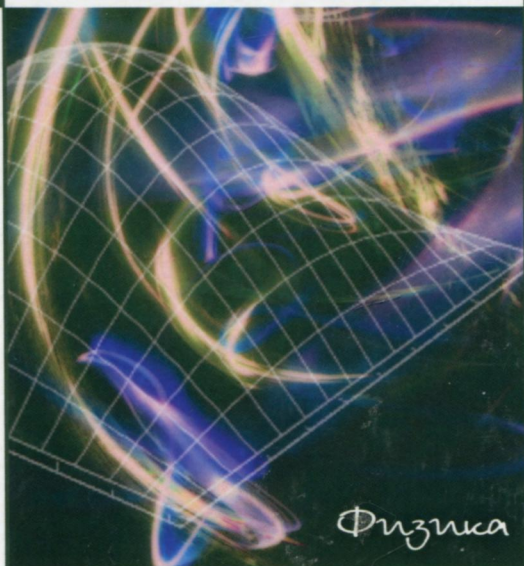


НАУЧНАЯ МЫСЛЬ



В.Н. Нечаев, А.В. Шуба

**РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ
И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ
ФЕРРОИКОВ**



НАУЧНАЯ МЫСЛЬ

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

В.Н. НЕЧАЕВ

А.В. ШУБА

**РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ
И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ
ФЕРРОИКОВ**

МОНОГРАФИЯ

Электронно-
Библиотечная
Система
znanium.com

Москва
ИНФРА-М
2023

УДК 538.9(075.4)

ББК 22.35

Н59

Рецензенты:

Гриднев С.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела Воронежского государственного технического университета, заслуженный деятель науки Российской Федерации;

Тополов В.Ю., доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики Южного федерального университета, член-корреспондент Российской академии естествознания, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации

Нечаев В.Н.

Н59 Размерные эффекты в фазовых переходах и физических свойствах ферроиков : монография / В.Н. Нечаев, А.В. Шуба. — Москва : ИНФРА-М, 2023. — 384 с. — (Научная мысль).

ISBN 978-5-16-017937-7 (print)

ISBN 978-5-16-110948-9 (online)

В монографии изложены математические методы и совокупность математических моделей, описывающих в рамках феноменологической теории фазовые переходы в $0D$ - $1D$ -, $2D$ -, $3D$ -мерных сегнетоэлектриках, сегнетоэластиках, ферромагнетиках и их статические и динамические физические свойства вблизи точки фазового перехода. Проанализировано влияние параметров, характеризующих образец ферроика и его взаимодействие с окружающей средой, на особенности фазового перехода, смещение температуры фазового перехода, теплоемкость, обобщенные восприимчивости. Рассмотрены математические модели многослойных тонкопленочных структур и композиционных материалов, где одним из компонентов является наночастица ферроика. В целом достаточно полно освещаются современные представления о размерных эффектах в сегнетоэлектриках, сегнетоэластиках, ферромагнетиках и механизмах целенаправленного влияния на их свойства.

Предназначена для научных работников, студентов и аспирантов физических специальностей вузов, интересующихся фундаментальными проблемами формирования физических свойств низкоразмерных материалов. Инженеры-исследователи, разработчики новых материалов могут использовать изложенный материал в качестве научно-методических основ поддержки выработки оптимальных решений по их созданию.

УДК 538.9(075.4)

ББК 22.35

ISBN 978-5-16-017937-7 (print)

ISBN 978-5-16-110948-9 (online)

© Нечаев В.Н., Шуба А.В., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ (3D)...	10
1.1. Структурный фазовый переход.....	11
1.2. Фазовый переход в неоднородное состояние	24
1.3. Ориентационные магнитные фазовые переходы.....	28
ГЛАВА 2. СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ (2D)...	32
2.1. Фазовый переход в отсутствие внешнего поля.....	32
2.2. Влияние внешнего поля на фазовый переход.....	56
2.3. Метод усреднения в теории тонких пленок.....	64
ГЛАВА 3. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ ФЕРРОИКОВ (2D-СТРУКТУРЫ).....	68
3.1. Сегнетоэлектрический фазовый переход.....	68
3.2. Фазовые переходы из однородного магнитного состояния в неоднородное.....	79
3.3. Неоднородные поляризованные состояния.....	89
3.4. Влияние внешнего электрического поля на фазовый переход.....	101
3.4.1. Сегнетоэлектрический фазовый переход.....	101
3.4.2. Короткозамкнутый сегнетоэлектрический конденсатор.....	105
ГЛАВА 4. МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ (2D-СИСТЕМЫ).....	111
4.1. Диэлектрическая проницаемость и температура фазового перехода многослойных структур.....	111
4.1.1. Структура диэлектрик–сегнетоэлектрик–диэлектрик.....	111
4.1.2. Структура сегнетоэлектрик–сегнетоэлектрик.....	117
4.1.3. Структура сегнетоэлектрик–диэлектрик–сегнетоэлектрик.....	122
4.2. Диэлектрическая восприимчивость структуры сегнетоэлектрик–параэлектрик.....	128

4.3. Электрическое взаимодействие слоев в сверхрешетках сегнетоэлектрик–параэлектрик.....	131
4.4. Магнитные свойства трехслойной сэндвич-структуры из ферромагнитных материалов	135
4.4.1. Микроскопическая модель.....	135
4.4.2. Макроскопические магнитные свойства.....	138
ГЛАВА 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР В БЛИЗИ ТОЧЕК ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ (2D-СТРУКТУРЫ).....	143
5.1. Особенности колебательного спектра поляризации в тонкой сегнетоэлектрической пленке.....	143
5.1.1. Вектор поляризации лежит в плоскости пленки.....	145
5.1.2. Вектор поляризации лежит перпендикулярно плоскости пленки...148	
5.1.3. Вектор поляризации лежит в плоскости пленки ($T < T_f$).....	149
5.2. Спектр времен релаксации поляризации в тонкой сегнетоэлектрической пленке.....	154
5.2.1. Вектор поляризации лежит в плоскости пленки.....	154
5.2.2. Вектор поляризации лежит перпендикулярно плоскости пленки...156	
5.3. Динамическая диэлектрическая проницаемость слоистых тонкопленочных структур.....	158
5.3.1. Сегнетоэлектрическая пленка.....	158
5.3.2. Структура диэлектрик–сегнетоэлектрик–диэлектрик.....	161
5.3.3. Структура сегнетоэлектрик–сегнетоэлектрик.....	165
5.3.4. Структура сегнетоэлектрик–диэлектрик–сегнетоэлектрик.....	166
5.4. Переключение поляризации в тонких сегнетоэлектрических пленках...169	
5.4.1. Флуктуационное образование зародышей реполяризации.....	170
5.4.2. Кинетика процесса реполяризации.....	182
ГЛАВА 6. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТОНКИХ СТЕРЖНЯХ (1D).....	186
6.1. Сегнетоэлектрический фазовый переход.....	186
6.1.1. Стержень прямоугольного сечения.....	186

6.1.2. Стержень круглого сечения.....	189
6.1.3. Диэлектрическая проницаемость цилиндрического стержня.....	193
6.1.3.1. Параэлектрическая фаза ($T > T_c$).....	193
6.1.3.2. Сегнетоэлектрическая фаза ($T < T_c$).....	196
6.2. Сегнетоэластический фазовый переход.....	199
6.2.1. Плоская деформация.....	199
6.2.1.1. Постановка задачи в напряжениях.....	200
6.2.1.2. Постановка задачи в перемещениях.....	206
6.2.2. Антиплоская деформация.....	212
6.3. Влияние внешних напряжений на сегнетоэластический фазовый переход.....	216
ГЛАВА 7. ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В НАНОЧАСТИЦАХ ФЕРРОИКОВ (0D). АНАЛИТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ.....	221
7.1. Диэлектрическая проницаемость и теплоемкость сегнетоэлектрических частиц, претерпевающих фазовый переход второго рода.....	221
7.2. Диэлектрическая проницаемость и теплоемкость сегнетоэлектрических частиц, претерпевающих фазовый переход первого рода.....	231
7.3. Фазовый переход в сегнетоэлектрической частице с учетом собственных деполяризующих полей.....	236
7.3.1. Фазовый переход второго рода в цилиндрической частице.....	236
7.3.2. Фазовый переход первого рода.....	240
7.3.2.1. Частица в форме цилиндра вращения.....	240
7.3.2.2. Частица в форме эллипсоида вращения.....	249
ГЛАВА 8. ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В НАНОЧАСТИЦАХ ФЕРРОИКОВ (0D). ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....	257
8.1. Об основных факторах, определяющих температуру фазового перехода в нанокompозите сегнетоэлектрик–диэлектрик.....	258
8.1.1. Электростатические деполяризующие поля.....	259

8.1.2. Экстраполяционная длина и ее знак.....	260
8.1.3. Корреляционная длина.....	261
8.1.4. Толщина неоднородного поверхностного слоя.....	262
8.1.5. Размер сегнетоэлектрического выделения.....	263
8.1.6. Экранирование деполяризующих полей.....	265
8.1.7. Форма сегнетоэлектрической частицы.....	266
8.2. Механизмы повышения температуры фазового перехода в нанокompозите сегнетоэлектрик–диэлектрик.....	266
8.2.1. Фазовый переход на поверхности гранулы.....	267
8.2.2. Переходной слой на границе сегнетонаночастиц.....	271
8.2.3. Температурные напряжения.....	273
8.3. Неоднородные поляризованные состояния в сегнетоэлектрических включениях в нанокompозите сегнетоэлектрик–диэлектрик.....	280
8.4. Сегнетоэластический фазовый переход в пластине конечной длины.....	288
ГЛАВА 9. АНСАМБЛЬ БЕССТРУКТУРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ.....	295
9.1. Равновесные свойства ансамбля сегнетоэлектрических наночастиц в диэлектрической матрице.....	296
9.2. Спектр времен релаксации в ансамбле суперпараэлектрических частиц.....	300
9.3. Равновесные свойства ансамбля ферромагнитных наночастиц в неферромагнитной матрице.....	307
9.4. Динамика кластеров сегнетоэлектрических наночастиц.....	312
9.5. Динамические свойства ансамбля ферромагнитных наночастиц.....	317
ГЛАВА 10. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	323
10.1. Электростатическое взаимодействие сегнетоэлектрических частиц в диэлектрической матрице.....	325
10.2. Методы расчета эффективных характеристик материалов.....	332
10.2.1. Случай малых концентраций (разбавленной гетерогенной системы).....	337

10.2.2. Феноменологическая самосогласованная теория	
эффективной среды.....	339
10.2.3. Интегральный метод.....	342
10.2.4. Энергетический способ.....	343
10.2.5. Дипольное приближение.....	346
10.3. Эффективные коэффициенты упругости неоднородных тел.....	348
10.4. Эффективная проводимость двумерного смесового композита.....	353
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	359
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	360