



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

Институт наукоемких технологий и передовых материалов

«СОГЛАСОВАНО»
Руководитель ОП

Саранин А.А.
(Ф.И.О. рук. ОП)

«28» февраля _____ 2023 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

и.о. директора департамента
Общей и экспериментальной физики

Короченцев А.А.
(Ф.И.О.)

«28» февраля _____ 2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение магнитоупорядоченных сред численными методами
Направление подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Профиль: Электроника и наноэлектроника (совместно с ИАПУ ДВО РАН)
Форма подготовки: очная

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями *Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, утвержденного приказом Минобрнауки России*

от 29 сентября 2017 г. № 959 / ОС ДВФУ, утвержденного
от _____ 20__ г. № _____.

Рабочая программа обсуждена на заседании департамента общей и экспериментальной физики, протокол № 5 от «28» февраля 2023 г.

и.о. директора департамента общей и экспериментальной физики: канд. хим. наук, доцент Короченцев В.В.

Составители: к.ф.-м.н. Козлов А.Г.

Владивосток
2023

Оборотная сторона титульного листа
РПД

1. Рабочая программа пересмотрена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики и утверждена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики, протокол от «»

_____ 2023г.№

2. Рабочая программа пересмотрена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики и утверждена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики, протокол от «»

_____ 202 г.№

3. Рабочая программа пересмотрена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики и утверждена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики, протокол от «»

_____ 202 г.№

4. Рабочая программа пересмотрена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики и утверждена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики, протокол от «»

_____ 202 г.№

5. Рабочая программа пересмотрена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики и утверждена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики, протокол от «»

_____ 202 г.№

Аннотация дисциплины «Изучение магнитоупорядоченных сред численными методами»

Учебная дисциплина «Изучение магнитоупорядоченных сред численными методами» предназначена для магистрантов 1 курса магистратуры 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, магистерской программы «Электроника и наноэлектроника (совместно с ИАПУ ДВО РАН)».

Дисциплина «Изучение магнитоупорядоченных сред численными методами» входит в часть формируемую участниками образовательных отношений цикла дисциплин образовательной программы, является дисциплиной по выбору (Б1.В.ДВ.06.02), реализуется на 1 курсе, в 1 семестре, завершается экзаменом. Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 зачетные единицы (108 часов). Учебным планом предусмотрены лабораторные занятия (32 час.), самостоятельная работа студента (22 час., в том числе 54 час. на подготовку к экзамену).

Язык реализации – русский.

Цель изучения дисциплины: изучение важнейших физических процессов, явлений и характеристик различных магнитоупорядоченных сред.

Задачи:

1. Формирование знаний об основных физических принципах магнетизма в тонких наноструктурированных материалах.
2. Формирование знаний о магнитных характеристиках низкоразмерных пленок.
3. Формирование навыков расчета и экспериментального исследования магнитных параметров и характеристик основных типов двумерных и объемных материалов.

В результате изучения данной дисциплины у студентов формируются следующие профессиональные компетенции:

Тип задач	Код и наименование профессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Производственно-технологический	ПК-10 Способен обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов	ПК-10.1 анализирует современное состояние науки, связанной с получением и изучением новых наноструктурированных конденсированных сред
		ПК-10.2 использует принципы экономической эффективности технологических процессов в профессиональной деятельности
		ПК-10.3 дает оценку экономической эффективности технологических процессов
Научно-педагогический	ПК-14 Способен овладевать навыками разработки учебно-методических материалов для студентов по отдельным видам учебных занятий	ПК-14.1 выполняет требования, регламентирующие правила разработки учебно-методических материалов
		ПК-14.2 разрабатывает отдельные элементы учебно-методических материалов по отдельным видам учебных занятий

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
ПК-10.1 анализирует современное состояние науки, связанной с получением и изучением новых наноструктурированных конденсированных сред	<u>Знает</u> современное состояние науки, связанной с получением и изучением новых наноструктурированных конденсированных сред
	<u>Умеет</u> применять передовые методы и технологии в получении новых наноструктурированных материалов
	<u>Владеет</u> навыками анализа текущих тенденций в современной науке для разработки собственного технологического процесса получения перспективных наноструктурированных систем
ПК-10.2 использует принципы экономической эффективности технологических процессов в профессиональной деятельности	<u>Знает</u> принципы экономической эффективности технологических процессов в профессиональной деятельности
	<u>Умеет</u> использовать различные методики оценки экономической эффективности технологических процессов в своей профессиональной области
	<u>Владеет</u> навыками оценки экономической эффективности технологических процессов в решении научно-исследовательских задач
ПК-10.3 дает оценку экономической эффективности технологических процессов	<u>Знает</u> основы экономической эффективности технологических процессов
	<u>Умеет</u> оценивать экономическую эффективность технологических процессов по ряду параметров
	<u>Владеет</u> навыками выбора наиболее экономически эффективного подхода для осуществления технологических процессов
ПК-14.1 выполняет требования, регламентирующие правила разработки учебно-методических материалов	<u>Знает</u> требования и правила разработки учебно-методических материалов
	<u>Умеет</u> осуществлять разработку учебно-методических материалов с учётом нормативных требований
	<u>Владеет</u> навыками анализа и применения нормативной документации для разработки учебно-методических материалов
ПК-14.2 разрабатывает отдельные элементы учебно-методических материалов по отдельным видам учебных занятий	<u>Знает</u> методологию разработки учебно-методических материалов по отдельным видам учебных занятий
	<u>Умеет</u> составлять планы лабораторных и практических работ, ставить вычислительные задачи
	<u>Владеет</u> навыками разработки элементов учебно-методических материалов по отдельным видам учебных занятий

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

Лабораторные работы (68/ __ час.)

Лабораторная работа №1. Описание геометрических параметров и расчет магнитных постоянных моделируемого объекта на основании экспериментальных данных (4 / __ час.)

1. Используя изображение экспериментального образца, опишите его геометрическую форму и рассчитайте площадь поверхности ферромагнитного слоя.
2. Постройте в OriginPro петли гистерезиса, измеренные экспериментально на вибромагнетометре в полях измеренных параллельно и перпендикулярно оси легкого намагничивания (о.л.н.).
3. Проведите нормировку построенных петель гистерезиса.
4. Определите значения таких характеристик формы петель как коэрцитивная сила (H_c), остаточная намагниченность (M_r/M_s), поля эффективной анизотропии (H_{eff}).
5. Зная состав экспериментальной структуры и геометрические параметры измеренного образца, рассчитайте его объем.
6. Определив магнитный момент образца в насыщении, рассчитайте величину намагниченности насыщения образца (M_s).
7. Рассчитайте величину эффективной магнитной анизотропии, используя формулу $K_{eff} = \frac{1}{2} H_{eff} \cdot M_s$.
8. Учитывая ориентацию о.л.н. и кристаллическую структуру экспериментального образца, произведите пересчет эффективной анизотропии в константу наведенной (K_u), либо кристаллографической анизотропии (K_c), которая будет использоваться в моделировании.
9. Из графика температурного изменения намагниченности определите температуру Кюри (T_c) и рассчитайте константу обменного взаимодействия (A).
10. Рассчитайте длину ферромагнитной корреляции для данного образца,

используя формулу $l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$.

Лабораторная работа №2. Анализ экспериментальных результатов исследования магнитной структуры (4 / __ час.)

1. Используя изображение доменной структуры в размагниченном

- состоянии, полученное методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ), определите тип анизотропии образца.
2. Зная масштаб сканируемой на МСМ области образца, измерьте средний размер доменов.
 3. Обозначьте направление намагниченности в каждом домене МСМ изображения.
 4. Учитывая состав образца и толщины слоев, установите тип доменных границ.
 5. Разделите на изображении МСМ дефекты сканирования связанные с рельефом и особенности магнитной структуры – топологические спиновые конфигурации (магнитные вихри, скирмионы, изменения киральности доменных границ).
 6. Обработайте изображение образца №2 в размагниченном состоянии, полученное на магнитооптическом Керр-микроскопе.
 7. По виду доменной структуры на изображении Керр-микроскопии определите тип анизотропии.
 8. Зная масштаб сканируемой области образца на Керр-микроскопе, измерьте средний размер доменов.
 9. Используя изображения Керр-микроскопии измеренные на образце №2 в процессе перемагничивания, определите плотность центров зарождения доменов.
 10. Постройте зависимость изменения среднего размера доменов при изменении внешнего магнитного поля.

Лабораторная работа №4. Установка, изучение интерфейса и работа в программном пакете OOMMF (4 /__ час.)

1. Зайдите на сайт разработчика The Object Oriented MicroMagnetic Framework <https://math.nist.gov/oommf/> и скачайте версию программного пакета необходимую для вашей операционной системы.
2. Скачайте ActiveTcl Software, подходящий для вашей ОС, с сайта <https://www.activestate.com/products/activetcl/downloads/> и установите данный пакет.
3. Запустите `oommf.tcl`.
4. В появившемся окне выберите подпрограмму `mmProbEd`.
5. Запустите пример 2D задачи из папки `app\mmpe\examples`.
6. Запустите подпрограмму `mmDisp` и выведите отображение распределения намагниченности в процессе расчета.

7. Поставьте расчет на паузу и сохраните полученное изображение микромагнитной структуры.
8. Откройте подпрограмму mmGraph, возобновите расчет и постройте график изменения полной энергии системы от числа итераций.
9. Дождитесь момента, когда полная энергия достигнет минимума и сохраните изображение микромагнитной структуры.
10. Откройте подпрограмму Oxsii и запустите пример 3D задачи из папки app\oxs\examples.
11. Запустите подпрограмму mmDataTable для отображения текущего значения величины магнитного поля, а также критерия сходимости задачи.
12. Запустите подпрограмму mmArchive для автоматического сохранения данных в ODT файле.
13. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петлю гистерезиса, полученную на моделировании 3D структуры.

Лабораторная работа №4. Моделирование двумерных (2D) наноструктур в OOMMF (6 /__ час.)

1. Используя mmSolve2D задать двумерную задачу для наноструктур различной геометрической формы.
2. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 1.1.
3. Запустите подпрограмму mmDisp, включите отображение полученных наноструктур и сохраните OMF файл данных структур.
4. Задайте наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией и найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля.
5. Сделайте симуляцию процесса намагничивания образца в двух направлениях Ox и Oy , сохранив в ODT файле данные.
6. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте кривые намагничивания.
7. Смоделируйте процессы перемагничивания в полях ориентированных вдоль Ox и Oy , сохраните данные в ODT файле.
8. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса.
9. Напишите исходный код в формате MIF 1.1 для 2D наноструктуры с определенными магнитными и геометрическими параметрами.
10. Используя командную строку сконвертируйте исходный код из

кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1.

Лабораторная работа №5. Моделирование трехмерных (3D) наноструктур различной геометрической формы в OOMMF (6_/_ час.)

1. Используя Oxsii задать трехмерную задачу для наноструктур различной геометрической формы.
2. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 2.1.
3. Запустите подпрограмму mmDisp, включите отображение полученных наноструктур и сохраните OMF файл данных 3D наноструктур.
4. Задайте наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией и найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля.
5. Сделайте симуляцию процесса намагничивания образца в трех направлениях Ox , Oy , Oz , сохранив в ODT файле данные.
6. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте кривые намагничивания в трех направлениях.
7. Смоделируйте процессы перемагничивания в полях ориентированных вдоль Ox , Oy , Oz сохраните данные в ODT файле.
8. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса.
9. Задайте наноструктуру, используя блок ImageAtlas, и сохраните OMF файл полученной геометрии.
10. Задайте массив наноструктур, используя блок MultiAtlas, и сохраните OMF файл полученной геометрии.

Лабораторная работа №6. Особенности задания геометрии моделируемого 3D объекта при использовании ScriptAtlas в OOMMF (6_/_ час.)

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией, используя блок ScriptAtlas.
2. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 2.1.
3. Запустите подпрограмму mmDisp, включите отображение полученных наноструктур и сохраните OMF файл данных 3D наноструктур.
4. Задайте наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией, и найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля.

5. Задайте массив 3D наноструктур с определенными магнитными параметрами и геометрией, используя блок ScriptAtlas.
6. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 2.1.
7. Запустите подпрограмму mmDisp, включите отображение полученного массива наноструктур и сохраните OMF файл.
8. Найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля в массиве наноструктур.

Лабораторная работа №7. Формирование необходимой начальной конфигурации намагниченности 3D структур в OOMMF (6 / __ час.)

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией, используя блок UniformVectorField, задайте однородную намагниченность по осям Ox , Oy , Oz . Сохраните полученные распределения намагниченности в OMF файлах.
2. Задайте двухдоменное состояние через обращение к разным регионам моделируемой геометрии. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
3. Задайте двухдоменное состояние, используя подпрограмму ScriptVectorField. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
4. Задайте вихревое состояние, используя подпрограмму ScriptVectorField. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
5. Задайте полосовую доменную структуру, используя подпрограмму ScriptVectorField. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
6. Задайте хаотическое распределение намагниченности с размером ячейки $4 \times 4 \times 4 \text{ нм}^3$. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
7. Сравните полные энергии системы при различных конфигурациях намагниченности и найдите конфигурацию с минимальной энергией.

Лабораторная работа №8. Виды обменного взаимодействия при моделировании 3D объектов в OOMMF (4 / __ час.)

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами

- и геометрией. В полученной наноструктуре задайте косвенное обменное взаимодействие Дзялошинского-Мория.
2. Задайте двухдоменное состояние, после минимизации энергии сохраните OMF файл распределения намагниченности. Определите киральность доменных границ.
 3. Измените знак константы обменное взаимодействие Дзялошинского-Мория на противоположный, повторите задания 1 и 2.
 4. Задайте 3D наноструктуру трехслойной пленки с определенными магнитными параметрами. Между верхним и нижним слоями задайте косвенное обменное взаимодействие РККУ с антиферромагнитной связью через немагнитную прослойку.
 5. Задайте в качестве начальной конфигурации хаотическое распределение намагниченности в трехслойной пленке.
 6. Найдите конфигурацию с минимальной энергией в отсутствие внешнего магнитного поля.
 7. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.

Лабораторная работа №9. Магнитная анизотропия при моделировании 3D объектов в OOMMF (4 / __ час.)

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В полученной наноструктуре задайте одноосную анизотропию.
2. Проведите симуляции процессов перемагничивания в полях ориентированных параллельно и перпендикулярно о.л.н..
3. Включите автоматическое сохранение данных в ODT файл.
4. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса для двух случаев ориентации внешнего магнитного поля.
5. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В полученной наноструктуре задайте кубическую анизотропию.
6. Проведите симуляции процессов перемагничивания в полях ориентированных вдоль кристаллографических осей [100], [010], [001] и по диагонали [111].
7. Включите автоматическое сохранение данных в ODT файл.
8. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса для двух случаев ориентации внешнего магнитного поля.

**Лабораторная работа №10. Симуляция процессов
перемагничивания под действием внешнего магнитного поля в OOMMF
(6 /__ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В начальном состоянии задайте хаотическое распределение намагниченности. Проведите симуляцию процесса намагничивания вдоль оси Ox .
2. Включите автоматическое сохранение данных в ODT файл.
3. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте кривую намагничивания.
4. Задайте в начальной конфигурации двухдоменное состояние. Исследуйте динамику доменной стенки под действием вращающегося магнитного поля в плоскости Oxy .
5. Задайте в начальной конфигурации вихревое состояние намагниченности. Исследуйте динамику ядра вихря под действием переменного магнитного поля.
6. Задайте однодоменное состояние намагниченности. Исследуйте процесс перемагничивания наноструктуры под действием локального смещающегося магнитного поля. Включите автоматическое сохранение данных в OMF файл.

**Лабораторная работа №11. Симуляция спиновой динамики 3D
объекта под действием температуры в OOMMF (4 /__ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В начальном состоянии задайте вихревую намагниченность.
2. Увеличивайте температуру, что найти предельную T_{crit} до которой данное состояние будет оставаться устойчивым.
3. Увеличивайте температуру дальше выводя на mmGraph зависимость $m=f(T)$.
4. Найдите точку Кюри для вашей структуры.
5. Увеличьте размер ячейки разбиения в 2 раза и повторите задания 1-4.
6. Проведите анализ полученных результатов и сделайте вывод о том, как размер ячейки разбиения влияет на динамику намагниченности под действием температуры.

Лабораторная работа №12. Моделирование топологических спиновых конфигураций в OOMMF (4 / __ час.)

1. Задайте 3D наноструктуру с плоскостной магнитной анизотропией. В начальном состоянии задайте вихревую намагниченность.
2. Сохраните распределение намагниченности в OMF файл.
3. Измените кодировку полученного OMF файла из binary 4 в text.
4. Импортируйте полученное распределение намагниченности в OriginPro.
5. Используя формулу
$$N_{sk} = \frac{1}{4\pi} \iint \vec{m} \cdot \left(\frac{\partial \vec{m}}{\partial x} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial y} \right) dx dy$$
, рассчитайте величину топологического заряда для данной конфигурации намагниченности.
6. Задайте 3D наноструктуру перпендикулярной магнитной анизотропией и взаимодействием Дзялошинского-Мория. В начальном состоянии задайте скирмион.
7. Повторите действия, описанные в пунктах 2-5, для данной структуры.
8. Сравните величины топологических зарядов рассчитанные для вихря и скирмиона.

Лабораторная работа №13. Моделирование магнитостатических полей создаваемых ферромагнитной наноструктурой в OOMMF (4 / __ час.)

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. При этом размер моделируемой области пространства должен в 2 раза превышать геометрические размеры наноструктуры в каждом из направлений.
2. Задайте однодоменное состояние намагниченности вдоль оси Ox .
3. Найдите энергетический минимум для данной структуры.
4. Включите отображение магнитостатических полей, создаваемых наноструктурой в mmDisp.
5. Сохраните полученное распределение магнитостатических полей в OMF файл.
6. Задайте массив наноструктур так, чтобы моделируемая область пространства полностью охватывала данный массив.
7. Задайте в качестве начальной конфигурации намагниченности хаотическое распределение.

8. Запустите минимизацию энергии системы в отсутствие внешнего поля.
9. Получите распределение магнитостатических полей взаимодействия между элементами массива.
10. Уменьшите расстояние между элементами массива и пункты 7-9.

Лабораторная работа №14. Моделирование пленок и многослойных структур в OOMMF (6 / __ час.)

1. Задайте 3D область ферромагнитной пленки размером 2×2 мкм² определенными магнитными параметрами и толщиной.
2. Задайте в качестве начальной конфигурации намагниченности хаотическое распределение.
3. Запустите минимизацию полной энергии системы и сохраните OMF файл распределение намагниченности в энергетическом минимуме.
4. Добавьте периодические граничные условия на краях моделируемой области с количеством трансляций вдоль Ox и $Oy - 3$.
5. Повторите действия из пунктов 2-3.
6. Сравните полученные результаты без и с периодическими граничными условиями.
7. Задайте многослойный нанодиск, состоящий из 5 ферромагнитных слоев разделенных немагнитными прослойками.
8. Задайте в качестве начальной конфигурации намагниченности однодоменное состояние.
9. Запустите минимизацию полной энергии системы и сохраните OMF файл распределение намагниченности в энергетическом минимуме.
10. Используя эффективную модель, описанную работе [Woo, S. et al. *Nature materials* 2016, **15**, (5), 501-506], проведите пересчет магнитных параметров моделируемой структуры.
11. Задайте новую структуру нанодиска с одним эффективным ферромагнитным слоем.
12. Повторите действия из пунктов 8-9.
13. Сравните результаты, полученные при моделировании реальной многослойной структуры и эффективной модели.

**I. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

II. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Описание геометрических параметров и расчет магнитных постоянных моделируемого объекта на основании экспериментальных данных	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 1-7 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
2	Анализ экспериментальных результатов исследования магнитной структуры	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 8-11 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 2 Собеседование

					(УО-1)
3	Установка, изучение интерфейса и работа в программном пакете OOMMF	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 12-13 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
4	Моделирование двумерных (2D) наноструктур в OOMMF	ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 14-15 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
5	Моделирование трехмерных (3D) наноструктур различной геометрической формы в OOMMF	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 16-17 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
6	Особенности задания геометрии моделируемого 3D объекта при использовании ScriptAtlas в OOMMF	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 18-19 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6

					Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6 Собеседование (УО-1)
7	Формирование необходимой начальной конфигурации намагниченности 3D структур в ООММФ	ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 20-21 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7 Собеседование (УО-1)
8	Виды обменного взаимодействия при моделировании 3D объектов в ООММФ	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 22-23 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8 Собеседование (УО-1)
9	Магнитная анизотропия при моделировании 3D объектов в ООММФ	ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 24-25
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 9 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 9 Собеседование (УО-1)
10	Симуляция процессов перемагничивания под действием внешнего магнитного поля в	ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 26-27 Собеседование (УО-1)

	ООММФ		умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 10 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 10 Собеседование (УО-1)
11	Симуляция спиновой динамики 3D объекта под действием температуры в ООММФ	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 28-29 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 11 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 11 Собеседование (УО-1)
12	Моделирование топологических спиновых конфигураций в ООММФ	ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 30-31 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 12 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 12 Собеседование (УО-1)
13	Моделирование магнитоэлектронных полей создаваемых ферромагнитной наноструктурой в ООММФ	ПК-10 ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 32-33 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 13 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 13 Собеседование (УО-1)

14	Моделирование пленок и многослойных структур в ООММФ	ПК-14	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 34-35 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 14 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 14 Собеседование (УО-1)

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

III. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Кудреватых Н.В. Магнетизм редкоземельных металлов и их интерметаллических соединений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.В. Кудреватых, А.С. Волегов. – Электрон. текстовые данные. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015. – 200 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69622.html> – ЭБС «IPRbooks».
2. Юрчук С.Ю. Методы математического моделирования [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Юрчук С.Ю. – Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский Дом МИСиС, 2018. – 96 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/78562.html> – ЭБС «IPRbooks».
3. Мешков И.Н. Электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] / И.Н. Мешков, Б.В. Чириков. – Электрон. текстовые данные. – Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2014. – 544 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28923.html> – ЭБС «IPRbooks».
4. Аполлонский С.М. Электромагнитные поля технического оборудования. Том I. Методы математической физики и их использование при расчетах электромагнитных полей [Электронный ресурс] : монография / С.М.

Аполлонский. – Электрон. текстовые данные. – М. : Русайнс, 2016. – 280 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/61685.html> – ЭБС «IPRbooks».

5. Ибатуллин Р.У. Физика. Часть 2. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс]: методические рекомендации/ Ибатуллин Р.У., Кузьмичева В.А.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московская государственная академия водного транспорта, 2016.— 39 с. <http://www.iprbookshop.ru/65692.html>

Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 2. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : учебное пособие / И.В. Савельев. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/705> .

2. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т.2 Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : учебник / Г.С. Ландсберг. — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2011. — 400 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2240> .

3. Кудреватых Н.В. Магнетизм редкоземельных металлов и их интерметаллических соединений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.В. Кудреватых, А.С. Волегов. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 200 с. — 978-5-7996-1604-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69622.html>

4. Астайкин А.И. Метрология и радиоизмерения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Астайкин А.И., Помазков А.П., Щербак Ю.П. – Электрон. текстовые данные. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2010. – 405 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/18440.html> – ЭБС «IPRbooks».

5. Берлин Б.В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением [Электронный ресурс] / Б.В. Берлин, Л.А. Сейдман. — Электрон. текстовые данные. — М. : Техносфера, 2014. — 256 с. — 978-5-94836-369-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31877.html>

Интернет-ресурсы

1. <http://math.nist.gov/oommf/>
2. <http://deparkes.co.uk/wp-content/uploads/2014/02/userguide1.pdf>
3. <http://mumax.github.io/>
4. <https://arxiv.org/pdf/1406.7635.pdf>
5. <http://www.magpar.net/static/magpar/doc/html/install.html>
6. <http://www.magpar.net/static/magpar/doc/magpar.pdf>
7. <http://gmsh.info/>

Нормативно-правовые документы

1. ГОСТ Р 57700.6-2017 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в области бессеточных методов численного моделирования.
2. ГОСТ 19693-74 Межгосударственный стандарт. Материалы магнитные. Термины и определения.
3. ГОСТ 15971-90. Системы обработки информации. Термины и определения
4. ГОСТ 8.417-02. ГСИ. Единицы величин.
5. ГОСТ Р 8.563-96. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений.

Перечень информационных технологий и программного обеспечения

При осуществлении образовательного процесса по дисциплине может использоваться стандартное программное обеспечение компьютерных учебных классов (Windows, Microsoft Office).

IV. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

В процессе обучения студент должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы обычно составляет по времени 35% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которыми каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины или на кафедре.

Главное в период обучения своей специальности – это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо

распределять работу на следующий день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием как успешной учебы, так и последующей работы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Организация деятельности студента.

Лабораторная работа. Перед выполнением лабораторных работ студенты должны ознакомиться с теоретическим материалом по текущей теме. Если при изучении данного материала возникли вопросы, проконсультироваться с преподавателем. Прочитать инструкцию по выполнению лабораторной работы. Составить план выполнения для достижения поставленных задач. В случае затруднений необходимо обратиться к преподавателю. Следуя составленному плану, начать выполнение лабораторной работы. После выполнения каждого этапа, необходимо сделать анализ полученных результатов. Если результат удовлетворяет всем требованиям, указанным в задании, перейти к следующему этапу. В противном случае, если результат не удовлетворяет требованиям задания, приводит к некорректным выводам и/или ответам, необходимо проанализировать причины, приведшие к ошибкам. Работа над ошибками является одним из условий процесса совершенствования знаний и навыков а, следовательно, успешной учебы и работы.

После выполнения всех этапов лабораторной работы нужно составить отчет о проделанной работе. Представить данный отчет на проверку преподавателю.

Самостоятельная работа. Выполнение самостоятельной работы студентами необходимо для успешного закрепления изученного материала и навыков моделирования, приобретенных на лабораторных работах. Процесс

выполнения схож с лабораторными работами, с одним отличием – отсутствует возможность текущей консультации с преподавателем по возникающим ошибкам, либо трудностям. Благодаря этому студент начинает приобретать навыки самостоятельного анализа и решения проблем, что позволяет лучше усвоить материал. Перед выполнением самостоятельной работы прочитать поставленное задание и составить план действий для его выполнения. Следуя составленному плану, начать выполнение самостоятельной работы. Анализ полученных результатов, необходим после выполнения каждого этапа. Если результат удовлетворяет всем требованиям, указанным в задании, перейти к следующему этапу. После выполнения всех этапов самостоятельной работы нужно оформить результаты в виде отчета. Представить данный отчет на проверку преподавателю на лабораторном занятии.

V. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Лабораторные занятия проводятся в компьютерных классах лабораторного корпуса (корпус L). Для проведения исследований, связанных с выполнением задания по практике, а также для организации самостоятельной работы студентам доступно лабораторное оборудование и специализированные кабинеты, соответствующие действующим санитарным и противопожарным нормам, а также требованиям техники безопасности при проведении учебных и научно-производственных работ.

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпус L, ауд. L320	Специализированная лаборатория Департамента общей и экспериментальной физики: лаборатория пленочных технологий. 1. Сверхвысоковакуумный комплекс Omicron 2. ACM Integra Aura NT MDT 3. Photolithography system Suss MicroTech MJB6 (Germany) Количество посадочных	Microsoft Office365/Microsoft/США/Платное ПО Microsoft Teams/Microsoft/США/Платное ПО Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software / Department of Nanometrology/ Czech Metrology Institute/ Бесплатное ПО

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	1 неделя	Подготовка к лабораторной работе №1	4 час.	Работа на занятии
2	2 неделя	Подготовка к лабораторной работе №2	4 час.	Работа на занятии
3	3 недели	Подготовка к лабораторной работе №3	4 час.	Работа на занятии
4	4 недели	Подготовка к лабораторной работе №4. Выполнение самостоятельного задания по теме 1	4 час.	Работа на занятии
5	5 неделя	Подготовка к лабораторной работе №5	4 час.	Работа на занятии
6	6 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 2	4 час.	Проверка домашней работы
7	7 неделя	Подготовка к лабораторной работе №6	4 час.	Работа на занятии
8	8 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 3	4 час.	Проверка домашней работы
9	9 неделя	Подготовка к лабораторной работе №7	4 час.	Работа на занятии
10	10 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 4	4 час.	Проверка домашней работы
11	11 неделя	Подготовка к лабораторной работе №8	4 час.	Работа на занятии
12	12 неделя	Подготовка к лабораторной работе №9	4 час.	Работа на занятии
13	13 неделя	Подготовка к лабораторной работе №10	4 час.	Работа на занятии
14	14 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 5	4 час.	Проверка домашней работы
15	15 неделя	Подготовка к лабораторной работе №11	4 час.	Работа на занятии
16	16 неделя	Подготовка к лабораторной работе №12	4 час.	Работа на занятии
17	17 неделя	Подготовка к лабораторной работе №13	6 час.	Работа на занятии

18	18 неделя	Подготовка к лабораторной работе №14	6 час.	Работа на занятии
Итого			76 час.	

Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению

Задания и методические рекомендации для самостоятельной работы обеспечивают подготовку лабораторным занятиям, а также закрепление материала по пройденным темам. Их полное содержание приведено в программе и методических указаниях. Методические указания к лабораторным занятиям в электронном виде и печатном виде берутся у ведущего преподавателя.

Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы

Результаты самостоятельной работы отражаются в кратких отчетах, где приводятся результаты каждого из лабораторных занятий и заданий для самостоятельной работы. Отчеты по лабораторным занятиям и самостоятельной работе предоставляются преподавателю в электронном виде (где необходимо, компьютерное моделирование и построение графиков с помощью вычислительных средств) или письменном виде (если занятие проводится без использования компьютеров).

К представлению материалов по результатам лабораторных занятий предъявляются следующие требования.

Структура краткого отчета по результатам лабораторного занятия и самостоятельной работы.

Если для данного занятия необходимо предоставить материалы в электронной форме, то они подготавливаются как текстовые документы в редакторе MS Word.

Краткий отчет по результатам лабораторного занятия, либо самостоятельной работы должен быть обобщающим документом, включать всю информацию по выполнению заданий, в том числе исходный код моделируемой задачи, построенные графики, расчеты, необходимые пояснения и иллюстрации микромагнитной структуры и т.д.

Структурно краткий отчет по результатам лабораторного занятия, либо самостоятельной работы состоит из следующих частей:

- Исходные данные к выполнению заданий – обязательная компонента отчета, начинается с новой страницы, содержат указание варианта, тему, план работы и т.д.);
- Основная часть – материалы выполнения заданий, разбивается по рубрикам, соответствующих заданиям работы, с иерархической структурой: разделы – подразделы – пункты – подпункты и т.д.
- Выводы – обязательная компонента отчета, содержит обобщающие выводы по работе (какие задачи решены, оценка результатов, что освоено при выполнении работы);

Краткий отчет по результатам лабораторного занятия и самостоятельной работы оформляется по правилам оформления письменных работ студентами ДВФУ.

Необходимо обратить внимание на следующие аспекты в оформлении кратких отчетов:

- набор текста (если необходим отчет в электронной форме);
- структурирование работы;
- оформление заголовков всех видов (рубрик-подрубрик-пунктов-подпунктов, рисунков, таблиц, приложений);
- оформление перечислений (списков с нумерацией или маркировкой);
- оформление таблиц;
- оформление иллюстраций (графики, рисунки, фотографии, схемы, «скриншоты»);

- набор и оформление математических выражений (формул);

Если набор текста осуществляется на компьютере, то необходимо придерживаться следующих требований:

- печать – на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (размер 210 на 297 мм.);
- интервал межстрочный – полуторный;
- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 14 пт., в том числе в заголовках (в таблицах допускается 10-12 пт.);
- выравнивание текста – «по ширине»;
- поля страницы – левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 20 мм;
- нумерация страниц – в правом нижнем углу страницы (для страниц с книжной ориентацией), сквозная, от титульного листа до последней страницы, арабскими цифрами;
- режим автоматического переноса слов, за исключением заголовков всех уровней (перенос слов для отдельного абзаца блокируется средствами MSWord с помощью команды «Формат» – абзац при выборе опции «запретить автоматический перенос слов»).

Графическая информация: изображения микромагнитной структуры, графики, диаграммы моделей, схемы, экранные формы и т.п., должны отвечать требованиям визуальной наглядности представления иллюстративного материала как по размерам графических объектов, так и разрешающей способности отображения текстов, цветовому оформлению и другим важным пользовательским параметрам.

Рекомендуется в среде программного приложения mmDisp OOMMF настроить параметры масштабирования и цветовой схемы для наглядного отображения микромагнитной структуры.

Приведенные в отчет изображения рекомендуется отмасштабировать для заполнения страницы отчета «по ширине».

Изображения и графики в кратком отчете оформляются как рисунки, с заголовками, помещаемыми ниже области рисунков.

Критерии оценки выполнения самостоятельной работы

Оценивание результатов лабораторных занятий и самостоятельных работ проводится по критериям:

- полнота и качество выполненных заданий;
- владение методами и приемами микромагнитного моделирования в исследуемых вопросах, применение специализированных программных средств (если необходимо);
- отсутствие фактических ошибок, связанных с пониманием проблемы или задачи;
- отсутствие значительных ошибок в приводимых количественных результатах.