

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



АЛИКИН Юрий Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕГНЕТО-
ЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ
В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния и наноразмерных систем Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
Шур Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты: **Анкудинов Александр Витальевич**,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, ведущий научный сотрудник
лаборатории физико-химических свойств
полупроводников;

Втюрин Александр Николаевич,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского
отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение Федеральный исследо-
вательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук»,
главный научный сотрудник;

Мишина Елена Дмитриевна,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический
университет», г. Москва, заведующий лабораторией
фемтосекундной оптики для нанотехнологий ка-
федры наноэлектроники института перспективных
технологий и индустриального программирования;

Защита состоится «29» сентября 2023 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета **УрФУ 1.3.02.06** по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4973>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Сегнетоэлектрики обладают спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено приложением внешнего электрического поля. Процесс переключения поляризации осуществляется за счет образования доменов и движения доменных стенок (эволюции доменной структуры). Доменные стенки в зависимости от их ориентации могут быть нейтральными или заряженными [1]. В настоящее время экспериментально установлено, что реальные доменные структуры являются метастабильными и содержат заряженные доменные стенки, несмотря на то, что они энергетически невыгодны [2]. Проводимость заряженных доменных стенок на несколько порядков больше, чем объема сегнетоэлектрика [3,4]. В настоящее время понимание механизмов, приводящих к образованию и кинетике заряженных доменных стенок при переключении поляризации, является важной проблемой физики сегнетоэлектриков.

Одной из важнейших прикладных задач является создание в сегнетоэлектрических кристаллах стабильных регулярных доменных структур заданной геометрии. При формировании доменных структур определяющую роль играет зарождение доменов на поверхности и рост доменов с заряженными стенками в полярном направлении (прямое прораствание). Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из методов исследования и создания в сегнетоэлектриках доменных структур с нанометровым пространственным разрешением. Локальное переключение поляризации на неполярном срезе с помощью проводящего зонда СЗМ является уникальным методом исследования роста в полярном направлении доменов с заряженными стенками [5].

Пространственная модуляция электрооптических и нелинейно-оптических характеристик сегнетоэлектрических кристаллов путем создания стабильной доменной структуры с микронными периодами успешно применяется для изготовления преобразователей длины волны лазерного излучения с рекордной эффективностью. Необходимо иметь в виду, что для получения высокой эффективности невозпроизводимость периода регулярной доменной структуры должна быть не более 20 нм. Создание таких структур требует изучения эволюции доменов при локальном переключении с нанометровым пространственным разрешением. Наиболее популярным кристаллом для создания преобразователей длины волны с регулярной доменной структурой является конгруэнтный ниобат лития, легированный магнием MgOCLN. Однако процессы формирования, роста и взаимодействия доменов с заряженными доменными стенками в одноосных сегнетоэлектриках слабо изучены. Кроме того, принято считать, что сегнетоэлектрические микро- и нано-доменные структуры с заряженными доменными стенками являются уникальными модельными объектами для исследований кинетики фазового превращения в неравновесных условиях, представляющей собой важное направление наноп физики и наноэлектроники [6,7].

Кристаллы многоосного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца PMN-PT в настоящее время привлекли большое внимание, благодаря рекордным

пьезоэлектрическим коэффициентам [8]. Недавно было показано, что переключение переменным электрическим полем позволяет значительно увеличить пьезоэлектрические коэффициенты в кристаллах PMN-PT ромбоэдрической фазы [9]. Однако эволюция сложной доменной структуры, состоящей из сегнетоэлектрических и сегнетоэластических доменов, не исследовалась современными методами с высоким пространственным разрешением.

Цели и задачи исследования

Цель работы – исследование роста доменов при локальном переключении поляризации на неполярных срезах одноосного сегнетоэлектрика ниобата лития, легированного оксидом магния (MgOCLN) и многоосного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца (PMN-PT).

Основные задачи:

1. Изучить рост изолированных клиновидных доменов с заряженными доменными стенками и его зависимость от относительной влажности при локальном переключении на неполярных срезах одноосного сегнетоэлектрика MgOCLN.
2. Создать стабильную структуру полосовых доменов с субмикронными периодами локальным переключением поляризации на неполярном срезе MgOCLN.
3. Изучить эволюцию формы изолированного домена, растущего при приложении напряжения между проводящим зондом и заземленным полосовым электродом на неполярном срезе MgOCLN.
4. Исследовать эффект обратного переключения в результате сканирования при визуализации клиновидных доменов с заряженными доменными стенками, созданных при локальном переключении на неполярном срезе MgOCLN.
5. Исследовать формирование доменной структуры, созданной при локальном переключении, и ее зависимость от относительной влажности в многоосном сегнетоэлектрике PMN-PT в ромбоэдрической фазе.

Объекты исследования

При проведении исследований использовались:

Монодоменные пластины неполярного Y среза одноосного сегнетоэлектрического монокристалла конгруэнтного ниобата лития LiNbO_3 , легированного 5% оксидом магния.

Монодоменные пластины монокристалла магнониобата-титаната свинца PMN-PT с ориентацией [111] с составом, который находится в ромбоэдрической фазе при комнатной температуре.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показано, что при локальном переключении на неполярном срезе одноосного сегнетоэлектрика зависимость ширины основания клиновидного домена от приложенного напряжения определяется пространственным распределением поля, создаваемого проводящим зондом.

2. Впервые обнаружен эффект коррелированного зародышеобразования и потери устойчивости формы клиновидных доменов на неполярном срезе при приложении напряжения между проводящим зондом и заземленным полосовым электродом.
3. Впервые изучен и объяснен эффект частичного обратного переключения доменов с заряженными доменными стенками в результате визуализации доменов на неполярном срезе методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика, и предложены пути уменьшения эффекта.
4. Обнаружен эффект полного обратного переключения при повышенной влажности, вызванный формированием под зондом адсорбированного слоя воды, обеспечивающего эффективное внешнее экранирование деполяризующего поля.
5. Обнаружен и объяснен эффект изменения доменной структуры, состоящей из сегнетоэлектрических и сегнетоэластических доменов, вызванный изменением относительной влажности при исследовании локального переключения поляризации в многоосном сегнетоэлектрике PMN-PT, находящемся в ромбоэдрической фазе.

Теоретическая значимость исследования

Научная значимость исследования определяется тем, что получены новые данные об эволюции доменной структуры и росте заряженных доменных стенок в контролируемых сильнонеравновесных условиях в двух модельных системах: (1) одноосном сегнетоэлектрике MgOCLN при локальном переключении на неполярном срезе и (2) многоосном сегнетоэлектрике PMN-PT.

1. Впервые измерена и объяснена в рамках кинетического подхода зависимость от амплитуды и количества переключающих импульсов величины отклонения заряженных доменных стенок от полярного направления при локальном переключении на неполярном срезе одноосного сегнетоэлектрика.
2. Предложена оригинальная модель для объяснения зависимости от длительности приложения поля размеров доменов, растущих при локальном переключении в одноосных сегнетоэлектриках, основанная на учете влияния запаздывания экранирования деполяризующего поля.
3. Впервые обнаружены и объяснены эффекты коррелированного зародышеобразования и потери устойчивости формы, приводящие к формированию массива изолированных клиновидных доменов, в результате прорастания изолированного домена к сплошному электроду.

Практическая значимость исследования

Полученные закономерности формирования и эволюции доменных структур при локальном переключении поляризации представляют значительный практический интерес для дальнейшего развития методов доменной инженерии в одноосных и многоосных сегнетоэлектриках, которые используются для изготовления актюаторов и преобразователей длины волны излучения.

1. Обнаруженная зависимость величины отклонения заряженных доменных стенок от полярного направления от параметров переключения может быть использована

при создании нового поколения устройств наноэлектроники, включая элементы памяти с рекордной плотностью хранения информации.

2. Создание локальным переключением поляризации регулярных доменных структур с субмикронными периодами на неполярном срезе MgO/CLN может быть использовано при изготовлении преобразователей длины волны излучения и электрооптических модуляторов.
3. Обнаруженное влияние относительной влажности на обратное переключение и исчезновение клиновидного домена при относительной влажности более 30% необходимо учитывать при создании устройств наноэлектроники.

Методология и методы исследования

Создание и исследование доменных структур производилось с использованием современного аналитического оборудования. Для создания доменных структур в неоднородном электрическом поле использовался проводящий зонд сканирующего зондового микроскопа. Визуализация доменных структур выполнялась с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО) и оптической микроскопии в проходящем свете в режиме светлого поля. Все измерения проводились при комнатной температуре в атмосфере азота с контролем относительной влажности. При моделировании роста доменов использовался программный пакет COMSOL Multiphysics.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением поверенных и калиброванных средств измерений, аттестованных методик измерений, надежной статистикой экспериментов, применением современных и независимых методов обработки экспериментальных данных, согласием с результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям. Достоверность расчетов подтверждается обоснованностью допущений, а также согласованностью с экспериментальными результатами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость ширины основания клиновидного домена от амплитуды переключающего импульса при локальном переключении на неполярном срезе обусловлена пространственным распределением электрического поля, создаваемого проводящим зондом.

2. Формирование локальным переключением регулярных структур полосовых доменов с нейтральными стенками, обусловлено аннигиляцией заряженных кинков и антикинков после слияния растущих навстречу друг другу доменов.

3. Эволюция формы изолированного домена, растущего при приложении напряжения между проводящим зондом и заземленным полосовым электродом, и формирование массива изолированных клиновидных доменов, обусловлены коррелированным зародышеобразованием и потерей устойчивости формы, вызванной отклонением заряженной доменной стенки от полярного направления.

4. Частичное обратное переключение клиновидных доменов в результате сканирования при их визуализации методом силовой микроскопии

пьезоэлектрического отклика обусловлено влиянием остаточного деполяризующего поля и переменного напряжения малой амплитуды.

5. Полное обратное переключение при повышенной влажности обусловлено формированием на поверхности слабо проводящего адсорбированного слоя воды, обеспечивающего эффективное внешнее экранирование деполяризующего поля.

6. Формирование структуры, состоящей из сегнетоэлектрических *c*-доменов и сегнетоэластических *a*-доменов, при локальном переключении поляризации на (111) срезе PMN-PT обусловлено воздействием электрического поля и механических напряжений.

Апробация результатов

Основные результаты работы представлялись на следующих российских и международных конференциях:

(1) III Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» (ФТИ-2016, Екатеринбург, 2016); (2) XVII Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС–17, Екатеринбург, 2016); (3) Международной конференции RCBJSF-IWRF (Matsue, Japan, 2016); (4) XXIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков (ВНКСФ-23, Екатеринбург, 2017); (5) IV Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» (ФТИ-2017, Екатеринбург, 2017); (6) XXI Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI, Казань, 2017); (7) 14й международной конференции по сегнетоэлектричеству (IMF 2017, San Antonio, USA, 2017); (8) V Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» (ФТИ-2018, Екатеринбург, 2018); (9) Международной конференции «Исследование сегнетоэлектрических материалов российскими учеными. Столетие открытия сегнетоэлектричества» (СЭ-100, Екатеринбург, 2020); (10) XXV симпозиуме «Наноп физика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2021); (11) 32ом семинаре по фундаментальной физике сегнетоэлектриков и сопутствующих материалов (Ferro2021, USA, 2021); (12) XXII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXII, Екатеринбург, 2021); (13) Международном симпозиуме по применению сегнетоэлектриков (IEEE ISAF-ISIF-PFM, Sidney, Australia, 2021); (14) XXVI симпозиуме «Наноп физика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2022); (15) Международном симпозиуме по применению сегнетоэлектриков (ISAF-PFM-ECAPD, Tours, France, 2022); (16) IV международном семинаре "Современные нанотехнологии" (IWMN-2022, Екатеринбург, 2022).

Публикации и личный вклад автора.

Основные результаты опубликованы в 23 печатных работах в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS, и 16 тезисах международных и всероссийских конференций. Диссертационная работа выполнена с использованием оборудования Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» Института естественных наук и математики УрФУ в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (грант 20-32-90200 Аспиранты).

Основные результаты были получены лично автором или при его активном участии. Выбор направления исследований, обсуждение результатов и формулировка задач проводились совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором В. Я. Шуром, к.ф.-м.н., н.с. А. П. Турыгиным и к.ф.-м.н., зав.лаб. Д. О. Аликиным. Компьютерное моделирование проводилось совместно с к.ф.-м.н., н.с. М. С. Кособоковым. Оптическая визуализация доменных структур проводилась совместно с к.ф.-м.н., м.н.с. А. Д. Ушаковым. Исследование параметров доменной структуры, анализ и обработка результатов, проводились лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем работы составляет 105 страниц, включая 62 рисунка, 1 таблицы, список литературы из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы научно-квалификационной работы и степень ее разработанности, сформулирована основная цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту, определены объекты исследования, показаны научная новизна результатов, а также теоретическая и практическая значимость проведенных исследований, описаны методология и методы исследования. Представлены сведения о достоверности и апробации результатов, о публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава является обзорной. В ней рассматриваются современные представления об эволюции доменных структур в одноосных и многоосных сегнетоэлектриках во внешнем электрическом поле с учетом экранирования деполяризующих полей. Описаны основные физические свойства и доменные структуры в одноосном сегнетоэлектрике ниобате лития и многоосном сегнетоэлектрике магнониобате-титанате свинца PMN-PT. Рассмотрены основные современные методы визуализации доменных структур на поверхности и в объеме сегнетоэлектриков. Представлены особенности локального переключения поляризации с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа. Особое внимание уделено использованию локального переключения для исследования прорастания домена с заряженными доменными стенками в полярном направлении.

Вторая глава является методической и содержит основные характеристики исследуемых образцов, описание экспериментальных установок и методик.

Исследуемые образцы

Образцы неполярного среза монокристалла конгруэнтного ниобата лития LiNbO_3 (CLN), легированного 5% оксида магния (MgOCLN , Yamaju Ceramics, Япония) представляли собой пластины Y среза размером $15 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной 0,5 мм. Монокристаллы магнониобата-титаната свинца (PMN-PT) с составом $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0,28\text{PbTiO}_3$, имеющие ромбоэдрическую фазу при комнатной температуре, были выращены по модифицированной методике Бриджмена в

Сианьском транспортном университете, Сиань, Китай. Образцы представляли собой пластины с ориентацией [111], размерами 6×4 мм², толщиной 0,7 мм. Шероховатость поверхности не превышала 1 нм. Образцы приклеивались к металлической проводящей подложке серебряной пастой.

Визуализация доменов производилась с помощью сканирующего зондового микроскопа ИНТЕГРА Аура (NT-MDT Spectrum Instruments, Россия) в режиме СМПО с переменным напряжением от 1 до 6 В на частоте близкой к контактному резонансу. Использовались зонды NSC18 (MikroMasch, Болгария) с титано-платиновым проводящим покрытием, радиусом закругления 35 нм, резонансной частотой 70 кГц и жесткостью 3,5 Н/м. Оптические изображения доменной структуры были получены в проходящем свете в режиме светлого поля с помощью оптического микроскопа ВХ61 (Olympus Optical Co., Ltd., Япония).

Переключение поляризации производилось с помощью проводящего зонда СЗМ. Для генерации переключающих импульсов напряжением $U_p = 30 - 170$ В и длительностью $t_p = 0,01 - 100$ с использовалась многофункциональная плата сбора данных NI-6251 (National Instruments, США) и высоковольтный усилитель Trek-677В (TREK, Inc., США). Все эксперименты проводились при комнатной температуре в атмосфере азота с контролируемой относительной влажностью (RH).

Третья глава посвящена исследованию роста доменов с заряженными доменными стенками при локальном переключении поляризации на неполярных срезах MgOCLN.

Закономерности роста клиновидных доменов при локальном переключении поляризации.

Локальное переключение поляризации зондом СЗМ на неполярном Y-срезе в MgOCLN приводило к образованию изолированных клиновидных доменов (Рисунок 1а,б). Применялось два режима переключения прямоугольными импульсами: (1) однократное и (2) многократное с приложением напряжения в одной точке - сериями импульсов с напряжением $U_p = 100$ В и длительностью $t_p = 0,1$ с.

При однократном переключении длина и ширина основания домена увеличивались при увеличении длительности импульса (Рисунок 1в,г). При этом отношение длины к ширине основания домена (Aspect Ratio, AR) и отклонение доменной стенки от полярного направления $\alpha = \arctan(2AR)^{-1}$ не зависели от длительности импульса (Рисунок 1д,е).

Зависимость размеров домена от напряжения измеряли в диапазоне от 30 до 170 В (Рисунок 2). Длина и ширина основания домена, а также отношение длины к ширине основания увеличивались с напряжением (Рисунок 2в,г,д), что приводило к уменьшению отклонения доменной стенки от полярного направления (Рисунок 2е).

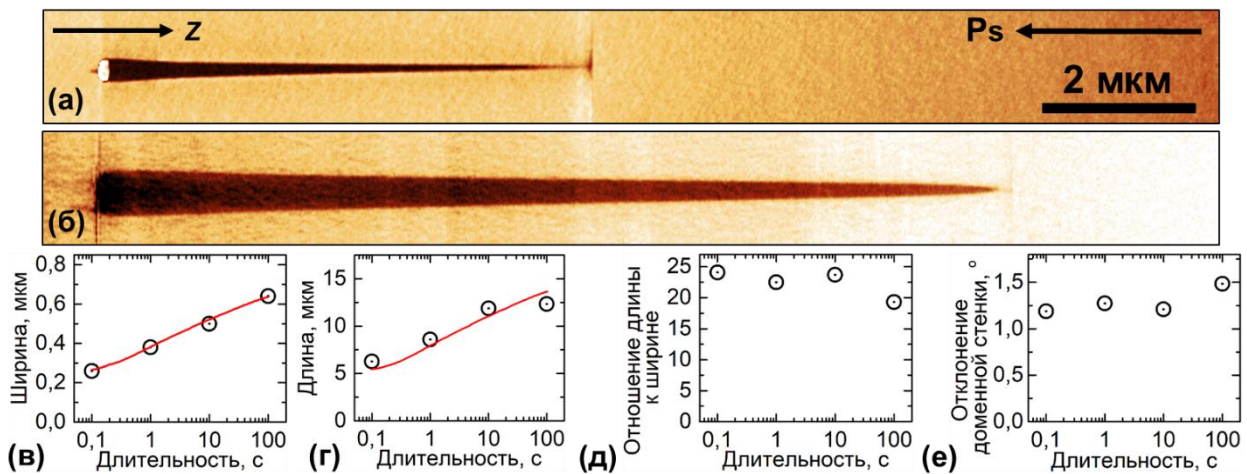


Рисунок 1 – СМПО изображения доменов после однократного переключения: (а) $U_p = 100$ В, $t_p = 0,1$ с, (б) $U_p = 100$ В, $t_p = 100$ с. Зависимости от длительности импульса: (в) ширины основания и (г) длины домена, аппроксимированные формулами (6) и (1); (д) отношения длины к ширине, и (е) отклонения доменной стенки от полярного направления. Сухая атмосфера. MgOCLN.

Полученная зависимость ширины основания от напряжения при эффективном экранировании определяется пространственным распределением полярной компоненты поля, создаваемого зондом СЗМ [5].

Полученные результаты были объяснены в рамках кинетического подхода, основанного на аналогии роста доменов и кристаллов [10]. Предполагалось, что рост домена при локальном переключении на неполярном срезе представляет собой результат генерации элементарных ступеней в основании домена и движения заряженных кинков голова-к-голове в полярном направлении вдоль доменной стенки (Рисунок 3ж,з). Рост основания домена, представляющего собой заряженную доменную стенку (ЗДС) хвост-к-хвосту, вызван генерацией ступеней под действием полярной компоненты локального поля, а движение кинков происходит в поле, создаваемом соседними заряженными кинками [5].

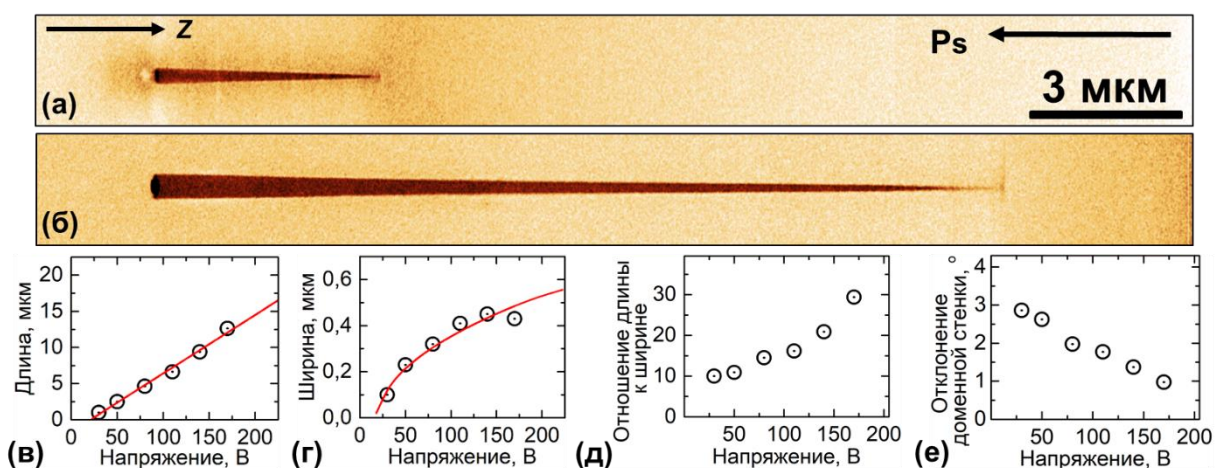


Рисунок 2 – СМПО изображения доменов, после однократного переключения: (а) $U_p = 80$ В, $t_p = 0,1$ с, (б) $U_p = 170$ В, $t_p = 0,1$ с. Зависимости от напряжения: (в) длины домена, аппроксимированной формулой (8), (г) ширины основания домена, аппроксимированной формулой (7), (д) отношения длины к ширине, и (е) отклонения доменной стенки от полярного направления. Сухая атмосфера. MgOCLN.

Предполагалось, что ширина основания домена $w_d(E)$ равна удвоенному расстоянию от точки приложения напряжения, при котором величина полярной компоненты локального поля $E_{loc.s.z}(x)$ равна пороговому полю для генерации ступеней $E_{th.st}$:

$$E_{loc.s.z}(w) - E_{th.st} = 0. \quad (1)$$

Следует учитывать, что $E_{loc.s.z}$ представляет собой суперпозицию полярных компонент поля, создаваемого зондом ($E_{tip.z}$), деполяризующего поля ($E_{dep.z}$), а также полей внешнего ($E_{ex.scr.z}$) и объемного ($E_{b.scr.z}$) экранирования:

$$E_{loc.s.z}(r, t) = E_{tip.z}(r) + [E_{dep.z}(r, t) - E_{ex.scr.z}(r, t)] - E_{b.scr.z}(r, t). \quad (2)$$

Предполагалось, что время экранирования τ_{scr} много больше времени, за которое доменная стенка перемещается от точки приложения напряжения на расстояние, при котором выполняется равенство (1).

Полярная составляющая поля $E_{tip.z}$, создаваемого зондом СЗМ (Рисунок 3а,б), была рассчитана с использованием приближения точечных зарядов с поправкой на емкость зонда [11]:

$$E_{tip.z}(x, y, z) = \frac{C_{tip} U}{4\pi\epsilon_0} \frac{2}{1+\epsilon} \frac{z}{(x^2 + (y - R_{tip})^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

где U – приложенное напряжение, $C_{tip} = 4\pi\epsilon_0 R_{tip} \frac{1+\epsilon}{1-\epsilon} \ln \frac{2}{1-\epsilon}$ – емкость зонда, ϵ – диэлектрическая проницаемость, и R_{tip} – радиус зонда.

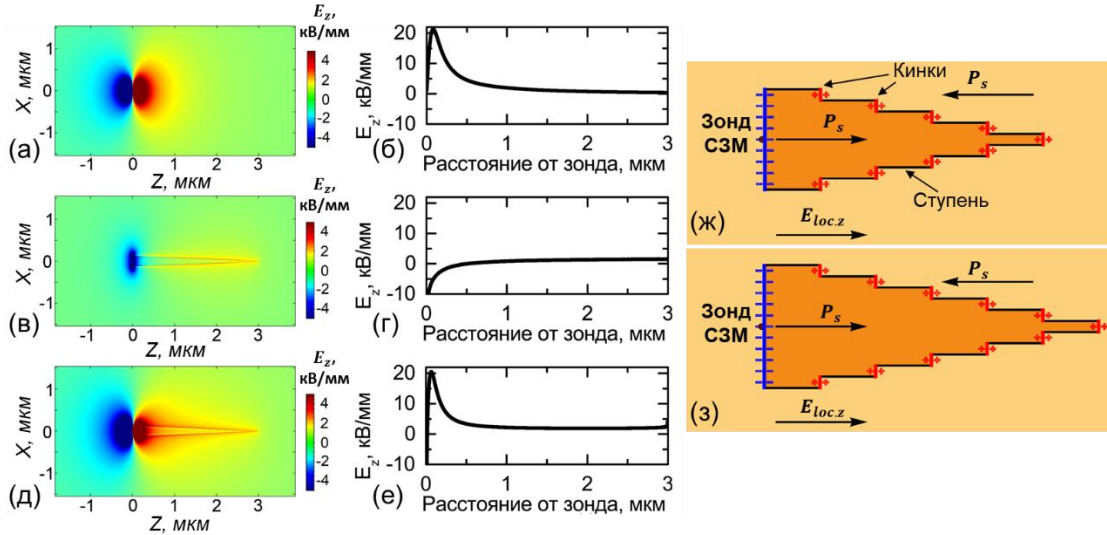


Рисунок 3 – Рассчитанное пространственное распределение полярных компонент электрических полей для клиновидного домена, растущего при локальном переключении на неполярном срезе: (а,б) $E_{tip.z}$, созданное зондом СЗМ, (в,г) $E_{dep.z} - E_{ex.scr.z}$, созданное ЗДС, (д,е) $E_{loc.s.z}$. Схема роста домена: (ж) начальное состояние, (з) конечное состояние.

В приближении однородного распределения экранирующего заряда в переключенной области рост основания домена зависит от экранирования деполяризующего поля. Связанный заряд в основании домена был рассмотрен как однородно заряженный отрезок (Рисунок 3а-е), расположенный на поверхности, поскольку глубина домена на неполярном срезе много меньше его ширины [12].

Величину полярной компоненты деполаризующего поля в месте генерации ступеней на краю основания домена на поверхности ($y = 0$) можно записать в виде:

$$E_{dep.z}(x, 0, z) = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{2}{1+\epsilon} \frac{1}{z} \left(\frac{2x-w}{\sqrt{(2x-w)^2+4z^2}} - \frac{w+2x}{\sqrt{(w+2x)^2+4z^2}} \right), \quad (4)$$

где w – ширина домена, λ – линейная плотность заряда.

Известно, что компенсация деполаризующего поля происходит в основном за счет быстрого внешнего экранирования и завершается за счет медленного объемного экранирования [13]. Поэтому до завершения экранирования существует остаточное деполаризующее поле $E_{rd.z}$, которое уменьшает величину $E_{loc.s.z}$:

$$E_{rd.z}(t) = [E_{dep.z}(t) - E_{ex.scr.z}(t)] - E_{b.scr.z}(t). \quad (5)$$

Известно, что для описания процесса объёмного экранирования необходимо использовать несколько характерных времен [14]:

$$E_{loc.s.z}(t_p) = E_{tip.z} - E_{rd.z}(t) \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{1+t_p/\tau_i}, \quad (6)$$

где ω_i – относительный вклад экранирования с постоянной времени τ_i , $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$.

Проведена аппроксимация зависимости ширины домена от длительности импульса (Рисунок 1г) для времен релаксации: 0,3 с, 3 с и 30 с.

Рассмотрим зависимость ширины домена от напряжения $w_d(U)$, измеренную при постоянной длительности переключающего импульса. При частичном экранировании ширина домена может быть определена из экспериментальной зависимости $w_d(t_p)$. Тогда ширина области, где $\Delta E_{loc.z} = 0$, может быть получена из уравнений (3) и (4):

$$w_d(U) = 2a \cdot b \sqrt{U - U_{th.st}}, \quad (7)$$

где $a = \sqrt{\frac{C_{tip}}{3\sqrt{3}\pi(1+\epsilon)\epsilon_0 E_{th.st}}}$, $U_{th.st} = (R_{tip}/a)^2$ – пороговое напряжение для генерации ступени, b – зависит от длительности импульса.

Поскольку $E_{tip.z}$ пропорционально напряжению, с учетом уравнения (3) зависимость длины домена L_d от напряжения имеет вид:

$$L_d(U) = k(U - U_{th.k}), \quad (8)$$

где $U_{th.k}$ – пороговое напряжение для генерации кинков, k – величина, пропорциональная подвижности.

Многokратное переключение последовательным приложением импульсов с одинаковым напряжением и длительностью с визуализацией домена после каждого импульса (Рисунок 4) показали, что ширина основания существенно увеличивалась, а длина не изменялась (Рисунок 4г,д). В результате воздействия десяти импульсов двукратно уменьшалось отношение длины к ширине основания и существенно увеличивалось отклонение доменной стенки от полярного направления (Рисунок 4е,ж).

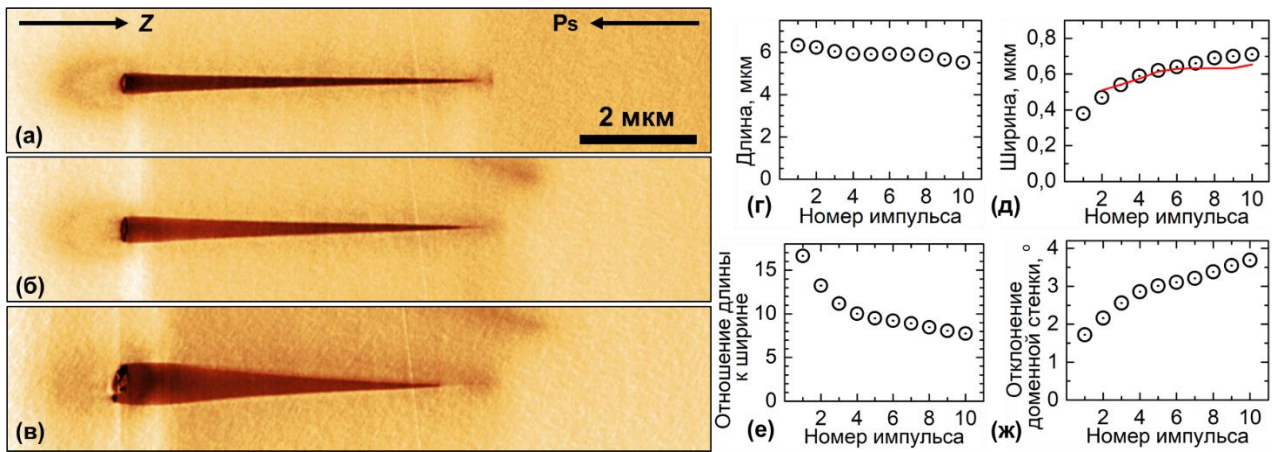


Рисунок 4 – СМПО изображения доменов после переключения различным количеством импульсов: (а) 1, (б) 2, (в) 10. Зависимости от количества импульсов: (г) длины домена, (д) ширины основания домена, аппроксимированная формулой (9), (е) отношения длины к ширине основания, и (ж) отклонения доменной стенки от полярного направления. $U_p = 100$ В, $t_p = 0,1$ с. Сухая атмосфера. MgOCLN.

Многokратное переключение поляризации проводилось с интервалом между импульсами 8 мин, что позволило предполагать, что полностью экранировалось деполяризующее поле, созданное частью основания домена, переключенной предыдущим импульсом. Учитывалось лишь действие остаточного деполяризующего поля, возникающего за счет увеличения ширины основания при последнем переключении.

$$E_{loc.s.z}(t) = E_{tip.z} - (E_{rd.z}(w_i, t_p) - E_{rd.z}(w_{i-1}, t_p)) \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{1 + t_p/\tau_i}, \quad (9)$$

где w_i и w_{i-1} – ширины домена после текущего и предыдущего импульса.

Увеличение ширины основания при приложении каждого последующего импульса обусловлено генерацией ступеней на краю основания. Незначительное уменьшение длины вызвано обратным переключением в процессе сканирования.

Взаимодействие клиновидных доменов. Встречный рост.

Локальное переключение как положительным, так и отрицательным импульсом приводило к образованию клиновидных доменов (Рисунок 5а,б). Размер домена после отрицательного импульса существенно меньше, чем после положительного. Эта особенность обусловлена тем, что проводимость заряженных доменных стенок голова-к-голове, образующихся при переключении положительным импульсом, существенно больше, чем стенок хвост-к-хвосту, образующихся при переключении отрицательным импульсом [15, 16]. Различие проводимости приводит к менее эффективному экранированию деполяризующего поля для доменных стенок, создаваемых отрицательным импульсом.

Переключение импульсом, после смещения точки приложения напряжения вдоль полярной оси импульсом другой полярности при $U_p > 80$ В (Рисунок 5в,г), приводило к образованию изолированного домена в результате встречного роста доменов. Длина домена была равна расстоянию между точками приложения напряжения, а форма существенно зависела от последовательности приложения импульсов.

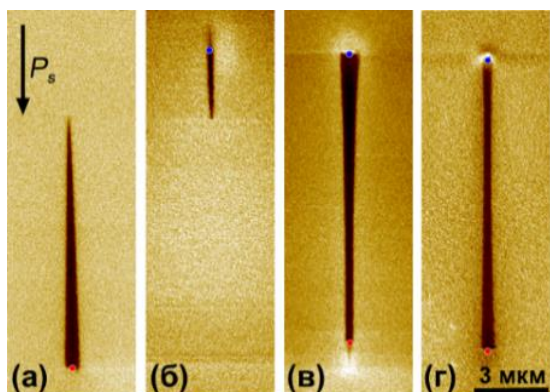


Рисунок 5 – СМПО изображения доменов, созданных: 1) приложением импульсов разной полярности (а) $U_p = +100$ В и (б) $U_p = -100$ В. 2) при разной последовательности импульсов: (в) отрицательный после положительного, (г) положительный после отрицательного ($U_p = 80$ В), Точки приложения положительных импульсов отмечены красным цветом, а отрицательных – синим. $t_p = 0,5$ с, RH = 20%. Расстояние между точками приложения напряжения 11 мкм. MgOCLN.

полярного направления (Рисунок бд) и при $U_p > 80$ В к образованию домена с нейтральными стенками (Рисунок бв,е). В дальнейших экспериментах использовалась именно такая последовательность приложения импульсов.

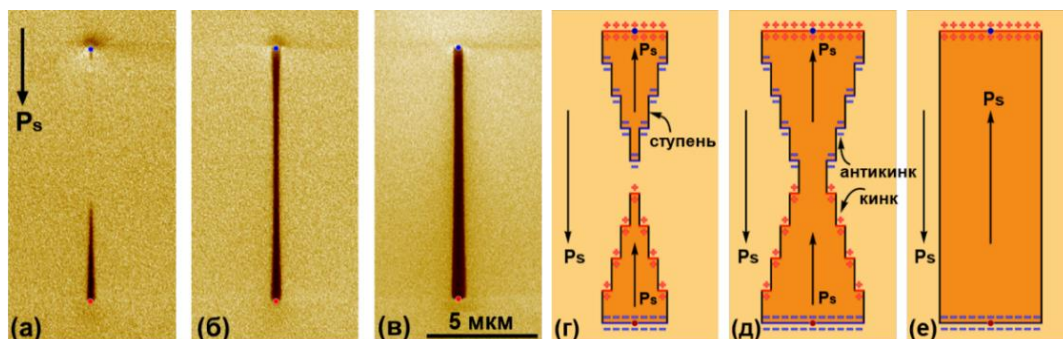


Рисунок 6 – СМПО изображения полосовых доменов, созданных импульсами с разным напряжением (U_p): (а) 60 В, (б) 70 В и (в) 80 В. $t_p = 0,5$ с, RH = 20%. Точка приложения положительного импульса отмечена красным, а отрицательного – синим. Расстояние между точками приложения напряжения 11 мкм. Схема образования полосовых доменов: (г) два изолированных домена с разным типом заряженных доменных стенок, (д) слияние доменов, (е) полосовой домен с нейтральными стенками. MgOCLN.

Уменьшение расстояния между точками приложения напряжения приводило к уменьшению отклонения доменных стенок от полярного направления (Рисунок 7).

Исследовалось формирование периодических полосовых доменных структур для различных расстояний между точками приложения напряжения от 0,5 до 2,5 мкм (Рисунок 8). Показано, что при расстоянии менее 0,7 мкм отдельные полосовые домены сливаются (Рисунок 8а). При расстоянии более 0,7 мкм формируются периодические доменные структуры (Рисунок 8б-г). Ширина доменов не зависит от расстояния и составляет около 400 нм.

Переключение отрицательным импульсом после положительного приводило к образованию домена с отклонением стенки от полярного направления на два градуса (Рисунок 5в).

Переключение положительным импульсом после отрицательного было получено несколько типов доменов (Рисунок 5г, ба-в).

Приложение напряжений менее 70 В приводило к образованию двух изолированных клиновидных доменов с ЗДС (Рисунок ба,г), а увеличение напряжения до 80 В к их слиянию (Рисунок бб,д). Сближение и аннигиляция кинков и антикинков с разным знаком заряда приводило к уменьшению отклонения доменной стенки от

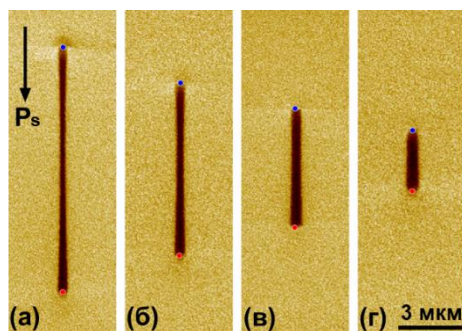


Рисунок 7 – СМПО изображение полосовых доменов, созданных при различном расстоянии между точками приложения поля, мкм: (а) 11, (б) 7,8, (в) 5,3, (г) 2,7. $U_p = 70$ В, $t_p = 0,5$ с, RH = 20%. Точка приложения положительного импульса отмечена красным цветом, а отрицательного – синим. MgOCLN.

Изменение периода позволило получить доменную структуру с периодом 0,75 мкм и коэффициентом заполнения 0,5, которая является оптимальной для преобразования длины волны излучения в периодически поляризованных кристаллах [17].

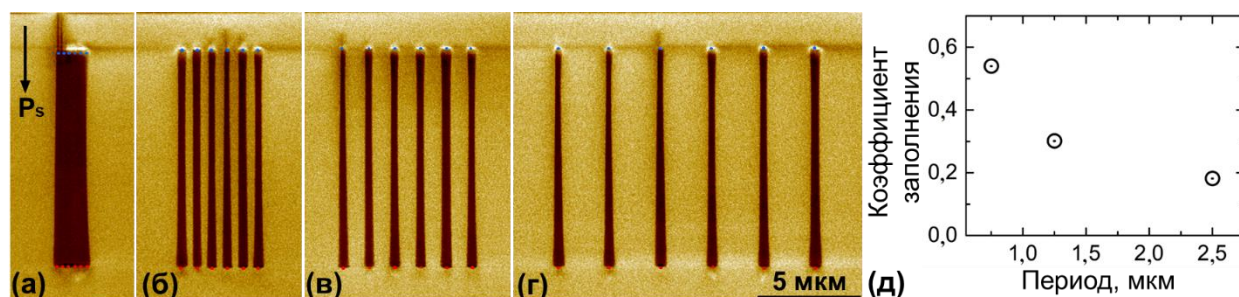


Рисунок 8 – СМПО изображения периодических полосовых доменов, созданных приложением импульсов напряжения для различных расстояний между точками приложения: (а) 0,5 мкм, (б) 0,75 мкм, (в) 1,25 мкм и (г) 2,5 мкм. (д) Зависимость коэффициента заполнения от периода записи доменов. $U_p = 80$ В, $t_p = 0,5$ с, RH = 20%. Точка приложения для положительного импульса отмечена красным, а отрицательного – синим. Расстояние между точками приложения 11 мкм. MgOCLN.

Рост изолированного домена к полосовому электроду

Исследовался рост изолированного домена от точки приложения отрицательного импульса к заземленному полосовому электроду (Рисунок 9). При увеличении приложенного напряжения были получены четыре формы доменов. (1) Одиночный изолированный клиновидный домен с ЗДС хвост-к-хвосту, возникающий в результате роста в полярном направлении от точки приложения напряжения (Рисунок 9а). (2) Уменьшение отклонения ЗДС от полярного направления после прорастания домена до электрода (Рисунок 9б). (3) Появление клиновидных выступов, растущих в обратном направлении от образовавшейся ЗДС голова-к-голове, и формирование гребенчатого домена (Рисунок 9в). (4) Формируется массив изолированных клиновидных доменов, которые продолжают расти за точкой приложения напряжения (Рисунок 9г).

Для объяснения полученных результатов был проведен расчет пространственного распределения полярной компоненты электрического поля, создаваемого системой зонд-электрод с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics (Рисунок 9д).

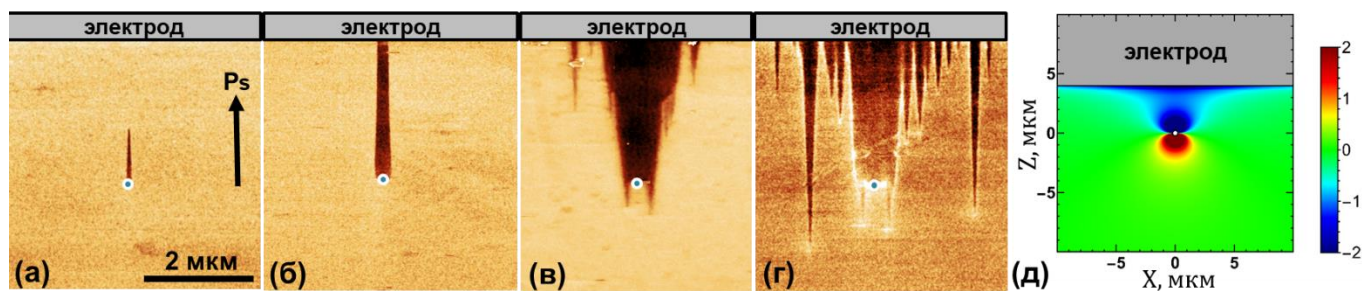


Рисунок 9 – СМПО изображения доменов при росте домена к электроду при различных напряжениях (U_p) (а) – 50 В, (б) – 55 В, (в) – 60 В, (г) – 70 В. $t_p = 0,5$ с. Точка приложения отрицательного импульса (отмечена синим) на расстоянии 2,6 мкм от электрода. Сухая атмосфера. MgOCLN. Распределение электрического поля в модели зонд-электрод

Рост одиночного изолированного клиновидного домена вызван генерацией ступеней в поле, создаваемом зондом и движением кинков. Ускоренное расширение домена на электроде, приводящее к смене типа ЗДС, обусловлено генерацией ступеней в поле вблизи электрода. Появление клиновидных выступов на ЗДС, растущих в обратном направлении и приводящих к формированию гребенчатого домена, вызвано потерей устойчивости формы, когда отклонение ЗДС от полярного направления превышает критическое значение [5]. Образование массива изолированных клиновидных доменов обусловлено коррелированным зародышеобразованием [10]. Их рост в противоположном направлении за точкой приложения напряжения обусловлен тем, что продолжается генерация ступеней вблизи электрода, а удлинение домена вызвано движением кинков в поле, создаваемом заряженными кинками.

Четвертая глава посвящена исследованию обратного переключения клиновидных доменов с заряженными доменными стенками.

Было проведено исследование ранее не изученного эффекта частичного обратного переключения после завершения переключающего импульса под действием остаточного деполяризующего поля и в результате сканирования при визуализации доменной структуры.

Влияние режима переключения

Было использовано два режима локального переключения: (1) зонд отрывается от поверхности до окончания импульса («с отрывом») и (2) зонд остается в контакте с поверхностью после окончания импульса («в контакте»).

После завершения положительного импульса в контакте происходило обратное переключение, которое приводило к значительному уменьшению длины домена. Этот эффект менее выражен при переключении с отрывом (Рисунок 10).

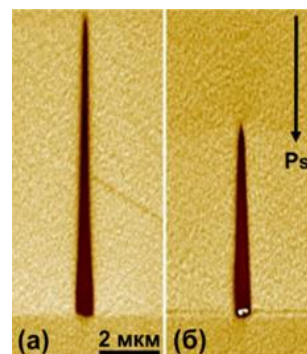


Рисунок 10 – СМПО изображения изолированных доменов, полученных переключением: (а) с отрывом, (б) в контакте. $U_p = 90$ В, $t_p = 0,5$ с. Сухая атмосфера. MgOCLN.

Самопроизвольное обратное переключение вызвано действием $E_{loc.bs.z}$:

$$E_{loc.bs.z}(r, t) = -E_{rd.z}(r, t) + E_{dep.bs.z}(r, t) - E_{ex.scr.bs.z}(r, t) - E_{b.scr.bs.z}(r, t). \quad (10)$$

Влияние сканирования на обратное переключение

Непрерывная визуализация созданных доменов сканированием с переменным напряжением $U_{AC} = 1$ В приводила к заметному уменьшению длины домена, а ширина основания домена остается практически постоянной (Рисунок 11а-в). Следует отметить, что при $U_{AC} = 6$ В длина домена уменьшается значительно сильнее. Измерения длины домена после последовательных сканирований позволили выявить его экспоненциальное уменьшение с временем релаксации около 9 мин (Рисунок 11д).

Для оценки обратного переключения без многократного сканирования были созданы два одинаковых домена. Изображение первого домена было получено сразу после завершения переключения (Рисунок 11а), а второго - через 60 минут после переключения (Рисунок 11г). Длина домена даже без многократной визуализации уменьшилась на 20%.

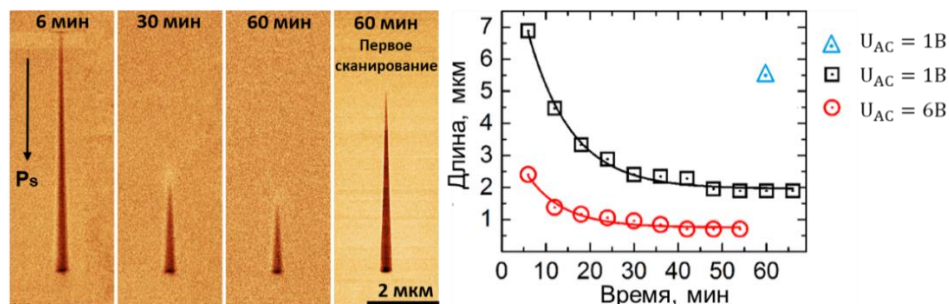


Рисунок 11 – СМПО изображения доменов: многократные сканирования сразу после переключения, время завершения сканирования: (а) 6 мин (первое сканирование), (б) 30 мин (пятое сканирование), (в) 60 мин (десятое сканирование), (г) однократное сканирование через 60 мин после переключения. $U_{AC} = 1$ В. (д) Зависимость длины домена от количества сканирований для $U_{AC} = 1$ и 6 В. $U_p = 100$ В, $t_p = 0,5$ с. Треугольником отмечена длина домена, представленного на (г). Сухая атмосфера. MgOCLN.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим обратное переключение под действием остаточного деполяризирующего поля $E_{rd.z}$. Экранирование $E_{dep.bs.z}$ определяет зависимость L_d от времени. Без сканирования уменьшение L_d вызвано компенсацией деполяризирующего поля $E_{dep.bs.z}$ объемным экранированием, а при сканировании реализуется дополнительное внешнее экранирование за счет тока во внешней цепи при кратковременном касании зонда, как и при переключении без отрыва. Влияние амплитуды слабого переменного модулирующего напряжения при сканировании можно отнести за счет “размытия” объемного экранирующего заряда при колебаниях ЗДС, что приводит к уменьшению пороговых полей генерации ступеней и движения кинков [5].

Локальное переключение в условиях повышенной влажности

Было проведено исследование влияния относительной влажности на размеры изолированных доменов, образовавшихся в результате переключения поляризации с отрывом и без отрыва зонда от поверхности до окончания импульса (Рисунок 12).

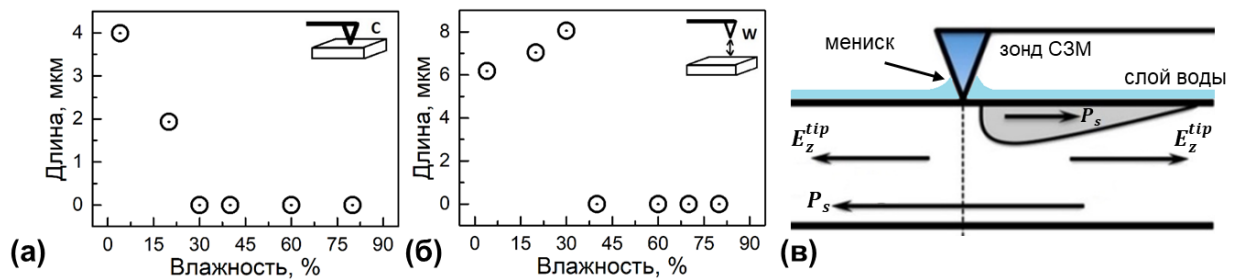


Рисунок 12 – Зависимость длины доменов от влажности при переключении: (а) без отрыва, (б) с отрывом зонда от поверхности до окончания импульса, (в) схематическое изображение зонда СЗМ со слоем воды на поверхности. $U_p = 100$ В, $t_p = 0,5$ с. MgOCLN.

При $RH < 30\%$ переключение в контакте приводит к уменьшению L_d за счет облегчения обратного переключения, благодаря дополнительному внешнему экранированию $E_{dep.bs.z}$ (Рисунок 12а). Переключение с отрывом приводит к увеличению L_d , за счет перераспределения приложенного поля, вызванного образованием водного мениска (Рисунок 12в), при незначительном обратном переключении поляризации (Рисунок 12б).

При $RH > 30\%$ полное обратное переключение вызвано образованием на всей поверхности образца слабо проводящего слоя воды, который обеспечивает внешнее экранирование $E_{dep.bs.z}$ (Рисунок 12а,б).

Пятая глава посвящена исследованию закономерностей формирования самоорганизованных доменных структур при локальном переключении в монокристаллах многоосного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца в ромбоэдрической фазе.

Локальное переключение в условиях сухой атмосферы

Впервые показано, что локальное переключение зондом СЗМ в сухой атмосфере в вырезанной перпендикулярно оси $[111]$ монокристаллической пластине многоосного сегнетоэлектрика PMN-PT в ромбоэдрической фазе приводит к формированию сложной доменной структуры, состоящей из сегнетоэлектрических c -доменов и сегнетоэластических a -доменов (Рисунок 13а-в).

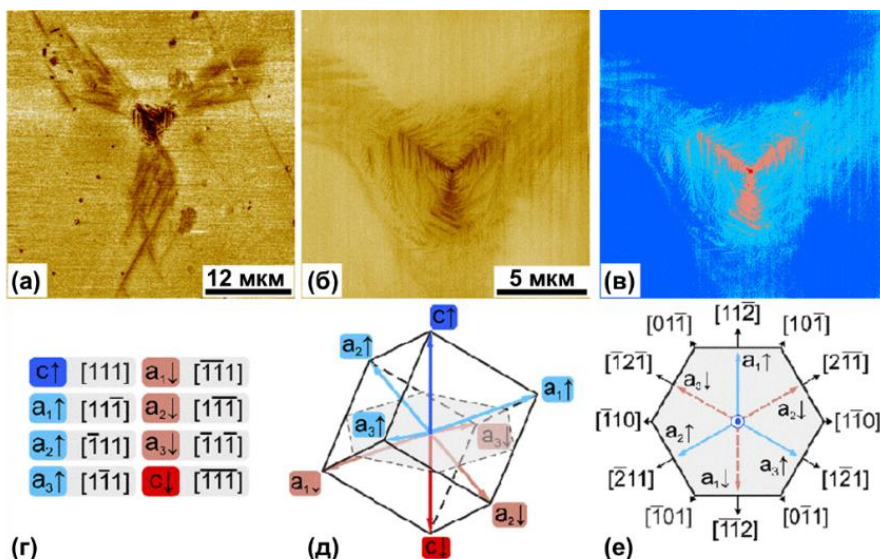


Рисунок 13 – (а,б) СМПО изображения доменных структур, полученных при локальном переключении. (в) Ориентация поляризации на изображении (б). (г,д) Обозначения поляризации и ориентации, используемые на (в). (е) Характерные направления в плоскости (111) для $[111]$ -ориентированной ромбоэдрической ячейки. $U_p = 90$ В, $t_p = 0,5$ с. Сухая атмосфера. PMN-PT.

Анализ СМПО изображений позволил выделить контрасты, соответствующие четырем типам доменов: исходного $c\uparrow$ -домена и переключенных $c\downarrow$, $a\uparrow$ и $a\downarrow$ -доменов (Рисунок 13д,е). Изменение топографии поверхности в области образования a -домена свидетельствует о повышении механического напряжения.

Выявленная эволюция доменной структуры аналогична полученной ранее при переключении однородным электрическим полем в PMN-PT [9]. Переключение из $c\uparrow$ доменного состояния в $c\downarrow$ реализовывалось за счёт трёх 71-градусных переключений – через два последовательных $a\uparrow$ и $a\downarrow$ -доменных состояния, что обусловлено меньшей величиной порогового поля образования a -доменов [18].

Для изучения кинетики доменной структуры проводилось локальное переключение с использованием зонда с радиусом закругления 10 мкм и *in situ* оптической визуализацией доменов (Рисунок 14а-в). Показано, что эволюция доменной структуры представляет собой рост «лепестковых» областей в направлениях $[11\bar{2}]$, $[1\bar{2}1]$, и $[\bar{2}11]$, контраст которых представляет собой наложение контрастов от отдельных широких $a\uparrow$ -доменов, наклоненных к поверхности под углом 35.5° (Рисунок 14г,е).

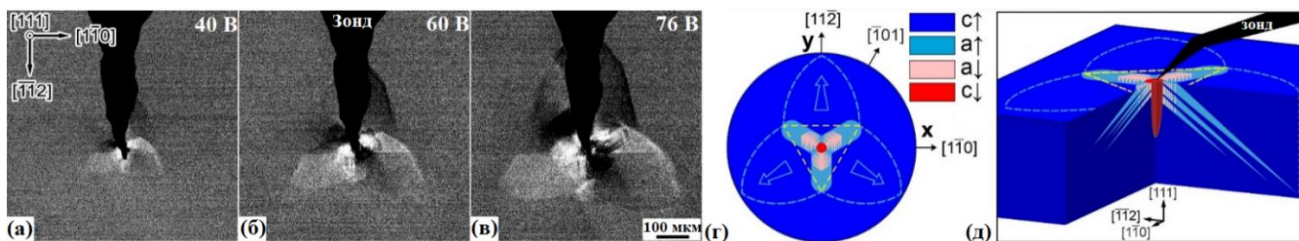


Рисунок 14 – (а-в) Оптические изображения доменной структуры, формирующейся при локальном переключении в растущем поле. Схемы доменной структуры: (г) на поверхности и (е) в объеме. Сухая атмосфера. PMN-PT.

Длина лучей домена линейно зависела от напряжения с пороговым значением около 10 В (Рисунок 15) и увеличивался пропорционально логарифму длительности импульса. Аналогичные зависимости радиуса доменов наблюдались ранее при локальном переключении в LiNbO_3 и LiTaO_3 .

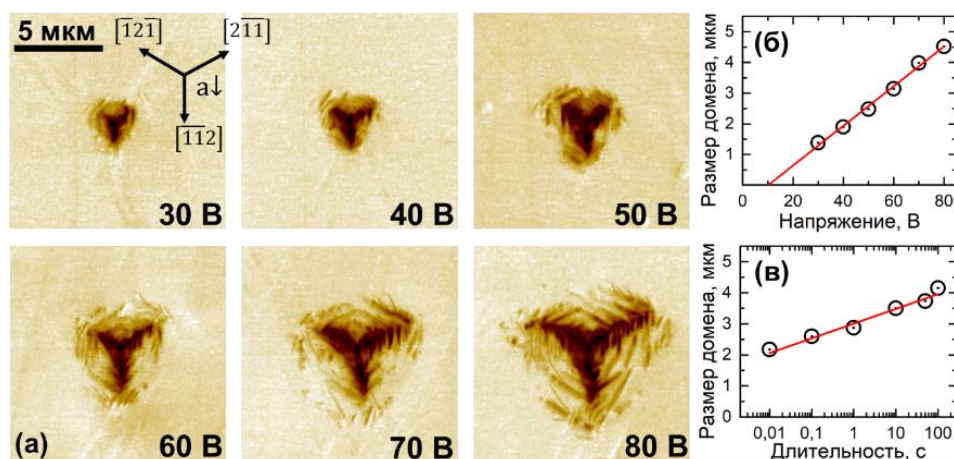


Рисунок 15 – (а) СМПО изображение $a\downarrow$ доменов, полученных при переключении импульсами с различной амплитудой при $t_p = 0,5$ с. Зависимость длины лучей доменов от (б) амплитуды и (в) длительности переключающего импульса при $U_p = 60$ В. Сухая атмосфера. PMN-PT.

Увеличение RH приводит к качественному изменению доменной структуры. При $RH > 40\%$ рост $c\downarrow$ -домена приводит к полному исчезновению a -доменов (Рисунок 16). Моделирование показало, что появление $c\downarrow$ -домена приводит к компенсации σ , ответственного за образование a -доменов.

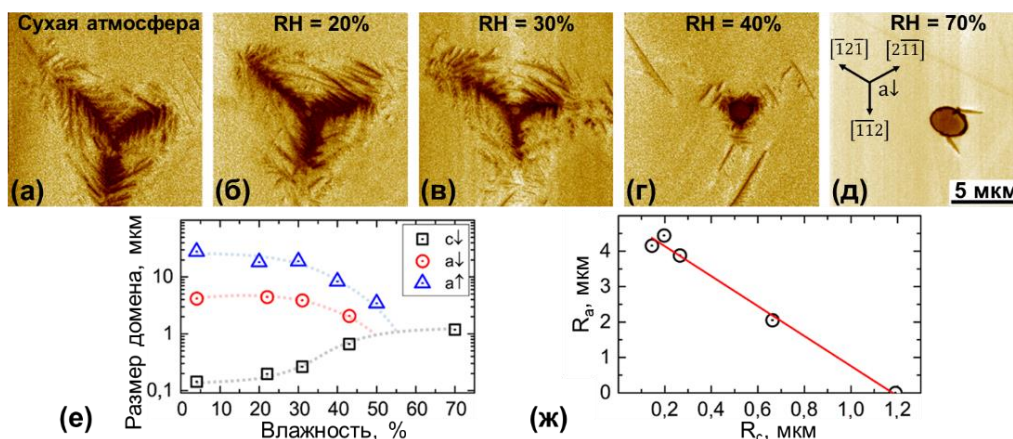


Рисунок 16 – СМПО изображения доменов, созданных локальным переключением при различной RH: (а) сухая атмосфера, (б) 20%, (в) 30%, (г) 40%, (д) 70%. (е) Зависимость размеров доменов от RH. (ж) Зависимость средней длины лучей $a\downarrow$ -домена от радиуса $c\downarrow$ -домена. $U_p = 90$ В, $t_p = 0,5$ с.

Взаимодействие изолированных доменов

Для исследования домен-доменного взаимодействия проводилась последовательная запись двух доменов одинаковыми переключающими импульсами с различным расстоянием между точками приложения напряжения (Рисунок 17а-г). Домены записывались слева направо. Было обнаружено, что форма первого домена искажается при расстоянии менее 7,5 мкм (Рисунок 17б) и уменьшается при уменьшении расстояния (Рисунок 17в) и при расстоянии менее 4 мкм первый домен исчезает (Рисунок 17г). При этом размеры второго домена практически не изменяются (Рисунок 17д). Полученная особенность обусловлена обратным переключением первого домена под действием деполяризующего поля и механических напряжений, возникающих при образовании второго домена.

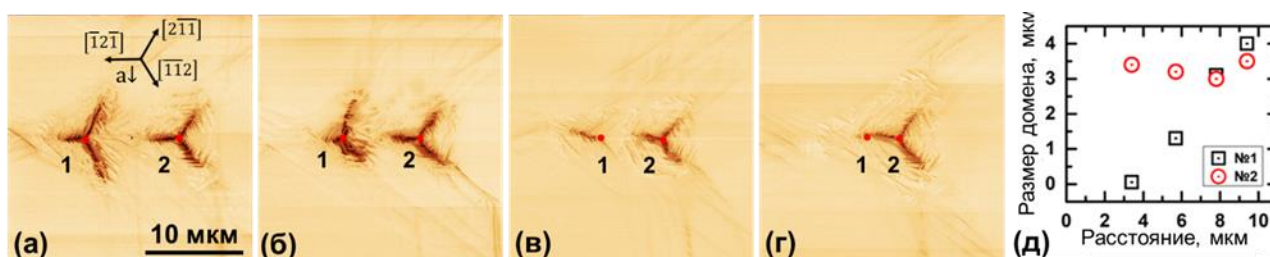


Рисунок 17 – СМПО-изображения доменов при записи с различным расстоянием между точками приложения поля, мкм: (а) 9,4, (б) 7,8, (в) 5,7, (г) 3,4. (д) Зависимость длины лучей доменов от расстояния. $U_p = 80$ В, $t_p = 0,5$ с. Точка приложения импульса обозначена красным цветом. Сухая атмосфера. PMN-PT.

Самопроизвольный рост доменов после завершения локального переключения поляризации

Было обнаружено, что после завершения импульса переключения при многократном сканировании с интервалом времени 25 мин наблюдается увеличение площади c -домена с характерным временем около 90 мин (Рисунок 18).

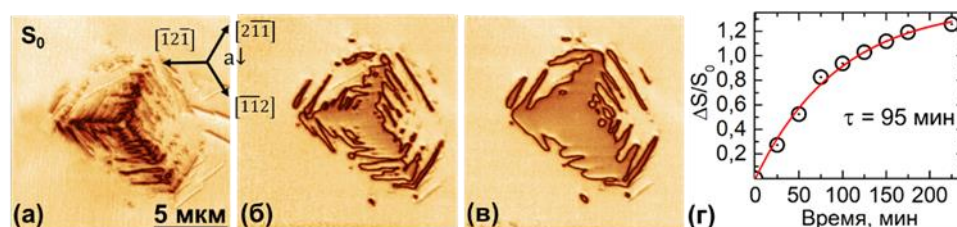


Рисунок 18 – СМПО изображение самопроизвольного роста c -домена: многократные сканирования сразу после завершения переключения поляризации, время начала сканирования: (а) 0 мин (первое сканирование), (б) 75 мин (четвертое сканирование), (в) 225 мин (десятое сканирование). (г) Зависимость от времени относительного изменения площади домена. $U_p = 90$ В, $t_p = 0,5$ с. Сухая атмосфера. PMN-PT.

Наблюдаемый рост домена аналогичен эффекту обратного переключения в MgOCLN и может быть отнесен за счет действия остаточного деполяризующего поля и влияния процесса сканирования при многократной визуализации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Проведенные исследования роста изолированных доменов и формирования регулярных доменных структур при локальном переключении поляризации проводящим зондом сканирующего зондового микроскопа на неполярных срезах одноосного сегнетоэлектрика MgOCLN и в монокристаллах многоосного сегнетоэлектрика PMN-PT позволили сделать следующие **основные выводы**:

1. Выявлена зависимость отклонения заряженных доменных стенок клиновидных доменов от полярного направления от амплитуды и количества переключающих импульсов при локальном переключении на неполярных срезах MgOCLN. Показано, что ширина основания клиновидного домена определяется пространственным распределением электрического поля.

2. Созданы статические регулярные доменные структуры с периодом 0,75 мкм и коэффициентом заполнения 0,5 локальным переключением двумя импульсами различной полярности на неполярном срезе MgOCLN.

3. Впервые изучен рост изолированного домена от точки приложения отрицательного импульса к заземленному полосовому электроду и выявлены стадии процесса. Формирование массива изолированных клиновидных доменов отнесено за счет коррелированного зародышеобразования и потери устойчивости формы, вызванного отклонением заряженной доменной стенки от полярного направления.

4. Впервые изучен и объяснен эффект частичного обратного переключения доменов с заряженными доменными стенками в результате визуализации доменов на неполярном срезе методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика, и предложены пути его уменьшения.

5. Обнаруженное изменение длины клиновидных доменов при относительной влажности до 30% отнесено за счет формирования мениска адсорбированной воды на зонде сканирующего зондового микроскопа. Полное обратное переключение при большей влажности объяснено формированием на поверхности адсорбированного слоя воды, который облегчает обратное движение доменных стенок.

6. Особенности формирования доменной структуры, состоящей из *a*- и *c*-доменов, при локальном переключении поляризации на (111) срезе PMN-PT в ромбоэдрической фазе вызваны совместным воздействием механических напряжений и электрического поля. Установлено, что при увеличении влажности вблизи точки приложения напряжения растет *c*-домен, что сопровождается исчезновением *a*-доменов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты, полученные в ходе исследований, будут использованы для развития методов доменной инженерии при создании регулярных доменных структур в одноосных и многоосных сегнетоэлектриках. Планируется изучение возможностей увеличения глубины регулярных доменных структур на неполярном срезе. Будут исследованы возможности использования регулярных доменных структур с субмикронными периодами для изготовления преобразователей длины волны лазерного излучения в конфигурации обратного рассеяния света и электрооптических модуляторов. Для создания регулярных доменных структур будет использоваться локальное облучение сфокусированным излучением инфракрасного фемтосекундного лазера.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Gureev, M. Y. Head-to-head and tail-to-tail 180° domain walls in an isolated ferroelectric / M. Y. Gureev, A. K. Tagantsev, N. Setter // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83. – № 18. – P. 184104.
2. Optical three-dimensional profiling of charged domain walls in ferroelectrics by Cherenkov second-harmonic generation / T. Kämpfe et al. // *Phys. Rev. B.* – 2014. – Vol. 89. – № 3. – P. 035314.
3. Static conductivity of charged domain walls in uniaxial ferroelectric semiconductors / E. A. Eliseev et al. // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83. – № 23. – P. 235313.
4. Conduction at domain walls in oxide multiferroics / J. Seidel et al. // *Nature Materials.* – 2009. – Vol. 8. – P. 229–234.
5. Forward growth of ferroelectric domains with charged domain walls. Local switching on non-polar cuts / V. Ya. Shur et al. // *J. Appl. Phys.* – 2021. – Vol. 129. – № 3. – P. 044103.
6. Seidel, J. Domain walls as nanoscale functional elements / J. Seidel // *J. Phys. Chem. Lett.* – 2012. – Vol. 3. – № 19. – P. 2905–2909.
7. Domain wall nanoelectronics / G. Catalan et al. // *Rev. Mod. Phys.* – 2012. – Vol. 84. – № 19. – P. 119.
8. Bokov, A. A Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure / A. A. Bokov, Z. G. Ye // *J. Mater. Sci.* – 2006. – Vol. 41. – P. 31–52.
9. Dense ferroelectric-ferroelastic domain structures in rhombohedral PMN-28PT single crystals / A. D. Ushakov et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 116. – № 18. – P. 182901.
10. Shur, V. Ya. Kinetics of ferroelectric domains: Application of general approach to LiNbO₃ and LiTaO₃ / V. Ya. Shur // *J. Mater. Sci.* – 2006. – Vol. 41. – P. 199–210.
11. Kalinin, S. V. Nanoelectromechanics of piezoresponse force microscopy / S. V. Kalinin, E. Karapetian, M. Kachanov // *Phys. Rev. B.* – 2004. – Vol. 70. – № 18. – P. 184101.
12. Tip-induced domain growth on the non-polar cuts of lithium niobate single-crystals / D. O. Alikin et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – Vol. 106. – № 18. – P. 182902.
13. Complex study of bulk screening processes in single crystals of lithium niobate and lithium tantalate family / V. Ya. Shur et al. // *Phys. Solid State.* – 2010. – Vol. 52. – P. 2147–2153.
14. Shur, V. Ya. Kinetics of polarization reversal in normal and relaxor ferroelectrics: relaxation effects / V. Ya. Shur // *Phase Transitions.* – 1998. – Vol. 65. – № 1-4. – P. 49–72.

15. Conductions through head-to-head and tail-to-tail domain walls in LiNbO₃ nanodevices / X. Chai et al. // *J. Alloys Compd.* – 2021. – Vol. 873. – P. 159837.
16. Anisotropic conductance at improper ferroelectric domain walls / D. Meier et al. // *Nature Materials.* – 2012. – Vol. 11. – P. 284–288.
17. Shur, V. Ya. Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate / V. Ya. Shur, A. R. Akhmatkhanov; I. S. Baturin // *Appl. Phys. Rev.* – 2015. – Vol. 2. – № 4. – P. 040604.
18. Multistep stochastic mechanism of polarization reversal in rhombohedral ferroelectrics / Y. A. Genenko et al. // *Phys. Rev. B.* – 2020. – Vol. 102. – № 6. – P. 064107.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Turygin, A. P. The formation of self-organized domain structures at non-polar cuts of lithium niobate as a result of local switching by an SPM tip / A. P. Turygin, D. O. Alikin, **Yu. M. Alikin**, V. Ya. Shur // *Materials* – 2017. – Vol. 10. – № 10. – P. 1143. – 0,75 п.л./ 0,20 п.л. – (Scopus, Web of Science).
2. Turygin, A. P. Self-organized domain formation by moving the biased SPM tip / A. P. Turygin, Yu. M. Alikin, E. A. Neradovskaia, D. O. Alikin, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics* – 2019. – Vol. 542. – № 1. – P. 70–76. – 0,4 п.л./ 0,1 п.л. – (Scopus, Web of Science).
3. **Alikin, Yu. M.** Tilt control of the charged domain walls created by local switching on the non-polar cut of MgO doped lithium niobate single crystals / **Yu. M. Alikin**, A. P. Turygin, D. O. Alikin, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics* – 2021. – Vol. 574. – № 1. – P. 16–22. – 0,45 п.л./ 0,15 п.л. – (Scopus, Web of Science).
4. Shur, V. Ya. Forward growth of ferroelectric domains with charged domain walls. Local switching on non-polar cuts / V. Ya. Shur, E. V. Pelegova, A. P. Turygin, M. S. Kosobokov, **Yu. M. Alikin** // *J. Appl. Phys.* – 2021. – Vol. 129. – № 4. – P. 044103. – 0,9 п.л./ 0,15 п.л. – (Scopus, Web of Science).
5. **Alikin, Yu. M.** Decay of domains created by local switching on non-polar cut of MgO doped LiNbO₃ single crystals / **Yu. M. Alikin**, A. P. Turygin, M. S. Kosobokov, D. O. Alikin, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics* – 2022. – Vol. 592. – № 1. – P.12–18. – 0,5 п.л./ 0,15 п.л. – (Scopus, Web of Science).
6. Alikin, D. Competition between ferroelectric and ferroelastic domain wall dynamics during local switching in rhombohedral PMN-PT single crystals / D. Alikin, A. Turygin, A. Ushakov, M. Kosobokov, **Y. Alikin**, Q. Hu, X. Liu, Z. Xu, X. Wei, V. Shur // *Nanomaterials* – 2022. – Vol. 12. – № 21. – P. 3912. – 1,4 п.л./ 0,15 п.л. – (Scopus, Web of Science).
7. **Alikin, Yu. M.** Interaction of wedge-like domains created by local polarization reversal on nonpolar cut of lithium niobate / **Yu. M. Alikin**, A. P. Turygin, D. O. Alikin, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics* – 2023. – Vol. 604. – № 1. – P. 25–31. – 0,4 п.л./ 0,1 п.л. – (Scopus, Web of Science).

Результаты работы были также опубликованы в 16 тезисах всероссийских и международных конференций.