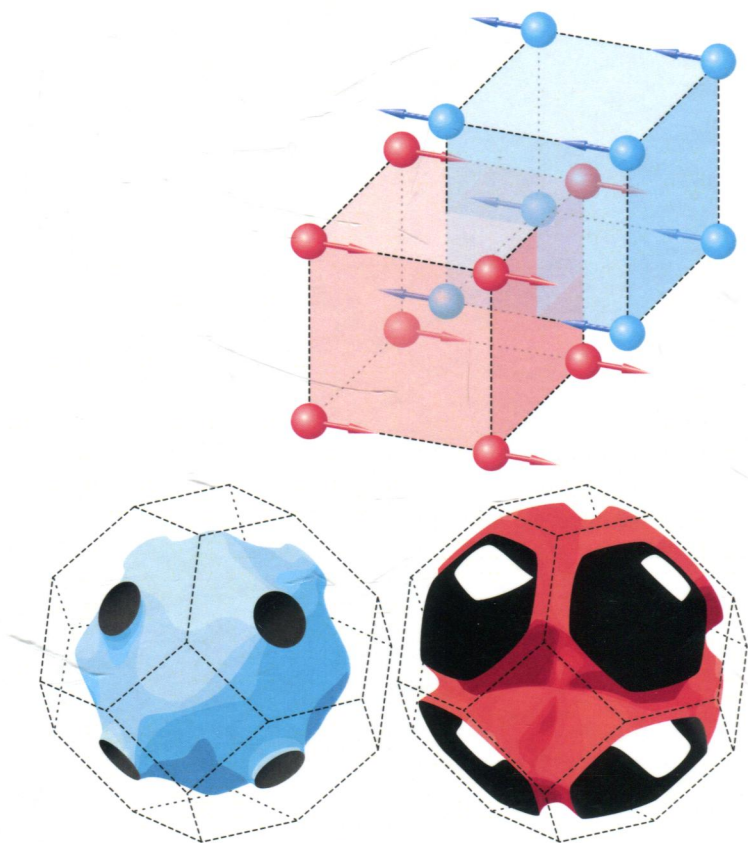


Микромагнитные структуры и их нелинейные свойства Часть 1



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН

Научно-образовательная серия ИФМ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД
12

Б.Н. Филиппов

Микромагнитные структуры и их нелинейные свойства

Часть 1

Екатеринбург

2019

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, 2019. – 424 с. (Научно-образовательная серия «Физика конденсированных сред»; 12).

ISBN 978-5-7691-2527-0

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.

Первая часть содержит подробное и доступное изложение современных теоретических и экспериментальных методов исследования микромагнитных структур с двух- и трехмерным распределением намагниченности (доменные стенки, вихри, антивихри, горизонтальные и вертикальные блоховские линии, блоховские точки и др.) в магнитных пленках, страйп-структурах, нанопроволоках, магнитных нанотрубках и субмикронных элементах («магнитных точках»).

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, 2019

© ИФМ УрО РАН, 2019

© Филиппов Б.Н., 2019

ISBN 978-5-7691-2527-0

Оглавление

| | |
|--|----|
| Предисловие | 5 |
| Введение | 7 |
| <i>Библиографический список к введению</i> | 12 |
| Глава 1. Основы теории микромагнетизма | 17 |
| 1.1. Взаимодействия, лежащие в основе микромагнитных явлений | 17 |
| 1.2. Термодинамический потенциал и его составляющие | 24 |
| 1.3. Краткие сведения об элементарных магнитных моментах | 26 |
| 1.4. Классификация веществ по магнитным свойствам. Понятие о магнитном упорядочении | 34 |
| 1.5. Микроскопическая природа магнитного упорядочения..... | 39 |
| 1.5.1. Зависимость части электростатического взаимодействия от взаимной ориентации спинов электронов в молекуле водорода | 39 |
| 1.5. 2. Обменное взаимодействие в конденсированных средах | 42 |
| 1.5. 3. Неоднородная часть обменного взаимодействия | 45 |
| 1.6. Магнитная анизотропия | 47 |
| 1.6.1. Магнитная кристаллографическая анизотропия | 47 |
| 1.6.2. Поверхностная и интерфейсная анизотропия..... | 62 |
| 1.6.3. Однонаправленная анизотропия..... | 72 |
| 1.7. Диполь-дипольное взаимодействие в магнитоупорядоченных веществах..... | 78 |
| 1.7.1. О роли диполь-дипольного взаимодействия | 78 |
| 1.7.2. Магнитные поля и энергии, связанные с диполь-дипольным взаимодействием | 79 |
| 1.7.3. Континуальное приближение. Магнитостатические поля | 80 |
| 1.7.4. Энергия анизотропии и энергия магнитостатического поля | 82 |
| 1.7.5. Магнитная анизотропия формы | 83 |
| 1.8. Магнитоупругое взаимодействие и связанные с ним эффекты | 88 |
| 1.8.1. Общие представления о магнитоупругих явлениях..... | 88 |
| 1.8.2. Энергия магнитоупругих взаимодействий..... | 91 |
| 1.8.3. Линейная магнитострикция кристаллов кубической и гексагональной симметрии | 96 |

| | |
|--|-----|
| 1.8.4. Объемная магнитострикция | 100 |
| 1.8.5. Магнитострикция формы | 103 |
| 1.8.6. Истинная магнитострикция | 105 |
| 1.9. Наведенная магнитная анизотропия | 107 |
| 1.9.1. Общие замечания о наведенной анизотропии | 107 |
| 1.9.2. Анизотропия, связанная с направленным атомным упорядочением в магнитных сплавах | 108 |
| 1.9.3. Анизотропия, обусловленная механическими напряжениями | 113 |
| 1.10. Примеры полного термодинамического потенциала Гиббса | 117 |
| <i>Библиографический список к главе 1</i> | 119 |
| Глава 2. Основные уравнения теории микромагнетизма | 131 |
| 2.1. Уравнения Брауна для описания статических структур | 131 |
| 2.2. Уравнения Ландау и Лифшица для описания динамических микромагнитных явлений | 134 |
| 2.3. Учет затухания по Гильберту | 138 |
| 2.4. Уравнения движения для намагниченности при учете затухания по Барьяхтару | 141 |
| 2.5. Уравнения Ландау-Лифшица и Гильберта при учете спин-поляризованного тока | 149 |
| <i>Библиографический список к главе 2</i> | 158 |
| Глава 3. Экспериментальные методы исследования микромагнитных структур | 163 |
| 3.1. Порошковые методы | 163 |
| 3.2. Магнитооптические методы | 166 |
| 3.3. Электронномикроскопические методы | 176 |
| 3.3.1. Принципы использования электронных волн для визуализации микромагнитных структур | 176 |
| 3.3.2. Лоренцовская электронная микроскопия | 178 |
| 3.3.3. Сканирующая трансмиссионная электронная микроскопия | 185 |
| 3.3.4. Сканирующий электронный микроскоп с анализатором поляризации | 188 |
| 3.3.5. Метод электронной голографии | |
| 3.4. Магнитная силовая микроскопия | 200 |
| 3.5. Рентгеновский метод исследования микромагнитных структур | 210 |
| <i>Библиографический список к главе 3</i> | 211 |

| | |
|--|------------|
| Глава 4. Простейшие одномерные микромагнитные конфигурации намагниченности в массивных кристаллах..... | 221 |
| 4.1. Общее определение свойств одномерных доменных границ в массивных кристаллах | 228 |
| 4.2. Одномерные 180-градусные стенки в массивных магнитоодноосных кристаллах..... | 230 |
| 4.3. Одномерные 180-градусные стенки в магнитоодноосных кристаллах при учете двух констант анизотропии..... | 234 |
| 4.4. Доменные стенки с одномерной структурой распределения намагниченности в массивных магнитотрехосных кристаллах | 237 |
| 4.4.1. 90-градусные доменные границы, параллельные кристаллографической плоскости типа (100) | 237 |
| 4.4.2. 90-градусные доменные стенки, параллельные кристаллографической плоскости типа (110) | 238 |
| 4.4.3. 90-градусные стенки, параллельные кристаллографической плоскости типа (111) | 239 |
| 4.4.4. 180-градусные доменные стенки в массивных магнитотрехосных кристаллах..... | 239 |
| 4.4.5. Влияние магнитострикции на устойчивость 180-градусных доменных границ, параллельных плоскости типа (010) магнитотрехосного кристалла..... | 242 |
| 4.5. 180-градусные стенки с одномерным распределением намагниченности в магниточетырехосных массивных ферромагнетиках | 245 |
| 4.6. 71- и 109-градусные доменные стенки в магниточетырехосных кристаллах..... | 247 |
| 4.6.1. 71-градусные стенки с плоскостью поверхности, параллельной кристаллографической плоскости типа (001) | 247 |
| 4.6.2. 71-градусные стенки с плоскостью поверхности, параллельной кристаллографической плоскости типа (110) | 248 |
| 4.6.3. 109-градусные стенки с плоскостью поверхности, параллельной кристаллографической плоскости типа (110) | 249 |
| 4.6.4. 109-градусные стенки с плоскостью поверхности, параллельной кристаллографической плоскости типа (111) | 250 |
| 4.6.5. 109-градусные стенки с плоскостью поверхности, параллельной кристаллографической плоскости типа (001) | 250 |
| 4.7. Периодические одномерные микромагнитные структуры в массивных ферромагнитных материалах | 251 |
| 4.8. Периодические одномерные структуры в массивных магнитомногоосных кристаллах в присутствии магнитного поля..... | 256 |

| | |
|--|-----|
| 4.9. Одномерные периодические микромагнитные структуры в массивных материалах при наличии внешних упругих напряжений | 262 |
| 4.9.1. Введение упругих напряжений в задачу определения микромагнитных конфигураций | 262 |
| 4.9.2. Периодические ДС при наличии сил, приложенных вдоль оси [001] | 263 |
| 4.9.3. Периодические ДС при наличии сил, приложенных вдоль оси [011] | 268 |
| <i>Библиографический список к главе 4</i> | 270 |

Глава 5. Микромагнитные конфигурации в магнитных пленках.

| | |
|---|-----|
| Модельные представления и экспериментальные данные | 273 |
| 5.1. Возможные типы магнитных пленок | 273 |
| 5.2. Доменные стенки неелевского типа в магнитных пленках с плоскостной анизотропией | 275 |
| 5.3. Доменные стенки с поперечными связями в пленках с анизотропией в плоскости | 284 |
| 5.4. Рябь намагниченности в поликристаллических пленках с плоскостной анизотропией и фактором качества $Q \ll 1$ | 292 |
| 5.5. Теории ряби намагниченности | 295 |
| 5.5.1 Теория ряби намагниченности Гофмана | 295 |
| 5.5.2. Теория ряби намагниченности Харта | 301 |
| 5.6. Модельные представления о микромагнитных конфигурациях в пленках с осью легкого намагничивания, перпендикулярной поверхности и с большим фактором качества | 311 |
| 5.7. Модельные представления о блоховских линиях и точках в магнитоодноосных пленках с перпендикулярной анизотропией | 316 |
| <i>Библиографический список к главе 5</i> | 323 |

Глава 6. Модельные представления о динамических свойствах доменных стенок в массивных кристаллах

| | |
|---|-----|
| доменных стенок в массивных кристаллах | 329 |
| 6.1. Механизм движения доменной стенки | 329 |
| 6.2. Инерционные свойства доменных границ. Эффективная масса | 332 |
| 6.3. Линейное уравнение, описывающее смещения и колебания доменных границ | 337 |
| 6.4. Подвижность доменных границ | 341 |
| 6.5. Подвижность доменных границ при учете обменной релаксации ... | 349 |
| 6.6. Предел стационарного движения доменных стенок в массивных материалах | 351 |

| | |
|--|------------|
| 6.7. Надкритическое поведение доменной стенки. Движение с переменной скоростью в постоянном поле..... | 355 |
| 6.8. Подход Слончевского к описанию динамического поведения стенок с одномерным распределением намагниченности..... | 362 |
| 6.9. Обобщение теории Слончевского на случай учета обменной релаксации..... | 366 |
| 6.10. Экспериментальные исследования подвижности доменных стенок..... | 368 |
| 6.11. Модельные представления о влиянии неоднородного характера распределения намагниченности в доменных стенках на их динамическое поведение в магнитных пленках..... | 383 |
| 6.11.1. Метод гиротропных сил..... | 384 |
| 6.11.2. Движение доменной стенки с горизонтальными блоховскими линиями..... | 386 |
| 6.11.3. Влияние вертикальных блоховских линий на движение доменных границ..... | 392 |
| 6.12. Движение изолированной вертикальной блоховской линии в скрученной стенке..... | 395 |
| 6.13. Размеры и динамика пар вертикальных блоховских линий в скрученной стенке..... | 401 |
| 6.14. Эффективная масса вертикальных блоховских линий в скрученной доменной стенке..... | 408 |
| <i>Библиографический список к главе 6.....</i> | <i>410</i> |