

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М. Н. МИХЕЕВА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

Под редакцией

В. В. Устинова, Н. В. Мушников, В. Ю. Ирхина

Екатеринбург

2020

УДК 537.6
ББК 22.334
Ф50

Ф50 Физика магнитных материалов и наноструктур / Под ред. В. В. Устинова, Н. В. Мушников, В. Ю. Ирхина. — Екатеринбург : Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, 2020. — 664 с. : ил.

ISBN 978-5-6045774-0-0

Коллективная монография включает главы, посвященные наиболее важным проблемам современной физики магнитных явлений — как теоретическим, так и экспериментальным. Они написаны ведущими учеными Института физики металлов имени М. Н. Михеева, активно работающими в соответствующих областях магнетизма. Помимо традиционных вопросов физики магнитных явлений (многоэлектронные модели магнетизма, магнитные структуры), рассмотрены наиболее актуальные темы, получившие развитие в последние годы (спинтроника, магнитные наноматериалы). Монография выходит к 110-летию Сергея Васильевича Вонсовского и является современным продолжением его классической монографии «Магнетизм», опубликованной в 1971 году.

Книга рассчитана на научных сотрудников, аспирантов и студентов, занимающихся изучением проблем магнетизма.

Коллектив авторов:

В. И. Анисимов, Н. В. Баранов, Н. Г. Бебенин, А. Б. Борисов, С. В. Вонсовский,
Е. Г. Герасимов, С. В. Жавков, В. Ю. Ирхин, А. А. Катанин, Е. А. Кравцов,
И. В. Леонов, В. А. Лукшина, В. В. Меньшенин, М. А. Милчев, Н. В. Мушников,
А. Г. Попов, А. П. Поталов, Н. В. Селезнева, Ю. Н. Скрябин, Ю. П. Сухоруков,
В. В. Устинов

УДК 537.6
ББК 22.334

ISBN 978-5-6045774-0-0

© ИФМ УрО РАН, 2020
© Авторы, 2020

Оглавление

Предисловие. О новых магнитных материалах и тенденциях развития современного магнетизма	11
<i>В. В. Устинов</i>	
Пролог, или ретроспективный взгляд на перспективы магнетизма	17
<i>С. В. Вансовский</i>	
О развитии фундаментальных исследований в СССР по некоторым основным проблемам физики твердого тела	18
Физика магнитных явлений	20
Физика полупроводников	24
Исследования тонкой электронной структуры, дефектности и поверхностных свойств твердых тел	24
Физика прочности и пластичности, физическое металловедение	27
«Информатика» в различных областях ФТТ	29
Научное приборостроение для целей ФТТ	31
Некоторые соображения по совершенствованию организации фундаментальных исследований и их практического использования	35
Послесловие к прологу	36
<i>В. Ю. Иркин, Н. В. Мушкетков</i>	

Часть I

Спинтроника, наномагнетизм и перспективные магнитные материалы

Глава 1. Спинтроника магнитных металлических наноструктур	41
<i>В. В. Устинов и М. А. Милчев</i>	
Введение	41
1.1. Магнитные металлические сверхрешетки с гигантским магнитосопротивлением	43
1.1.1. Микроскопический механизм гигантского магниторезистивного эффекта	44
1.1.2. Осциллирующее межслойное обменное взаимодействие в сверхрешетках с гигантским магнитосопротивлением	47
1.1.3. Влияние толщины ферромагнитных слоев на магнитные и магниторезистивные свойства сверхрешеток	50
1.1.4. Оптимизация функциональных характеристик сверхрешеток	58
1.2. Металлические спиновые клапаны	62
1.2.1. Композиция и функциональные характеристики спиновых клапанов	62
1.2.2. Спиновые клапаны с синтетическим антиферромагнетиком	72
1.2.3. Спин-флоп переход в синтетическом антиферромагнетике и изменение одноподобной анизотропии в спиновых клапанах	73

1.2.4. Особенности перематрирования сплавных фазовых слоев с пленкой галтания	76
1.2.5. Сплавной фазы со слоем дисперсии как инструмент для изучения гетерогенности	78
1.3. Наноструктуры с туннельным магнитосопротивлением	81
1.3.1. Механизм туннельного магнитосопротивления	83
1.4. Газовые уравнения спиновой спиновой	87
1.4.1. Экспериментальный спиновой транспорт в проводящих парамагнитных	88
1.4.2. Экспериментальный спиновой транспорт в проводящих диэлектрических магнитных структурах	98
1.4.3. Практические условия для описания электронного спинового транспорта в ограниченных проводниках	100
Заключение	102
Литература к главе 1	103
Глава 2. Нанокристаллические магнитные материалы	107
<i>И. В. Музалов, А. Г. Попов, А. П. Попов, В. А. Лукьянов</i>	
Введение	107
2.1. Аморфные и нанокристаллические магнитные материалы	108
2.1.1. Механизм формирования аморфной магнитной аннизотропии	109
2.1.2. Материалы с максимальной магнитной проницаемостью	110
2.1.3. Материалы с низким потерей на перематрирование	115
2.1.4. Материалы с высокой остаточной индукцией и постоянной магнитной проницаемостью	118
2.1.5. Нанокристаллические сплавы с высокой температурной и временной стабильностью	119
2.2. Высокопрочные магнитные материалы для гистерезисных двигателей	126
2.2.1. Дисперсионное твердение в Fe-Co-Si	127
2.2.2. Влияние добавок W и Ga на прочность и пластичность	128
2.2.3. Сплавы с пониженным содержанием Co и Si	132
2.3. Нанокристаллические материалы для постоянных магнитов	136
2.3.1. Зависимость магнитной силы от размера зерен	136
2.3.2. Сплавы Sm-Co-Fe-Cu-Zr для высокотемпературных постоянных магнитов	139
2.3.3. Нанокристаллические быстрозакаленные сплавы Nd-Fe-B	142
2.3.4. Нанокристаллические магнитотвердые сплавы R-Fe-B (R = Pr, Nd), полученные методом ионно-пластической деформации кручения	150
2.3.5. Ионно-пластическая деформация быстрозакаленного сплава Nd ₂ Fe ₁₄ B	155
2.3.6. Равноосиальное угловое прессование сплавов R-Fe-B (R = Pr, Nd) — новый метод получения большеобъемных микрокристаллических постоянных магнитов	162
Заключение	165
Литература к главе 2	166

Глава 3. Магнетизм соединений со слоистой кристаллической структурой 171

И. В. Баранов, Е. Г. Герасимов, Н. В. Семенов, Н. В. Мухомов

Введение	171
3.1. Тройные соединения RT_2Se_2 и KT_2Ge_2 с тетрагональной слоистой структурой	172
3.1.1. Кристаллическая структура соединений RT_2Se_2	172
3.1.2. Магнетизм 3d переходных металлов в соединениях RT_2Se_2	173
3.1.3. Магнитные структуры в подрешке марганца и общие закономерности в соединениях RMn_2Z_2	176

3.1.4. Магнитная аннизотропия соединений RMn_2Z_2	178
3.1.5. Магнитный фазовый переход первого рода мезоскопической антиферромагнетик — мезоскопической ферромагнетик	180
3.1.6. Магнитный фазовый переход ферромагнетик — плоскостной антиферромагнетик	185
3.1.7. Магнитные флуктуации в соединениях RMn_2Z_2	186
3.2. Редкоземельные соединения со структурой типа $NbFe_2Ge_2$	188
3.2.1. Кристаллическая и магнитная структуры соединений RT_2Z_6	188
3.2.2. Формирование в слое магнитных структур типа двойной плоской спирали	190
3.2.3. Магнитные структуры в соединениях RT_2Z_6 с магнитными атомами R	192
3.2.4. Магнитная аннизотропия и магнитные фазовые переходы в соединениях $GdMn_2Si_4$ и $TbMn_2Si_4$	195
3.2.5. Сопоставление и индукционные поля магнитные фазовые переходы между антиферромагнитным и ферромагнитным состояниями	201
3.3. Магнитные свойства интеркарированных диалкоголидов переходных металлов со слоистой структурой	203
3.3.1. Методы получения интеркарированных диалкоголидов переходных металлов и особенности их кристаллической структуры	204
3.3.2. Эффективный магнитный момент атомов 3d-металлов, интеркарированных в структуру $TbSe_2$	208
3.3.3. Дальний магнитный порядок и магнитные структуры в интеркарированных соединениях M_nTX_2	210
3.3.4. Индуцированные полями фазовые переходы, формирование метастабильных состояний и магнитный гистерезис в соединениях Fe_nTlX_2	218
3.3.5. Магнитные свойства диалкоголидов титана, интеркарированных редкоземельными элементами	221
Заключение	222
Литература к главе 3	223

Глава 4. Магнитные полупроводники — материалы спинтроники 228

Ю. П. Суровиков

Введение	228
4.1. Гетероструктуры на основе магнитных полупроводников — материалы для спинтроники	230
4.1.1. Гетероструктура ферромагнитный полупроводник/полупроводник	230
4.1.2. Спин-инжекционный инжектор	232
4.2. Материалы для спинтроники на основе магнитных полупроводников	234
4.2.1. $HgCr_2Se_4$: усиление спиновых волн диффузией носителей заряда	234
4.2.2. p-n-переход в $HgCr_2Se_4$: структура с гигантским магнитосопротивлением	236
4.2.3. Спираль-магнетоника: магнетонное состояние в ферромагнитной пленке $CoFe_2O_4$	237
4.2.4. Ферромагнитные полупроводники с туннелированием спин-поляризованных электронов	238
4.3. Технические устройства на основе магнитных полупроводников	241
4.3.1. Спиновый клапан	241
4.3.2. Модулятор инфракрасного излучения	242
4.3.3. «Магнитная линза» на основе гетероструктуры магнит/ВТСП	244
4.4. Нанокристаллические магнитные полупроводники — функциональные материалы для спинтроники	245
4.4.1. Нанокристаллической антиферромагнитный полупроводник CuO	245

4.4.2. Методы создания высококачественной нанокерамики	246
4.4.3. Нанокристаллический $Y_2Fe_2O_7$ — материал для модуляторов электромагнитного излучения	247
4.4.4. Нанокристаллический CaO — материал для селективных полупроводников солнечной энергии	248
Заключение	249
Литература к главе 4	250
Глава 5. Магнитотранспорт в системах с колоссальным магнетосопротивлением	256
<i>И. Г. Бобров</i>	
Введение	256
5.1. Кристаллическая и магнитная структура	257
5.2. Основные данные об электронной зонной структуре	259
5.3. Кинетические эффекты при $T < T_C$	260
5.4. Кинетические эффекты в области фазового перехода второго рода	263
5.5. Кинетические эффекты в области фазового перехода первого рода	267
5.6. Оптические свойства	270
Заключение	271
Литература к главе 5	272

Часть II

Теория магнетизма и моделирование магнитных систем

Глава 6. Современное модельное описание магнетизма	277
<i>В. Ю. Иван</i>	
Введение	277
6.1. Полярная модель и модель Хаббарда	278
6.1.1. Атомное представление и метод многоэлектронных операторов	280
6.1.2. Электронный спектр в модели Хаббарда и переход металл—изолятор	287
6.1.3. Ферромагнетизм сильно коррелированных d -систем	294
6.2. s - d обменная модель и модель Андерсона	302
6.2.1. Электронные состояния в s - d обменной модели	307
6.2.2. s - d обменная модель с узкими зонами и t - J модель	311
6.2.3. Сопоставление магнитных переходов металлов	314
6.2.4. s - f обменная модель и свойства редземельных металлов	317
6.2.5. Эффект Кюндли	320
6.2.6. Свойства аномальных f -соединений	325
Заключение	335
Литература к главе 6	337
Глава 7. Исследование электронной структуры соединений с сильными электронными корреляциями в рамках теории динамического среднего поля	342
<i>И. В. Лосово и В. И. Алексеев</i>	
Введение	342
7.1. Модельный подход в теории сильно коррелированных соединений	345
7.2. Методы расчета электронной структуры соединений с коррелированными электронами	348
7.2.1. Основы теории функционала электронной плотности (DFT)	348
7.2.2. Приближение DFT+ U в случае сильно коррелированных электронных систем	352

7.3. Теория динамического среднего поля (DMFT)	354
7.3.1. Методы решения прериссовой модели Андерсона: алгоритм Хираи—Ива (HF-QMC)	356
7.3.2. Методы решения прериссовой модели Андерсона: метод кластерного Монте-Карло с нулевым временем (CT-QMC)	358
7.4. Комбинированный метод теории функционала плотности и динамической теории среднего поля DFT+DMFT	361
7.5. Результаты метода DFT+DMFT для магнитных изоляторов и сильно коррелированных металлов	364
7.5.1. Соединение $SrVO_3$: пример сильно коррелированного металла с одними электронами в расширенной t_2 зоне	365
7.5.2. Кооперативный эффект Яна—Теллера и орбитальное упорядочение в парамагнитном диэлектрике $KCaF_7$	369
7.5.3. Эффект кулоновских корреляций в рамках описания электронных, магнитных и решеточных свойств железа	375
7.5.4. Соединение V_2O_5 : переход Мотта парамагнитный металл—диэлектрик	385
7.5.5. Электронные, магнитные и решеточные свойства коррелированных моноксидов MnO , FeO , CoO и NiO : переход Мотта и возникновение локальных моментов под давлением	392
Заключение	401
Литература к главе 7	402

Глава 8. Трехмерные магнитные системы

<i>А. Б. Березин</i>	
Введение	406
8.1. Трехмерные спиральные структуры в ферромагнетике (обыкновенное приближение). Точные решения	409
8.2. Пространственные структуры в многомерных антиферромагнетиках	415
8.3. Гексагональные структуры в кубических кристаллах магнетиков	423
8.4. Решетки спинов	428
8.5. Трехмерные спиновые в тонких пленках кристаллов магнетиков	432
8.6. Фазовая диаграмма для плоской изотропной гелимагнетика	435
8.7. Кристаллы боббер (ползунков)	439
8.8. Экспериментальное наблюдение кристаллов боббера	442
8.9. Взаимодействие спинов	447
Заключение	452
Литература к главе 8	453

Глава 9. Локализационный магнетизм в низкоразмерных системах

<i>А. А. Копылов и В. Ю. Иван</i>	
Введение	456
9.1. Квазидвумерные магнетики с антозерновым типом «слепая ось»	459
9.1.1. Неэквивалентные представления в теории квазидвумерных ферро- и антиферромагнетиков и СВТ квазидвумерных магнетиков	459
9.1.2. Перезервировка вертикали взаимодействия и подрезервировочная магнетичность в точном приближении	468
9.1.3. Теоретико-числовое описание квазидвумерных магнетиков с локализованными моментами	470
9.1.4. Описание различных температурных режимов в рамках резонансного подхода и $1/N$ -разложения	473

9.1.5. Теоретическое описание экспериментальных данных нематичности в температур Неллэ слоистых систем	479
9.2. Квазидвумерные магнетики с изотропной типа «легкая плоскость»	485
9.3. Слоистые изотропные антиферромагнетики с треугольной решеткой	489
9.4. Квазидвумерные изотропные антиферромагнетики	491
9.4.1. Модель в самоорганизанный спин-волновой подход	491
9.4.2. Процедура билингвизма	493
9.4.3. Приближение неэквивалентного среднего поля для билингвизированного гамильтониана и поправки первого порядка по $1/z$	494
9.4.4. Сравнение с экспериментальными данными	497
Заключение	497
Литература к главе 9	499
Глава 10. Дизайн оптимальных магнитных макросистем	503
<i>С. В. Жилин</i>	
Введение	503
10.1. Формулировка задачи оптимизации	505
10.2. Оптимизация магнитных систем из постоянных магнитов	505
10.2.1. Получение максимального магнитного поля и максимального градиента магнитного поля в заданной области	505
10.2.2. Оптимальные магнитные системы для изолятора Фарадея	511
10.2.3. Оптимизация магнитных систем для создания однородного поля	513
10.3. Оптимизация асимметрично-симметричных магнитных систем с магнитными элементами	516
10.4. Практические приложения	520
10.4.1. Магнитные системы для ячеек Фарадея	520
10.4.2. Магнитные системы для ЯМР-релаксометра	520
10.4.3. Магнитные системы для фокусировки электронных пучков	525
Заключение	527
Литература к главе 10	527

Часть III

Физические методы анализа и диагностики магнетизма

Глава 11. Симметричный анализ магнитных материалов	531
<i>В. В. Мельников</i>	
Введение	531
11.1. Объемная магнитная структура и ориентационное состояние	533
11.2. Преобразования векторов антиферромагнетизма	538
11.3. Антиферромагнитный фотогальванический эффект	539
11.3.1. Антиферромагнетики, в которых может наблюдаться антиферромагнитный фотогальванический эффект	540
11.3.2. Микроскопические механизмы антиферромагнитного фотогальванического эффекта	541
11.4. Взаимодействие магнитов с оптическими фононами в орторомбических кристаллах	542
11.4.1. Ортоферриты	542
11.4.2. Связанные колебания магнитов и оптических фононов в ортоферритах	543
11.5. Несогласованные магнитные структуры	546
11.5.1. Развитие плотности магнитного момента в FeGe_2	548

11.5.2. Эффективные гамильтонианы	552
11.5.3. Фазовые переходы второго рода и несогласованные структуры в дисперсных железах	555
11.5.4. Плотность магнитного момента в соединении LiMn_2O_4	557
11.5.5. Фазовые переходы второго рода и несогласованные магнитные структуры в соединении LiMn_2O_4	561
11.6. Взаимосвязь дальнего магнитного порядка и электрической поляризации в оксидах RMn_2O_7	565
11.6.1. Несогласованная магнитная структура и солитонная решетка	566
11.6.2. О возможности описания магнитных фазовых переходов в магнетиках в рамках теории Ландау	572
11.6.3. Ренормгрупповой анализ фазового перехода	574
Заключение	579
Литература к главе 11	580

Глава 12. Нейтроннография магнитных структур

<i>Ю. Н. Срибин</i>	
Введение	583
12.1. Использование симметрии при нейтроннографическом исследовании магнитных структур кристаллов	583
12.1.1. Определение волновых векторов структуры	583
12.1.2. Описание магнитных структур с помощью неприводимых представлений пространственных групп	588
12.1.3. Использование симметрии объемного гамильтониана	596
12.1.4. Угловое рассеяние поляризованных нейтронов	598
12.1.5. Экспериментальное исследование магнитных структур с применением симметричного анализа	599
12.2. Модулированные дивергентные структуры	606
12.2.1. Исследование дивергентных структур и их описание на основе функционала Гинзбурга–Ландау	606
12.2.2. Солитонная решетка и угловое рассеяние нейтронов на ней	609
12.3. Малоугловое рассеяние	616
12.3.1. Малоугловое многократное рассеяние	616
12.3.2. Нематичность сплавов со смешанным объемом взаимодействия	621
12.3.3. Магнитные фазовые диаграммы сплавов со смешанным объемом взаимодействия	624
Заключение	632
Литература к главе 12	633

Глава 13. Магнитная рентгенография

<i>Е. А. Крауце и В. В. Устинов</i>	
Введение	636
13.1. Взаимодействие поляризованного рентгеновского излучения с веществом: общий формализм	639
13.2. Резонансное магнитное рассеяние	642
13.3. Резонансное магнитное рассеяние	643
13.4. Экспериментальные исследования с использованием рентгеновского магнитного и резонансного рассеяния	644
Заключение	651
Литература к главе 13	651

Аннотация. Curriculum vitae

653