

ФИЗИКА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД

Под редакцией

К. М. Рабе, Ч. Г. Ана, Ж. -М. Трискона

Перевод с английского

д-ра физ.-мат. наук, проф. Б. А. Струкова

и д-ра физ.-мат. наук, проф. А. И. Лебедева

5-е издание, электронное



Москва

Лаборатория знаний

2025

УДК 537
ББК 22.37
Ф50

Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд / под ред. К. М. Рабе, Ч. Г. Ана, Ж.-М. Трискона ; пер. с англ. — 5-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2025. — 443 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-865-4

Книга содержит семь аналитических обзоров ведущих ученых Европы и США. Материал дает представление о важных изменениях, произошедших в физике сегнетоэлектриков за последние 20 лет. Рассматриваются концептуальные достижения теории сегнетоэлектричества, новые технологии получения тонких эпитаксиальных пленок оксидных сегнетоэлектриков и сверхрешеток и методы их исследования. Описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований размерных эффектов в тонких и сверхтонких сегнетоэлектрических пленках, сегнетоэлектрических наночастицах и нанотрубках. Приводятся результаты изучения доменных стенок в тонких сегнетоэлектрических пленках, а также данные по исследованию мультиферроиков. Полученные сведения позволяют использовать сегнетоэлектрики в электронике и других областях техники, в том числе для создания сегнетоэлектрических энерго-независимых запоминающих устройств (FRAM) и диэлектрических слоев в интегральных схемах.

Для студентов, аспирантов, преподавателей вузов, практических специалистов и научных работников.

УДК 537
ББК 22.37

Деривативное издание на основе печатного аналога: Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд / под ред. К. М. Рабе, Ч. Г. Ана, Ж.-М. Трискона ; пер. с англ. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 440 с. : ил. — ISBN 978-5-9963-0302-1.

Первый тираж осуществлен при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 09-02-07041

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

Translation from the English language
edition: "Physics of Ferroelectrics"
edited by Karin M. Rabe, Charles
H. Ahn, Jean-Marc Triscone
Springer-Verlag Berlin Heidelberg
2007 Springer is a part of Springer
Science+Business Media. All Rights
Reserved.

Copyright ©

© Лаборатория знаний, 2015

ISBN 978-5-93208-865-4

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие переводчиков	5
Предисловие	7
Глава 1. Современная физика сегнетоэлектриков: необходимые основы. <i>Карин М. Рабе, Мэттью Даубер, Селина Лихтенштайгер,</i> <i>Чарльз Х. Ан, Жан-Марк Трискон.</i>	9
1.1. Введение	9
1.2. Переключение и петли гистерезиса	10
1.3. Кристаллографические особенности сегнетоэлектричества	15
1.4. Материалы	17
1.4.1. Оксиды со структурой перовскита.	17
1.4.2. LiNbO_3	25
1.4.3. Слоистые оксидные сегнетоэлектрики	26
1.4.4. Другие семейства сегнетоэлектрических оксидов.	28
1.4.5. Магнитные сегнетоэлектрические оксиды	28
1.4.6. Электронные сегнетоэлектрики	29
1.4.7. Наноразмерные сегнетоэлектрики	29
1.5. Применения сегнетоэлектриков.	31
1.5.1. Пироэлектрические и пьезоэлектрические устройства	31
1.5.2. Технология сегнетоэлектрической памяти	32
1.5.3. Потенциальные применения.	33
1.6. Замечание от редакторов	35
Литература.	35
Глава 2. Теория поляризации: современный подход. <i>Рафаэль Реста, Да-вид Вандербильт.</i>	42
2.1. Почему необходим современный подход?	42
2.1.1. Ошибочность представлений Клаузиуса—Моссотти	43
2.1.2. Ошибочность определения поляризации через распределе- ние заряда	45
2.2. Поляризация как протекание адиабатического тока	48
2.2.1. Как измеряется наведенная поляризация?	48
2.2.2. Как измеряется сегнетоэлектрическая поляризация?	50
2.2.3. Основные идеи теории поляризации	52

2.3. Формальное описание теории фазы Берри	54
2.3.1. Формулировка в непрерывном \mathbf{k} -пространстве	55
2.3.2. Формулировка в дискретном \mathbf{k} -пространстве	57
2.3.3. Квант поляризации	59
2.3.4. Формальная поляризация как многозначная векторная величина	61
2.3.5. Отображение на центры Ванье	64
2.4. Применение к сегнетоэлектрикам	66
2.4.1. Спонтанная поляризация	67
2.4.2. Аномальные динамические заряды	68
2.4.3. Пьезоэлектрические свойства	70
2.5. Дальнейшее развитие теории	71
2.5.1. Поляризация в ненулевом электрическом поле	71
2.5.2. Теорема о границе раздела и определение связанного заряда	73
2.5.3. Многочастичное решение и некристаллические материалы	75
2.5.4. Поляризация в методе функционала плотности Кона—Шэма	77
2.5.5. Локализация, поляризация и флуктуации	78
2.6. Заключение	79
Литература	80
Глава 3. Введение в теорию Ландау для сегнетоэлектриков. Премии Чандра, Питер Б. Литтлвуд	84
3.1. Введение	84
3.2. Теория Ландау—Девоншира	89
3.2.1. Общая феноменология	89
3.2.2. Переходы второго рода (непрерывные)	91
3.2.3. Переходы первого рода (прерывные)	93
3.2.4. Связь с деформациями	94
3.2.5. Домены	97
3.3. Теория Ландау—Гинзбурга	100
3.3.1. Общие соображения	100
3.3.2. Поляризационная корреляционная функция	101
3.3.3. Критерий Леванюка—Гинзбурга	102
3.3.4. Переходы типа смещения и порядок—беспорядок	105
3.3.5. Недавние результаты для объемных сегнетоэлектриков	108
3.4. Уменьшенные размеры и другие граничные эффекты	110
3.4.1. Общая дискуссия	110
3.4.2. Поляризация на границе	111
3.4.3. Эффекты деполяризации	114
3.4.4. Эпитаксиальные деформации	118
3.4.5. Эффекты, связанные с неоднородностями	121

3.5. Заключение и (некоторые) открытые вопросы	123
3.6. Благодарности	125
Литература	125
 Глава 4. Исследование сегнетоэлектрических оксидов из первых принципов. <i>Карин М. Рабе, Филипп Госез</i>	135
4.1. Введение	135
4.2. Методы расчетов из первых принципов	136
4.3. Результаты для оксидов со структурой перовскита	143
4.3.1. Структура основного состояния	143
4.3.2. Фононы, неустойчивости решетки и поляризация	149
4.3.3. Связь поляризации с деформацией	157
4.3.4. Диэлектрический и пьезоэлектрический отклики	159
4.3.5. Результаты для ненулевой температуры	162
4.4. Результаты для других соединений сегнетоэлектрических оксидов	166
4.5. Результаты для твердых растворов	169
4.6. Результаты для дефектов	174
4.7. Результаты для поверхности, тонких пленок, сверхрешеток, нанопроволок и наночастиц	176
4.8. Проблемы и перспективы	178
Литература	180
 Глава 5. Сходства и различия между сегнетоэлектриками и ферромагнетиками. <i>Никола А. Спалдин</i>	201
5.1. Основы	203
5.1.1. Природа спонтанной поляризации	203
5.1.2. Домены	215
5.2. Применения	221
5.2.1. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства с произвольной выборкой	224
5.2.2. Магниторезистивные запоминающие устройства с произвольной выборкой	225
5.3. Мультиферроики	227
5.3.1. Почему ферромагнитные сегнетоэлектрики редки?	228
5.3.2. Магнитоэлектрическое взаимодействие	229
5.3.3. Примеры некоторых материалов	230
5.3.4. Композиты	239
5.4. Заключение	240
Литература	241

Глава 6. Получение и новые применения эпитаксиальных оксидных тонких пленок. <i>Агхам-Байан Посадас, Микк Липпмаа, Фред Дж. Волкер, Мэттью Даубер, Чарльз Х. Ан, Жан-Марк Трискон.</i>	249
6.1. Введение	249
6.2. Выращивание тонких пленок сложных оксидов	251
6.2.1. Вакуумная камера	252
6.2.2. Контроль и поддержание температуры	253
6.2.3. Импульсное лазерное осаждение	259
6.2.4. Осаждение пленок распылением	271
6.2.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия оксидов	278
6.3. Подложки	293
6.4. Применение эпитаксиальных оксидных тонких пленок	307
6.4.1. Деформационная инженерия и сверхрешетки	308
6.5. Кристаллические оксиды на полупроводниках (КОП)	318
6.5.1. Выращивание КОП с определенной последовательностью слоев	321
6.5.2. Каким образом силициды способствуют эпитаксии	327
6.6. Заключение	330
Литература	331
Глава 7. Размерные эффекты в сегнетоэлектриках. <i>Селин Лизтенштейгер, Мэттью Даубер, Жан-Марк Трискон.</i>	346
7.1. Размерные эффекты в сегнетоэлектриках	346
7.2. Размерные эффекты в теории Гинзбурга—Ландау—Девоншира	347
7.3. Внешние размерные эффекты	348
7.4. Влияние экранирования	350
7.4.1. Простая электростатическая модель	350
7.4.2. Недавние экспериментальные работы: сверхтонкие пленки на металлических электродах	351
7.4.3. Скейлинг коэрцитивного поля	365
7.4.4. Тонкие пленки на изолирующих подложках	366
7.5. Сверхрешетки	368
7.6. Другие геометрии	371
7.6.1. Наночастицы	371
7.6.2. Размерные эффекты, связанные с площадью образцов	373
7.6.3. Самоорганизация	373
7.6.4. Новые сегнетоэлектрические геометрии	374
Литература	375
Глава 8. Исследования доменных стенок в эпитаксиальных сегнетоэлектрических тонких пленках на наномасштабах. <i>Патриция Паруч, Тьерри Джамарчи, Жан-Марк Трискон.</i>	382
8.1. Введение	382

8.2. Сегнетоэлектрические доменные стенки как упругие неупорядоченные системы	384
8.3. Статическое и динамическое поведение упругих неупорядоченных систем	384
8.4. Экспериментальное наблюдение ползучести доменных стенок . .	388
8.5. Ползучесть доменных стенок в соразмерном потенциале	392
8.6. Ползучесть доменных стенок в случайном потенциале	395
8.7. Экспериментальное наблюдение шероховатости доменных стенок	399
8.8. Доменные стенки в присутствии беспорядка типа «случайные связи» и диполь-дипольных взаимодействий	402
8.9. Последние исследования динамики сегнетоэлектрических доменных стенок	403
8.10. Заключение	404
Литература	405
Приложение А. Коэффициенты разложения свободной энергии Ландау. <i>Лонг-Куинг Чен</i>	409
A.1. BaTiO_3	411
A.2. SrTiO_3	411
A.3. $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ (PZT)	413
A.4. PbTiO_3	414
A.5. LiTaO_3 и LiNbO_3	414
A.6. $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$	416
A.7. $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$	416
Литература	416
Приложение В. Таблицы комбинаций материал—подложка. <i>Селин Лихтенштайгер, Мэттью Даубер</i>	418
Литература	433