

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.


В.В. Белокуров /
«21» марта 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Физика магнитных явлений

Physics of magnetic phenomena

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Физика магнитных явлений
(103-01-00-1312-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Физика магнитных явлений.

Целью изучения дисциплины является подготовка к сдаче кандидатского экзамена по специальности в соответствии с научной специальностью подготавливаемой диссертации. Предлагаемая программа имеет целью содействовать приобретению глубоких и упорядоченных знаний в области общих концепций физики магнитных явлений.

2. Уровень высшего образования – подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность, область науки: 1.3.12 Физика магнитных явлений; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся.

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа - занятия лекционного типа, 18 часов - индивидуальные консультации, 4 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

6. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия

Необходимой основой для успешного освоения дисциплины являются знания в объеме основных профессиональных образовательных программ высшего образования по физике магнитных явлений, физике конденсированного состояния вещества, квантовой теории твердого тела, экспериментальных методов физики магнитных явлений.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Молекулярная теория магнетизма (Магнитные моменты атомов и молекул. Магнетон Бора. Магнитные моменты ядер. Строение электронных оболочек переходных и редкоземельных атомов. Диамагнетизм. Пространственное квантование магнитного момента атома. Парамагнетизм систем слабозаимодействующих	12	4	-	-	2	-	6	4	2	6

атомов. Функции Бриллюэна. Закон Кюри и Кюри-Вейсса. Обменная энергия. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Спиновые волны. Магноны. Температурная зависимость спонтанной намагниченности при низких температурах. Косвенное и прямое обменное взаимодействие в магнитных диэлектриках. Косвенное обменное взаимодействие через электроны проводимости в редкоземельных металлах. Косвенное обменное взаимодействие в магнитных полупроводниках (EuO, CdCr, Se и др.) через электроны проводимости.)										
Тема 2. Основы зонной теории магнетизма (Гамильтониан системы электронов и ионов. Адиабатическое приближение. Метод Хартри-Фока. Поверхность Ферми d- и f-металлов. Различные типы обменных интегралов. Электронный газ. Парамагнетизм и диамагнетизм электронного газа. Критерий ферромагнетизма	12	4	-	-	2	-	6	4	2	6

электронного газа. Обменное расщепление. Полярная модель Шубникова-Вонсовского. Модель Хаббарда для невырожденной зоны. Уровни Ландау. Осцилляция магнитной восприимчивости. Циклотронный резонанс. Восстановление поверхности Ферми по экспериментальным данным, полученным при изучении этих эффектов. Примесные уровни и их влияние на энергетический спектр. Распределение зарядовой и спиновой плоскости вокруг примеси. Магнитная восприимчивость разбавленных растворов.)										
Тема 3. Магнитные структуры (Виды магнитных структур: ферромагнетики, коллинеарные ферромагнетики, неколлинеарные антиферромагнетики, гелимагнетики, ферримагнетики и их магнитные характеристики. Метод нейтронографии. Примеры веществ с указанными структурами. Спиновые стекла.)	8	2	-	-	2	-	4	2	2	4

Тема 4. Ферромагнетизм и доменная структура кристаллов (Анизотропия магнитной энергии. Константы анизотропии и их измерение. Магнитоупругая энергия и ее зависимость от направления спонтанной намагниченности и деформации. Магнитострикция. Природа магнитной анизотропии. Методы наблюдения доменной структуры. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу. Доменная структура вблизи полостей для включений. Цилиндрические магнитные домены. Структура граничного слоя между доменами и его энергия. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм. Процессы намагничивания: смещение доменных границ, вращение, парапроцесс. Теория кривых намагничивания в монокристаллах в области вращения. Влияние упругих напряжений на намагничивание. Магнитная текстура. Теория магнитного гистерезиса и коэрцитивной	14	6	-	-	2	-	8	4	2	6
--	-----------	---	---	---	---	---	----------	---	---	----------

<i>силы. Прямоугольная петля гистерезиса. Процессы перемангничивания в тонких пленках.)</i>										
Текущий контроль успеваемости	4	-	-	-	-	2	2	-	2	2
Тема 5. Антиферромагнетизм и ферримагнетизм (Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля. Продольная и поперечная восприимчивость и их температурная зависимость. Термодинамическая теория слабого ферромагнетизма по Дзялошинскому. Редкоземельные ортоферриты. Геликоидальный антиферромагнетизм редкоземельных металлов. Теория ферримагнетизма в приближении молекулярного поля. Основные типы температурной зависимости самопроизвольной намагниченности. Температурная зависимость парамагнитной восприимчивости ферромагнетиков (закон Нееля). Физические свойства ферримагнетиков в области	12	4	-	-	2	-	6	4	2	6

точки компенсации магнитных моментов подрешеток. Ферриты структурной шпинели и граната. Гексагональные ферриты.)										
Тема 6. Основы теории магнитных превращений (Термодинамические потенциалы. Удельные теплоемкости. Магнетокалорический эффект. Термодинамическая теория ферромагнитного превращения. Критические индексы. Магнитные фазовые переходы типа спиновой переориентации, вызванные сильным магнитным полем и изменением температуры.)	12	4	-	-	2	-	6	4	2	6
Тема 7. Динамика процессов перемангничивания (Ферро- и ферримагнетики в переменных полях. Уравнение Ландау и Лифшица для движения магнитного момента. Ферромагнитный, ферримагнитный и антиферромагнитный резонансы. Определение фактора и констант магнитной анизотропии, Ядерный магнитный резонанс. Спиновое эхо. Магнитные	8	2	-	-	2	-	4	2	2	4

<i>эффективные поля на ядрах магнетиков и их природа. Эффект Мессбауэра.)</i>										
Тема 8. Магнитооптические явления (Магнитооптические эффекты при отражении, преломлении и прохождении света через прозрачные среды. Тензор диэлектрической проницаемости. Зависимость его компонентов от частоты. Магнитооптические параметры и зонная структура.)	10	2	-	-	2	-	4	4	2	6
Тема 9. Современные проблемы магнетизма	10	4	-	-	2	-	6	2	2	4
Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену	6	-	-	-	-	2	2	-	4	4
Итого	108	32	-	-	18	4	54	30	24	54

8. Образовательные технологии

Проводятся традиционные лекции с использованием мультимедийных презентаций. Контактная работа обучающихся с преподавателем проходит, в основном, в виде установочных лекций и индивидуальных консультаций, на которых обсуждается содержание тем дисциплины, их значимость и взаимосвязь. В процессе преподавания дисциплины используются активные формы обучения, такие как коллоквиумы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине

Перед началом освоения дисциплины, обучающиеся должны быть ознакомлены с видами контактной и самостоятельной работы, формами текущей и промежуточной аттестации, с критериями оценки качества знаний для промежуточной аттестации.

Обучающимся предоставляется программа курса, план занятий и перечень домашних заданий. По теме каждой лекции указывается материал в источниках из списков основной и дополнительной литературы, а также из интернет-ресурсов.

Самостоятельная работа обучающихся предусматривает изучение рекомендованной основной и дополнительной литературы, конспектов установочных лекций, использование доступа к Интернет-ресурсам и электронным библиотекам.

10. Ресурсное обеспечение

Основная литература:

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
2. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир, 1976.
3. Кондорский Е.И. Зонная теория магнетизма. М.: изд.МГУ, 1976.
4. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. М.: изд.МГУ, 1976.
5. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.: Мир, 1983.
6. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение. М.: Мир, 1987.
7. Хандрих К., Коте С. Аморфные ферро- и ферримагнетики. М.: Мир, 1982.
8. Ведяев А.В., Котельникова О.А., Рыжанова Н.В. Спин-зависящий транспорт в магнитных наноструктурах. М.: изд.МГУ, 2012.
9. Устинов В.В., Мушников Н.В., Михеев М.Н. Физика магнитных материалов и наноструктур, УрО РАН, 2020.
10. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // УФН. 2008. Т. 178. №.12. С. 1336–1348.
11. Грюнберг П.А. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее // УФН. 2008. Vol. 178. N.12. P. 1349–1358.
12. Novel Magnetic Nanostructures: Unique Properties and Applications. Natalia Domracheva, Maria Caporali, Eva Rentschler. Elsevier. 2018.

Дополнительная литература:

1. Alex Hubert, Rudolf Shafer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998.
2. H, Zabel, S.D. Bader. Magnetic Heterostructures – Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
3. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient - Gutfleisch - 2011 - Advanced Materials - Wiley Online Library [Electronic resource]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.201002180> (accessed: 15.04.2022).
4. Займан Д. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1966.

5. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. М.: Наука, 1967.
6. Смит Я. и Вейсс Х. Ферриты. М.: Издательство иностранной литературы, 1962.

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели

Доктор физико-математических наук, профессор Перов Николай Сергеевич; e-mail: perov@magn.ru.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий и вопросов к коллоквиуму:

1. Диамагнетизм свободного электронного газа. Спиновый парамагнетизм. Закон Кюри. Ферромагнетизм. Молекулярное поле Вейсса. Обменное взаимодействие. Ферромагнитные домены. Энергия анизотропии. Доменная стенка. Антиферромагнетики. Ферриты.
2. Кинетическое уравнение. Электро- и теплопроводность. Времена релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефектах. Электрон-фононные столкновения. Нормальные процессы, процессы переброса. Магнитосопротивление и эффект Холла.
3. Электрические и гальваномагнитные измерения как методы изучения электронной структуры кристаллов и состава примесей в полупроводниках.
4. Рентгенография: методы исследования идеальной и реальной структуры.
5. Эффект Мёссбауэра. ЭПР, ЯМР.
6. Определение параметров кривой намагничивания и петли гистерезиса в статическом и динамическом режимах измерения.
7. Обменное взаимодействие.
8. Прямой и косвенный обмен. Взаимодействие Рудермана-Киттеля-Касуйи-Иосида.
9. Физическая сущность микромагнитной структуры.
10. Различие между микромагнитной и магнитной структурой.
11. Основные энергетические вклады при расчете микромагнитной структуры.
12. Роль магнито-дипольного взаимодействия на формирование микромагнитных структур.
13. Влияние размеров образца на микромагнитную структуру.
14. Влияние объемной и поверхностной магнитной анизотропии на микромагнитную структуру.
15. Влияние намагниченности на характер микромагнитной структуры.
16. Микромагнитные структуры в тонких пленках, микропроводах, совершенных частицах.
17. Критерий однодоменности.
18. Особенности процессов перемагничивания низкоразмерных магнитных структур.
19. "Ripple" структура, "curling и buckling" моды перемагничивания.
20. Микромагнитные структуры в многослойных тонкопленочных структурах.
21. Экспериментальные методы исследования микромагнитных структур.

Вопросы для промежуточной аттестации - зачета:

1. Сформулировать основы зонной теории магнетизма.
2. Рассчитать магнитные моменты атомов переходных 3d элементов (Fe, Ni, Co).
3. Построить температурную зависимость восприимчивости идеального парамагнитного газа.

4. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу.
5. Парамагнетизм систем слабозаимодействующих атомов. Функции Бриллюэна. Закон Кюри и Кюри-Вейсса.
6. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Спиновые волны. Магноны.
7. Температурная зависимость спонтанной намагниченности при низких температурах.
8. Косвенное и прямое обменное взаимодействие в магнитных материалах различных типов.
9. Гамильтониан системы электронов и ионов. Адиабатическое приближение. Метод Хартри-Фока.
10. Электронный газ. Парамагнетизм и диамагнетизм электронного газа. Критерий ферромагнетизма электронного газа.
11. Уровни Ландау. Осцилляция магнитной восприимчивости. Циклотронный резонанс.
12. Примесные уровни и их влияние на энергетический спектр. Распределение зарядовой и спиновой плоскости вокруг примеси.
13. Магнитная восприимчивость разбавленных растворов.
14. Виды магнитных структур: ферромагнетики, коллинеарные ферромагнетики, неколлинеарные антиферромагнетики, гелимагнетики, ферримагнетики и их магнитные характеристики.
15. Анизотропия магнитной энергии. Константы анизотропии и их измерение. Магнитоупругая энергия.
16. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм. Процессы намагничивания: смещение доменных границ, вращение, парапроцесс.
17. Теория магнитного гистерезиса и коэрцитивной силы. Прямоугольная петля гистерезиса.
18. Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля. Продольная и поперечная восприимчивость и их температурная зависимость.
19. Теория ферримагнетизма в приближении молекулярного поля. Основные типы температурной зависимости самопроизвольной намагниченности.
20. Термодинамическая теория ферромагнитного превращения. Критические индексы.
21. Магнитные фазовые переходы типа спиновой переориентации, вызванные сильным магнитным полем и изменением температуры.
22. Ферро- и ферримагнетики в переменных полях. Уравнение Ландау и Лифшица для движения магнитного момента.
23. Ферромагнитный, ферримагнитный и антиферромагнитный резонансы.
24. Магнитооптические эффекты при отражении, преломлении и прохождении света через прозрачные среды.
25. Тензор диэлектрической проницаемости. Зависимость его компонентов от частоты.

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, включающем 3 вопроса. Уровень знаний обучающегося по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», обучающийся получает общую оценку «допуск».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения	Критерии оценивания знаний, умений и навыков
--------------------	--

дисциплины	неудовлетворительно/ недопуск	удовлетворительно/ допуск	хорошо/ допуск	отлично/ допуск
Знания	Отсутствие знаний основных законов физики магнитных явлений	В целом успешные, но не систематические знания основных законов физики магнитных явлений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов физики магнитных явлений	Успешные и систематические знания основных законов физики магнитных явлений
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов физики магнитных явлений для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания основных законов физики магнитных явлений для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов физики магнитных явлений для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов физики магнитных явлений для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области физики магнитных явлений	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области физики магнитных явлений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области физики магнитных явлений	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области физики магнитных явлений