

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Дальневосточный федеральный университет

Л.Л. Афремов, И.Г. Ильюшин, С.В. Анисимов

Теория намагничивания наночастиц

Монография

Владивосток



2022

УДК 537.6
ББК 22.324
А94

Результаты исследования, представленные в монографии, выполнены при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0657-2020-0005.

Рецензенты:

Н.Г. Галкин, главный научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН,
д-р физ.-мат. наук, профессор;
Л.А. Чеботкевич, д-р физ.-мат. наук, профессор

Афремов, Леонид Лазаревич.

А94 Теория намагничивания наночастиц : монография / Л.Л. Афремов, И.Г. Ильюшин, С.В. Анисимов. – Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. – 240 с. – (Лучшее научное издание ДВФУ-2021).

ISBN 978-5-7444-5160-8.

DOI <https://doi.org/10.24866/7444-5160-8>.

В монографии представлены результаты теоретических исследований процессов намагничивания материалов, магнитные свойства которых определяются гомо- или гетерогенными наночастицами. Особое внимание уделяется влиянию внутренних (размер и форма наночастиц, намагниченность насыщения и различные виды магнитной анизотропии) и внешних (температура, давление, химические превращения и время) факторов на магнитные состояния наночастиц. На основе анализа магнитных состояний гетерогенных наночастиц проведено моделирование зависимости различных видов намагниченности от размеров и формы наночастиц, механических напряжений, температуры и времени. Отдельно рассмотрены процессы намагничивания двухфазных (core/shell) наночастиц. Приведены результаты исследований зависимости гистерезисных характеристик, включая поле обменного смещения от размеров core/shell наночастиц, температуры и давления, а также от межфазного обменного взаимодействия ядро – оболочка и магнитоэстатического взаимодействия между частицами. Кроме того, в рамках модели core/shell наночастиц проведен анализ влияния процессов распада и однофазного окисления на магнитные характеристики наноматериалов.

Монография может быть рекомендована студентам, аспирантам и научным работникам, специализирующимся в области физики магнитных явлений и физики наносистем.

УДК 537.6
ББК 22.324

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	8
Глава 1. Основные понятия теории кривых намагничивания магнетиков.....	12
1.1. Взаимодействие элементарных магнитных моментов в кристаллах.....	12
1.2. Некоторые виды намагниченности.....	16
1.2.1. Нормальная намагниченность.....	17
1.2.2. Вязкая намагниченность.....	19
1.2.3. Термонамагниченность.....	21
1.2.4. Влияние механических напряжений на процессы намагничивания.....	22
1.2.4.1. Магнитная восприимчивость.....	23
1.2.4.2. Влияние одноосного сжатия на нормальную остаточную намагниченность.....	24
1.2.4.3. Пьезонамагниченность.....	25
1.2.5. Химическая намагниченность.....	28
Литература к главе 1.....	30
ЧАСТЬ 1. ГОМОГЕННЫЕ ОДНОДОМЕННЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ.....	33
Глава 2. Магнитные состояния однодоменных наночастиц.....	35
2.1. Задача об однодоменном состоянии магнитной частицы.....	35
2.2. Равновесные состояния магнитного момента однодоменной сферической наночастицы.....	38
2.3. Равновесные состояния магнитного момента однодоменной несферической наночастицы.....	41
2.3.1. Магнитные состояния вытянутой наночастицы.....	43
2.3.2. Температурная зависимость критического поля однодоменной частицы.....	45
2.3.3. Зависимость магнитного состояния однодоменной наночастицы от знака констант анизотропии.....	46
2.4. Влияние механических напряжений на магнитные состояния одноосных однодоменных наночастиц.....	47
2.5. Магнитные состояния кристаллографически многоосной наночастицы.....	50

2.6. Влияние поверхностной анизотропии на магнитное состояние наночастицы	53
2.7. Влияние термических флуктуаций на магнитные состояния наночастиц.....	54
Литература к главе 2.....	56
Глава 3. Магнитные свойства системы невзаимодействующих наночастиц.....	60
3.1. Нормальная остаточная намагниченность и ее коэрцитивный спектр	62
3.2. Влияние знака констант анизотропии на процесс намагничивания.....	66
3.3. Термическое возбуждение однодоменных частиц. Вязкая намагниченность	72
3.4. Влияние механических напряжений на магнитные свойства системы гомогенных наночастиц.....	74
3.4.1. Петля гистерезиса и начальная восприимчивость системы наночастиц.....	75
3.4.2. Изучение влияния упругих и пластических деформаций на остаточную намагниченность ансамбля наночастиц	86
3.4.2.1. Влияние растяжения на остаточную намагниченность ансамбля наночастиц.....	88
3.4.2.2. Влияние сжатия на процесс намагничивания	94
3.4.2.3. Влияние пластических деформаций на остаточную намагниченность.....	95
3.4.2.4. Намагничивание в малых полях	99
3.4.2.5. Обсуждение результатов	101
Литература к главе 3.....	108
Глава 4. Магнитостатическое взаимодействие в системе наночастиц .	111
4.1. Магнитостатическое взаимодействие в 1D, 2D и 3D системах наночастиц	111
4.1.1. Малые концентрации	112
4.1.2. Большие концентрации.....	116
4.2. Особенности магнитостатического взаимодействия в ансамбле растущих наночастиц.....	117
4.3. Магнитостатическое взаимодействие в системе двухфазных частиц	123

Литература к главе 4	126
ЧАСТЬ 2. ГЕТЕРОГЕННЫЕ (ДВУХФАЗНЫЕ) НАНОЧАСТИЦЫ	127
Глава 5. Магнитные состояния двухфазных наночастиц	133
5.1. Модель одноосной core/shell наночастицы	133
5.2. Магнитные состояния одноосных core/shell наночастиц	134
5.3. Магнитные состояния многоосных core/shell наночастиц	136
5.4. Основные и метастабильные магнитные состояния core/shell наночастиц	139
5.5. Зависимость метастабильности core/shell наночастиц от межфазного обменного взаимодействия	142
5.6. Влияние тепловых флуктуаций на магнитные состояния core/shell наночастиц	144
Литература к главе 5	145
Глава 6. Влияние размерного эффекта на магнитные свойства core/shell наночастиц	152
6.1. Намагниченность системы невзаимодействующих наночастиц	152
6.2. Гистерезисные характеристики системы наночастиц Fe/Fe_3O_4	153
6.2.1. Выбор параметров моделирования	153
6.2.2. Гистерезисные характеристики	153
6.3. Особенности намагничивания системы наночастиц Co/Au	156
6.3.1. Выбор параметров моделирования	156
6.3.2. Зависимость гистерезисных характеристик от размеров	157
6.4. Гистерезисные характеристики системы взаимодействующих core/shell наночастиц	161
Литература к главе 6	165
Глава 7. Моделирование зависимости поля смещения петли гистерезиса от температуры и размера core/shell наночастиц	167
7.1. Модель наночастицы ферромагнетик/ антиферромагнетик	167
7.2. Магнитные состояния наночастиц ферромагнетик/антиферромагнетик	168
7.3. Температурная зависимость константы межфазного взаимодействия	169
7.4. Температурная зависимость гистерезисных характеристик	175
7.4.1. Выбор параметров моделирования	175
7.4.2. Результаты моделирования	178

7.4.3. Сравнение с экспериментальными данными	181
Литература к главе 7	184
Глава 8. Температура блокирования системы взаимодействующих core/shell наночастиц	186
8.1. Определение температуры блокирования core/shell наночастиц	186
8.2. Выбор параметров моделирования	187
8.3. Расчет температуры блокирования по времени релаксации	189
8.3.1. Моделирование размерной зависимости температуры блокирования	189
8.3.2. Зависимость температуры блокирования от внешнего поля.	192
8.3.3. Влияние магнитоэлектрического взаимодействия на температуру блокирования	193
8.4. Расчет температуры блокирования по кривым FC- и ZFC- намагниченностей	195
Литература к главе 8	198
Глава 9. Влияние механических напряжений на магнитные состояния и гистерезисные характеристики системы core/shell наночастиц	200
9.1. Диаграммы магнитных состояний гетерофазных наночастиц	200
9.2. Намагниченность системы двухфазных наночастиц	206
9.3. Влияние механических напряжений на кривую намагничивания и гистерезисные характеристики ансамбля покрытых кобальтом наночастиц $\gamma - Fe_2O_3$	209
Литература к главе 9	212
ГЛАВА 10. Влияние химических превращений на магнитные свойства системы наночастиц	214
10.1. Модель распада наночастиц титаномагнетита	216
10.2. Намагниченность взаимодействующих наночастиц	217
10.3. Температура блокирования невзаимодействующих наночастиц	218
10.4. Коэрцитивная сила и намагниченность насыщения невзаимодействующих наночастиц	220
10.5. Химическая намагниченность невзаимодействующих наночастиц	222
10.6. Моделирование температурной зависимости гистерезисных характеристик взаимодействующих наночастиц	224
10.7. Термоостаточная и химическая намагниченности	227

10.8. Гистерезисные характеристики и температура блокирования наночастиц окисленного магнетита.....	230
10.8.1. Выбор параметров моделирования.....	231
10.8.2. Влияние окисления на гистерезисные характеристики	232
10.8.3. Зависимость температуры блокирования от степени окисления.....	233
Литература к главе 10.....	235
Приложение.....	238