

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу **Удалова Артура Рудольфовича** «Нелинейная динамика и топологические неустойчивости доменных границ в сегнетоэлектриках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Удалова А.Р. посвящена теоретическому исследованию нелинейной динамики и неоднородности пространственного распределения электрического поля, ведущего к изменению формы движущихся нейтральных 180° доменных границ в сегнетоэлектриках в однородном внешнем электрическом поле при сильнонеравновесных условиях переключения поляризации. Исследовано немонотонное движение плоской доменной границы под действием постоянного и гармонического напряжения в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностным диэлектрическим слоем и последовательным сопротивлением, с экспоненциальным распределением поверхностного экранирующего заряда.

Изучены особенности пространственного распределения полярной компоненты электрического поля на движущейся доменной границе синусоидальной формы в сегнетоэлектрике с поверхностным диэлектрическим слоем при воздействии постоянного внешнего поля, при равномерном пространственном распределении поверхностного экранирующего заряда, которые приводят к изменению формы доменной границы.

Разработан аналитический подход к определению пространственного распределения электрического поля в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностными диэлектрическими слоями и движущейся доменной границей произвольной формы под действием постоянного напряжения. Исследовано пространственное распределение полярной компоненты электрического поля вблизи равномерно движущейся доменной границы синусоидальной формы в

сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностными диэлектрическими слоями под действием постоянного напряжения при экспоненциальном распределении поверхностного экранирующего заряда.

Актуальность темы диссертации

Эволюцию сегнетоэлектрической доменной структуры принято рассматривать как аналог фазового перехода первого рода, поэтому нелинейная динамика и неустойчивость формы сегнетоэлектрических доменных границ в сильнонеравновесных условиях переключения поляризации представляет собой фундаментальную проблему физики конденсированного состояния.

Процессы внешнего и объемного экранирования деполяризующего поля, создаваемого связанными зарядами спонтанной поляризации, определяют изменение формы доменных границ сегнетоэлектриков. Использование сильнонеравновесных условий переключения поляризации характеризуются неэффективным экранированием деполяризующего поля, которое не дает правильной информации о форме движущихся доменных границ. Учет влияния запаздывания экранирования деполяризующих полей на эволюцию доменной структуры существенно усложняет форму движущихся доменных границ, существенно меняя их динамику, представляя, таким образом, значительный интерес для правильного отражения фундаментальных проблем физики сегнетоэлектриков.

Повышенный интерес к эволюции доменной структуры сегнетоэлектриков во многом вызван бурным развитием «доменной инженерии», основной задачей, которой на данный момент является создание стабильных регулярных доменных структур для улучшения нелинейно-оптических, электрооптических и акустических характеристик, в частности для изготовления эффективных преобразователей частоты когерентного излучения. Наиболее широко используемыми материалами для таких применений являются монокристаллы семейства ниобата лития и танталата лития. Для оптимального подбора

технологических параметров формирования доменных структур необходимо понимание закономерностей эволюции формы доменных границ. Таким образом, проводимые исследования имеют важное фундаментальное и прикладное значение.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, благодарностей, списка цитируемой литературы и 2-х приложений. Общий объем работы составляет 142 страницы, включая 51 рисунок, 139 формул, список сокращений и условных обозначений и список литературы из 81 наименования. В каждой главе сформулированы выводы по результатам главы.

В первой главе приводится информация об основных свойствах сегнетоэлектриков, современные представления о переключении поляризации и кинетике доменной структуры. Подробно рассмотрены исследования процессов переключения поляризации в сегнетоэлектриках. Приведены основные физические параметры и особенности доменной структуры ниобата лития и танталата лития.

Показано, что существенную роль в кинетике доменной структуры играет запаздывание экранирования деполяризующего поля. При переключении в сильнонеравновесных условиях качественно изменяется форма и динамика доменных границ. Отмечено, что ранее не производилось теоретическое описание нелинейной динамики доменной границы и не было получено аналитическое выражение для пространственного распределения электрического поля в материале для объяснения характера движения и формы движущихся доменных границ.

Вторая глава посвящена исследованию немонотонного движения плоской доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностным диэлектрическим слоем и последовательным сопротивлением во внешней цепи

под действием постоянного напряжения.

Разработан полуаналитический метод описания немонотонного бокового движения плоской доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с последовательным сопротивлением под действием постоянного напряжения с учётом запаздывания экранирования деполяризующего поля.

Показано, что динамика бокового движения доменной границы может быть описана одномерным обобщённым уравнением Релея с введением эффективных массы и силы трения, зависящих от скорости движения.

Предсказано возникновение устойчивых самоподдерживающихся осцилляций скорости движения доменной границы в области скоростей с отрицательным значением эффективной силы трения.

Третья глава посвящена исследованию скачкообразного движения плоской доменной границы под действием гармонического напряжения в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностным диэлектрическим слоем и последовательным сопротивлением во внешней цепи.

Установлен амплитудно-частотный диапазон существования предсказанного эффекта захвата частоты скачкообразного бокового движения плоской доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с последовательным сопротивлением под действием гармонического напряжения.

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей пространственного распределения полярной компоненты электрического поля на движущейся доменной границе синусоидальной формы в сегнетоэлектрике с поверхностным диэлектрическим слоем при воздействии постоянного внешнего поля, которая должна приводить к изменению формы доменной границы.

Показано, что экспериментально наблюдаемое изменение формы плоской доменной границы с образованием регулярных выступов вызвано запаздыванием объёмного экранирования остаточного деполяризующего поля.

Построена фазовая диаграмма устойчивости формы синусоидальной доменной границы в зависимости от длины и периода шлейфа остаточного экранирующего заряда.

Пятая глава посвящена разработке аналитического подхода к вычислению пространственного распределения электрического поля в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностными диэлектрическими слоями для движущихся доменных границ произвольной формы под действием постоянного напряжения, для изучения неоднородности поля, которая приводит к изменению формы доменных границ. На примере равномерно движущейся доменной границы синусоидальной формы в модели процесса запаздывания объёмного экранирования, приводящей к экспоненциальному распределению поверхностного экранирующего заряда, аналитически получено пространственное распределение z-компоненты электрического поля.

Разработан оригинальный аналитический подход для вычисления пространственного распределения электрического поля в сегнетоэлектрическом конденсаторе с движущимися доменными границами произвольной формы с учётом запаздывания объёмного экранирования деполяризующего поля.

Получено точное аналитическое выражение для пространственного распределения z-компоненты электрического поля равномерно движущейся синусоидальной доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с диэлектрическими слоями с учётом запаздывания экранирования деполяризующего поля.

Показано, что увеличение длины шлейфа остаточного экранирующего заряда приводит сначала к росту неоднородности пространственного распределения электрического поля, ведущей к изменению формы доменной границы, а при дальнейшем увеличении длины шлейфа – к уменьшению неоднородности вплоть до исчезновения эффекта изменения формы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

Предложен оригинальный полуаналитический метод описания немонотонного бокового движения плоской доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с последовательным сопротивлением во внешней цепи под действием постоянного напряжения с учётом запаздывания экранирования деполяризующего поля. Впервые показано, что боковое движение доменной границы может быть описано одномерным обобщённым уравнением Релея с введением эффективных массы и силы трения доменной границы, зависящих от скорости движения.

Предсказан эффект захвата частоты скачкообразного бокового движения плоской доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с последовательным сопротивлением во внешней цепи под действием гармонического напряжения.

Разработан оригинальный аналитический подход для решения граничной электростатической задачи, соответствующей трехслойному конденсатору (диэлектрик-сегнетоэлектрик-диэлектрик), для движущейся доменной границы произвольной формы с учётом запаздывания процессов экранирования деполяризующего поля. Он позволяет получить выражение для пространственного распределения электрического поля в сегнетоэлектрическом конденсаторе с движущимися доменными границами.

Впервые получено аналитическое выражение для пространственного распределения полярной компоненты электрического поля равномерно движущейся синусоидальной доменной границы в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностными диэлектрическими слоями при запаздывании объемного экранирования остаточного деполяризующего поля.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты представляют основу для дальнейших исследований нелинейной динамики и устойчивости формы доменных границ, а

также для интерпретации экспериментальных результатов. Развитый подход к исследованию неоднородности пространственного распределения поля, ведущей к изменению формы движущихся сегнетоэлектрических доменных границ, может представлять интерес для развития методов доменной инженерии.

Защищаемые положения отражают научную новизну и практическую ценность работы и подтверждены представленными результатами исследований.

Достоверность проведённых исследований обеспечивается применением надежных численных и аналитических методов, обоснованностью допущений в решении поставленных задач, сравнением получаемых результатов с результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям, а также согласованностью с экспериментальными результатами. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, прошли **апробацию**, были представлены на международных конференциях, опубликованы в статьях в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых базами данных Web of Science и Scopus

По представленной работе можно сделать следующие замечания:

1. Известно, что процессы переключения сегнетоэлектриков представляют совокупность двух стадий. Стадию «зародышеобразования» и стадию скольжения. Очевидно, что сделанные выводы относятся к стадии скольжения. Поэтому было бы интересно отметить как на результатах проведенного исследования отразится решеточный потенциальный барьер для доменной стенки.
2. Отдельный интерес вызывает влияние на сделанные заключения параметры поверхностного несегнетоэлектрического слоя. Было бы интересно рассмотреть указанный вопрос более подробно.

Сделанные замечания не отражаются на общем положительном впечатлении о представленной работе как о серьезном актуальном исследовании, посвященном важному для физики переключения сегнетоэлектриков процессу.

Заключение по диссертации Удалова А.Р.

Диссертация Удалова А.Р. «Нелинейная динамика и топологические неустойчивости доменных границ в сегнетоэлектриках» является законченной научно-квалификационной работой. Выводы диссертации сформулированы ясно и хорошо обоснованы.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Автореферат диссертации соответствует её содержанию и адекватно отражает полученные результаты.

Работа написана грамотно и отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Удалов А.Р. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

08.05.2019г.

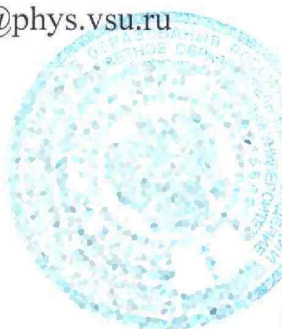
Сидоркин Александр Степанович

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры экспериментальной физики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный университет»

Адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Тел.: +7 (473) 220-86-25

E-mail: sidorkin@phys.vsu.ru



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<i>Сидоркина А.С.</i>
Завверяю	начальник отдела кадров должность
	<i>О.И. Зверева</i> 0805 2019
	цифровая подпись