

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
"Уральский государственный лесотехнический университет"**



УТВЕРЖДАЮ  
И. о. ректора  
ФГБОУ ВО «УГЛТУ»  
кандидат сельскохозяйственных наук,  
доцент

\_\_\_\_\_ Платонов Е. П.

«\_15\_»\_\_мая\_\_2019 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный лесотехнический университет"** 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.

В диссертационной работе Удалова А.Р. проводится теоретическое исследование нелинейной динамики и неоднородности пространственного распределения электрического поля, ведущего к изменению формы движущихся нейтральных  $180^\circ$  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.

Разработанный 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 позволил исследовать 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.

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

Эволюция доменной структуры сегнетоэлектриков вызывает интерес во многом благодаря интенсивному развитию «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 отсутствовало теоретическое описание нелинейной динамики доменной границы, как и 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 диссертации можно сделать следующие замечания:**

1. Развитый в диссертации подход использует феноменологическое уравнение, определяющее скорость движения доменной границы как величину, пропорциональную отклонению локального электрического



поля от порогового значения. Однако обсуждение ограничений использования этого соотношения в работе отсутствует.

2. При описании бокового роста плоской доменной границы выбирается функция, в которой объемы контактирующих доменов представлены равноправно. В каком диапазоне скоростей движения границы это справедливо?

3. Замечания по оформлению.

-В работе имеется ряд опечаток. Так , на странице 15 в подрисуночной подписи ссылка на случай (3) смещена на три слова вправо, имеется и пропуск слова (третья строка снизу); на странице 18 вместо рис. 1.2 идет ссылка на рис. 2.1; на странице 20 не удален слог «на» (третья строка снизу); на странице 41 в формуле (2.5) – содержится разность двух одинаковых слагаемых; на странице 43 не хватает окончания «ся» (последняя строка)...

-о терминологии: на странице 17 неудачное выражение «крайне стабильных...»

- в первой обзорной главе для удобства чтения было бы полезным добавление рисунка, связанного со структурным фазовым переходом, явно задающим полярную ось.

Сделанные замечания не затрагивают существа диссертационной работы и не влияют на общее хорошее впечатление от работы и ее достойную оценку.

#### **Заключение по диссертации Удалова А.Р.**

Диссертация Удалова А.Р. «Нелинейная динамика и топологические неустойчивости доменных границ в сегнетоэлектриках» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне.



Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, включая формулу специальности в части «...теоретическое ... исследование природы кристаллических ... веществ... и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях», а также области исследований в части п.1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств неорганических соединений ..., диэлектриков ... в твердом состоянии в зависимости от ... состава, температуры и давления», п.3 «Изучение...фазовых переходов в них ...» и п.5 «Разработка математических моделей ... и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения».

Содержание автореферата соответствует материалам, представленным в диссертации. Работа прошла необходимую апробацию. Содержание диссертации достаточно полно опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Работа удовлетворяет критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством РФ от 24 сентября 2013 г. №842. На использованные в диссертации отдельные результаты других авторов, в том числе, полученные в результате совместных исследований, диссертантом в работе даны соответствующие ссылки. Весомость личного вклада автора в диссертационную работу не вызывает сомнения.

Автор диссертации Удалов Артур Рудольфович безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

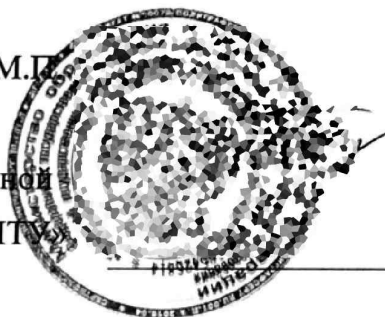
Отзыв составлен профессором кафедры физики, доктором физико-математических наук (01.04.07), доцентом Чащиной Верой Геннадиевной.

Диссертация и подготовленный на нее отзыв прошли рассмотрение на кафедре физики Уральского государственного лесотехнического университета (протокол № «09» от «13» мая 2019 г.)

Зав. каф. «Физика» д-р, ф.-м.  
наук, профессор ФГБОУ ВО  
«УГЛТУ»

Кашенко Михаил  
Петрович

Подпись Кашенко М.П.  
удостоверяю  
Проректор по научной  
работе ФГБОУ ВО «УГЛТУ»



Газеев М.В.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Телефон/факс: 8 (343) 261-45-51.

E-mail: rector@usfeu.ru, mpk46@mail.ru

Адрес: 620100, г. Екатеринбург, улица Сибирский тракт, дом № 37