

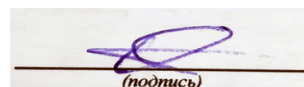
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике в ЯФ ФГБУН
«Физико-технологический институт» РАН

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
«Физика магнитных наноструктур»
(наименование дисциплины)

Направление подготовки (специальности)
11.04.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Направленность (профиль)
«Интегральная электроника и наноэлектроника»

Форма обучения _очная

Программа рассмотрена
на заседании базовой кафедры
нанотехнологий в электронике
протокол №8 от «30» марта 2023 г.

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол № 5 от «25 » апреля 2023 г.

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целью курса «Физика магнитных наноструктур» является ознакомление студентов с основными идеями и техническими решениями современной спинтроники. Задачами курса являются: объяснение основных физических механизмов формирования и магнитного переключения многослойных магнитных наноструктур, а также конструктивных особенностей датчиков магнитного поля и ячеек магнитной памяти на их основе. Целью курса является также изучение основных закономерностей протекания тока в таких системах и подготовка студентов к чтению специальной литературы по спинтронике.

2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Данная дисциплина является дисциплиной по выбору и относится к вариативной части Блока 1.

Для освоения данной дисциплины студенты должны знать основы физики атома и магнитных явлений и аппарат квантовой механики, владеть навыками экспериментальной работы с лабораторным оборудованием.

Дисциплина «Физика магнитных наноструктур» относится к числу специальных курсов и изучает вопросы, лежащие в основе современных функциональных элементов спинтроники. Спинтроника – новая парадигма в области переработки и хранения информации, в рамках которой основной физической величиной используемой для обработки информации является спин электрона, вместо заряда. Этот курс должен стать основой понимания возможностей и способов использования элементов спинтроники при создании информационных систем. В рамках направления подготовки **210100 Электроника и наноэлектроника** приобретенные студентами знания и навыки необходимы как при освоении других дисциплин, так и для решения задач в своей профессиональной деятельности.

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

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		
ОПК-2. Способен применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы	<p>ИД_ОПК-2.1. Знает методы синтеза и исследования моделей.</p> <p>ИД_ОПК-2.2. Осуществляет постановку задачи исследования и оптимизации сложных объектов на основе методов математического моделирования.</p> <p>ИД_ОПК-2.3. Демонстрирует умение методологического анализа научного исследования и его результатов.</p>	<p>Знать: основные законы электромагнитной теории курса общей физики, основы квантовой механики</p> <p>Уметь: Формулировать основные законы физики магнитных явлений</p> <p>Владеть навыками: Решения задач в области физики магнитных явлений</p>
Профессиональные компетенции		
ПК-3. Готов осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени.	<p>ИД_ПК-3.1. Демонстрирует знание принципов планирования и автоматизации проведения эксперимента.</p> <p>ИД_ПК-3.1. Умеет разрабатывать требования к средствам проведения эксперимента, контроля и диагностики.</p> <p>ИД_ПК-3.1. Обладает навыками тестирования и диагностики изделий микро- и наноэлектроники. методологии исследования изделий микро- и наноэлектроники</p>	<p>Знать: Основные идеи, лежащие в основе функционирования современных элементов спинтроники. Общие принципы технологии формирования многослойных магнитных наноструктур и создания функциональных элементов спинтроники на их основе.</p> <p>Уметь: Использовать знания о структуре и функционировании элементов спинтроники для решения практических исследовательских и инженерных задач.</p> <p>Владеть навыками: Экспериментального и теоретического исследования</p>

ПК-4. Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.	<p>ИД_ПК-4.1. Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований.</p> <p>ИД_ПК-4.2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования.</p> <p>ИД_ПК-4.3. Демонстрирует навыки проведения исследований с применением современных средств и методов.</p>	<p>Знать: Современные средства автоматизации измерений на базе программируемых контроллеров.</p> <p>Уметь: Проводить подбор средств автоматизации эксперимента. Разрабатывать схемы экспериментальных стендов.</p> <p>Владеть навыками: Создания экспериментальных стендов на основе программируемых контроллеров.</p>
---	--	---

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц, 108 акад.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 испытания	самостоятельная работа	
1	Введение. Основы магнетизма	2	4					10	Опрос
2	Атомный магнетизм	2	2					12	Опрос
3	Микромагнитная модель	2	2		4	2		10	Опрос
4	Введение в спинтронику	2	4		4	2		10	Опрос
5	Основы магнитооптики	2	2		4			10	Опрос
6	Технология многослойных магниторезистивных структур	2	2		4			10	Опрос
							0.3	9.7	Зачет
Всего			16		16	4	0.3	71.7	

Содержание разделов дисциплины

Тема № 1: Введение. Основы магнетизма.

История развития магнетизма. Основные понятия и величины. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Единицы измерения. Уравнения Максвелла. Интегральная и дифференциальная форма. Основы магнитостатики. Закон Био-Савара-Лапласа. Сила Лоренца. Сила Ампера. Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент. Магнитные свойства вещества. Намагниченность магнетиков. Магнитная восприимчивость. Виды магнетиков. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Магнито-механические явления. Магнитный момент орбитального движения электрона. Спин электрона. Гиромагнитное отношение.

Тема № 2: Атомный магнетизм

Атомный магнетизм. Квантово-механическое описание магнитного момента атома. Правило Хунда. Магнитные атомы в периодической системе элементов. Антиферромагнетизм. Ферримагнетизм.

Тема № 3: Микромагнитная модель

Основы микромагнитной теории. Основные вклады в полную энергию магнитной системы. Уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Доменная структура ферромагнетика. Доменные стенки. Основные виды доменных стенок. Базовый алгоритм численной реализации микромагнитной модели.

Тема № 4: Введение в спинтронику

Введение в спинтронику. Понятие спиновой поляризации. Зонная структура ферромагнетика с учетом ориентации спина. Анизотропное магнетосопротивление. Многослойные магнитные наноструктуры. Гигантское магнетосопротивление. Простые модели для описания этого эффекта. Трехслойные магнитные структуры. Спиновые вентили. Прототип датчика магнитного поля на основе спинового вентиля. Спин-туннельная структура. Прототип ячейки магнитной памяти на основе такой структуры. Топология матрицы памяти MRAM.

Тема № 5 Основы магнитооптики

Введение в магнитооптику. Эффект Фарадея. Эффект Керра. Применение методов магнитооптики для контроля качества многослойных магниторезистивных структур.

Тема № 6: Технология многослойных магниторезистивных структур

Физика и технология формирования многослойных магнитных наноструктур. Методы получения и исследования спин-вентильных и спин-туннельных структур. Перспективные устройства спинтроники. Трековая память. Спин-вентильный транзистор.

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 (или ее разделе) и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки специалиста. 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 курса, 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.

Академическая лекция, как правило, состоит из трех частей: вступления (введения), изложения и заключения:

- вступление (введение) определяет тему, план и цель лекции. Оно призвано заинтересовать и настроить аудиторию, сообщить, в чём заключается предмет лекции и (или) её актуальность, основная идея (проблема, центральный вопрос), связь с предыдущими и последующими занятиями, поставить её основные вопросы. Введение должно быть кратким и целенаправленным.

- изложение является основной частью лекции, в которой реализуется научное содержание темы, ставятся все узловые вопросы, приводится вся система доказательств с использованием наиболее целесообразных методических приемов. Каждое теоретическое положение должно быть обосновано и доказано, приводимые формулировки и определения должны быть четкими, насыщенными глубоким содержанием.

- заключение обобщает в кратких формулировках основные идеи лекции, логически ее завершая. В заключении могут даваться рекомендации о порядке дальнейшего изучения основных вопросов лекции самостоятельно по указанной литературе.

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

Лабораторная работа – организация учебной работы с реальными материальными и информационными объектами, экспериментальная работа с аналоговыми моделями реальных объектов.

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

В процессе подготовки и осуществления образовательного процесса используются:

- для подготовки и проведения лекций программа Power Point из пакета Microsoft Office
- для поиска учебной литературы интернет ресурсы библиотеки ЯрГУ

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

а) основная литература

1. С.С. Аплеснин Основы спинтроники, С. Петербург: Лань, 2010.
2. Н.Г. Чеченин Магнитные наноструктуры и их применение, Москва, МГУ: Грант-Виктория ТК, 2006.

б) дополнительная литература

1. Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер, Лекции по магнетизму, Москва, Физматлит, 2005.
2. В.А. Боков, Физика магнетиков, С.Петербург, Невский Диалект, 2002.
3. С.В. Вонсовский, Магнетизм, Москва, Наука, 1971.
4. С.И. Касаткин, Н.П. Васильева, А.М. Муровьев, Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе, Москва, ИПУ РАН, 2005.

в) ресурсы сети «Интернет»:

1. Электронные каталоги НБ ЯрГУ
(http://www.lib.uni Yar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)
2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
(www.biblioclub.ru)
3. пакеты микромагнитного моделирования
 1. math.nist.gov/oomm
 2. www.magpar.net

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

Аудитории, оборудованные для проведения лекций и практических занятий.
Компьютерные классы и экспериментальные стенды для проведения лабораторных работ.
Мультимедийный проектор, персональный компьютер (ноутбук), класс персональных компьютеров, локальная сеть с выходом в Интернет.

Автор(ы) :

доцент, к.ф.-м.н.
(должность, ученая степень)

(подпись)

Трушин О.С.
(Фамилия И.О.)

Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
« Физика магнитных наноструктур »
(наименование дисциплины)

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

1.2 Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

Список вопросов к зачету

1. Введение в физику магнитных явлений. История развития магнетизма. Основные понятия и величины. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Единицы измерения.
2. Уравнения Максвелла. Интегральная и дифференциальная форма.
3. Основы магнитостатики. Закон Био-Савара-Лапласа. Сила Лоренца. Сила Ампера.
4. Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент.
5. Магнитные свойства вещества. Намагниченность магнетиков. Магнитная восприимчивость.
6. Виды магнетиков. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм.
7. Магнито-механические явления. Магнитный момент орбитального движения электрона.
8. Спин электрона. Гиромагнитное отношение.
9. Атомный магнетизм. Квантово-механическое описание магнитного момента атома. Правило Хунда. Магнитные атомы в периодической системе элементов.
10. Антиферромагнетизм. Ферримагнетизм.
11. Основы микромагнитной теории. Основные вклады в полную энергию магнитной системы. Уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.
12. Доменная структура ферромагнетика. Доменные стенки. Основные виды доменных стенок.
13. Основы магнито-оптики. Эффект Фарадея. Эффект Керра.
14. Магнетосопротивление. Эффект анизотропного магнетосопротивления (AMR). Эффект гигантского магнетосопротивления (GMR). Основные модели этих явлений.
15. Спиновый вентиль. Принцип работы и основные применения.
16. Спин-туннельная структура. Ячейка MRAM. Топология матрицы памяти.
17. Методы получения и исследования спин-вентильных и спин-туннельных структур.

18. Перспективные устройства спинтроники. Трековая память. Спин-вентильный транзистор.

Зачет выставляется по результатам краткого собеседования со студентом

2. Перечень компетенций, этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкалы оценивания

2.1 Шкала оценивания сформированности компетенций и ее описание

Оценивание уровня сформированности компетенций в процессе освоения дисциплины осуществляется по следующей трехуровневой шкале:

Пороговый уровень - предполагает отражение тех ожидаемых результатов, которые определяют минимальный набор знаний и (или) умений и (или) навыков, полученных студентом в результате освоения дисциплины. Пороговый уровень является обязательным уровнем для студента к моменту завершения им освоения данной дисциплины.

Продвинутый уровень - предполагает способность студента использовать знания, умения, навыки и (или) опыт деятельности, полученные при освоении дисциплины, для решения профессиональных задач. Продвинутый уровень превосходит пороговый уровень по нескольким существенным признакам.

Высокий уровень - предполагает способность студента использовать потенциал интегрированных знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, полученных при освоении дисциплины, для творческого решения профессиональных задач и самостоятельного поиска новых подходов в их решении путем комбинирования и использования известных способов решения применительно к конкретным условиям. Высокий уровень

превосходит пороговый уровень по всем существенным признакам.

**2.2 Перечень компетенций, этапы их формирования,
описание показателей и критериев оценивания компетенций
на различных этапах их формирования**

Код компетенции	Форма контроля	Этапы формирования (№ темы (раздела))	Показатели оценивания	Шкала и критерии оценивания компетенций на различных этапах их формирования		
				Пороговый уровень	Продвинутый уровень	Высокий уровень
Общекультурные компетенции						
Общепрофессиональные компетенции						
Профессиональные компетенции						
ПК-3	зачет	1-6	Знать: Основные идеи, лежащие в основе функционирования современных элементов спинтроники. Общие принципы технологии формирования многослойных магнитных наноструктур и создания функциональных элементов спинтроники на их основе. Уметь: Использовать знания о структуре и функционировании элементов спинтроники для решения практических исследовательских и инженерных задач. Владеть навыками: Навыками экспериментального и теоретического исследования магнитных наноструктур.	1. Основы магнетизма в объеме курса общей физики 2. Основные понятия квантовой теории магнетизма 3. Явления AMR и GMR 4. Основы микромагнитной теории 5. Основные эффекты магнитооптики 6. Спиновый вентиль и магнито-туннельный переход 7. Конструкция ячейки MRAM	Решение задач с использованием микромагнитной теории	Знание технологического процесса получения магнитотуннельных переходов
ПК-4	зачет	1-6	Знать: Современные средства автоматизации измерений на базе	1. Микроконтроллеры на платформе Arduino 2. Микроконтроллеры фирмы National	Создание простых программ на языке	Создание простых программ на

			программируемых контроллеров. Уметь: Проводить подбор средств автоматизации эксперимента. Разрабатывать схемы экспериментальных стендов. Владеть навыками: Создания экспериментальных стендов на основе программируемых контроллеров.	Instruments 3. Среда графического программирования LabView.	C++ для Arduino	языке LabView
Профильные компетенции						

3. Методические рекомендации преподавателю по процедуре оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Целью процедуры оценивания является определение степени овладения студентом ожидаемыми результатами обучения (знаниями, умениями, навыками и (или) опытом деятельности).

Процедура оценивания степени овладения студентом ожидаемыми результатами обучения осуществляется с помощью методических материалов, представленных в разделе «Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций»

3.1 Критерии оценивания степени овладения знаниями, умениями, навыками и (или) опытом деятельности, определяющие уровни сформированности компетенций

Пороговый уровень (общие характеристики):

- владение основным объемом знаний по программе дисциплины;
- знание основной терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы без существенных ошибок;
- владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках рабочей программы дисциплины;
- усвоение основной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- знание базовых теорий, концепций и направлений по изучаемой дисциплине;
- самостоятельная работа на практических и лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, достаточный уровень культуры исполнения заданий.

Продвинутый уровень (общие характеристики):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме программы дисциплины;

- использование основной терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно решать сложные задачи (проблемы) в рамках рабочей программы дисциплины;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических и лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

Высокий уровень (общие характеристики):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам дисциплины;
- точное использование терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- безупречное владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные задачи (проблемы) в рамках рабочей программы дисциплины;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- активная самостоятельная работа на практических и лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

3.2 Описание процедуры выставления оценки

В зависимости от уровня сформированности каждой компетенции по окончании освоения дисциплины студенту выставляется оценка. Вид оценки («зачтено», «незачтено») определяется рабочей программой дисциплины в соответствии с учебным планом.

Оценка «зачет» выставляется студенту, у которого каждая компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована не ниже, чем на пороговом уровне.

Оценка «незачтено» выставляется студенту, у которого хотя бы одна компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована ниже, чем на пороговом уровне.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины
« Физика магнитных наноструктур »
(наименование дисциплины)

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения материала по дисциплине «Физика магнитных наноструктур» являются лекции в объеме 16 часов. Это связано с необходимостью описания основных понятий и законов магнетизма.

На лабораторных занятиях студенты (под руководством преподавателя) проводят экспериментальные исследования образцов одно- и многослойных магнитных наноструктур, а также тестовые расчеты в рамках микромагнитного моделирования. При этом особое внимание уделяется анализу получаемых данных и их физической интерпретации.

Для успешного освоения дисциплины важно активное участие студентов на лабораторных занятиях, а также их самостоятельная работа дома. Рекомендуется регулярное повторение пройденного материала и чтение рекомендованной литературы.

В конце семестра студенты сдают зачет, который проводится в форме устного опроса по списку вопросов.

Освоить вопросы излагаемые в данном курсе самостоятельно студенту достаточно сложно. Поэтому посещение аудиторных занятий является необходимым.

**Учебно-методическое обеспечение
самостоятельной работы студентов по дисциплине**

а) основная литература

1. С.С. Аплеснин Основы спинтроники, С. Петербург: Лань, 2010.
2. Н.Г. Чеченин Магнитные наноструктуры и их применение, Москва, МГУ: Грант-Виктория ТК, 2006.

б) дополнительная литература

1. Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер, Лекции по магнетизму, Москва, Физматлит, 2005.
2. В.А. Боков, Физика магнетиков, С.Петербург, Невский Диалект, 2002.

3. С.В. Вонсовский, Магнетизм, Москва, Наука, 1971.
4. С.И. Касаткин, Н.П. Васильева, А.М. Муровьев, Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе, Москва, ИПУ РАН, 2005.

в) ресурсы сети «Интернет»:

1. Электронные каталоги НБ ЯрГУ
(http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)
2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
(www.biblioclub.ru)
3. пакеты микромагнитного моделирования
 3. math.nist.gov/oomm
 4. www.magpar.net