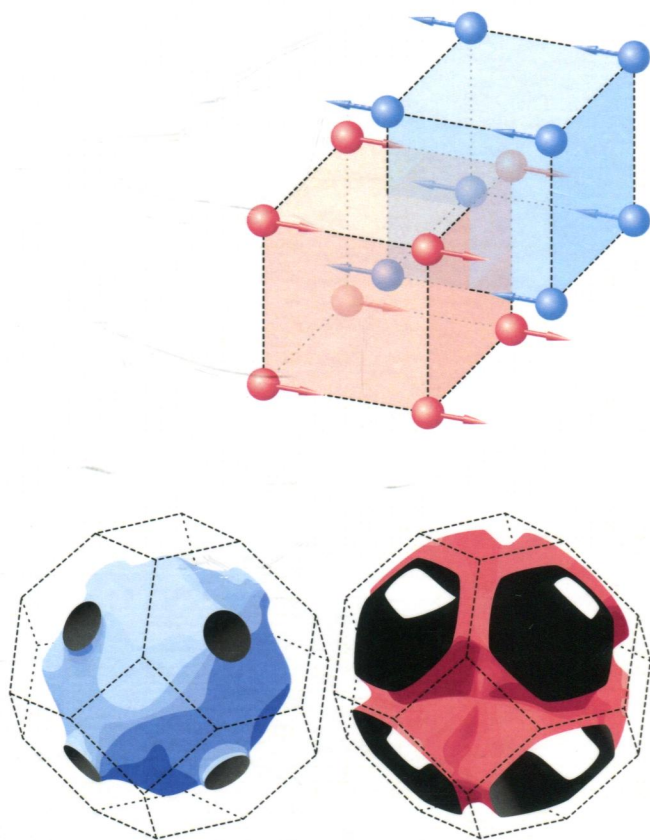


Б.Н. Филиппов

Микромагнитные структуры и их нелинейные свойства Часть 2



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН

Научно-образовательная серия ИФМ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

13

Б.Н. Филиппов

Микромагнитные структуры и их нелинейные свойства

Часть 2

Екатеринбург

2020

УДК 538.1+538.22

ББК 22.33+22.31

Ф 534

Рекомендовано к изданию Ученым советом
Института физики металлов и НИСО УрО РАН

Ответственные редакторы

к.ф.-м.н М.Н. Дубовик, к.ф.-м.н., с.н.с. В.А. Лукшина

Рецензенты

д.ф.-м.н., проф. В.В. Зверев, к.ф.-м.н., в.н.с. А.В. Королев

Филиппов Б.Н.

Ф 534

Микромагнитные структуры и их нелинейные свойства / Б.Н. Филиппов – Екатеринбург. УрО РАН, 2020. – 380 с. (Научно-образовательная серия «Физика конденсированных сред»; 13).

ISBN 978-5-7691-2537-9

В двух частях монографии дано систематическое изложение микромагнитного подхода к исследованию магнитных свойств вещества, лежащих в основе разработки всех видов магнитных материалов, применяющихся как в электро- и радиотехнической промышленности, так и в микроэлектронике, информационной технике, а также перспективных для спинтронных устройств и др.

Во второй части описана нелинейная динамика стенок в пленках с перпендикулярной и плоскостной анизотропией, а также в страйп-структурах, учитывающая различные сценарии динамического преобразования внутренней структуры стенок. Приведены результаты исследования влияния на динамику доменных стенок импульсных полей, приводящим к внутрискруточным переходам. Представлены результаты исследований динамики периодических структур доменов, описаны условия возникновения хаотической динамики, динамического дробления и однонаправленного движения в периодических по времени полях.

Книга предназначена для студентов старших курсов и аспирантов, специализирующихся в области исследования магнитных явлений и материалов, а также для научных работников, начинающих работать в области исследований магнитных свойств.

УДК 538.1+538.22

ББК 22.33+22.31

© Уральское отделение РАН, 2020

© ИФМ УрО РАН, 2020

© Филиппов Б.Н., 2020

ISBN 978-5-7691-2537-9

Оглавление

Глава 7. Численные методы микромагнетизма	5
7.1. Предпосылки необходимости численных исследований проблем микромагнетизма	5
7.2. Сеточный подход для решения микромагнитных задач. Примеры сеток, используемых в разных случаях	8
7.3. Дискретизация функционалов	11
7.4. Граничные условия	19
7.5. Методы минимизации дискретизированного функционала	20
7.6. Сеточные методы с упрощающими способами вычисления магнитостатических полей	25
7.7. Численное решение динамических уравнений	27
7.8. Численное решение уравнений Ландау и Лифшица методом вейвлет-преобразований	30
<i>Библиографический список к главе 7</i>	35
Глава 8. Микромагнитные конфигурации намагниченности в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией и фактором $Q < 1$	43
8.1. Способы представления данных о микромагнитных конфигурациях намагниченности в пленках	43
8.2. Одномерные микромагнитные конфигурации намагниченности, получаемые в рамках двумерных моделей расчета	45
8.3. Асимметричные стенки Блоха в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией	48
8.4. Границы существования асимметричных блоховских стенок	56
8.5. Асимметричные неелевские стенки	60
8.6. Блох-неелевский переход	66
8.7. Блох-неелевский переход при наличии внешнего магнитного поля, перпендикулярного ОЛН	69
8.8. Исследование асимметричных стенок в широкой области параметров пленки	70
8.9. Влияние поверхностной анизотропии на двумерные конфигурации намагниченности	76

8.10. Профили доменных стенок с различным распределением намагниченности.....	79
8.11. Толщины асимметричных стенок	83
8.12. Экспериментальные свидетельства существования асимметричных доменных стенок.....	87
<i>Библиографический список к главе 8</i>	92
9. Доменно-стеночные конфигурации с двухмерным распределением намагниченности в пленках с перпендикулярной анизотропией	95
9.1. Стенки с двухмерным распределением намагниченности в пленках с фактором качества $Q > 1$	95
9.2. Стенки с двухмерным распределением намагниченности в пленках с $Q < 1$	104
9.3. Периодические структуры в пленках с перпендикулярной анизотропией	108
9.4. Периодические структуры в пленках с наклонной осью анизотропии	114
<i>Библиографический список к главе 9</i>	118
10. Двухмерные асимметричные конфигурации в магнитомногоосных пленках	121
10.1. Реальные магнитомногоосные пленки.....	121
10.2. 180-градусные асимметричные стенки в трехосных магнитных пленках с поверхностью типа (010).....	122
10.3. Профили 180-градусных асимметричных стенок в трехосных пленках с поверхностью типа (010)	128
10.4. Сравнение данных для асимметричных стенок в пленках типа (100)-пленок с экспериментальными исследованиями	131
10.5. Асимметричные стенки в (110)-пленках магнитотрехосных кристаллов.....	137
10.6. Асимметричные 90-градусные доменные стенки с двухмерным распределением намагниченности в магнитотрехосных пленках с поверхностью (010)	141
<i>Библиографический список к главе 10</i>	150
11. Статические трехмерные микромагнитные структуры в магнитных пленках.....	153
11.1. Предпосылки образования структур с трехмерным распределением намагниченности в магнитных пленках	153

11.2. Некоторые особенности описания переходных магнитных структур.....	156
11.3. Способы визуализации вихревых и антивихревых поверхностных образований особых точек намагниченности.....	160
11.4. Основные типы переходных магнитных структур между участками двухмерных асимметричных блоховских стенок	164
11.5. Переходы А между участками асимметричных блоховских стенок в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	166
11.6. Переходы В между участками асимметричных блоховских стенок в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	168
11.7. Переходы С между участками асимметричных блоховских стенок в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	170
11.8. ПМС в виде кластеров блоховских точек и разных ВБЛ в асимметричных блоховских стенках	172
11.9. Метастабильность трехмерных распределений намагниченности в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	173
11.10. Трехмерные конфигурации намагниченности, связанные с асимметричными неелевскими стенками в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	176
11.11. Визуализация топологической структуры в целом в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	180
11.12. Трехмерные микромагнитные конфигурации в магнитоодноосных пленках с перпендикулярной анизотропией...	184
11.13. Переходные магнитные структуры в (100) пленках магнитотрехосных кристаллов типа железа	194
11.14. Экспериментальные исследования структур с трехмерным распределением намагниченности.....	201
<i>Библиографический список к главе 11</i>	<i>207</i>
12. Продольные двух- и трехмерные микромагнитные структуры в ограниченных одноосных пленках (страйпах)	211
12.1. Микромагнитные структуры с трехмерным распределением намагниченности и межстеночные переходы	211
12.1.1. Возможные микромагнитные структуры в сверхтонких пленках.....	211
12.1.2. Структура стенок с перетяжками, полученная на основе 3D-расчетов	215

12.1.3. Межстеночные переходы.....	220
12.1.4. Критические толщины переходов	223
12.2 Фазовые диаграммы продольных микромагнитных структур в широких пленках-полосках	225
12.3. Продольные микромагнитные конфигурации намагниченности в страйпах с комбинированной анизотропией.....	229
<i>Библиографический список к главе 12</i>	236
13. Поперечные микромагнитные конфигурации в нанострайпах и нанопроволоках	239
13.1. Поперечные микромагнитные конфигурации в нанострайпах с $Q < 1$	239
13.2. Структура стенки «голова к голове» в широких пермалловых страйпах и фазовые диаграммы	246
13.3. Микромагнитные конфигурации в многослойных нанострайпах.....	250
13.4. Влияние анизотропии на микромагнитные структуры нанострайпов	254
13.5. Микромагнитные конфигурации в магнитных нанопроволоках	256
<i>Библиографический список к главе 13.</i>	261
14. Динамические свойства асимметричных доменных стенок в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией	265
14.1. Предмет исследования и ограничения	265
14.2. Динамика доменных стенок в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией в полях ниже критического.....	266
14.2.1. Возможные стационарные конфигурации движущихся стенок	266
14.2.2. Эффективная масса вихреподобных доменных стенок.....	271
14.2.3. Подвижность вихреподобных доменных стенок.....	277
14.3. Нестационарная динамика вихреподобных доменных стенок в магнитных пленках с плоскостной анизотропией	284
14.3.1. Динамическое преобразование вихреподобных стенок в магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией.....	284
14.3.2. Динамическая перестройка структуры асимметричных вихреподобных стенок в пленках с малым затуханием.....	300
14.3.3. Период динамических преобразований доменных стенок.....	303
14.3.4. Критическое поле.....	307
<i>Библиографический список к главе 14</i>	311

15. Динамическое поведение асимметричных доменных стенок под действием комбинированных магнитных полей в пленках с плоскостной анизотропией	315
15.1. Влияние на динамическую перестройку структуры асимметричных блоховских стенок малых внешних полей, перпендикулярных оси анизотропии	315
15.2. Нелинейная динамика вихреподобных доменных стенок в импульсных полях, ориентированных вдоль ОЛН.....	320
15.2.1. Основные понятия и ограничения	320
15.2.2. Межстеночные переходы, индуцируемые единичными импульсами, в пленках с классическим сценарием преобразования структуры стенки при $H_i = 0$	321
15.2.3. Межстеночные переходы в пленках со сценариями преобразования стенок, отличных от классических. Влияние индукции насыщения	326
15.2.4. Нелинейные преобразования структуры стенок под влиянием периодических импульсов поля $H_i > H_w$	330
15.3. Влияние на движение асимметричных блоховских стенок импульсных полей, перпендикулярных оси легкого намагничивания	332
15.3.1. Цель данного раздела и используемые приближения	332
15.3.2. Движение вихреподобных стенок под действием одиночных импульсов поля.....	333
15.3.3. Движение вихреподобных стенок при периодической последовательности импульсов поля.....	337
<i>Библиографический список к главе 15</i>	341
16. Динамическое поведение доменных стенок в ультратонких магнитоодноосных пленках с плоскостной анизотропией	343
16.1. Моделирование динамики неелевских доменных стенок на основе двухмерной модели распределения намагниченности	343
16.1.1. Динамическое преобразование структуры неелевских доменных стенок	343
16.1.2. Динамическое преобразование структуры неелевских доменных стенок при изменении напряженности внешнего магнитного поля, затухания и намагниченности насыщения	349
16.1.3. Поведение скоростей движения неелевских стенок в зависимости от толщины пленки и внешнего магнитного поля	350
16.1.4. Связь критического поля с параметрами пленки.....	352

16.1.5. Период нелинейной динамической перестройки структуры неелевской стенки.....	354
16.2. Нелинейное динамическое поведение доменных стенок с перетяжками	357
16.2.1. Перспективность и особенности микромагнитного моделирования динамики доменных стенок с перетяжками ...	357
16.2.2. Стационарное движение стенок с перетяжками	358
16.2.3. Нестационарное движение доменных стенок	365
<i>Библиографический список к главе 16</i>	370