

На правах рукописи



Барабаш Татьяна Константиновна

**ФРАКТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МОДЕЛЬНЫЕ
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДАМИ РЭМ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Барнаул – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Амурский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент **Масловская Анна Геннадьевна**

Официальные оппоненты: **Солнышкин Александр Валентинович**,
доктор физико-математических наук,
доцент, ФГБОУ ВО «Тверской
государственный университет», заведующий
кафедрой физики сегнето- и пьезоэлектриков

Гафнер Юрий Яковлевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Хакасский
государственный университет
им. Н.Ф. Катанова», заведующий
кафедрой общей и экспериментальной
физики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения», г. Хабаровск

Защита состоится « 26 » июня 2015 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.04 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, e-mail: veronika_65@mail.ru .

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова <http://www.altstu.ru/structure/unit/odia/scienceevent/2479/>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Романенко В.В.

Примечание: отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организаций, просим присылать в 2-х экз. на адрес университета и e-mail: veronika_65@mail.ru .

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из приоритетных направлений в физике конденсированного состояния является задача исследования и модификации свойств различных функциональных диэлектрических материалов с привлечением возможностей растровой электронной микроскопии (РЭМ). Распространение аналитических методик РЭМ на сегнетоэлектрические материалы обусловлено способностью электронного зонда взаимодействовать с электрическими полями образцов, что делает РЭМ весьма привлекательным инструментом для анализа геометрического и потенциального рельефа, изучения и модификации электрических свойств полярных диэлектриков, а также открывает принципиальные возможности применения все более разнообразных режимов формирования видеосигнала.

Актуальные области практического применения сегнетоэлектриков в качестве активных элементов электронных схем основаны на способности таких материалов менять направление поляризации в неравновесных внешних условиях. Поэтому исследование эффектов в сегнетоэлектрических кристаллах, возникающих в условиях электронного облучения и влияющих на кинетику доменной структуры и переключение поляризации, представляет интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения практических приложений.

В настоящее время известен широкий ряд работ, посвященных использованию экспериментальных режимов РЭМ для визуализации доменных структур, анализа и модификации основных свойств сегнетоэлектрических материалов. Первые результаты были получены G.Y. Robinson и R.M. White, R. Le Bihan и M. Maussion, Y. Uchicawa и S. Ikeda, Г.В. Спиваком с соавторами, А.С. Олейником, в работах которых была показана возможность выявления доменных структур широкого ряда сегнетоэлектрических материалов за счет потенциального рельефа, существующего на поверхности кристаллов. Неослабевающий интерес исследователей обусловил дальнейшее развитие этой тематики в более поздних работах N. Nakatani, L. Szczesniak, В.З. Бородина и А.А. Согра, В.В. Аристова и Л.С. Коханчик, J. He, D.B. Li и многих др., посвященных разработке нестандартных аналитических методик РЭМ, позволяющих не только визуализировать потенциальный контраст, но и наблюдать динамику доменной структуры, а также контролировать индуцированные электронным зондом процессы переключения поляризации.

Для модельного представления одной из основных интегральных характеристик – тока переключения поляризации в сегнетоэлектриках – на практике применяют концепции статистической теории кристаллизации Колмогорова-Аврами, модификации которой были развиты в работах E. Fatuzzo, Y. Ishibashi, Y. Takagi, H. Orihara, В.Я. Шура, J.F. Scott. Переключение поляризации типичных сегнетоэлектриков является результатом образования самоподобных структур; геометрия доменных конфигураций и динамические характеристики сегнетоэлектрических кристаллов обнаруживают фрактальное поведение в процессе переключения поляризации. Фрактальность подобных процессов связывают с наличием эффектов памяти системы, со свойствами анизотропии реальных кристаллов, со сложными механизмами динамики доменных границ и перестройкой доменной структуры. Для описания геометрических характеристик доменных конфигураций и закономерностей динамики доменных границ, определяющих процессы переключения поляризации в сегнетоэлектриках, в качестве теоретического базиса оказываются применимы концепции фрактальной теории. Отдельные аспекты использования фрактального подхода для описания сложного скейлинга сегнетоэлектрических доменных структур, а также для моделирования тока переключения поляризации представлены в

работах современных авторов: Т. Ozaki и К. Fujii, Д.В. Пелегова, В. Tadic, Y-R. Jeng, Н.М. Галияровой, С.А. Садыкова и др. Однако задачи исследования фрактальных закономерностей геометрических конфигураций доменных структур, наблюдаемых при исследовании с помощью методик РЭМ, а также динамики доменных границ и процессов переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов, стимулированных электронным зондом, обуславливают специфику исследуемой предметной области и формируют широкий круг вопросов, которые на сегодняшний день остаются открытыми и требуют отдельного изучения.

Объектом исследования являются растровые изображения доменных структур сегнетоэлектриков и кинетика переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов, **предметом исследования** – изображения сегнетоэлектрических доменных структур, полученные методами РЭМ, и индуцируемые электронным облучением процессы переключения поляризации в сегнетоэлектрических кристаллах.

Цель диссертационной работы заключалась в развитии подхода к описанию процессов формирования токов переключения поляризации в сегнетоэлектрических кристаллах при воздействии электронного зонда РЭМ с учетом фрактальной природы строения и динамики доменной структуры.

Для достижения цели был сформулирован и решен ряд **научных задач**.

1. Выполнить количественную оценку фрактальных характеристик статических РЭМ-изображений доменных структур типичных сегнетоэлектриков, учитывая механизмы формирования потенциального контраста сегнетоэлектриков в различных режимах РЭМ.

2. Специфицировать особенности неоднородности доменных границ сегнетоэлектриков, обусловленные воздействием электронного зонда. Установить закономерности эволюции изображений доменных структур сегнетоэлектриков в последовательных стадиях переключения поляризации, наблюдаемых в режимах динамического контраста РЭМ.

3. Определить характер динамики доменной структуры по данным отклика сегнетоэлектрических кристаллов в условиях инъекции электронного зонда РЭМ.

4. Развить модельные представления процессов формирования токов переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов с учетом фрактального характера динамики доменных границ.

5. Разработать модель, позволяющую описать механизмы перестройки доменной структуры и процесс формирования видеосигнала в режиме токов электронно-стимулированной поляризации. Провести прогнозирование изменения полярного состояния сегнетоэлектрика в зависимости от условий электронного зондирования на основе интерпретации результатов моделирования.

Методы решения задач научного исследования. Для исследования геометрических характеристик РЭМ-изображений доменных структур и временных зависимостей тока переключения поляризации сегнетоэлектриков применялись методы фрактального и мультифрактального анализа. При построении и реализации модели процесса переключения поляризации сегнетоэлектриков использованы методы математического и имитационного моделирования, в частности, численные методы решения дробно-дифференциальных уравнений, схема метода Монте-Карло.

Новизна диссертационного исследования определяется следующими результатами:

1. Развита теоретический подход к исследованию кинетики переключения поляризации сегнетоэлектриков при диагностике методами РЭМ, состоящий в многоступенчатом процессе оценки фрактальных характеристик геометрии доменных структур и отклика сегнетоэлектрика на воздействие электронного зонда, а также в учете самоподобного характера динамики доменов в модели формирования токов переключения поляризации.

2. Определены количественные характеристики наблюдаемых модификаций геометрии доменных структур и доменных границ при исследовании сегнетоэлектриков методами РЭМ, в частности, связанных с накоплением инжектированных зарядов, распределением дефектов, а также со стохастическим процессом появления зародышей (эффектом Баркгаузена). Установлено, что фрактальная размерность изображений доменной структуры кристалла ТГС в последовательных стадиях переключения поляризации, визуализируемых в режиме динамического контраста РЭМ, изменяется циклически.

3. Разработан комплекс прикладных программ, позволяющих проводить исследования геометрии доменных конфигураций и динамических характеристик процесса переключения поляризации в сегнетоэлектриках методами фрактального и мультифрактального анализа. Программный комплекс включает реализацию авторского перколяционно-фрактального алгоритма, который предоставляет возможности оценки степени неоднородности и изрезанности доменных границ.

4. Установлены фрактальные и мультифрактальные свойства индуцированных электронным облучением импульсов токов переключения поляризации в сегнетоэлектриках, которые свидетельствуют о сложном самоподобном характере динамики доменных границ и дают количественную оценку эффектов статистической памяти в динамическом процессе перестройки доменной структуры.

5. Предложен модифицированный подход для фрактальной модели тока переключения поляризации сегнетоэлектриков в рамках теории Колмогорова-Аврами. Модификация основана на использовании численной аппроксимации производной дробного порядка по времени и позволяет моделировать процесс переключения с учетом нецелого значения показателя степени доменного роста.

6. Разработана оригинальная модель, позволяющая описать процесс формирования тока переключения сегнетоэлектрических кристаллов в режиме токов электронно-стимулированной поляризации. Модель учитывает фрактальный характер динамики доменной структуры и обнаруживает согласование с данными эксперимента. Установлены закономерности изменения формы кривой импульса тока переключения в режиме инжекции при вариации параметров моделирования, соответствующих различным условиям экспериментального наблюдения.

Теоретическая и практическая значимость заключается в разработке многоаспектного подхода к исследованию фрактальной динамики сегнетоэлектрических доменных структур при исследовании методами РЭМ, состоящего из взаимосвязанных этапов: оценки скейлинговых характеристик геометрии статических и динамических доменных конфигураций, диагностики фрактальных размерностей временных зависимостей токов переключения поляризации, моделирования на основе проведенного анализа процесса формирования отклика сегнетоэлектриков на воздействие электронного зонда. Предложенная физико-математическая модель динамики переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов в режиме инжекции электронного пучка дает теоретическое обоснование экспериментальной методики формирования изображения доменных структур сегнетоэлектриков – режима токов электронно-стимулированной поляризации.

Реализованные в программных комплексах методики могут служить инструментарием, используемым для оценок фрактальных характеристик неоднородных физических систем, как в рамках научных исследований, так и в учебном процессе. Результаты диссертационной работы используются при преподавании отдельных тем дисциплин «Математические методы обработки данных», «Математическое моделирование физических процессов» для студентов, обучающихся в ФГБОУ ВПО «АмГУ» по направлению «Прикладные математика и физика».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Геометрия статических доменных конфигураций сегнетоэлектриков, визуализируемых методами РЭМ, а также наблюдаемые экспериментально эффекты «эрозии» доменных границ при электронном облучении и перестройки доменной структуры в процессе переключения поляризации в режимах динамического контраста РЭМ описываются численными характеристиками в рамках концепции фрактальной и мультифрактальной теории.

2. Временные зависимости импульсов токов электронно-стимулированной поляризации в сегнетоэлектриках в режиме инжекции электронного зонда обнаруживают самоподобный характер динамики доменной структуры и присутствие эффектов памяти в процессе переключения поляризации, индуцируемой электронным зондом.

3. Предложенная на основе фрактального подхода модель динамики доменной структуры под действием инжектированных вглубь образца электронов отвечает законам формирования видеосигнала в инжекционном режиме и корректно воспроизводит форму импульсов токов переключения поляризации.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных принципов при построении моделей процесса переключения поляризации сегнетоэлектриков, корректными физической и математической постановками задач, обоснованностью принятых допущений, применением современных верифицированных методов и средств математического и компьютерного анализа, согласием с экспериментальными данными и результатами других исследователей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XI, XII, XIII, XIV, XV региональных научно-практических конференциях «Молодежь XXI века: шаг в будущее» (Благовещенск, 2010 г., 2011 г., 2012 г., 2013 г., 2014 г.); VIII, IX, X региональных научных конференциях «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Благовещенск, 2009 г., Хабаровск, 2010 г., Владивосток, 2011 г.); I Всероссийской конференции молодых ученых «Математическое моделирование фрактальных процессов, родственные проблемы анализа и информатики» (Терскол, 2010 г.); Международной научной школе-конференции «Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials» (Владивосток, 2011 г.); Международном российско-китайском симпозиуме «Modern materials and technologies» (Хабаровск, 2011 г.); Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 2011 г.); Международном симпозиуме «11th International symposium on ferroic domains and micro- to nanoscopic structures and 11th Russia/CIS/Baltic/Japan symposium on ferroelectricity» (Екатеринбург, 2012 г.); Всероссийских молодежных научных конференциях «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Благовещенск, 2012 г., 2014 г.).

Результаты работы также неоднократно докладывались и обсуждались на научно-методических семинарах кафедр «Теоретическая и экспериментальная физика», «Физика» Амурского государственного университета.

Соответствие паспорту специальности. Научные результаты, полученные в рамках диссертации, соответствуют пункту 5 паспорта специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (физико-математические науки): разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения.

Связь работы с научными темами и программами. Основные результаты диссертационной работы были получены автором при проведении исследований, выполнявшихся в 2010-2014 гг. в рамках следующих НИР: «Воздействие тепловых полей и высококонцентрированных потоков энергии на неорганические материалы», проект № 2.1.2/9665 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 гг.)»; «Исследование физических свойств, структуры и процессов самоорганизации диэлектрических систем» – НИР по заданию Минобрнауки РФ ФГБОУ ВПО «АмГУ» на проведение в 2012 г. НИР по тематическому плану научно-исследовательских работ (№ гос. рег. НИР: 2.2639.2011); инициативная НИР ФГБОУ ВПО «АмГУ» «Разработка численных алгоритмов исследования и компьютерное моделирование физических систем» (№ гос. рег. НИР 01201251796), 2011-2014 гг., а также по грантам «Исследовательский проект» ФГБОУ ВПО АмГУ в 2011 и в 2012 гг.

Публикации и личный вклад автора. В список основных публикаций по теме диссертации включены 22 работы, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ (3 из которых цитируются международными базами Scopus и Web of Science), 5 статей в региональных изданиях, 10 материалов докладов в сборниках международных, всероссийских и региональных конференций, 2 свидетельства о государственных регистрациях программ для ЭВМ.

Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично или в соавторстве при его непосредственном участии. Выбор направлений и методов исследования, постановка и решение прикладных задач осуществлены совместно с научным руководителем. Разработка и реализация моделей и модифицированных алгоритмов, анализ фрактальных и мультифрактальных закономерностей динамических характеристик сегнетоэлектрических материалов выполнялись автором самостоятельно. Соавторы совместных публикаций принимали участие в разработке отдельных программных решений, проведении и обработке результатов некоторых вычислительных экспериментов.

Достижения автора. Стипендия Правительства Российской Федерации в 2013-2014 учебном году. Диплом победителя отборочного тура всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области математических наук по направлению «Математическое моделирование в естественных науках» (Ульяновск, 2012 г.). Победитель конкурса «Молодой ученый-аспирант года» ФГБОУ ВПО «АмГУ» в 2013 г. Грамоты за лучшие доклады на международной научной школе-конференции “Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials” (Владивосток, 2011 г.) и всероссийских молодежных научных конференциях «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Благовещенск, 2012 г., 2014 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Рукопись диссертации содержит 167 машинописных страниц основного текста, 53 рисунка, литературный перечень из 182 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, указаны новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура работы и функциональные связи между отдельными главами.

Первая глава «Исследование основных свойств полярных диэлектрических материалов, находящихся в неравновесных условиях электронного облучения» представляет аналитический обзор известных результатов исследований процессов динамики доменной

структуры и переключения поляризации в сегнетоэлектриках под действием электронного зонда РЭМ, а также теоретических подходов к формализации этих явлений.

Представлены литературные данные по базовым положениям теории сегнетоэлектричества, теоретическим подходам к построению и способам реализации моделей кинетики переключения поляризации и формирования отклика сегнетоэлектрических материалов. Проведен анализ исследований, посвященных использованию фрактальной теории для исследования и моделирования динамических характеристик сегнетоэлектрических материалов. Приведены сведения относительно возможности применения методик РЭМ для исследования и модификации свойств сегнетоэлектрических материалов.

В целом показано, что различным теоретическим и экспериментальным аспектам изучения сегнетоэлектриков посвящен достаточно широкий круг работ, тем не менее, ряд вопросов остается далеким от полного разрешения. В частности, задачи визуализации доменных конфигураций с помощью методик РЭМ и разработки новых режимов для наблюдения электронно-стимулированных процессов переключения поляризации в сегнетоэлектриках проводят к необходимости развития теоретического базиса, предназначенного для анализа и моделирования наблюдаемых эффектов.

В заключительной части главы сформулированы объект и предмет исследования, определена общая концепция диссертационного исследования.

Во второй главе «Исследование свойств самоподобия РЭМ-изображений доменных конфигураций типичных сегнетоэлектриков» обобщены результаты анализа фрактальных и мультифрактальных характеристик растровых изображений доменных конфигураций типичных сегнетоэлектриков, наблюдаемых в режимах статического и динамического контраста в РЭМ.

На основе анализа особенностей строения визуализируемых РЭМ-изображений доменных структур типичных сегнетоэлектриков систематизирован набор методик фрактального и мультифрактального анализа, привлекаемых в качестве теоретического базиса для исследования скейлинговых характеристик доменных структур сегнетоэлектриков.

Фрактографический метод «островов среза» [1], использующий соотношение между площадью S и периметром P , введенное Мандельбротом,

$$P(\delta) = C\delta^{(1-D)}(S(\delta))^{D/2}, \quad (1)$$

позволяет вычислить фрактальную размерность D измеряемого изображения границы кластерной структуры при заданном эталоне длины δ . С учетом сложности и неоднородности строения анализируемых доменных структур, предложен авторский алгоритм расчета размерности растровых изображений доменных границ. Модификация основана на использовании соотношения (1), процессе маркировки кластеров с помощью алгоритма Хошена-Копельмана и включает рекурсивную процедуру, исключающую некорректную маркировку кластеров при повторном просмотре.

Информацию о степени неоднородности всей структуры можно получить, используя алгоритм метода покрытий [1]. Для структур, обладающих сложным строением, использованы метод мультифрактальной параметризации и метод максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразований, которые позволяют определять набор скейлинговых характеристик. Для совокупности рассмотренных методик проведена алгоритмизация и программная реализация, что позволяет проводить расчет скейлинговых характеристик РЭМ-изображений доменных структур сегнетоэлектриков, инициализируемых в виде растровых изображений в битовом формате.

Отмечено, что анализ геометрических свойств изображений доменных структур сегнетоэлектриков, визуализируемых с помощью методик РЭМ, обладает рядом специфиче-

ских особенностей в силу того, что картина потенциального контраста есть результат взаимодействия пучка электронов с исследуемым образцом. На основе анализа данных по методическим основам экспериментального зондирования сегнетоэлектриков в РЭМ представлены механизмы формирования контраста доменов и доменных границ. При этом тональность доменов и доменных границ во многом определяется особенностями используемого режима. Показано, что в «активных» режимах сканирования [2] электронный зонд сначала инициирует специфические эффекты в облучаемом образце, а впоследствии их регистрирует. Одним из приоритетных факторов в проведении фрактального анализа является вопрос правильной интерпретации растрового изображения анализируемых элементов доменной структуры и корректного представления входных данных.

Установлено, что РЭМ-изображения статических доменных конфигураций сегнетоэлектриков характеризуются сложным скейлингом. Расчет значений фрактальной размерности методом покрытий для широкого ряда сегнетоэлектриков, показал, что размерность лежит в диапазоне от 1.6 до 1.9, что в целом свидетельствует о фрактальности изображений. Результаты расчета включают оценки, которые были построены по нескольким изображениям: для сегнетовой соли – $D=1.72-1.88$, для ТГС – $D=1.71-1.92$, для титаната бария $BaTiO_3$ – $D=1.60-1.77$, для титаната висмута $Bi_4Ti_3O_{12}$ – $D=1.84-1.89$, для титаната свинца $PbTiO_3$ – $D=1.64-1.78$, для нитрита натрия $NaNO_2$ – $D=1.86-1.95$, сегнетоэлектрической керамики PZT $D=1.52-1.56$. Однако классический метод покрытий квадратными кластерами дает только количественную характеристику степени заполнения фракталом пространства и не позволяет описать форму структур, составляющих изображение.

Изрезанность и шероховатость доменных границ устанавливалась методом «островов среза» и характеризовалась фрактальной размерностью от почти регулярных форм, для которых $D=1.05$, до сильно изогнутых, с ярко выраженными фрактальными свойствами, для которых $D=1.66$. Фрактальная размерность доменных границ, разделяющих 90° a -компоненты спонтанной поляризации, и границ, разделяющих антипараллельные 180° c -компоненты, в монокристаллах титаната висмута оказалась довольно значительной и распределена в интервале $D=1.509-1.780$. Пример результатов расчета размерности линии, ограничивающей кластеры – a - и c -домены, представлен на рис. 1 a .

Фрактальная размерность доменной границы одиночного кластера для РЭМ-контраста доменной структуры кристалла GASH (в плоскости, перпендикулярной полярной оси) методом покрытий дает $D=1.645$. Расчет фрактальной размерности границ доменов для кристалла ТГС, визуализируемого в режиме токов электронно-стимулированной поляризации, дает для положительных доменов $D=1.201$ и отрицательных – $D=1.287$. РЭМ-изображения доменной структуры ТГС, полученные в процессе нагрева до T_C и в результате глубокого отжига при $T \gg T_C$ приводят к модификации исходной структуры и характеризуются выстраиванием доменов в вытянутые цепочки. Сначала доменная структура напоминает структуру, характерную для процесса полимеризации гелей, – образование «вязких пальцев». Вытягивание доменов в цепочки при отжиге приводит к сглаживанию границ, для которых $D=1.110$ для положительных доменов ($D=1.149$ для отрицательных). Для структуры, образующейся в результате глубокого отжига, оценка фрактальной размерности границ положительных доменов дает значение $D=1.193$ (отрицательных – $D=1.168$). Граница раздела доменов противоположной полярности также является фрактальной. Применение метода покрытий для расчета фрактальной размерности линии (границы раздела областей противоположной полярности) по соотношению приводит к $D=1.624$.

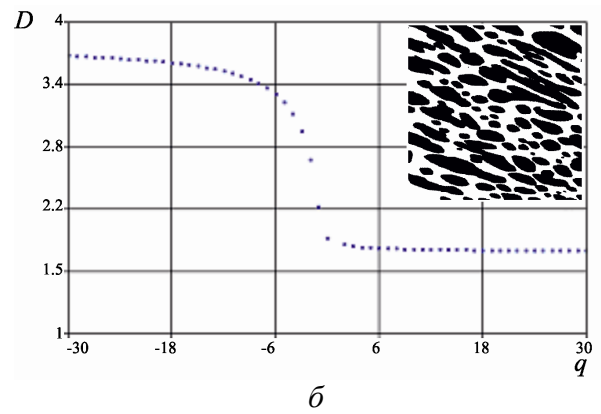
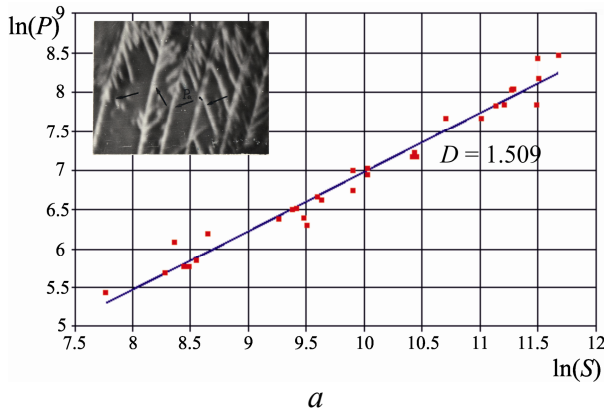


Рис. 1. Результат фрактального анализа доменной структуры титаната висмута (на вставке) методом «островов среза» – *а* и результат мультифрактального анализа доменной структуры ТГС (на вставке) – *б*

Показано, что для режима токов электронно-стимулированной поляризации (ТЭСП) эффект эрозии доменной границы в кристалле ТГС, индуцированной электронным облучением, характеризуется значительным увеличением фрактальной размерности с $D=1.245$ до $D=1.521$.

В режимах динамического контраста было отмечено, что усложнение структуры в процессе ее динамики характеризуется увеличением значения фрактальной размерности изображения и незначительным увеличением фрактальной размерности границ. Разрастание доменов в кристалле титаната висмута с параллельной полю *c*-компонентой путем расширения клиньев, образующихся на 90° доменной стенке, сопровождается увеличением фрактальной размерности, вычисленной методом покрытий, с $D=1.784$ до $D=1.807$. Фрактальность же самих доменных границ, анализируемая с помощью метода «островов среза», остается в узком интервале $D \in (1.61, 1.66)$. В последовательных стадиях визуализации динамики изменения доменной структуры BaTiO_3 фрактальная размерность изменяется в диапазоне $D = [1.608, 1.613, 1.729, 1.734]$. Подобного рода анализ, проведенный для поэтапных изображений полного цикла переключения поляризации ТГС в режиме потенциального электронного контакта, позволяет сделать вывод о том, что усложнение доменной структуры как для бокового роста положительных, так и отрицательных доменов происходит одинаково: фрактальная размерность изображения изменяется в пределах $1.63 < D < 1.99$, границ доменов – $1.012 < D < 1.214$.

Процесс переключения поляризации в кристалле ТГС, наблюдаемый в режиме ТЭСП, осуществляется сквозным прорастанием доменов сквозь кристалл и подобная «эрозия» внутренней структуры доменов характеризуется усложнением ее геометрии и ростом значения фрактальной размерности со значения $D=1.112$ до $D=1.236$.

Проведенный мультифрактальный анализ для типичной доменной структуры кристалла ТГС позволил рассчитать спектральные характеристики, дающие информацию о дисперсии фрактальных размерностей (рис. 1 *б*, анализу подлежат положительные домены – темный контраст).

Полученная зависимость скейлинговой экспоненты $\tau(q)$ является нелинейной, что характерно для мультифрактальных структур. Анализ спектра размерностей Реньи $D(q)$ позволяет определить набор размерностей, образующих исследуемое множество точек, а также оценить ширину фрактального спектра ($\Delta\alpha \approx 2$). Анализируемое изображение доменной структуры кристалла ТГС имеет самоподобное строение с распределением фрактальной размерности в диапазоне 1.7-3.7. Метод вейвлет-преобразований [3] позволяет визуализировать картину вейвлет-коэффициентов и скелетон экстремумов, которые демонстрируют иерархическую структуру профиля изображения. Также этот метод дает

спектральные характеристики $\tau(q)$ и $f(q)$, численно согласующиеся с зависимостями, полученными методом мультифрактальной параметризации [1]. Значение $D(q=0)\approx 1.86$ соответствует фрактальной размерности, вычисленной методом покрытий.

Таким образом, неоднородная геометрия РЭМ-изображений сегнетоэлектриков может быть специфицирована численно на основе концепций фрактального формализма. Проведенный анализ позволил установить количественные оценки степени упорядоченности таких структур: фрактальные размерности отдельных изображений и степень несовершенства доменных границ (на основе метода покрытий); фрактальную размерность границ кластерной структуры (метод «островов среза»), а также спектральные характеристики исследуемых изображений с использованием алгоритмов мультифрактального анализа.

Третья глава «Фрактальные и мультифрактальные закономерности динамических характеристик переключения поляризации сегнетоэлектриков под действием электронного облучения» объединяет результаты исследования скейлинговых характеристик токов переключения поляризации сегнетоэлектриков, регистрируемых в режиме инжекции электронного пучка.

Свойство самоподобия геометрии доменных конфигураций, наблюдаемых в режимах статического и динамического контраста в РЭМ, не является единственной фрактальной характеристикой сегнетоэлектрических материалов. Динамические характеристики сегнетоэлектриков также обладают фрактальными свойствами, что связано со стохастичностью процесса зародышеобразования, с нелинейной перестройкой и динамикой доменной структуры, обусловленной боковым или сквозным прорастанием доменов в процессе переключения поляризации, с наличием дефектной структуры (и взаимодействием доменных стенок с дефектами) и присутствием эффектов памяти, проявляющихся, в частности, в повторяемости центров зародышеобразования при циклическом переключении поляризации. На основе широкого ряда методов проведены исследования скейлинговых характеристик временных зависимостей импульсов токов переключения поляризации в сегнетоэлектрических кристаллах ТГС, регистрируемых в режиме электронно-стимулированной поляризации в РЭМ [4].

Для исследования фрактальных свойств тока переключения применены метод нормированного размаха (R/S -анализ) и метод Фурье. Полученные результаты: показатель Херста $H=0.73$ и фрактальная размерность $D=1.27$ (рис. 2 а) свидетельствуют в пользу предположения о проявлении свойств самоорганизованного движения доменных границ в процессе переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов. Временная зависимость тока переключения поляризации, отражающая процессы перестройки доменной структуры под действием электронного облучения, характеризуется персистентным поведением: в процессе формирования последующих состояний системы учитываются предыдущие состояния. Данный факт можно связать с эффектами долговременной памяти в сегнетоэлектрических материалах.

Для поддержки проводимых исследований разработан программный комплекс, который объединяет отдельные модули, реализующие методы фрактального (метод R/S -анализа и метод Фурье [1]) и мультифрактального анализа (метод мультифрактального флуктуационного анализа [5] и метод максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования [3]).

Технический анализ разбитого на участки временного ряда, представленного током переключения поляризации, дает различные значения фрактальной размерности для каждого анализируемого периода. Такой результат обусловлен смешанной природой тока

переключения, которая количественно может быть охарактеризована с использованием мультифрактального анализа. Применение мультифрактального анализа позволило более детально исследовать фрактальные свойства токов переключения. Так, метод мультифрактального флуктуационного анализа временных рядов [5] позволяет получить непрерывный спектр фрактальных размерностей. Дополнительные возможности открывает метод вейвлет-анализа временных колебаний, позволяющий локализовать временные и масштабные свойства динамических данных. Результат представлен на рис. 2 б.

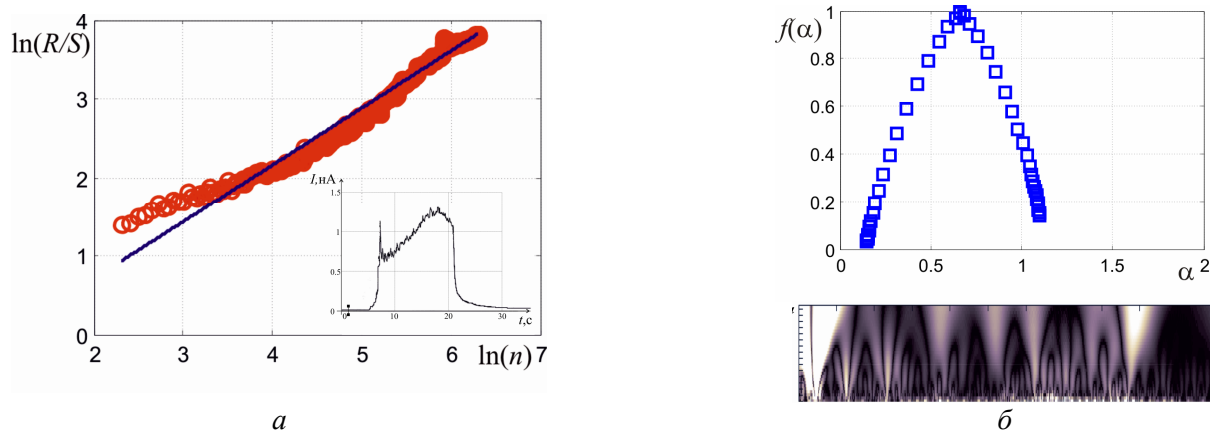


Рис.2. Результат R/S -анализа – a ; картина вейвлет-коэффициентов и спектр фрактальных размерностей $f(\alpha)$ – b для импульса тока переключения поляризации кристалла ТГС (на вставке) в режиме ТЭСР

Картина вейвлет-коэффициентов наглядно показывает иерархическую структуру флуктуаций сигнала, такая особенность обусловлена тем, что исследуемый сигнал обладает свойствами самоподобия. Рассчитанный спектр фрактальных размерностей дает вариацию значений фрактальной размерности в диапазоне $0.9 \leq D \leq 1.9$, что подтверждает предположение о мультифрактальной природе процесса переключения поляризации в инжекционном режиме. Абсцисса максимума спектральной кривой соответствует параметру Херста фрактального процесса.

Установленные фрактальные закономерности использованы при построении математической модели тока переключения поляризации в режиме инжекции пучка электронов на этапе учета характерной размерности кинетического процесса.

Четвертая глава «Развитие теоретических подходов к описанию процесса переключения поляризации сегнетоэлектриков в неравновесных условиях электронного облучения» посвящена развитию теоретических основ и построению модифицированной модели процесса динамики доменной структуры и формирования токов переключения поляризации сегнетоэлектриков в режиме токов электронно-стимулированной поляризации.

Первый этап представлен разработкой модифицированной модели формирования тока переключения поляризации в сегнетоэлектриках с использованием концепций дробно-дифференциального исчисления. В качестве базового подхода использована фрактальная модификация модели Колмогорова-Аврами, предложенная авторами работы [6], в которой для описания эффектов статистической памяти в динамическом процессе перестройки доменной структуры используется производная по времени дробного порядка [7]:

$$I(\tau) = \frac{2P_S \cdot S}{\bar{t}} \frac{d^{\alpha}}{d\tau^{\alpha}} V(\tau), \quad (2)$$

где $\tau = t/\bar{t}$ – безразмерное время; \bar{t} – характерное время переключения; α – динамическая фрактальная размерность, $\alpha \in (0,1]$; P_S – поляризация кристалла, Кл/м²; S – площадь электрода, м²; $V(\tau)$ – отношение переключенного объема к полному объему образца.

Модифицированная модель предполагает использование аппроксимирующего выражения для безразмерной величины $V(\tau) = 1 - \exp(-\tau^n)$, позволяющее учитывать размерность доменного роста n , а также включает численную схему решения задачи расчета тока переключения на основе конечно-разностной аппроксимации дробной производной с использованием формулы Грюнвальда-Летникова:

$$\frac{d^{\delta} V(\tau)}{d\xi^{\delta}} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{\Gamma(-\delta)} \cdot \frac{1}{h^{\delta}} \cdot \sum_{i=0}^k \frac{\Gamma(i-\delta)}{\Gamma(i+1)} V(\tau - ih), \quad \text{ш} = \{\tau_i = \tau_0 + ih, i = \overline{0, N}\}, \quad (3)$$

где h – шаг по времени; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера.

Однако введенный в рассмотрение подход обладает рядом недостатков применительно к решению задачи моделирования токов переключения поляризации в режиме токов электронно-стимулированной поляризации. Во-первых, метод в силу введения эмпирической зависимости для $V(\tau)$ относится к группе аппроксимационных и не учитывает специфику динамики доменной структуры, индуцированной электронным зондом. Во-вторых, модель (2) не включает управляющие параметры экспериментальных режимов РЭМ. В-третьих, модель не приводит к удовлетворительному согласованию с формой регистрируемых токовых кривых. Поэтому на следующем этапе разработана модель, описывающая формирование тока переключения поляризации в режиме инжекции электронного пучка.

Метод ТЭСП [2] основан на использовании эффекта инжекции электронного пучка в образец при повышенных ускоряющих напряжениях (10-40 кВ). Метод ТЭСП позволяет визуализировать потенциальный контраст и одновременно наблюдать процесс переключения поляризации. Схема регистрации видеосигнала показана на рис. 3. Инжекция электронов в образец на глубину l приводит к накоплению зарядов в облученном слое q , на верхнем q_1 и нижнем q_2 электродах, что вызывает появление электрических полей E_1 и E_2 в облученной и необлученной частях кристалла. Поле E_2 способно инициировать переключение поляризации доменов, ориентированных «хвост-к-лучу», и, напротив, стабилизировать доменную структуру с ориентацией вектора \mathbf{P}_s «голова-к-лучу».

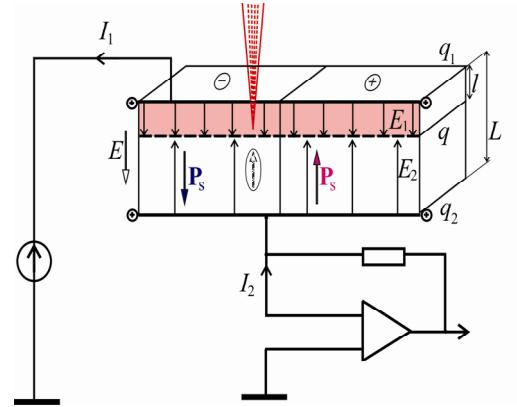


Рис. 3. Схема регистрации сигнала

Модель динамики 180° доменной структуры и формирования тока переключения поляризации строится на следующих положениях. Ток переключения поляризации (2) выражался с использованием соотношения для скорости движения доменной стенки:

$$I(t) = \frac{2P_s S}{L} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad v = v_\infty \exp(-\delta / E_2), \quad (4)$$

где L – толщина кристалла, м; v_∞ – максимальная скорость движения стенки при $E \rightarrow \infty$, м/с; δ – поле активации, В/м.

Принимая во внимание особенности переключения поляризации в режиме ТЭСП, в модель введен механизм клинообразного роста доменов (рис. 4): расширение области переключения осуществляется путем роста клиньев с фиксированной шириной основания $2y$ и меняющимся углом наклона доменной границы φ . Процесс переключения поляризации заканчивается при переходе серединой клина $z(t) = l + x(t)/2$ границы L .

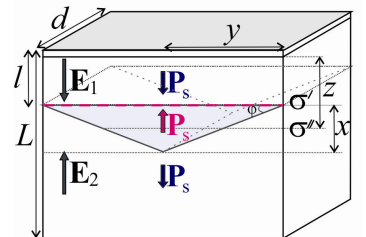


Рис. 4. Схема движения доменной границы

Для описания переключения поляризации сегнетоэлектриков как фрактального процесса со степенной памятью использован оператор дробного дифференцирования по времени:

$$\frac{d^{\alpha} s}{dw^{\alpha}} = \exp\left(-\frac{\Phi_2}{\Phi_1 w + \frac{\Phi_3}{2l}(1 + \cos^2 \varphi) \frac{Ls}{2}}\right), \quad s(w_0) = 0, \quad 0 \leq s(w) \leq 2(1 - l/L), \quad (5)$$

где $s = x/L$ – безразмерное расстояние; $w = t/\tau_1$ – безразмерное время; α – динамическая фрактальная размерность, $\alpha \in (0.5, 0.99)$; $\cos^2 \varphi = y^2/(x^2 + y^2)$; $\tau_1 = L/v_{\infty}$ – характерное время пробега толщины кристалла доменной стенкой со скоростью v_{∞} ; $\tau_2 = (\delta \varepsilon \varepsilon_0 L)/(jl)$ – характерный параметр – «время» накопления заряда, создающего поле $E_2 = \delta$ при данной плотности тока j ; ε – диэлектрическая проницаемость образца; $\tau_3 = 2P_S/j$ – характерный параметр – «время», в течение которого ток с плотностью j инициирует появление зарядов с поверхностной плотностью $\sigma = 2P_S$.

В уравнении (5) использовано выражение для поля в необлученной части кристалла E_2 , полученное с учетом влияния искривления профиля границы на поле, формируемое в области движущегося клина:

$$E_2(w) = \frac{jl\tau_1 w}{\varepsilon \varepsilon_0 L} + \frac{P_S}{\varepsilon \varepsilon_0 L} \cdot \frac{Ls}{2} (1 + \cos^2 \varphi). \quad (6)$$

Выражение для вычисления поляризационного тока (4) преобразовано к виду:

$$I(w) = \begin{cases} \frac{4 \cdot P_S \cdot d \cdot y}{\Phi_1} \cdot \frac{d^{\alpha} s}{dw^{\alpha}}, & \text{при } 0 \leq s \leq 1 - \frac{l}{L}, \\ \frac{4 \cdot P_S \cdot d \cdot y}{s^2 \cdot \Phi_1} \cdot L^2 \cdot \left[1 - \frac{k}{M}\right] \cdot \frac{d^{\alpha} s}{dw^{\alpha}}, & \text{при } 1 - \frac{l}{L} < s \leq 2\left(1 - \frac{l}{L}\right), \end{cases} \quad (7)$$

где M – число дискретных интервалов, на которые разбивается основание клина y , $k = \overline{0, M}$.

Процесс переключения осуществляется путем прорастания n клиньев с одинаковой скоростью и шириной основания $2y/n$. Ток переключения представляет собой суперпозицию вкладов, которые дают отдельные области переключения.

Предложена схема реализации модели (5). Процесс решения дробно-дифференциального уравнения строится с использованием численной аппроксимации производной по формуле Грюнвальда-Летникова:

$$s_{i+1} = \Gamma(1) \left[h^{\alpha} f(s_i, w_i) - \sum_{j=1}^{i+1} \Lambda_j^{\alpha} s_{i-j+1} \right], \quad \Lambda_j^{\alpha} = \frac{\Gamma(j-\alpha)}{\Gamma(-\alpha) \cdot \Gamma(j+1)}, \quad i = \overline{0, N}, \quad (8)$$

где $f(s, w)$ – правая часть дифференциального уравнения (5).

Таким образом, авторская модель формирования тока переключения поляризации в режиме инжекции электронного пучка включает начальную задачу для дробно-дифференциального уравнения (5), выражение для вычисления поля (6), выражение для тока переключения (7), а также численную схему реализации модели согласно (8).

Моделирование проводилось в физических величинах, соответствующих данным физического эксперимента. Были заданы: параметры зонда, геометрические размеры кристалла и облучаемой зоны, характерные времена τ_1 , τ_2 , τ_3 , определяющие процесс пере-

ключения, физические характеристики кристалла. Толщина слоя инжекции l определялась с помощью моделирования транспорта электронов методом Монте-Карло.

На рис. 5 а представлены результаты моделирования формы тока переключения кристалла ТГС. Кривая импульса тока переключения имеет максимум, характерный для импульсной методики, и повторяет особенности экспериментальных данных (при регистрации сигнала с нижнего электрода).

От момента включения зонда до начала переключения поляризации проходит некоторое время t_{st} , необходимое для накопления в слое инжекции стартового заряда, создающего в необлученной части кристалла поле, равное коэрцитивному. После некоторой задержки, требуемой для накопления стартового заряда, ток характеризуется резким возрастанием, после чего следует фаза спада тока. Резкое увеличение поляризационного тока вызвано дрейфом доменной границы и соответствующим усилением поля. Завершение процесса переключения соответствует спадающему току переключения до нулевого уровня. Процесс переключения поляризации кристалла ТГС при облучении электронным лучом протекает в режиме не постоянного поля, а постоянного тока инжекции. В рассматриваемом диапазоне параметров модели значение поверхностной плотности инжектированных зарядов $\sigma = jt$ сравнимо со значением спонтанной поляризации $2P_s$, при этом поле в зоне инжекции достигает значений деполяризующего поля в монодоменных кристаллах ТГС ($\sim 10^8$ В/м при $\epsilon=50$), а поле в необлученной части кристалла превышает значение коэрцитивного поля.

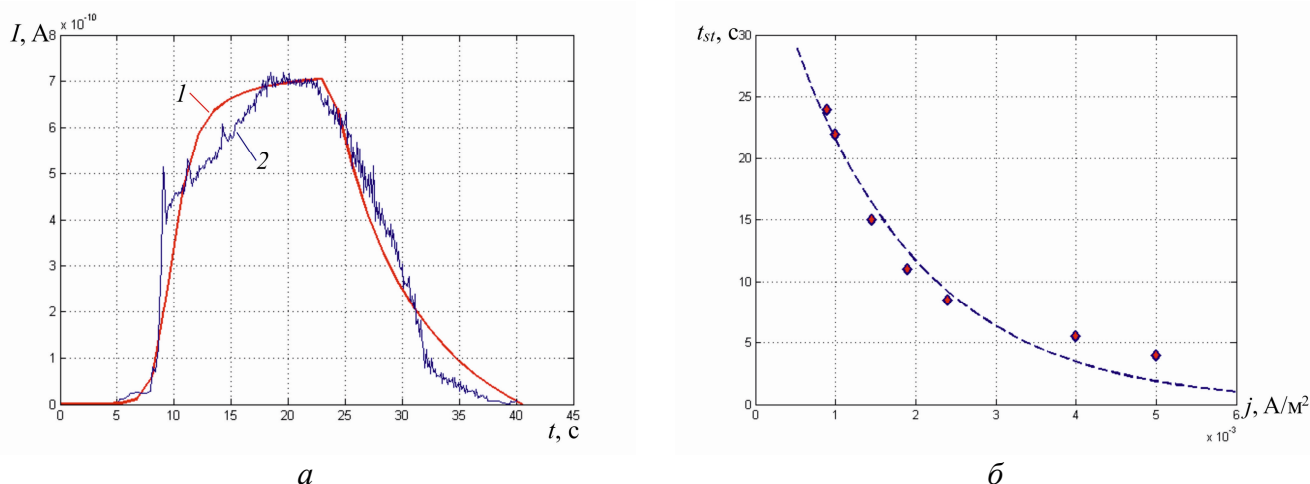


Рис. 5 – Модельное представление тока переключения поляризации кристалла ТГС в режиме инжекции электронного пучка (1) в сравнении с данными эксперимента [2] (2) – а ($\tau_1=13.5$ с, $\tau_2=37$ с, $\tau_3=16.5$ с, $L=1$ мм, $l=3$ мкм, $S=0.25$ мм², $\alpha=0.7$), зависимость времени старта переключения поляризации от плотности тока инжекции – б

На рис. 5 б показана зависимость времени старта процесса переключения поляризации кристалла ТГС от значения плотности инжекционного тока. Характер поведения модели отвечает экспериментально наблюдаемым закономерностям процесса: время старта процесса переключения поляризации t_{st} уменьшается экспоненциально при увеличении параметра j . Расчет нормированной на величину тока зонда I_{pr} зависимости уровня максимального значения поляризационного тока I_{max} от плотности тока инжекции j показал, что при увеличении плотности инжекционного тока ($j > 0.8 \cdot 10^{-3}$ А/м²) поляризационный отклик кристалла способен превышать значение тока инжекции.

Различным значениям ускоряющих напряжений U будут соответствовать различные значения глубины инжекции l (по данным моделирования транспорта электронов в облученном кристалле). Поле в необлученной части образца будет достигать значения стар-

того при условии $q_{st}l = \text{const}$. Принимая во внимание степенную связь между l и U : $q_{st}U^n = \text{const}$ можно исследовать кинетику накопления инжектированных зарядов, проводя расчет зависимости времени старта t_{st} процесса переключения поляризации от значений ускоряющих напряжений: $t_{st}U^n = \text{const}$. Обработка данных вычислительного эксперимента с использованием соотношения $\lg(t_{st}) = -n \lg(U) + \text{const}$ при $U=[10, 15, 25, 40]$ кВ позволила оценить значение показателя степени $n=1.7$.

Таким образом, предложенная модель позволяет адекватно описать процесс переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов в режиме токов электронно-стимулированной поляризации. В основу модели положены фундаментальные соотношения, позволяющие теоретически описать механизм перестройки доменной структуры в режиме инъекции электронного пучка, а также рассчитать основную динамическую характеристику процесса переключения – ток переключения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что геометрические свойства изображений доменных структур сегнетоэлектриков, визуализируемых с помощью методик РЭМ, обладают рядом специфических особенностей в силу того, что картина потенциального контраста есть результат взаимодействия пучка электронов с исследуемым образцом. Показано, что приоритетным фактором в проведении фрактального анализа является вопрос корректной интерпретации растрового изображения анализируемых элементов доменной структуры.

2. С учетом сложности и неоднородности строения анализируемых доменных структур, предложен авторский перколяционно-фрактальный алгоритм расчета размерности растровых изображений границ кластерных объектов. Методика основана на процессе маркировки кластеров с помощью алгоритма Хошена-Копельмана и содержит рекурсивную процедуру, исключаящую некорректную маркировку кластеров при повторном просмотре.

3. Рассчитаны количественные характеристики самоорганизованного строения доменных структур ряда сегнетоэлектриков по данным РЭМ-изображений, визуализируемых с помощью методик наблюдения статического контраста: фрактальные размерности изображений и степень изрезанности отдельных доменных границ, фрактальная размерность доменной структуры как кластерной системы, а также спектральные характеристики исследуемых изображений.

4. Специфицирован самоподобный характер динамики доменной структуры кристалла ТГС в последовательных стадиях переключения поляризации, наблюдаемой в режиме динамического контраста: установлены циклически меняющиеся значения фрактальных размерностей визуализируемых изображений.

5. Установлено, что воздействие электронного зонда при формировании изображения в режиме инъекции электронного пучка приводит к усложнению геометрии границ доменов, характеризующейся увеличением фрактальной размерности.

4. Показано, что импульсы тока переключения поляризации в кристаллах ТГС, отражающие процессы перестройки доменной структуры под действием электронного облучения, характеризуются персистентным поведением: в процессе формирования последующих состояний системы учитываются предыдущие состояния. Данный факт обусловлен присутствием эффектов долговременной памяти в сегнетоэлектрических материалах. Детально исследованы свойства токов переключения на основе методов мультифрактального анализа. Картина вейвлет-коэффициентов наглядно показывает иерархиче-

скую структуру флуктуаций сигнала. Рассчитанный спектр дает вариацию значений фрактальной размерности в широком диапазоне.

6. Для поддержки проводимых исследований разработаны адаптированные в зависимости от специфики решаемых задач программные приложения, позволяющие проводить многоаспектный фрактальный и мультифрактальный анализ растровых изображений и динамических характеристик сложных физических систем.

7. Представлена модификация фрактальной модели Колмогорова-Аврами, предложенной в [6], с использованием численной аппроксимации дробной производной по времени. Такой подход позволяет моделировать процесс переключения с учетом нецелого значения показателя степени доменного роста.

8. Разработана модель формирования тока переключения поляризации в режиме инжекции электронного пучка, учитывающая фрактальный характер динамики доменных границ в процессе переключения поляризации. Предложенная физико-математическая модель динамики переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов в режиме инжекции электронного пучка составляет теоретическое обоснование экспериментальной методики формирования изображения доменных структур сегнетоэлектриков – режима токов электронно-стимулированной поляризации. Модель основана на клинообразном характере роста доменов и учитывает специфику формирования полей в необлученной части кристалла, индуцирующих переключение ориентированных против поля доменов.

9. Проведен модельный расчет тока переключения поляризации с учетом выбора параметров, отвечающих условиям экспериментального наблюдения в инжекционном режиме. Модель корректно воспроизводит экспериментально наблюдаемые токи переключения поляризации кристаллов ТГС в режиме ТЭСР и позволяет установить характеристики кинетики процесса переключения поляризации в зависимости от вариации значений основных параметров сканирования в РЭМ: тока и ускоряющих напряжений электронного зонда.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
2. Sogr A.A., Maslovskaya A.G., Kopylova I.B. Advanced modes of imaging of ferroelectric domains in the SEM // *Ferroelectrics*. – 2006. – V. 341. – P. 29-37.
3. Arneodo A., Decoster N., Roux S.G. A wavelet-based method for multifractal image analysis. I. Methodology and test applications on isotropic and anisotropic random rough surfaces // *Eur. Phys. J.B.*, 2000. – V. 15. – P. 567-600.
4. Масловская А.Г., Копылова И.Б. Взаимодействие электронных пучков средних энергий с сегнетоэлектрическими материалами – Владивосток: изд-во Дальнаука, 2010. – 204 с.
5. Kantelhardt J.W. Fractal and multifractal time series – Halle-Wittenberg: Institute of Physics, Martin-Luther-University (Germany), 2010. – 42 p.
6. Мейланов Р.П., Садыков С.А. Фрактальная модель кинетики переключения поляризации в сегнетоэлектриках // *ЖТФ*. – 1999. – Т. 69. – № 5. – С. 128-129.
7. Нахушев А.М. Дробное исчисление и его применение – М.: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 149 с.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Масловская А.Г., **Барабаш Т.К.** Имитационное моделирование процесса переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов под действием инжектированных зарядов // **Вестник Московского государственного областного университета. Сер. Физика-Математика**, 2011. – № 2. – С. 53-60.

2 Масловская А.Г., **Барабаш Т.К.** Вейвлет-мультифрактальный анализ индуцированного электронным зондом тока переполаризации сегнетоэлектрических кристаллов // **Вестник Саратовского государственного технического университета**, 2011. – № 62. – С. 232-238.

3 Масловская А.Г., **Барабаш Т.К.** Исследование фрактальных закономерностей процессов переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов в инжекционном режиме // **Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования**, 2012. – № 1. – С. 1-8.

4 Maslovskaya A.G., **Varabash T.K.** Multifractal analysis of electron beam stimulated process of polarization reversal in ferroelectrics // **Physics Procedia**, 2012. – No. 23. – P. 81-85.

5 Maslovskaya A.G., **Varabash T.K.** Dynamic simulation of polarization reversal processes in ferroelectric crystals under electron beam irradiation // **Ferroelectrics**, 2013. – V. 442. – P. 18-26.

6 **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г. Компьютерное моделирование фрактальных временных рядов // **Вестник АмГУ**, 2010. – Вып. 49. – С. 31-38.

7 Масловская А.Г., **Барабаш Т.К.** Расчет скейлинговых характеристик РЭМ-изображений доменных структур сегнетоэлектриков методом фрактальной параметризации // **Вестник АмГУ**, 2011. – Вып. 55. – С. 35-42.

8 **Барабаш Т.К.**, Бурдина А.И., Масловская А.Г. Исследование спектральных характеристик токов переключения сегнетоэлектриков методом вейвлет-анализа // **Вестник АмГУ**, 2012. – Вып. 57. – С. 23-26.

9 **Барабаш Т.К.** Система анализа динамических характеристик фрактальных физических систем // **Вестник АмГУ**, 2013. – Вып. 61. – С. 29-32.

10 **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г. Развитие фрактального подхода в задачах моделирования формирования тока переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов // **Вестник АмГУ**, 2014. – Вып. 67. – С. 26-31.

11 Масловская А.Г., **Барабаш Т.К.**, Гресс А.Ю. Фрактальный подход к исследованию процессов переполаризации сегнетоэлектриков // В кн.: Материалы VIII региональной научной конференции «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование». – Благовещенск, 2009. – С. 32-36.

12 **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г. Мультифрактальный анализ токов переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов // В кн.: Материалы IX региональной научной конференции «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование». – Хабаровск, 2010. – С. 6-8.

13 Масловская А.Г., **Барабаш Т.К.**, Сивунов А.В. Оценка мультифрактальных характеристик процесса переполаризации сегнетоэлектрических кристаллов при электронном облучении // В кн.: Материалы XII Международной научной конференции «Физика диэлектриков». – Санкт-Петербург, 2011. – Т. 1. – С. 96-99.

14 Maslovskaya A.G., **Varabash T.K.** Multifractal analysis of electron beam induced polarization switching processes in ferroelectrics // In: Proc. of Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials. – Vladivostok, 2011. – P. 163-164.

15 **Барабаш Т.К.** Оценка фрактальных параметров процесса переполяризации сегнетоэлектриков методами Фурье- и вейвлет-преобразований // В кн.: Материалы Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике – Владивосток, 2011. – С. 28-29.

16 **Barabash T.K.**, Maslovskaya A.G., Multifractal detrended fluctuation analysis of polarization reversal processes in ferroelectrics // In: Proc. of International Russian-Chinese symposium «Modern materials and technologies 2011». – Khabarovsk, 2011. – P. 13-18.

17 **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г., Шпилевская И.М. Использование концепций дробного дифференциального исчисления для моделирования индуцированного электронным облучением процесса переполяризации сегнетоэлектриков // В кн.: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование». – Благовещенск, 2012. – С. 30-33.

18 **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г., Колесник М.А. Применение дробно-дифференциального исчисления в задачах моделирования фрактальной динамики сегнетоэлектрических доменных структур // В кн.: Материалы XII региональной научной конференции «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование». – Хабаровск, 2013. – С. 17-23.

19 Колесник М.А., **Барабаш Т.К.** Применение перколяционно-фрактальных алгоритмов для анализа растровых изображений доменных структур сегнетоэлектриков // В кн.: Материалы XV региональной научно-практической конференции «Молодежь XXI века: шаг в будущее». – Благовещенск, 2014. – Т. 5. – С. 51-52.

20 **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г. Фрактальные закономерности и модельные представления процессов переключения поляризации сегнетоэлектриков при диагностике методами РЭМ // В кн.: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Физика, фундаментальные и прикладные исследования, образование». – Благовещенск, 2014. – С. 13-16.

21 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660562. «Программа мультифрактального анализа динамических характеристик физических систем» / **Барабаш Т.К.**, Масловская А.Г.

22 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619367. «Программный комплекс для расчета скейлинговых характеристик растровых изображений неоднородных физических структур» / **Барабаш Т.К.**, Колесник М.А., Масловская А.Г.

Барабаш Татьяна Константиновна

ФРАКТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ
ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДАМИ РЭМ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Типография АмГУ. Подписано к печати __.__.2015. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ __.

