



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ФГБОУ ВО «ИГУ»

**Принято**

Ученым советом ФГБОУ ВО «ИГУ»  
протокол № 7 от «22» 02 2018 г.

**Утверждаю**

Первый проректор ФГБОУ ВО «ИГУ»,  
профессор

 А.Ф. Шмидт  
2018 г.

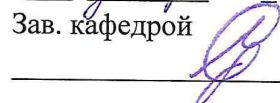


**Программа кандидатского экзамена по специальности  
01.04.11 Физика магнитных явлений**

Согласовано с УМС Педагогического  
института  
(протокол № 5 от «30» января 2018 г.)

Председатель УМС  
 /М.С.Павлова/

Программа рассмотрена на заседании  
кафедры физики (протокол № 4 от  
«25» декабря 2017 г.)

Зав. кафедрой  
 /А.В. Семиров/

Иркутск 2018

**ЧАСТЬ I. ПРОГРАММА**  
**КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**  
**01.04.11 Физика магнитных явлений**  
(часть I – основная)

**СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

**Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: физика магнитных явлений, магнитооптика, микромагнетизм, магнитные материалы. Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии по физике при участии Института радиотехники и электроники РАН и Московского физико-технического университета (ПРОГРАММА МИНИМУМ (типовая, утверждена приказом Минобрнауки России от 8 октября 2007 г. № 274))

**1. Общие понятия**

Магнетизм. Магнитное поле. Магнитный момент. Векторы магнитной индукции, намагниченности, напряженности магнитного поля. Магнитный поток. Магнитный заряд. Магнитный диполь.

**2. Магнитные структуры и типы магнетиков**

2.1. Упорядоченные магнитные структуры. Магнитная структура. Магнитная подрешетка. Ферромагнитная структура. Антиферромагнитная структура. Слабый ферромагнетизм. Ферримагнитная структура. Спиральная магнитная структура. Магнитная ячейка. Магнитная нейтронография.

2.2. Неупорядоченные магнитные структуры. Спиновое стекло.

**3. Магнитные взаимодействия**

Обменное взаимодействие и его энергия. Косвенное обменное взаимодействие. Спин-орбитальное взаимодействие. Магнитное дипольное взаимодействие. Сверхтонкое взаимодействие.

**4. Магнитная анизотропия**

Энергия магнитной анизотропии. Константы магнитной анизотропии. Эффективное магнитное поле анизотропии. Оси магнитной анизотропии. Плоскости легкого и трудного намагничивания. Магнитная анизотропии типа “легкая ось”, “легкая плоскость”. Наведенная магнитная анизотропия.

**5. Магнитоупругие явления**

Магнитострикция. Магнитоупругая энергия. Магнитоупругие постоянные. Константы магнитострикции. Магнитоупругие волны. Магнитоупругое затухание.

**6. Кинетические явления**

Гальваномагнитные эффекты. Эффекты Холла. Магниторезистивные эффекты. Гальванотермомагнитные эффекты. Термомагнитные эффекты.

**7. Домены и доменные границы**

Магнитный домен. Доменная граница (Блоха, Нееля). Доменная структура. Полосовая и лабиринтная доменные структуры. Цилиндрический магнитный домен. Решетка ЦМД.

**8. Процессы намагничивания, перемагничивания и размагничивания**

Внешнее магнитное поле. Намагничивание. Гистерезис намагничивания. Эффект Баркгаузена. Магнитное насыщение. Подвижность и эффективная масса доменной границы. Перемагничивание. Коэрцитивная сила. Петля магнитного гистерезиса. Магнитные восприимчивость и проницаемость. Размагничивание переменным полем, нагревом. Размагничивающее и внутреннее магнитное поле.

**9. Магнитные фазовые переходы и критические явления**

Фазовый переход. Переходы первого и второго рода. Диаграмма состояний. Критическая температура. Температура Кюри. Температура Нееля.

### **10. Спиновые волны**

Ферромагнитный резонанс. Магнитостатические моды. Спиновые волны. Спин-волновой резонанс.

### **11. Магнитооптика**

Магнитооптические эффекты: эффект Фарадея, эффект Коттона-Мутона, Эффект Керра. Фотомагнитные эффекты. Гиромагнитная среда.

### **12. Характеристики магнитных материалов**

Магнито-мягкий материал. Магнито-твердый материал. Магнитный материал с прямоугольной петлей гистерезиса. Сверхвысокочастотный магнитный материал. Магнитный материал для постоянных магнитов. Магнитный материал для носителей записи. Материал с цилиндрическими магнитными доменами. Магнестрикционный материал. Материал для термомагнитной записи информации. Текстурированный магнитный материал.

### **13. Магнитные материалы**

Феррит-гранат. Феррит-шпинель. Ортоферрит. Гексаферрит. Пермаллой.

### **14. Параметры магнитных материалов**

Магнитные потери. Магнитные потери на гистерезис. Магнитные потери на вихревые токи. Магнитное сопротивление. Время и скорость перемагничивания. Коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса.

## **РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ**

### **а) основная литература**

1. Боровик, Е.С. Лекции по магнетизму [Текст] : учебное пособие / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Физматлит, 2005. - 511 с (10 экз.)
2. Кринчик, Г. С. Физика магнитных явлений [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г. С. Кринчик. - 2-е изд., доп. - М. : Изд-во МГУ, 1985. - 336 с. -2 экз
3. Тикадзуми С.. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.:Мир, 1983.
4. Тикадзуми С.. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение. М.:Мир, 1987.
5. Вонсовский, С. В. Магнетизм [Текст] : научное издание / С. В. Вонсовский. - М. : Наука, 1984. - 208 с. – 2 экз.

### **б) дополнительная литература**

1. Кекало И.В.. Нанокристаллические магнитомягкие материалы. Москва. МИСИС. 2000.
2. Калинин Б.А. Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. – М.: МИФИ, 2007.
3. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Электронный ресурс] / А. И. Гусев. - Москва : Физматлит, 2009. - 416 с. : ил. - Режим доступа: ЭБС "Издательства Лань". - Неогранич. доступ.
4. Хандрих К., Коте С.. Аморфные ферро- и ферримагнетики. М.: Мир, 1982.
5. Петров, А.Л. Структура и свойства неупорядоченных твердых тел [Текст] : учеб. пособие / А. Л. Петров, А. А. Гаврилюк, С. М. Зубрицкий ; ред. Л. А. Щербаченко. - Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2004. - 77 с. (14 экз.)
6. Магнитные материалы микро- и наноэлектроники [Электронный ресурс] : учеб. пособие. - ЭВК. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. - Режим доступа: . - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ.

**ЧАСТЬ II. ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО  
СПЕЦИАЛЬНОСТИ 01.04.11 Физика магнитных явлений  
(часть II –дополнительная)**

**Содержание дополнительной части программы**

**1. Модели магнитной доменной структуры и доменных границ**

Модели элементарной доменной структуры с замкнутым, частично замкнутым магнитным потоком и с открытыми полюсами. Переход от массивных к тонким кристаллам. Теория Малека и Камберского. Критические размеры однодоменности и абсолютной однодоменности. Микромагнитные структуры в частицах. Магнитная структура граничного слоя. Блоховский, неелевский, блочный типы доменных границ. Одномерные и двумерные микромагнитные структуры в тонких пленках. Узкие границы в сверханизотропных ферромагнетиках.

**2. Элементы динамики доменных границ**

Механизм движения доменных границ в магнитодиэлектриках с позиции уравнения Ландау-Лифшица. Эффективная масса доменной границы. Уравнение Дёринга. Релаксация и резонанс доменных границ. Низкочастотная динамика доменной структуры в пленках с перпендикулярной анизотропией. Запись информации на доменах и доменных границах.

**3. Динамические свойства проводящих магнетиков**

Влияние вихревых токов на составляющие комплексной магнитной проницаемости и потери энергии на перемагничивание ферромагнетиков. Роль доменных границ в формировании потерь энергии. Пути снижения потерь энергии в электротехнической стали.

**4. Аморфные и нанокристаллические сплавы**

Способы получения. Влияние технологических воздействий на микроструктуру сплавов. Магнитные структуры аморфных сплавов металл-металлоид d- и f-переходных элементов. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов в сравнении со свойствами кристаллических аналогов.

**5. Магнетизм редкоземельных металлов и сплавов на их основе**

Электронная структура редкоземельных элементов (R). Формирование магнитного момента 4f -электронной оболочки. Кристаллическая структура редкоземельных металлов. Основные взаимодействия в R-металлах, определяющие их магнетизм. Магнитная структура R-металлов. Спонтанная намагниченность, магнитокристаллическая анизотропия и магнитострикционные свойства R-металлов и их сплавов.

Особенности формирования магнитных структур в соединениях редкоземельных элементов с 3d –элементами (двухподрешеточная модель). Магнитная анизотропия и анизотропная магнитострикция (R-3d)- соединений. Магнитные материалы на основе этих соединений.

**6. Тонкие магнитные плёнки**

Фундаментальные свойства магнетиков в тонкоплёночном состоянии. Спонтанная намагниченность тонких плёнок в теориях молекулярного поля и спиновых волн. Роль поверхности и размерного фактора в формировании магнитной анизотропии. Структурно-чувствительные магнитные свойства плёнок.

Магнитные свойства многослойных плёнок. Влияние контактного и косвенного обменного взаимодействия на спонтанную намагниченность, динамические и гистерезисные свойства. Механизмы межслойной магнитостатической связи. Особенности гистерезисных свойств и доменной структуры.

Электросопротивление и магнитосопротивление тонких плёнок. Магнитоэлектрические явления в многослойных плёнках. Гигантское магнитосопротивление в магнитных сверхрешётках и сэндвичах. Баллистическое магнитосопротивление.

## **7. Магнитоимпедансный и стрессимпедансный эффекты в магнитомягких проводниках**

Импеданс проводящих магнитомягких материалов. Высокочастотная магнитная проницаемость и импеданс планарных магнитомягких сред. Магнитоимпеданс сред с осевой симметрией. Стрессимпедансный эффект. Перспективы практического применения магнитоимпедансного и стрессимпедансного эффектов.

### **Литература**

#### **а) основная литература**

6. Боровик, Е.С. Лекции по магнетизму [Текст] : учебное пособие / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Физматлит, 2005. - 511 с (10 экз.)
7. Кринчик, Г. С. Физика магнитных явлений [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г. С. Кринчик. - 2-е изд., доп. - М. : Изд-во МГУ, 1985. - 336 с. -2 экз
8. Тикадзуми С.. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.:Мир, 1983.
9. Тикадзуми С.. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение. М.:Мир, 1987.
10. Вонсовский, С. В. Магнетизм [Текст] : научное издание / С. В. Вонсовский. - М. : Наука, 1984. - 208 с. – 2 экз.

#### **б) дополнительная литература**

7. Кекало И.В.. Нанокристаллические магнитомягкие материалы. Москва. МИСИС. 2000.
8. Калинин Б.А. Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. – М.: МИФИ, 2007.
9. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Электронный ресурс] / А. И. Гусев. - Москва : Физматлит, 2009. - 416 с. : ил. - Режим доступа: ЭБС "Издательства Лань". - Неогранич. доступ.
10. Хандрих К., Коте С.. Аморфные ферро- и ферримагнетики. М.: Мир, 1982.
11. Петров, А.Л. Структура и свойства неупорядоченных твердых тел [Текст] : учеб. пособие / А. Л. Петров, А. А. Гаврилюк, С. М. Зубрицкий ; рец. Л. А. Щербаченко. - Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2004. - 77 с. (14 экз.)
12. Магнитные материалы микро- и нанoeлектроники [Электронный ресурс] : учеб. пособие. - ЭВК. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. - Режим доступа: . - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ.

#### **ПРОЦЕДУРА ПРОВЕДЕНИЯ КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА**

Кандидатский экзамен проводится в соответствии с Приказом Минобрнауки России от 28.03.2014 N 247"Об утверждении Порядка прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечня" (Зарегистрировано в Минюсте России 05.06.2014 N 32577) и Порядком работы экзаменационных комиссий по приему кандидатских экзаменов в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» (утвержден приказом №69 от 29.01.2018 г.)

Кандидатский экзамен проводится по билетам, билет включает два вопроса.

Уровень знаний соискателя ученой степени оценивается на “отлично”, “хорошо”, “удовлетворительно”, “неудовлетворительно”.

#### **ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ**

##### **Основные теории магнетизма**

1. Магнитное поле. Магнитный момент.
2. Векторы магнитной индукции, намагниченности, напряженности магнитного поля.

3. Магнитный поток. Магнитный заряд. Магнитный диполь.
4. Спин и спиновой магнитный момент электрона. Эффект Зеемана.
5. Диамагнетизм электронной оболочки атома. Парамагнитные вещества в сильных и слабых магнитных полях. Парамагнитные вещества.
6. Свойства электронов проводимости в металле. Парамагнетизм свободных электронов. Диамагнетизм свободных электронов.
7. Упорядоченные магнитные структуры. Магнитная подрешетка.
8. Классификация магнетиков. Ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики, слабые ферромагнетики, вещества с обменной анизотропией. Спиральная магнитная структура.
9. Магнитная ячейка. Неупорядоченные магнитные структуры. Спиновое стекло. Основные свойства ферромагнетиков.
10. Основы термодинамики магнитных явлений. Теплоемкость. Особенности термодинамического поведения магнетиков. Вычисление магнитного момента тела.
11. Формальная теория ферромагнетизма. Гипотеза о существовании областей спонтанной намагниченности (ферромагнитных доменов).
12. Природа элементарных носителей магнитного момента в ферромагнетиках. Обменная энергия. Молекулярная теория ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Температура Кюри.
13. Обменное взаимодействие. Косвенное обменное взаимодействие. Спин-орбитальное взаимодействие. Энергия обменного взаимодействия.
14. Энергия кристаллографической магнитной анизотропии. Энергия магнитострикционной деформации (магнитоупругая энергия). Магнитоупругая энергия. Энергия магнитоэластического поля.
15. Линейная магнитострикция. Объемная магнитострикция. Механострикция и  $\Delta E$  – эффект.
16. Энергия магнитной анизотропии. Константы магнитной анизотропии. Эффективное магнитное поле анизотропии. Плоскости легкого и трудного намагничивания. Магнитная анизотропия типа «легкая ось», «легкая плоскость». Наведенная магнитная анизотропия.
17. Магнитострикция. Магнитоупругая энергия, магнитоупругие постоянные. Константы магнитострикции. Магнитоупругие волны. Магнитоупругое затухание.
18. Фазовый переход. Переходы первого и второго рода. Диаграмма состояний. Критическая температура. Температуры Кюри и Нееля.

#### **Магнетики в постоянных и переменных полях**

19. Магнитный домен. Граничный слой между областями спонтанной намагниченности. Доменные границы Блоха и Нееля.
20. Модели доменной структуры в одноосных и многоосных ферромагнетиках. Магнито-многоосный кристалл. Однодоменная структура.
21. Полосовая и лабиринтная доменные структуры. Цилиндрический магнитный домен.
22. Движение границ между областями с антипараллельной и взаимно перпендикулярной намагниченностью.
23. Теория критического поля. Теория начальной и обратной проницаемости в идеально однородной среде при наличии в ней неоднородных упругих напряжений.
24. Начальный участок кривой намагничивания. Гистерезис намагничивания. Эффект Баркгаузена.
25. Обратимые и необратимые процессы смещения границ. Обратимые процессы вращения. Теория Акулова.
26. Влияние упругих напряжений на намагничивание ферромагнетиков. Необратимые явления перемагничивания.
27. Теория гистерезиса на основе процесса смещения границ в однородной среде при наличии в ней неоднородных напряжений и включений (Кондорский, Керстен).

28. Гистерезис, обусловленной задержкой роста зародышей перемагничивания. Гистерезис, обусловленный необратимым процессом вращения.
29. Скин эффект. Дисперсия магнитной проницаемости. Уравнение движения доменной стенки.
30. Электрические свойства ферромагнетиков. Теплопроводность.
31. Гальваномагнитные эффекты. Эффекты Холла. Четные и нечетные гальвано-термомагнитные эффекты.
32. Термомагнитные эффекты. Оптические свойства ферромагнетиков.
33. Ядерный магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс.
34. Магнитооптические эффекты: эффект Фарадея, эффект Коттона-Мутона, эффект Керра. Фотомагнитные эффекты. Гиромагнитная среда.

#### **Магнитные материалы**

35. Магнитомягкие материалы. Магнитный материал с прямоугольной петлей гистерезиса. Сверхвысокочастотный магнитный материал. Железо, железокремнистые, железоникелевые сплавы и т.п.
36. Магнито-твердые материалы. Постоянные магниты.
37. Магнитный материал для носителей записи. Материал с цилиндрическими магнитными доменами.
38. Магнитострикционный материал.
39. Материал для термомагнитной записи информации. Текстурированный магнитный материал. Феррит-гранат. Феррит-шпинель. Ортоферрит. Гексаферрит. Пермаллой.
40. Основные способы получения. Вакуумные технологии. Основные достоинства и недостатки.
41. Быстро закаленные сплавы. Особенности процессов намагничивания тонких магнитных пленок.
42. Структура доменных границ. Современные устройства на тонких магнитных пленках.
43. Магнитные потери. Магнитные потери на гистерезис. Магнитные потери на вихревые токи. Магнитное сопротивление.
44. Время и скорость перемагничивания. Коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса.

**Разработчики:** А.В. Семиров, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики;  
А.А. Моисеев, к.ф.-м.н, доцент кафедры физики