граница. Структура Ландау-Лифшица (Блоха), Нееля. Обменная энергия 180-градусной доменной границы.
17. Доменная граница. Энергия анизотропии 180-градусной доменной границы.
18. Ширина доменной границы, энергия.
19. Микромагнитная одномерная модель доменной границы.
20. Трёхмерная модель доменной границы. Вертикальные, горизонтальные блоховские линии, блоховские точки, скрученные доменные границы.
21. Доменная структура. Доменная структура с замыкающими доменами и без замыкающих доменов в одноосном ферромагнетике.
22. Магнетизм микрочастиц. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.

23. Теория технического намагничивания. Однородное вращение намагниченности в одноосном кристалле, намагничиваемом вдоль оси лёгкого намагничивания.
24. Теория технического намагничивания. Однородное вращение намагниченности в одноосном кристалле, намагничиваемом вдоль оси трудного намагничивания.
25. Теория технического намагничивания. Однородное вращение намагниченности в кубическом кристалле, намагничиваемом вдоль оси $[110]$.
26. Смещение доменных границ. Обратимое и необратимое смещение, эффект Баркгаузена.
27. Смещение доменных границ. Кривая намагничивания. Элементы теории включений, теории напряжений. Кривая технического намагничивания.
28. Динамика доменных границ. Уравнение движения 180-градусной доменной границы. Скорость доменной границы.
29. Динамика доменных границ. Уравнение Ландау-Лифшица. Неоднородная прецессия спинов. Скорость доменной границы.
30. Динамика доменных границ. Эффективная масса доменной границы.
31. Динамика доменных границ. Предельная скорость.
32. Магнитные материалы.

На зачётном мероприятии студенту предлагается решить 3 задачи из предлагаемого перечня задач и дать ответы на 3 вопроса из списка вопросов к зачёту.

Правила выставления оценки

По итогам зачёта выставляется одна из оценок: «зачет» или «незачет».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который решил все задачи или хотя бы написал уравнения, для их решения и представляет принцип решения предложенных задач. При ответе на контрольные вопросы проявляет понимание сути излагаемых явлений, подтверждает их математическими выкладками, владеет основными понятиями физики магнитных явлений, понимает физическую природу диа-, пара- и ферромагнетизма, знает виды взаимодействий в ферромагнетиках, механизмы намагничивания, физические явления при намагничивании ферромагнетиков.

Оценка «незачтено» выставляется студенту, который при решении предложенных задач оказался неспособен даже выписать уравнения для их решения. Не понимает физической сущности явлений, о которых идёт речь в предлагаемых контрольных вопросах, не понимает физическую природу диа-, пара- и ферромагнетизма, не имеет представления о видах взаимодействий в магнитоупорядоченных веществах, механизмах намагничивания, физических явлениях при намагничивании ферромагнетиков.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Физика магнитных явлений»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Физика магнитных явлений» являются лекции. Закрепление теоретического материала и приобретение навыков его применения осуществляется на практических занятиях.

Для успешного освоения дисциплины очень важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные и индивидуальные консультации. Цель практических занятий – помочь усвоить фундаментальные понятия и основы изучаемой дисциплины, научиться применять полученные теоретические знания на практике. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо прорабатывать, используя для этого учебники и учебно-методические пособия, контролировать и корректировать полученные знания и навыки, консультируясь с преподавателями, ведущими теоретические и практические занятия.

Большое внимание должно быть уделено выполнению домашней работы. В качестве заданий для самостоятельной работы дома студентам предлагаются задачи, аналогичные разобранным на лекциях и практических занятиях или немного более сложные, которые являются результатом объединения нескольких базовых задач.

Подготовка к зачёту

Зачётная сессия - это серия зачётов, установленных учебным планом. Интервал между ними может быть менее 3 дней. Это время нужно использовать для систематизации уже имеющихся знаний. На консультации перед зачётом преподаватели ответят на возникшие вопросы. Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

Требования к организации подготовки к зачётам те же, что и при занятиях в течение семестра, но соблюдаться они должны более строго:

- очень важно соблюдение режима дня; сон не менее 8 часов в сутки, занятия заканчиваются не позднее, чем за 1-2 часа до сна. Оптимальное время занятий - утренние и дневные часы. В перерывах между занятиями рекомендуются прогулки на свежем воздухе, неумотительные занятия спортом;
- наличие хороших собственных конспектов лекций (с комментариями и заметками, выполненными в течение семестра). Даже в том случае, если была пропущена какая-либо лекция, необходимо ее восстановить;
- при подготовке к зачёту должны быть заранее подобраны хорошие учебники (ну, хотя бы один).