
ФИЗИКА
МАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ
И НАНОСТРУКТУР

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

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

Под редакцией

В. В. Устинова, Н. В. Мушникова, 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. Мушникова, 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. Жаков, В. Ю. Ирхин, А. А. Катанин, Е. А. Кравцов,
И. В. Леонов, В. А. Лукшина, В. В. Меньшенин, М. А. Миляев, Н. В. Мушников,
А. Г. Попов, А. П. Потапов, 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. Вонсовский</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. Ирхин, Н. В. Мушников</i>	

Часть I

Спинтроника, наномagnetизм и перспективные магнитные материалы

Глава 1. Спинтроника магнитных металлических наноструктур	41
<i>В. В. Устинов и М. А. Миляев</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 однонаправленной анизотропии в спиновых клапанах	73

1.2.4. Особенности перемагничивания спиновых клапанов со слоем гадолиния	76
1.2.5. Спиновый клапан со слоем диспрозия как инструмент для изучения гелимагнетизма	78
1.3. Наноструктуры с туннельным магнитосопротивлением	81
1.3.1. Механизм туннельного магнитосопротивления	83
1.4. Базовые уравнения спинтроники	87
1.4.1. Электронный спиновый транспорт в проводящих парамагнетиках	88
1.4.2. Электронный спиновый транспорт в проводящих длиннопериодических магнитных структурах	98
1.4.3. Граничные условия для описания электронного спинового транспорта в ограниченных проводниках	100
Заключение	102
Литература к главе 1	103
Глава 2. Нанокристаллические магнитные материалы	107
<i>Н. В. Мушиников, А. Г. Попов, А. П. Потапов, В. А. Лукицина</i>	
Введение	107
2.1. Аморфные и нанокристаллические магнитомягкие материалы	108
2.1.1. Механизмы формирования наведенной магнитной анизотропии	109
2.1.2. Материалы с максимальной магнитной проницаемостью	110
2.1.3. Материалы с низкими потерями на перемагничивание	115
2.1.4. Материалы с низкой 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-Cr-Co	127
2.2.2. Влияние добавок W и Ga на прочность и пластичность	128
2.2.3. Сплавы с пониженным содержанием Co и Cr	132
2.3. Нанокристаллические материалы для постоянных магнитов	136
2.3.1. Зависимость коэрцитивной 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 ($R = \text{Pr, Nd}$), полученные методом интенсивной пластической деформации кручения	150
2.3.5. Интенсивная пластическая деформация быстрозакаленного сплава $\text{Nd}_9\text{Fe}_{85}\text{B}_6$	155
2.3.6. Равноканальное угловое прессование сплавов R-Fe-B ($R = \text{Pr, Nd}$) — новый метод получения большеобъемных микрокристаллических постоянных магнитов	162
Заключение	165
Литература к главе 2	166
Глава 3. Магнетизм соединений со слоистой кристаллической структурой	171
<i>Н. В. Баранов, Е. Г. Герасимов, Н. В. Селезнева, Н. В. Мушиников</i>	
Введение	171
3.1. Тройные соединения $RT_2\text{Si}_2$ и $RT_2\text{Ge}_2$ с тетрагональной слоистой структурой	172
3.1.1. Кристаллическая структура соединений RT_2Z_2	172
3.1.2. Магнетизм 3d переходных металлов в соединениях RT_2Z_2	173
3.1.3. Магнитные структуры в подрешетке марганца и обменные взаимодействия в соединениях RMn_2Z_2	176

3.1.4.	Магнитная анизотропия соединений RMn_2Z_2	178
3.1.5.	Магнитный фазовый переход первого рода межплоскостной антиферромагнетик — межплоскостной ферромагнетик	180
3.1.6.	Магнитный фазовый переход ферромагнетик — плоскостной антиферромагнетик	185
3.1.7.	Магнитные фрустрации в соединениях RMn_2Z_2	186
3.2.	Редкоземельные соединения со структурой типа $HfFe_6Ge_6$	188
3.2.1.	Кристаллические и магнитные структуры соединений RT_6Z_6	188
3.2.2.	Формирование и слом магнитных структур типа двойной плоской спирали	190
3.2.3.	Магнитные структуры в соединениях RT_6Z_6 с магнитными атомами R	192
3.2.4.	Магнитная анизотропия и магнитные фазовые переходы в соединениях $GdMn_6Sn_6$ и $TbMn_6Sn_6$	195
3.2.5.	Спонтанные и индуцированные полем магнитные фазовые переходы между антиферромагнитным и ферромагнитным состояниями	201
3.3.	Магнитные свойства интеркалированных дихалькогенидов переходных металлов со слоистой структурой	203
3.3.1.	Методы получения интеркалированных дихалькогенидов переходных металлов и особенности их кристаллической структуры	204
3.3.2.	Эффективный магнитный момент атомов $3d$ -металлов, интеркалированных в структуру $TiSe_2$	208
3.3.3.	Дальний магнитный порядок и магнитные структуры в интеркалированных соединениях M_xTX_2	210
3.3.4.	Индукцированные полем фазовые переходы, формирование метастабильных состояний и магнитный гистерезис в соединениях Fe_xTiX_2	218
3.3.5.	Магнитные свойства дихалькогенидов титана, интеркалированных редкоземельными элементами	221
	Заключение	222
	Литература к главе 3	223
Глава 4. Магнитные полупроводники — материалы спинтроники		228
	<i>Ю. П. Сухоруков</i>	
	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 лазер	232
4.2.	Материалы для спинтроники на основе магнитных полупроводников	234
4.2.1.	$HgCr_2Se_4$: усиление спиновых волн дрейфующими носителями заряда	234
4.2.2.	$p-n$ -переход в $HgCr_2Se_4$: структура с гигантским магнитосопротивлением	236
4.2.3.	Стрейн-магнитооптика: магнитопоглощение в ферромагнитной шпинели $CoFe_2O_4$	237
4.2.4.	Ферромагнитные полупроводники с туннелированием спинполяризованных 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 манганит/ВТСП	244
4.4.	Нанокристаллические магнитные полупроводники — функциональные материалы для спинтроники	245
4.4.1.	Нанокристаллический антиферромагнитный полупроводник CuO	245

4.4.2. Методы создания высокоплотной нанокерамики	246
4.4.3. Нанокристаллический $Y_3Fe_5O_{12}$ — материал для модуляторов электро- магнитного излучения	247
4.4.4. Нанокристаллический CuO — материал для селективных поглотителей солнечной энергии	248
Заключение	249
Литература к главе 4	250

Глава 5. Магнитотранспорт в системах с колоссальным магнитосопротивлением 256

Н. Г. Бебенин

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

В. Ю. Ирхин

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. $s-d(f)$ 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. Сопротивление магнитных переходных металлов	314
6.2.4. $s-f$ обменная модель и свойства редкоземельных металлов	317
6.2.5. Эффект Кондо	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

И. В. Леонов и В. И. Анисимов

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 примесной модели Андерсона: алгоритм Хирша—Фая (HF-QMC)	356
7.3.2. Методы решения примесной модели Андерсона: метод квантового Монте-Карло с непрерывным 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 моттовских изоляторов и сильно коррелированных металлов	364
7.5.1. Соединение SrVO ₃ : пример сильно коррелированного металла с одним электроном в вырожденной t_{2g} зоне	365
7.5.2. Кооперативный эффект Яна—Теллера и орбитальное упорядочение в парамагнитном диэлектрике KCuF ₃	369
7.5.3. Эффект кулоновских корреляций в рамках описания электронных, магнитных и решеточных свойств железа	375
7.5.4. Соединение V ₂ O ₃ : переход Мотта парамагнитный металл—диэлектрик	385
7.5.5. Электронные, магнитные и решеточные свойства коррелированных монооксидов MnO, FeO, CoO и NiO: переход Мотта и коллапс локальных моментов под давлением	392
Заключение	401
Литература к главе 7	402
Глава 8. Трехмерные магнитные солитоны	406
<i>А. Б. Борисов</i>	
Введение	406
8.1. Трехмерные спиральные структуры в ферромагнетике (обменное приближение). Точные решения	409
8.2. Пространственные структуры в многоподрешеточных антиферромагнетиках	415
8.3. Геликоидальные структуры в кубических киральных магнетиках	423
8.4. Решетки скирмионов	428
8.5. Трехмерные скирмионы в тонких пленках киральных магнетиков	432
8.6. Фазовая диаграмма для пленки изотропного гелимагнетика	435
8.7. Киральный боббер (поплавок)	439
8.8. Экспериментальное наблюдение кирального боббера	442
8.9. Взаимодействие скирмионов	447
Заключение	452
Литература к главе 8	453
Глава 9. Локализованный магнетизм в низкоразмерных системах	456
<i>А. А. Катанин и В. Ю. Ирхин</i>	
Введение	456
9.1. Квазидвумерные магнетики с анизотропией типа «легкая ось»	459
9.1.1. Нелинейные бозонные представления в теории квазидвумерных ферро- и антиферромагнетиков и ССВТ квазидвумерных магнетиков	459
9.1.2. Перенормировка вершины взаимодействия и подрешеточной намагниченности в лестничном приближении	468
9.1.3. Теоретико-полевое описание квазидвумерных магнетиков с локализованными моментами	470
9.1.4. Описание различных температурных режимов в рамках ренормгруппового подхода и $1/N$ -разложения	473

9.1.5. Теоретическое описание экспериментальных данных намагниченности и температур Нееля слоистых систем	479
9.2. Квазидвумерные магнетики с анизотропией типа «легкая плоскость»	485
9.3. Слоистые изотропные антиферромагнетики с треугольной решеткой	489
9.4. Квазиодномерные изотропные антиферромагнетики	491
9.4.1. Модель и самосогласованный спин-волновой подход	491
9.4.2. Процедура бозонизации	493
9.4.3. Приближение межцепочечного среднего поля для бозонизированного гамильтониана и поправки первого порядка по $1/z_{\perp}$	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. Жаков</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 аксиально-симметричных магнитных систем с магнитно-мягкими элементами	516
10.4. Практические приложения	520
10.4.1. Магнитные системы для ячеек Фарадея	520
10.4.2. Магнитные системы для ЯМР-релаксометров	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 магнетиков

Глава 11. Симметричный анализ магнитных материалов	531
<i>В. В. Меньшенин</i>	
Введение	531
11.1. Обменная 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 магнонов с оптическими фононами в орторомбических кристаллах	542
11.4.1. Ортоферриты	542
11.4.2. Связанные колебания магнонов и оптических фононов в ортоферритах	543
11.5. Несоизмеримые магнитные структуры	546
11.5.1. Разложение плотности магнитного момента в FeGe_2	548

11.5.2. Эффективные гамильтонианы	552
11.5.3. Фазовые переходы второго рода и несоизмеримые структуры в дигерманиде железа	555
11.5.4. Плотность магнитного момента в соединении LiMn_2O_4	557
11.5.5. Фазовые переходы второго рода и несоизмеримые магнитные структуры в соединении LiMn_2O_4	561
11.6. Взаимосвязь дальнего магнитного порядка и электрической поляризации в оксидах RMn_2O_5	565
11.6.1. Несоизмеримая магнитная структура и солитонная решетка	566
11.6.2. О возможности описания магнитных фазовых переходов в манганатах в рамках теории Ландау	572
11.6.3. Ренормгрупповой анализ фазового перехода	574
Заключение	579
Литература к главе 11	580
Глава 12. Нейтронография магнитных структур	583
<i>Ю. Н. Скрябин</i>	
Введение	583
12.1. Использование симметрии при нейтронографическом 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 обменного гамильтониана	596
12.1.4. Упругое рассеяние поляризованных нейтронов	598
12.1.5. Экспериментальные исследования магнитных структур с применением симметричного анализа	599
12.2. Модулированные длиннопериодические структуры	606
12.2.1. Исследование длиннопериодических структур и их описание на основе функционала Гинзбурга—Ландау	606
12.2.2. Солитонная решетка и упругое рассеяние нейтронов на ней	609
12.3. Малоугловое рассеяние	616
12.3.1. Малоугловое многократное рассеяние	616
12.3.2. Намагниченность сплавов со смешанным обменным взаимодействием	621
12.3.3. Магнитные фазовые диаграммы сплавов со смешанным обменным взаимодействием	624
Заключение	632
Литература к главе 12	633
Глава 13. Магнитная рентгенография	636
<i>Е. А. Кравцов и В. В. Устинов</i>	
Введение	636
13.1. Взаимодействие поляризованного рентгеновского излучения с веществом: общий формализм	639
13.2. Нерезонансное 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
Авторы. Curriculum vitae	653