

# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНО- И МИКРОГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

3-е издание, электронное



Москва  
Лаборатория знаний  
2020

УДК [53+54]-022.532  
ББК 22.37+30.37  
Г82

*Серия основана в 2006 г.*

**Гриднев С. А.**

Г82 Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С. А. Гриднев, Ю. Е. Калинин, А. В. Ситников, О. В. Стогней. — 3-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 355 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-853-7

Изучение нелинейных явлений в многокомпонентных гетерогенных системах, находящихся в аморфном, нано- и микрокристаллическом состояниях, способствует установлению физической природы многих происходящих в них явлений и совершенствованию существующих теоретических положений, а следовательно, и разработке новых материалов, обладающих комплексом уникальных физических свойств. Для успешного решения этих задач большое значение имеет знание особенностей пространственного расположения атомов в аморфных, нано- и микрокристаллических твердых телах и многокомпонентных гетерогенных системах, основных механизмов электронного транспорта в гетерогенных системах металл—диэлектрик и механизмов формирования магнитной анизотропии в нанокompозитах ферромагнетик—диэлектрик, магнитоэлектрических явлений в системах ферромагнетик—пьезоэлектрик, рассмотренных в этой книге.

Для специалистов в областях химии, физики и материаловедения.

УДК [53+54]-022.532  
ББК 22.37+30.37

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С. А. Гриднев, Ю. Е. Калинин, А. В. Ситников, О. В. Стогней. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. — 352 с. : ил. — (Нанотехнологии). — ISBN 978-5-9963-0294-9.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-853-7

© Лаборатория знаний, 2015

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>3</b>
<b>Часть 1. Методы получения и морфология систем с пониженной размерностью</b> .....	<b>5</b>
1.1. Структура аморфных твердых тел .....	5
1.1.1. Способы описания аморфной структуры .....	6
1.1.2. Экспериментальные результаты исследования некоторых аморфных структур .....	10
1.1.3. Модели аморфной структуры .....	18
1.1.4. Дефекты аморфной структуры .....	21
1.1.5. Структурная релаксация .....	25
1.2. Методы получения систем с пониженной размерностью .....	30
1.2.1. Получение структур из газообразного состояния .....	30
1.2.2. Получение аморфных структур из жидкого состояния ..	41
1.2.3. Получение вещества в аморфном состоянии из твердого кристаллического .....	55
1.3. Основные методы получения наногранулированных композитов металл—диэлектрик .....	58
1.4. Морфология наногранулированных композитов .....	61
1.4.1. Морфология композитов с кристаллическими гранулами ..	62
1.4.2. Морфология композитов с аморфной структурой гранул ..	65
1.4.3. Структурные изменения в аморфных гранулированных композитах при нагреве .....	68
Литература к части 1 .....	71
<b>Часть 2. Электрические свойства наногранулированных композитов металл—диэлектрик</b> .....	<b>76</b>
2.1. Концентрационные зависимости электрического сопротивления ..	77
2.1.1. Теория протекания .....	77
2.1.2. Экспериментальные зависимости удельного электрического сопротивления некоторых нанокompозитов металл—диэлектрик от состава .....	81
2.1.3. Удельное электрическое сопротивление композитов, полученных в атмосфере аргона с добавлением азота в процессе осаждения .....	84
2.1.4. Удельное электрическое сопротивление композитов, полученных в атмосфере аргона с добавлением кислорода в процессе осаждения .....	89

2.2.	Температурные зависимости проводимости аморфных гранулированных композитов . . . . .	96
2.2.1.	Проводимость в диэлектрическом режиме . . . . .	96
2.2.2.	Проводимость в металлическом режиме . . . . .	112
2.2.3.	Электрическое сопротивление наногранулированных композитов при высоких температурах . . . . .	116
	Литература к части 2 . . . . .	130
Часть 3.	<b>Магнитные свойства гранулированных композитов ферромагнетик—диэлектрик</b> . . . . .	136
3.1.	Свойства магнитных наночастиц. Суперпарамагнетизм . . . . .	136
3.2.	Процессы намагничивания гранулированных композитов . . . . .	141
3.2.1.	Процессы перемагничивания аморфных сплавов $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ и $\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2$ . . . . .	141
3.2.2.	Процессы перемагничивания аморфных гранулированных композитов при комнатной температуре . . . . .	145
3.3.	Магнитные свойства аморфных гранулированных композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_n)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{86}\text{Nb}_{12}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_n)_{100-x}$ при низких температурах . . . . .	152
3.3.1.	Магнитное последствие . . . . .	152
3.3.2.	Терромагнитный гистерезис гранулированных композитов. . . . .	156
3.3.3.	Магнитный гистерезис при низких температурах . . . . .	160
3.3.4.	Концентрационные зависимости константы анизотропии и коэрцитивной силы нанокомпозитов. Влияние диполь-дипольного взаимодействия . . . . .	169
3.3.5.	Релаксация остаточной намагниченности в области низких температур . . . . .	172
3.4.	Механизмы формирования макроскопической магнитной анизотропии в композитах ферромагнетик—диэлектрик . . . . .	182
3.4.1.	Магнитная анизотропия парного упорядочения атомов в аморфной ферромагнитной фазе композита . . . . .	182
3.4.2.	Магнострикционная анизотропия . . . . .	186
3.4.3.	Магнитная анизотропия, обусловленная текстурой композитов. . . . .	188
3.5.	Высокочастотные магнитные свойства наногранулированных композитов ферромагнетик—диэлектрик . . . . .	192
3.5.1.	Концентрационная зависимость магнитной проницаемости наногранулированных композитов ферромагнетик—диэлектрик . . . . .	192
3.5.2.	Влияние термической и терромагнитной обработки на высокочастотные свойства наногранулированных композитов. . . . .	198
3.5.3.	Частотные зависимости комплексной магнитной проницаемости. . . . .	201
	Литература к части 3 . . . . .	204

Часть 4. Гигантское магнитосопротивление гранулированных композитов металл—диэлектрик . . . . .	212
4.1. Природа магниторезистивного эффекта в наногранулированных композитах металл—диэлектрик . . . . .	213
4.1.1. Качественная модель туннельного магнитосопротивления . . . . .	215
4.1.2. Количественные модели туннельного магнитосопротивления . . . . .	217
4.2. Концентрационная зависимость магнитосопротивления . . . . .	220
4.3. Корреляция намагниченности и магнитосопротивления композитов . . . . .	225
4.4. Влияние охлаждения наногранулированных композитов на величину магнитосопротивления . . . . .	227
4.5. Зависимость магнитосопротивления наногранулированных композитов от элементного состава металлической фазы. . . . .	233
4.5.1. Корреляция магнитосопротивления и магнитострикции металлической фазы композитов . . . . .	234
4.5.2. Экваториальный эффект Керра в аморфных наногранулированных композитах . . . . .	236
4.5.3. Влияние магнитострикции насыщения металлической фазы на магниторезистивные и магнитооптические свойства композитов . . . . .	240
4.6. Роль диэлектрической матрицы и факторы, влияющие на величину магниторезистивного эффекта . . . . .	241
4.6.1. Влияние термического воздействия на величину магнитосопротивления . . . . .	242
4.6.2. Влияние условий получения на величину магнитосопротивления . . . . .	251
4.7. Аномальное положительное магнитосопротивление наногранулированных композитов металл—диэлектрик . . . . .	254
4.7.1. Магнитосопротивление гранулированных нанокompозитов Co—Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Co—SiO <sub>2</sub> и Co—CaF <sub>2</sub> . . . . .	255
4.7.2. Влияние кислорода на положительное магнитосопротивление . . . . .	258
4.7.3. Модель положительного магнитосопротивления в наногранулированных нанокompозитах металл—диэлектрик . . . . .	260
4.7.4. Влияние температуры на положительное магнитосопротивление . . . . .	267
4.7.5. Отсутствие положительного магнитосопротивления в системе Co—CaF <sub>2</sub> . . . . .	269
Литература к части 4 . . . . .	270

<b>Часть 5. Электрические и магнитные свойства многослойных наноструктур <math>[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/\alpha\text{-Si:H}]_{30}</math> . . . .</b>	<b>277</b>
5.1. Концентрационная зависимость удельного электрического сопротивления многослойных структур композит—полупроводник . . . . .	278
5.2. Низкотемпературные исследования электрической проводимости многослойной структуры композит—полупроводник . . . . .	280
5.3. Магниторезистивный эффект в многослойной структуре композит—полупроводник . . . . .	283
5.4. Магнитные свойства многослойной структуры композит—полупроводник. . . . .	285
Литература к части 5 . . . . .	290
<b>Часть 6. Магнитоэлектрические свойства нано- и микрокомпозитов . . . . .</b>	<b>292</b>
6.1. Тонкопленочные наногетерогенные магнитоэлектрические композиты . . . . .	298
6.1.1. Концентрационные зависимости электропроводности и диэлектрической проницаемости. . . . .	300
6.1.2. Механизмы электропроводности в композитах . . . . .	305
6.1.3. Кристаллизация аморфных материалов . . . . .	312
6.1.4. Структурная релаксация в аморфном состоянии . . . . .	318
6.2. Слоистые магнитоэлектрические композиты . . . . .	324
6.2.1. Прямой магнитоэлектрический эффект . . . . .	326
6.2.2. Обратный магнитоэлектрический эффект в двухслойных композитах. . . . .	335
Литература к части 6 . . . . .	340