

На правах рукописи



ИЕВЛЕВ Антон Владимирович

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОДОМЕННЫХ СТРУКТУР
В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДАМИ
СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре компьютерной физики и в лаборатории сегнето-электриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ физики и прикладной математики Института естественных наук ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург.

Научные руководители – доктор физико-математических наук,
профессор **Шур Владимир Яковлевич**

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук,
Институт физики микроструктур РАН,
ведущий научный сотрудник,
отдела магнитных наноструктур,
Миронов Виктор Леонидович

доктор физико-математических наук, профессор
ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Институт естественных наук,
заведующий кафедрой теоретической физики,
Москвин Александр Сергеевич

Ведущая организация – **Казанский Физико-Технический Институт
им. Завойского, РАН, Казань**

Защита состоится 8 июня 2012 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (620002, Екатеринбург, пр. Мира 19, ауд. I).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург.

Автореферат разослан «29» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



Г.И. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исследование кинетики фазовых переходов в физике конденсированного состояния представляет значительный интерес для изучения общих закономерностей кинетики фазовых превращений. Особый интерес представляют сегнетоэлектрические кристаллы, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой можно изменять воздействием электрического поля. Процесс переключения поляризации, сопровождаемый изменением доменной структуры за счет образования и роста доменов в поле, может быть рассмотрен как аналог фазового превращения при фазовом переходе первого рода.

Использование методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) позволяет визуализировать статические доменные структуры с нанометровым разрешением, что открывает новые возможности в исследовании фазовых превращений. Высокое пространственное разрешение позволяет детально исследовать роль нанометровых доменов на разных стадиях переключения поляризации, начиная от образования наноразмерных зародышей и заканчивая формированием остаточных нанодоменов при слиянии доменов.

В последние годы сильно возрос интерес к практическому применению сегнетоэлектрических монокристаллов с нанодоменной структурой. Наиболее перспективным является создание устройств хранения информации сверхвысокой плотности на основе сегнетоэлектрической доменной структуры. Продемонстрирована возможность записи информации с плотностью до 1 Тбит/см^2 [1]. Успешно развивается доменная инженерия, которая занимается разработкой методов создания стабильных регулярных доменных структур для улучшения характеристик важных для практического применения. Одной из наиболее актуальных задач доменной инженерии является создание фотонных нелинейно-оптических кристаллов. Наиболее популярным методом доменной инженерии является приложение пространственно неоднородного электрического поля, позволяющее создавать периодические структуры с микронными периодами. Вместе с тем для некоторых приложений требуются фотонные кристаллы с субмикронными периодами.

СЗМ, на сегодняшний день, представляется наиболее перспективным методом создания субмикронных структур. Показано, что приложение импульсов напряжения к наноразмерному электроду (проводящему зонду СЗМ), позволяет создавать домены с размерами менее 50 нм [1]. Однако недостаточно исследовано как влияние внешних условий на формирование и рост доменов, так и процессы взаимодействия между изолированными доменами.

Кроме того, чрезвычайно важным с фундаментальной и прикладной точек зрения является исследование кинетики формирования микро- и нанодоменных при переключении поляризации в однородном поле. Широкий спектр режимов СЗМ предоставляют уникальную возможность проведения локальных исследований процессов переключения поляризации, результаты которых могут быть использованы для оптимизации классических методов доменной инженерии.

Целью работы являлось экспериментальное исследование и теоретическое описание процессов формирования микро- и нанодоменных структур при переключении поляризации электрическим полем, созданным проводящим зондом СЗМ.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

1. Разработать методики подбора оптимальных измерительных параметров для исследования доменных структур в режиме силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика и измерения локальных петель гистерезиса.
2. Исследовать влияние проводящего адсорбционного слоя на локальное переключение поляризации полем, создаваемым зондом СЗМ в ниобате лития.
3. Изучить особенности локального переключения поляризации вблизи плоской 180° доменной стенки в ниобате лития.
4. Исследовать эффекты взаимодействия между изолированными доменами в ниобате лития.
5. Изучить кинетику формирования и роста микро- и нанодоменных структур в релаксорном сегнетоэлектрике ниобате бария стронция.

Объекты исследования.

В качестве объекта исследования в работе были выбраны монокристаллы одноосных сегнетоэлектриков ниобата лития LiNbO_3 (LN), танталата лития LiTaO_3 (LT) и ниобата бария стронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN), как модельных сегнетоэлектриков, обладающих сравнительно простой доменной структурой. Монокристаллы семейства LN и LT в настоящее время находят широкое применение при создании устройств нелинейной оптики, в том числе с использованием доменной инженерии. В работе исследовались: LN конгруэнтного состава (CLN) и легированный магнием ($\text{MgO}:\text{LN}$), LT стехиометрического состава (SLT) и SBN легированный церием. Основной методикой исследования и модификации доменных структур являлась СЗМ, что позволило провести исследования и модификацию доменной структуры с нанометровым разрешением. Сочетание важных и перспективных для применений материалов, а также современной методики исследования доменных структур обуславливает актуальность проводимых исследований.

Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании процесса формирования микро- и нанодоменных структур в результате переключения поляризации при помощи электрического поля, создаваемого зондом СЗМ.

- Впервые показано, что наклон локальной петли гистерезиса зависит от точки фокусировки лазера на поверхности кантилевера.
- Объяснен рост доменов с размерами, существенно превышающими радиус закругления зонда СЗМ, при локальном переключении поляризации.
- Обнаружено существенное влияние проводимости адсорбционного слоя на процесс переключения поляризации.
- Обнаружено и объяснено образование треугольных выступов и рост цепей нанодоменов при локальном переключении поляризации вблизи плоской доменной стенки.
- Обнаружено взаимодействие между изолированными доменами при расстояниях между доменами менее толщины диэлектрического зазора

- Выявлен рост нанодоменных структур при переключении поляризации в однородном электрическом поле в релаксорном сегнетоэлектрике ниобате бария стронция.

Практическая значимость

Полученные результаты создают фундаментальные основы для использования СЗМ в доменной инженерии для создания субмикронных регулярных доменных структур в монокристаллах семейства ниобата лития и танталата лития для нового поколения устройств нелинейной оптики. В том числе, устройств, использующих эффект параметрической генерации света обратной волны, а также электрооптических переключаемых Брэгговских решеток для спектрально-селективной коммутации когерентного излучения. Также полученные фундаментальные результаты, которые могут быть использованы для оптимизации методов создания периодических доменных структур в доменной инженерии.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного и надежного аттестованного оборудования, надежной статистикой проведенных экспериментов, применением современных и независимых методов обработки данных, согласием с экспериментальными результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям. Достоверность проведенных расчетов подтверждается обоснованностью принятых допущений, согласованностью с экспериментальными данными и другими результатами.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Механизм роста доменов при локальном переключении поляризации под действием поля, создаваемого зондом СЗМ в присутствии проводящего адсорбционного слоя.
2. Выявленные типы изменений плоской 180° доменной стенки при локальном переключении вблизи стенки.
3. Механизм формирования треугольных выступов и цепей нанодоменов вдоль траектории движения заземленного СЗМ зонда после локального переключения поляризации.
4. Механизм взаимодействия между изолированными доменами в процессе локального переключения поляризации при расстояниях между доменами менее толщины диэлектрического зазора.
5. Механизмы формирования микро- и нанодоменных структур при переключении поляризации в монокристаллах ниобата бария стронция в однородном электрическом поле.

Апробация работы. Основные результаты были представлены на 25 российских и международных конференциях и симпозиумах, в том числе на 1st, 2nd, 3rd International Symposiums “Micro- and Nano-scale Domain Structuring in Ferroelectrics” (15-19.11.2005, 22-27.08.2007, 13-18.09.2009, Екатеринбург), 9th, 10th International Symposiums on Ferroic Domains and Micro- to Nanoscopic Structures (26-30.06.2006, Dresden, Germany; 20-24.09.2010, Prague, Czech Republic), 5th, 6th International Seminars on Ferroelastic Physics (10-13.09.2006, 22-25.09.2009, Воронеж), 11th, 12th European Meetings on Ferroelectricity (3-7.09.2007, Bled, Slovenia; 26.06-2.07.2011 Bordeaux, France), 9th, 10th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposiums on Ferroelectricity (15-19.06.2008,

Vilnius, Lithuania; 20-24.06.2010, Yokohama, Japan), 6^{ой} Всероссийской школе-конференции «Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении (индустрия наносистем и материалы)» (14-20.10.2007, Воронеж), 18^{ой} и 19^{ой} Всероссийских конференциях по физике сегнетоэлектриков (12-14.06.2008, Санкт-Петербург; 20-23.06.2011, Москва), 13^{ом} Международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (16-20.03.2009 Нижний Новгород), 12th International Meeting on Ferroelectricity (23-27.08.2009 Xi'an, China), XXIII российской конференции по электронной микроскопии (31.05-04.06.2010, Черногловка), 19th International Symposium on the Applications of Ferroelectrics and the 10th European Conference on the Applications of Polar Dielectrics (9-12.08.2010, Edinburgh, UK), Международных форумах по нанотехнологиям «Rusnanotech-2009» и -2010 (6-8.10.2009, 1-3.11.2010, Москва), 3^{ей} Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению «Наноинженерия» (13-15.10.2010 Калуга-Москва), 3^{ей} Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (26-29.10.2010, Нижний Новгород), 2^{ой} Уральской школе молодых ученых «Современные нанотехнологии. Сканирующая зондовая микроскопия» (19-22.04.2011), 20th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics and the International Symposium on PFM& Nanoscale Phenomena in Polar Materials (24-27.07.2011 Vancouver, Canada), Symposium Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy (12-16.09.2011, Зеленоград).

Публикации и личный вклад автора. Основные результаты исследований опубликованы в 48 печатных работах, из них 7 статей в российских и зарубежных реферируемых печатных изданиях и 41 тезис Всероссийских и международных конференций. Диссертационная работа выполнена в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники Института естественных наук Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина в рамках исследований, проводимых при частичной поддержке грантов РФФИ (гр. 10-02-96042-р-урал-а, гр. 10-02-00627-а), Федерального Агентства по образованию, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013» (гос. контракты П870, П2127), Федерального Агентства по науке и инновациям (гос. контракты №. 02.740.110171, 02.552.11.7069), а также стипендии Правительства РФ (2011/12 уч. гг.).

Все основные результаты работы были получены лично автором или при его активном участии. Выбор направления исследований, формулировка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем профессором В.Я. Шуром. Исследования в ниобата бария стронция проводились совместно с В.А. Шиховой, в ниобате лития после лазерного облучения – с Е.А. Мингалиевым. Образцы ниобата лития, модифицированные ионами аргона, исследовались вместе с Д.О. Аликиным. Изучение объемных доменных структур с помощью сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния проводилось вместе с П.С. Зеленовским и М.С. Небогатиковым. Компьютерное моделирование кинетики доменов проводилось совместно с А.И. Лобовым. Соавтор публикации Л.И. Ивлева (Институт общей физики РАН, Москва), предоставила образцы ниобата бария стронция. Часть исследований была проведена автором в центре «Nanophase Material Science» (Oak Ridge, США) при участии **С.В. Калинина**.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 146 страниц, включая 70 рисунков, 2 таблицы, список условных обозначений и библиографию из 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, определен объект исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Кратко изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Первая глава является обзорной.

В ней изложены современные представления о кинетике доменной структуры (ДС) как аналоге фазового перехода первого рода, особое внимание уделено эволюции ДС в неравновесных условиях и при условиях неэффективного внешнего экранирования деполяризующего поля. Рассмотрены особенности переключения поляризации полем, создаваемым проводящим зондом сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Кроме того, рассмотрены основные СЗМ методы, позволяющие исследовать сегнетоэлектрические материалы. Описаны основные физические свойства монокристаллов ниобата лития LiNbO_3 (LN), танталата лития LiTaO_3 (LT) и ниобата бария стронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN).

Принять считать, что эволюция ДС при переключении поляризации внешним полем происходит за счет зародышеобразования, вероятность которого определяется локальной величиной «переключающего поля» E_s , усредненного по объему зародыша [2]. Это поле складывается из внешнего поля E_{ex} , деполяризующего поля E_{dep} , а также полей внешнего E_{scr} и объемного E_b экранирования. Существование диэлектрического слоя на поверхности образца приводит к тому, что E_{scr} , протекающее за счет перераспределения зарядов во внешних электродах, не достаточно для полной компенсации E_{dep} . В результате в объеме существует остаточное деполяризующее поле E_{rd} [3]. Неоднородное пространственное распределение E_{rd} может привести к *коррелированному зародышеобразованию* – образованию изолированных доменов на некотором расстоянии перед стенкой. Кроме того, возможна ситуация, когда переключение происходит только за счет 3х-мерного зародышеобразования перед стенкой – такой вид переключения называется *дискретным переключением*. Процессы объемного экранирования способные полностью компенсировать E_{rd} и стабилизировать ДС протекают достаточно медленно.

В настоящее время СЗМ широко используется для исследования свойств сегнетоэлектрических материалов. Основным режимом, используемым для исследования доменных структур, является силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика (СМПО), основанная на обратном пьезоэлектрическом эффекте. При помощи селективного усилителя регистрируется локальный пьезоэлектрический отклик поверхности образца на модулирующее напряжение небольшой амплитуды U_{mod} , приложенное между проводящим СЗМ зондом и нижним электродом. В сигнале фазы наблюдается контраст доменов, а в сигнале амплитуды – контраст доменных стенок [4,5].

Кроме того, СЗМ может использоваться для измерения локальных петель гистерезиса, несущих в себе информацию о процессе переключения поляризации в нанометровой области под зондом и изменении ДС с разрешением в несколько десятков нанометров [1,6]. Для этого, к зонду прикладываются импульсы переключающего напряжения U_{sw} .

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

Объектами исследования в данной работе являлись монокристаллические пластины одноосных сегнетоэлектриков, вырезанные перпендикулярно полярной оси: 1) ниобата лития конгруэнтного состава (CLN) толщиной 20 мкм, 2) ниобата лития конгруэнтного состава легированного магнием (MgO:LN) толщиной 15 мкм, 3) танталата лития стехиометрического состава, полученные методом VTE (VTE-SLT), толщиной 50 мкм, 4) релаксорного сегнетоэлектрика ниобата бария-стронция $Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb_2O_6$, (SBN61:Ce) толщиной 0,5 мм.

Для проведения исследований использовались различные режимы сканирующей микроскопии: 1) силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика (СМПО), 2) атомно-силовая микроскопия, 3) конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния (КМ-КР). Кроме того измерялись локальные петли диэлектрического гистерезиса и производилось локальное переключение поляризации с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа (СЗМ).

Исследования проводились в Уральском ЦКП «Современные нанотехнологии» ИЕН УрФУ с помощью зондовых нанолaborаторий NTEGRA Aura и NTEGRA Spectra (НТ-МДТ, Россия). Часть работ была выполнена в центре «Nanophase Material Science» национальной лаборатории Oak Ridge (США) на СЗМ Cypher (Asylum Research, США).

Режим силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО) использовался для визуализации и исследования доменной структуры сегнетоэлектриков. Принято считать, что для амплитуды пьезоэлектрического отклика должно наблюдаться уменьшение сигнала до нуля на доменной стенке, а для фазы - разность фаз на 180° между антипараллельными доменами. Однако, экспериментально такое поведение наблюдается крайне редко [7].

Несоответствие измеряемых сигналов предсказанию теории метода относят за счет неучтенных взаимодействий в системе зонд-поверхность, а также искажений, вносимых электронной и механической подсистемами СЗМ. В результате, реальные СМПО сигналы характеризуются дополнительным сигналом смещения [8].

В рамках векторных диаграмм сигнал смещения можно представить в координатах $X_{PFM} - Y_{PFM}$, где $X_{PFM} = R \cos \theta$, $Y_{PFM} = R \sin \theta$ (Рис. 1). В идеальном случае (без смещения), антипараллельным доменам соответствуют две точки, расположенные на оси абсцисс, симметрично относительно центра координат (Рис. 1а). Наличие смещения приводит к параллельному переносу точек. В результате сигнал смещения может быть определен, как вектор, направленный из центра координат в центр отрезка, соединяющего точки, соответствующие антипараллельным доменам (Рис. 1б).

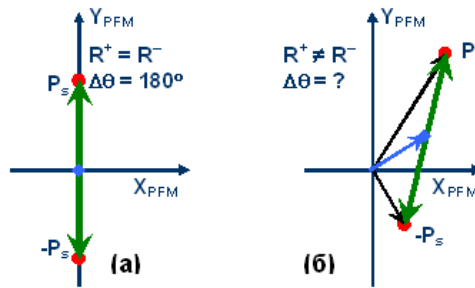


Рис. 1 Векторные диаграммы в координатах $X_{PFM} - Y_{PFM}$, демонстрирующие амплитуду R и фазу θ сигнала пьезоэлектрического отклика (а) без сигнала смещения, (б) с сигналом смещения.

Была разработана оригинальная методика оптимизации условий измерения подбором частоты и фазы модулирующего напряжения. Частота напряжения обеспечивает минимальное значение сигнала смещения, а сдвиг фаз между модулирующим и опорным напряжениями – равное значение фаз для соседних доменов.

Кроме того была разработана методика математической коррекции результатов, позволившая компенсировать сигнала смещения. Используемые изменения сигналов X_{PFM} и Y_{PFM} приводило фазовую диаграмму к идеальному виду, а последующее обратное преобразование в сигналы амплитуды и фазы позволяло получить сигналы пьезоэлектрического отклика, соответствующие теории СМПО. Разработанные методики позволили существенно улучшить контрасты доменов и доменных стенок.

Локальное переключение поляризации приложением одиночных прямоугольных и треугольных импульсов напряжения различных длительностей и амплитуд к проводящему зонду СЗМ, использовалось для модификации доменной структуры с нанометровым пространственным разрешением.

Локальные петли гистерезиса определялись путем измерения зависимости поляризации в нанометровой области под проводящим зондом от приложенного напряжения. Не удавалось непосредственно измерить ток переключения, который составлял около 0,05 пА для области радиусом 50 нм, поэтому регистрировались амплитуда и фаза колебания поверхности образца, индуцированные модулирующим напряжением. Использовались два режима измерения локальных петель гистерезиса: «импульсный» и «в поле».

В импульсном режиме переключение производилось серией прямоугольных импульсов с изменяющейся амплитудой, в промежутках между которыми регистрировались сигналы (Рис. 2б) [9]. Преимущество метода - отсутствие электростатического взаимодействия зонда с поверхностью. Однако данный режим не применим при существенном самопроизвольном обратном переключении.

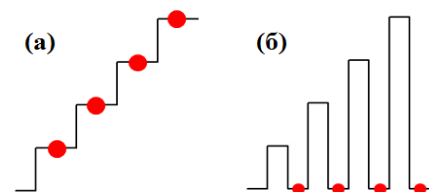


Рис. 2 Импульс, использовавшийся для измерения петель гистерезиса. Режимы (а) в поле, (б) импульсный.

В режиме «в поле» измерения сигналов пьезоэлектрического отклика производились одновременно с приложением переключающего напряжения (Рис. 2а). При этом становится не существенной проблема обратного переключения, однако проявляется электростатическое взаимодействие зонда с поверхностью, приводящее к наклону петли гистерезиса (Рис. 3а), величина которого существенно зависит от положения точки фокусировки лазера СЗМ на поверхности кантилевера (Рис. 3).

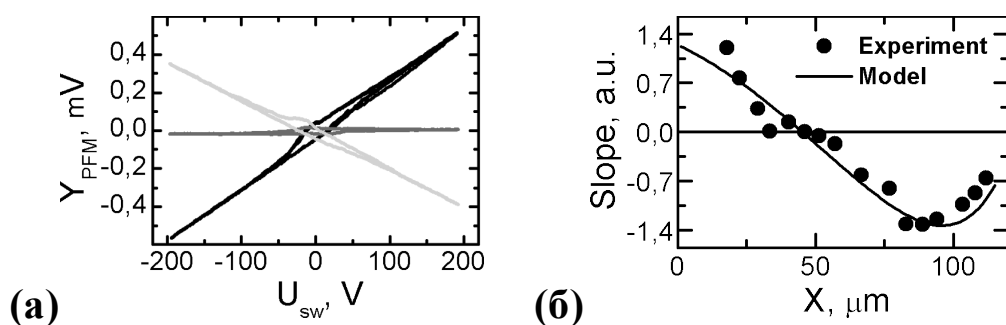


Рис. 3 (а) Локальные петли гистерезиса, измеренные для разных положений точки фокусировки на кантилере. (б) Зависимость угла наклона петли гистерезиса от положения точки фокусировки. Режим «в поле».

Наклон петли обусловлен электростатическим взаимодействием зарядов, индуцированных переключающим напряжением в поверхности образца, и зарядов, индуцированных модулирующим напряжением в кантилере. Амплитуда вызванного взаимодействием дополнительного отклика на частоте модулирующего напряжения, пропорциональна амплитуде переключающего напряжения. Математическое моделирование изменения формы кантилера под действием механических и электростатических сил и положения пятна на фотодиоде СЗМ позволило получить зависимость угла наклона петли гистерезиса от координаты точки фокусировки, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными (Рис. 3б). Кроме того, было выявлено положение точки фокусировки на поверхности кантилера, при котором полностью отсутствует наклон петель гистерезиса. Была разработана методика измерения локальных петель гистерезиса с полной компенсацией наклона за счет выбора точки фокусировки лазера на поверхности кантилера.

Визуализация доменных стенок в объеме производилась при помощи конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния (КМКР). Метод основан на измерении при трехмерном сканировании локальных сдвигов определенных линий спектра комбинационного рассеяния, индуцированных искажением кристаллической решетки, вызванных электрическим полем вблизи доменных стенок [10].

В третьей главе представлены результаты исследования влияния типа и проводимости адсорбционного слоя на размеры доменов, создаваемых в результате локального переключения поляризации в тонких образцах MgO:LN и VTE:SLT .

Переключение производилось одиночными прямоугольными импульсами различных амплитуд и длительностей. Непосредственно перед измерениями поверхность образцов обрабатывалась специальным образом для формирования различных адсорбционных слоев: производилась обработка ацетоном или деионизованной водой и плазменная очистка ионами аргона. Последующие измерения производились при нормальном давлении или в вакууме 5×10^{-3} Торр.

Характерный вид доменов, полученных в MgO:LN в результате локального переключения после обработки поверхности водой и ацетоном, и плазменной очистки, представлены на Рис. 4. Основным и наиболее важным результатом является существенная зависимость размеров доменов от типа обработки поверхности образца. Домены максимальных размеров записывались после обработки водой, а минимальных – после плазменной очистки.

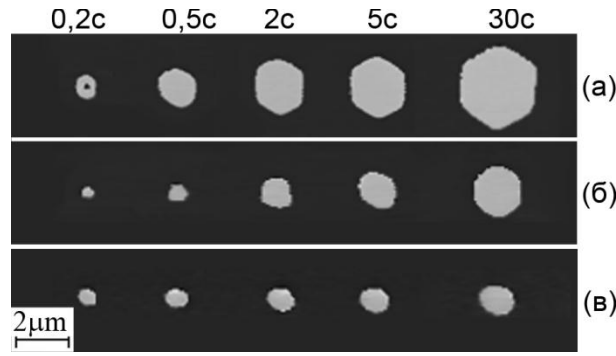


Рис. 4 Типичные изображения доменов, созданных в MgO:LN импульсами различных длительностей с амплитудой 100 В. Типы обработки поверхности: (а) вода, (б) ацетон, (в) плазменная очистка.

Зависимости радиуса домена r от длительности переключающих импульсов t_{sw} для различных типов подготовки поверхности представлены на Рис. 5. Показано, что минимальная длительность импульса, обеспечивающая формирование стабильного домена составляет $t_{cr} = 40$ мс. Нестабильность доменов при $t_{sw} < t_{cr}$ была отнесена за счет самопроизвольного обратного переключения поляризации в несквозных доменах. Отсутствие зависимости t_{cr} от типа адсорбционного слоя позволило утверждать, что ключевую роль в стабилизации доменов играет эффект объемного экранирования.

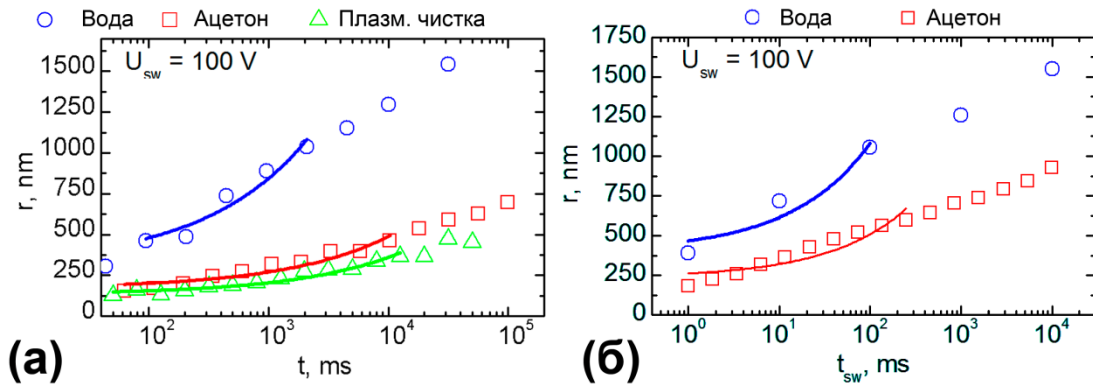


Рис. 5 Зависимость радиуса домена от длительности переключающего импульса для различных типов поверхностной обработки. Образцы: (а) MgO:LN и (б) VTE-SLT.

Зависимости радиуса домена r от амплитуды переключающих импульсов U_{sw} имеют линейный вид (Рис. 6).

Подобные зависимости $r(t_{sw})$ и $r(U_{sw})$ были получены ранее [4,11,12].

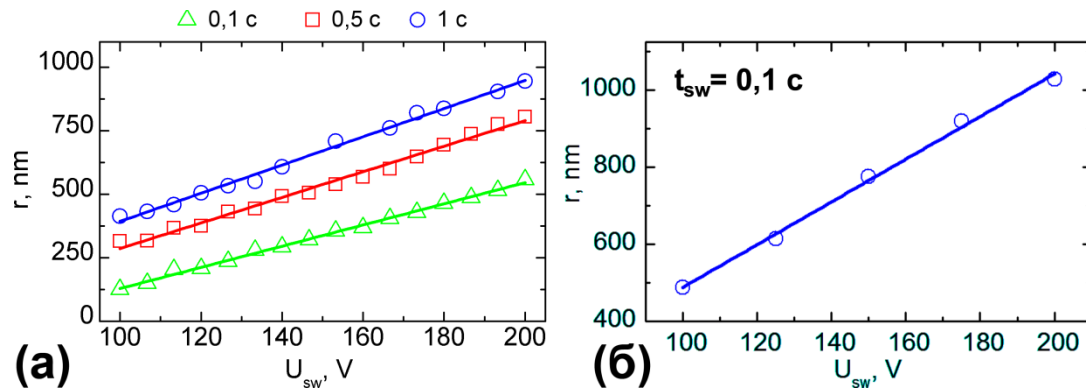


Рис. 6 Зависимость радиуса записанного домена от амплитуды переключающего импульса (а) в MgO:LN для различных t_{sw} и (б) в VTE-SLT при $t_{sw} = 0,1$ с.

Другим важным результатом явились большие максимальные размеры записываемых доменов (радиус до 2 мкм для обработки деионизованной водой), что значительно превосходило размер области, в которой поле, создаваемое проводящим зондом СЗМ с радиусом $r_{tip} \sim 25$ нм превышает пороговое значение. Распределение поля рассчитывалось по [13]:

$$E_r(R) = \frac{C_t U_{sw}}{2\pi\epsilon_0(\sqrt{\epsilon_c\epsilon_a}+1)} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\epsilon_c}} \frac{r_{tip}+\delta}{[(r_{tip}+\delta)^2+R^2]^{3/2}} \quad (1)$$

где C_t – емкость зондового датчика; ϵ_a и ϵ_c – диэлектрические постоянные вдоль полярной и неполярной осей, соответственно; δ – зазор между кончиком зонда и поверхностью.

Расчет показал, что поле E_r , создаваемое зондом вблизи поверхности на расстоянии от кончика зонда около микрона, много меньше коэрцитивного поля для MgO:LN. Следовательно, в поле, создаваемом зондом невозможно сформировать домены микронного радиуса.

Для объяснения полученных результатов было высказано предположение, что адсорбционный слой, представляющий собой верхний электрод с плохой проводимостью, играет ключевую роль в процессе локального переключения поляризации. В этом случае зародышеобразование происходит в сильном поле под кончиком зонда, а последующий рост – в однородном поле, создаваемом проводящим адсорбционным слоем.

При росте домена за доменной стенкой при отсутствии внешнего экранирования образуется шлейф деполяризующего поля, замедляющий боковое движение доменной стенки и определяющий размер образующегося домена [14–16]. Дальнейший рост домена возможен только при внешнем экранировании за счет тока переключения (I_{sw}), протекающего через адсорбционный слой.

Низкая проводимость адсорбционного слоя приводит к ограничению I_{sw} и определяет скорость роста домена (реализуется *ограниченный токостой рост* [17]):

$$I_{sw} = const \quad (2)$$

Проведенные расчеты позволили получить выражение, характеризующее зависимость радиуса домена от t_{sw} , U_{sw} и I_{sw} .

$$r(t_{sw}, U_{sw}) = aU_{sw} + \sqrt{bt_{sw}} - c \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2KE_{dep}}; b = \frac{I_{sw}}{\epsilon\epsilon_0\pi E_{dep}} \frac{1}{d}; c = \frac{d}{2K} \frac{E_{th}}{E_{dep}} \quad (4)$$

где E_{dep} – деполяризующее поле; E_{th} – пороговое поле; d – толщина образца; ϵ – диэлектрическая постоянная; K – деполяризующий фактор.

Полученная теоретическая зависимость хорошо согласуется с зависимостями $r(U_{sw})$ (Рис. 6) и $r(t_{sw})$ (Рис. 5) для малых значений t_{sw} . Расхождение между экспериментальными и теоретическими данными для больших t_{sw} было отнесено за счет изменения механизма пристеночного зародышеобразования от *стохастического* (изотропный рост круглых доменов) к *детерминированному* (рост шестиугольных доменов) для доменов радиусом более 1 мкм (Рис. 4) [18,19].

Таблица 1. Значение параметра b и относительного сопротивления адсорбционного слоя для различных типов обработки поверхности

Параметры	Тип обработки поверхности				
	$MgO:LN$			VTE-SLT	
	Вода	Ацетон	Плазм.очистка	Вода	Ацетон
$b, 10^4 \text{ нм}^2/\text{мс}$	9,73	3,35	1,93	2,89	1,06
$R_{\text{layer}}/R_{\text{water}}$	1,0	2,9	5,0	1,0	2,7

Кроме того, полученные зависимости (3) и (4) позволили оценить относительную величину сопротивления адсорбционного слоя. Из аппроксимации зависимостей $r(t_{sw})$ были определены значения параметра b , характеризующего степень экранирования деполяризующего поля. В приближении постоянного тока, величина параметра b пропорциональна сопротивлению слоя R_{layer} . Значения параметра b и относительного сопротивления адсорбционного слоя $R_{\text{layer}}/R_{\text{water}}$ (где R_{water} - сопротивление слоя после обработки деионизованной водой) для различных типов обработки поверхности представлены в таблице 1.

Было проведено исследование влияния давления воздуха в измерительной камере СЗМ на размеры записываемых доменов. Локальное переключение производилось импульсами с амплитудой $U_{sw} = 100 \text{ В}$ и длительностью $t_{sw} = 100 \text{ мс}$ при ступенчатом увеличении давления воздуха в измерительной камере (начальное давление 5×10^{-3} Торр.). Было установлено, что величина радиуса доменов r не зависела от давления до 10 Торр., а при последующем увеличении давления наблюдался резкий рост размеров (Рис. 7а). Данный эффект был объяснен образованием адсорбционного слоя за счет конденсации паров воды на поверхности образца.

Было обнаружено уменьшение радиуса записываемых доменов при увеличении температуры от комнатной после очистки поверхности образца деионизованной водой. Последующее охлаждение не выявило изменений размеров (Рис. 7б). Кроме того, из измерения локальных петель гистерезиса было обнаружено увеличение коэрцитивного поля от 20 В при 20°C до 45 В при 60°C. Обнаруженные эффекты были отнесены за счет испарения адсорбционного слоя при нагреве.

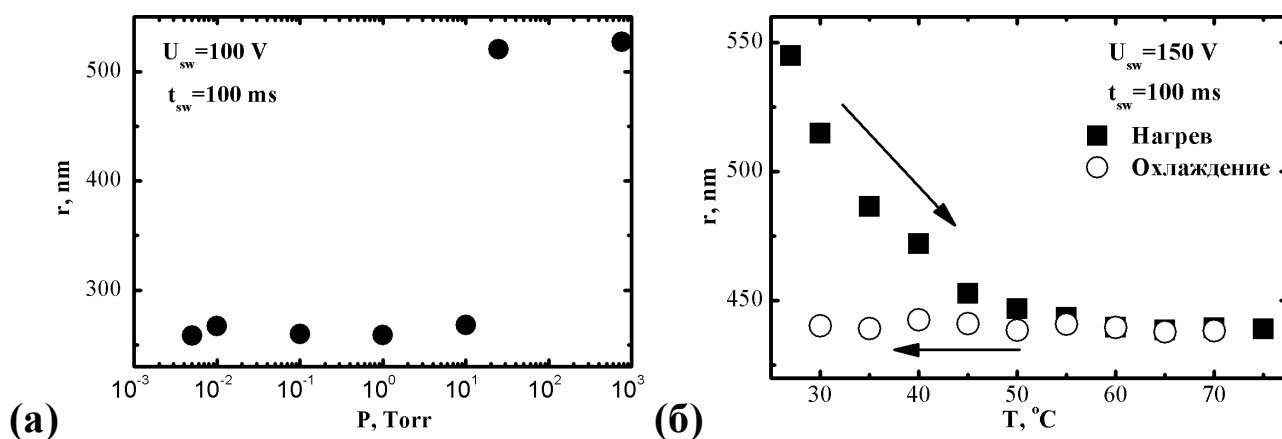


Рис. 7 Зависимости радиуса записываемого домена от: (а) давления и (б) температуры.

В четвертой главе представлены результаты исследования особенностей локального переключения поляризации вблизи доменной стенки в тонком монокристаллическом образце конгруэнтного ниобата лития (CLN). Стабильная периодическая доменная структура (период около 10 мкм) была предварительно создана в образце толщиной 0,5 мм приложением поля к системе полосовых металлических электродов, полученных методом фотолитографии. На полярную грань Z- был напылен сплошной металлический электрод (Cr) и пластина была приклеена с помощью проводящей эпоксидной смолы к металлическому диску. Затем толщина пластины была уменьшена шлифовкой и полировкой до 20 мкм.

Исследование локального переключения поляризации вблизи доменной стенки было проведено автором в центре “Nanophase Material Science” (Oak Ridge, США). Локальное переключение поляризации производилось треугольными импульсами с амплитудой $U_{sw} = 20 \div 100 \text{ В}$ и длительностью $t_{sw} = 250 \text{ мс}$. Во время экспериментов записывались матрицы изолированных доменов, причем сканирование производилось под углом к плоской доменной стенке (Рис. 8), что позволяло исследовать особенности переключения при различном расстоянии от стенки до точки приложения поля.

Использовались два режима, отличавшиеся условиями перемещения зонда к очередной точке приложения напряжения: «в контакте» и «без контакта». Переключающие импульсы были знакопеременными (Рис. 9), поэтому доменная стенка разделяла образец на области с обратимым и необратимым переключением. В области с обратимым переключением после завершения импульса не наблюдалось изменения доменной структуры, поскольку во втором полупериоде происходило полное обратное переключение.

В режиме без контакта при перемещении зонд поднимался на 2 мкм над поверхностью образца. Результат переключения в этом режиме матрицы доменов из трех столбцов, представлен на Рис. 10а. Вид образовавшихся доменов существенно зависел от расстояния до стенки.

Приложение поля вдали от стенки в области с необратимым переключением, приводило к формированию изолированных доменов ($r = 230 \text{ нм}$ для $U_{sw} = 100 \text{ В}$). Приложение поля в области с обратимым переключением приводило к формированию выступов (локальному сдвигу доменной стенки), которые наблюдаются даже при расстояниях от точки приложения поля, существенно превышающих радиус изолированных доменов (до 440 нм).

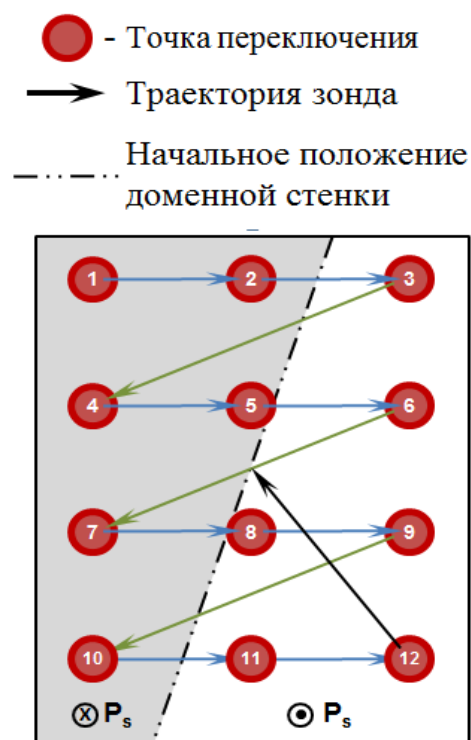


Рис. 8 Схема проведения локального переключения поляризации

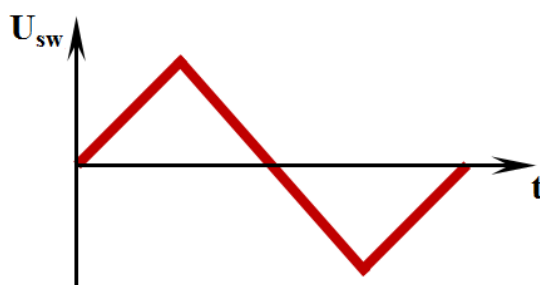


Рис. 9 Вид импульса для локального переключения поляризации

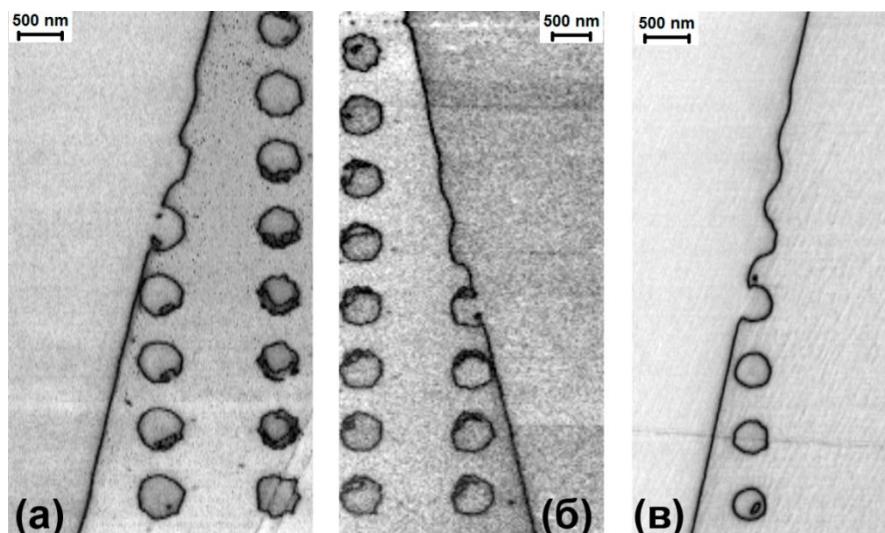


Рис. 10 (а) Локальное переключение поляризации (а) в бесконтактном режиме при $U_{sw} = 100 \text{ В}$, (б) в контактном режиме, при переходе из области с необратимым переключением в область с обратимым переключением $U_{sw} = 100 \text{ В}$, (в) в контактном режиме при «вертикальном» сканировании, $U_{sw} = 80 \text{ В}$

В контактном режиме перемещение зонда к точке приложения напряжения происходило в контакте с поверхностью. Полученные результаты качественно изменялись при изменении направления сканирования. При записи строки матрицы при пересечении доменной стенки происходил переход из области с необратимым переключением в область с обратимым переключением (Рис. 10б), полученные результаты были аналогичны режиму без контакта. Аналогичные результаты были получены при «вертикальном» перемещении зонда между точками переключения при записи одиночного столбца доменов (Рис. 10в). При передвижении зонда из области с обратимым переключением в область с необратимым (Рис. 11) для амплитуд импульсов более 40 В наблюдалось формирование вдоль траектории движения заземленного зонда треугольных выступов (с углом при вершине около 30 градусов), переходящих в нанодоменные цепи (с периодом $115 \pm 25 \text{ нм}$) (Рис. 11в-д; Рис. 12г-е). Формирование нанодоменных цепей (дискретное переключение) наблюдалось также на траектории движения зонда при перемещении от одной строки к другой и от последнего домена к центру записанной матрицы (Рис. 11г-д).

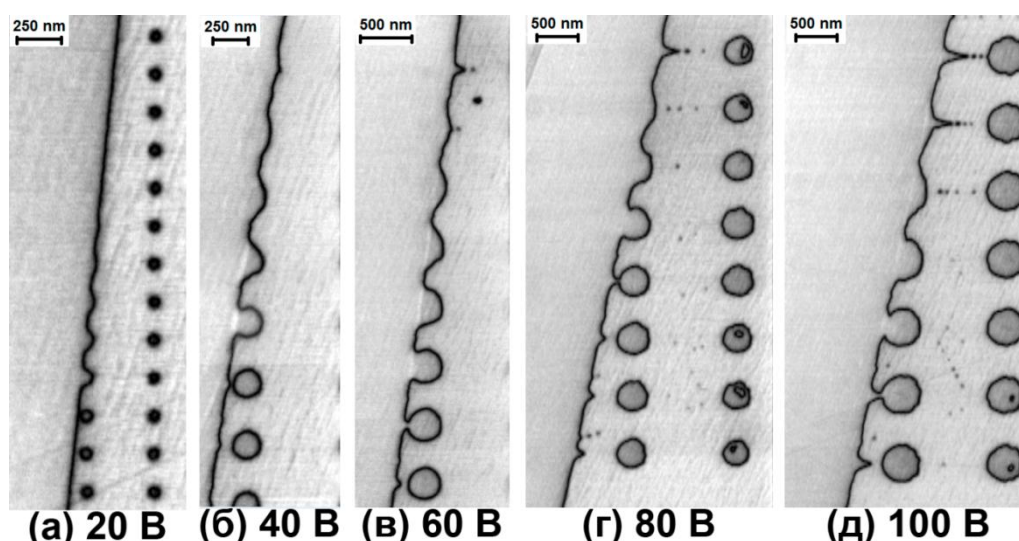


Рис. 11 Локальные переключения поляризации в контактном режиме импульсами различных амплитуд.

Для объяснения полученных результатов предполагалось, что в контактном режиме сканирования существенно изменяется кинетика доменной структуры, благодаря эффективному внешнему экранированию в области под заземленным зондом.

Были изучены четыре типа изменений доменной структуры: 1) формирование изолированного домена (Рис. 12а), 2) сдвиг доменной стенки (Рис. 12б-в), 3) образование треугольного выступа (Рис. 12г-д), 4) рост нанодоменной цепи (Рис. 12е).

Формирование изолированного домена было рассмотрено в Главе 3. При переключении короткими импульсами можно пренебречь током через адсорбционный слой и размер домена определяется шлейфом деполяризующего поля E_{tr} .

Сдвиг доменной стенки при приложении поля в области с обратимым переключением на расстояние, существенно превышающее радиус изолированного домена (Рис. 12в), вызван формированием остаточного деполяризующего поля. В первом полупериоде приложенного импульса происходит локальное переключение с образованием «временного домена» с обратным направлением поляризации, что приводит к уменьшению экранирующего поля. Во втором полупериоде временный домен исчезает (переключается в исходное состояние), но экранирующее поле не успевает восстановиться. В результате сдвиг стенки происходит под действием остаточного деполяризующего поля E_{rd} , созданного некомпенсированными связанными зарядами на том месте, где существовал временный домен. Проведенное моделирование, показало, что величина E_{rd} в приповерхностном слое достаточна для переключения поляризации на расстояниях до 250 нм от стенки временного домена, что согласуется с экспериментальными результатами.

Образование треугольного выступа вдоль траектории движения заземленного зонда (Рис. 12г) было объяснено частичным уменьшением поля шлейфа за счет экранирования в области под зондом и переключения под действием E_{rd} временного домена. Остановка роста треугольного выступа происходила при достижении критического значения поля шлейфа ($E_{rd}(r) - E_{tr}(r) = E_{th}$).

Образование треугольных выступов наблюдалось только, когда точка переключения, предшествующего перемещению зонда, находилась на расстояниях более 200 нм за стенкой (Рис. 12г). При уменьшении расстояния площадь сдвига стенки, образовавшегося при переключении, увеличивалась, приводя к увеличению площади шлейфа (Рис. 12д). В результате частичное экранирование под зондом оказывалось не достаточным для образования треугольного выступа.

Рост нанодоменных цепей вдоль траектории движения зонда наблюдался вблизи треугольных выступов (Рис. 12г) и на промежуточных этапах перемещения зонда (между строками матрицы и от последней точки к центру матрицы) (Рис. 112е). В первом случае рост цепи был обусловлен переключением поляризации под действием E_{rd} , создаваемого треугольным выступом. С ростом длины выступа растет поле шлейфа, ограничивающее его длину. Вместе с тем, компьютерное моделирование показало, что пространственное распределение E_{rd} выступа в приповерхностном слое при внешнем экранировании имеет максимум на расстоянии в несколько диэлектрических зазоров от конца выступа, в результате чего образуется изолированный нанодомен. В результате формируется новый максимум E_{rd} , приво-

дящий к образованию следующего нанодомена. Этот процесс формирует цепь нанодоменов.

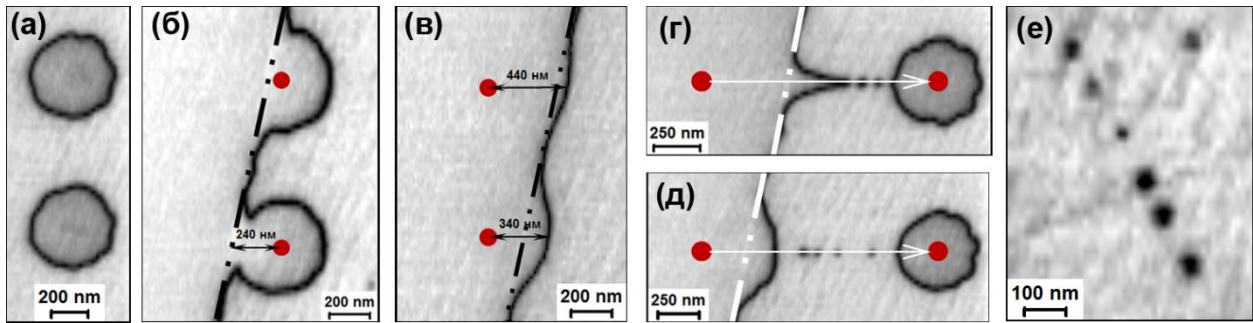


Рис. 12 Доменная структура в CLN, образовавшаяся в результате локального переключения поляризации. (а) Изолированный домен; (б) и (в) сдвиг доменной стенки; (г) и (д) треугольный выступ; (е) нанодоменная цепь.

Пятая глава посвящена исследованию эффекта взаимодействия между изолированными доменами в процессе локального переключения поляризации в монокристаллах LN.

Проведенный компьютерный расчет распределения E_{rd} вблизи несквозного изолированного домена показало, что на расстоянии 80 нм (близком к толщине диэлектрического зазора) от доменной стенки E_{rd} в приповерхностном слое имеет направление, затрудняющее переключение поляризации (глава 4) и препятствующее образованию нового домена, что должно приводить к взаимодействию между изолированными доменами.

Для изучения эффекта взаимодействия в образце CLN толщиной 20 мкм треугольными биполярными импульсами с амплитудой 20 В и длительностью 250 мс, приложенными к проводящему зонду, записывались матрицы доменов. Расстояния между доменами в матрице составляли 100 и 200 нм.

Локальное переключение с расстояниями между доменами более 200 нм приводило к формированию одинаковых изолированных доменов с радиусом около 40 нм (Рис. 13в), что свидетельствует о полном отсутствии взаимодействия между доменами. Уменьшение периода по горизонтальной оси матрицы ($\Delta X = 100$ нм) приводило к уменьшению размеров доменов, и даже полному исчезновению некоторых доменов в строке (Рис. 13б). Аналогичный результат наблюдался во всех строках, что свидетельствует о взаимодействии между соседними доменами в строке и об отсутствии взаимодействия между доменами в соседних строках. Необходимо отметить, что в каждой строке только первый домен имеет размер, равный размеру домена для больших периодов.

Уменьшение периода одновременно по вертикальной и горизонтальной оси ($\Delta X = \Delta Y = 100$ нм) приводило к появлению эффекта «чередования строк». Изолированные домены формировались главным образом в нечетных строках, что свидетельствует о сильном взаимодействии между доменами в соседних строках матрицы (Рис. 13а). В этом случае домены первой и последующих нечетных строк матрицы подавляют формирование доменов во второй и последующих четных строках.

Таким образом обнаруженное взаимодействие было объяснено действием поля, создаваемого вблизи несквозного домена с заряженными доменными стенками.

Наблюдаемый эффект представляет значительный интерес при создании нанодоменных структур и исследовании процессов переключения поляризации.

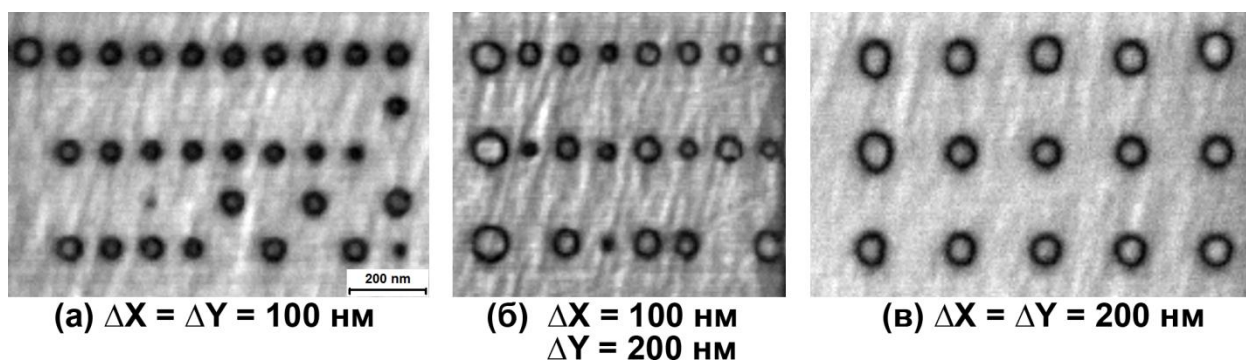


Рис. 13 СМПО изображения матриц доменов, записанных импульсами с амплитудой $U_{sw} = 20 \text{ В}$ в CLN. Расстояния между доменами в матрице (а) $\Delta X = \Delta Y = 100 \text{ нм}$; (б) $\Delta X = 100 \text{ нм}$, $\Delta Y = 200 \text{ нм}$; (в) $\Delta X = \Delta Y = 200 \text{ нм}$.

В шестой главе представлены результаты исследования кинетики и статики доменной структуры в монокристалле релаксорного сегнетоэлектрика ниобата бария стронция (SBN). Измерения проводились в пластинах SBN толщиной 0,5 мм при комнатной температуре (образец находился в сегнетоэлектрической фазе).

СМПО исследования показали, что исходная доменная структура SBN, полученная после охлаждения без поля, представляет собой квазирегулярный трехмерный лабиринт (Рис. 14) с характерным «периодом» структуры около 130 нм.

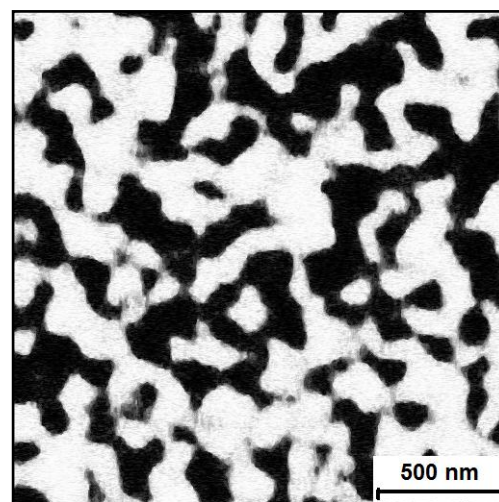


Рис. 14 Исходная доменная структура SBN

Перед проведением переключения поляризации производилась монодоменизация циклическим переключением биполярными прямоугольными импульсами. Контроль однородности монодоменированного состояния осуществлялся при помощи СМПО.

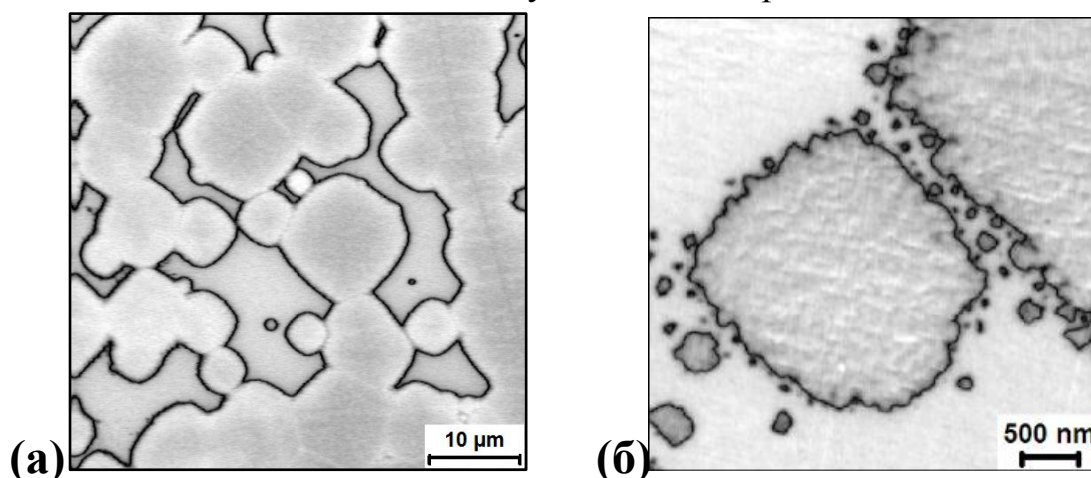


Рис. 15 Доменная структура в результате переключения поляризации в SBN.

Частичное переключение поляризации с жидкими электродами (площадь около 1 мм^2) импульсами с длительностью 1 с и амплитудой 340 В/мм приводило к фор-

мированию квадратных доменов микронных размеров (Рис. 15а). Такая форма обусловлена симметрией C_{4v} кристаллов SBN.

СМПО измерения позволили выявить три механизма формирования нанодоменных структур: (1) дискретное переключение вблизи доменной стенки, (2) самопроизвольное обратное переключение поляризации внутри доменов, (3) образование остаточных нанодоменов при слиянии микродоменов.

Дискретное переключение поляризации вблизи доменной стенки (Рис. 15б), приводящее к формированию доменов с характерным размером $40\div 80$ нм, наблюдалось при переключении через искусственный диэлектрический зазор на краю жидкого электрода. Эффект был отнесен за счет коррелированного зародышеобразования под действием E_{rd} доменной стенки, которое имеет максимум на расстоянии близком к толщине диэлектрического зазора (см. главу 4). Дискретное переключение приводило к сложной форме доменной стенки (росту шероховатости), за счет слияния растущей стенки с нанодоменами.

Самопроизвольное обратное переключение поляризации после быстрого выключения переключающего поля приводило к формированию внутри микродоменов нанодоменной структуры с размерами изолированных доменов менее 100 нм (Рис. 16а). Измерения доменной структуры в объеме образца с помощью КМКР, показали, что микродомены являются сквозными, а нанодоменная структура существует только в приповерхностном слое толщиной менее 20 мкм. В соответствии с существующей моделью формирование нанодоменной структуры обусловлено действием E_{rd} [20].

Слияние микродоменов приводило к формированию цепей остаточных нанодоменов на «границе слияния» (Рис. 16б). Наблюдаемый эффект был отнесен за счет электростатического взаимодействия между сближающимися доменными стенками, затруднявшего полное слияние доменов [2].

Таким образом, закономерности формирования и роста микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектрической фазе SBN и кристаллах семейства LN подобны, несмотря на нано-масштабную неоднородность химического состава SBN.

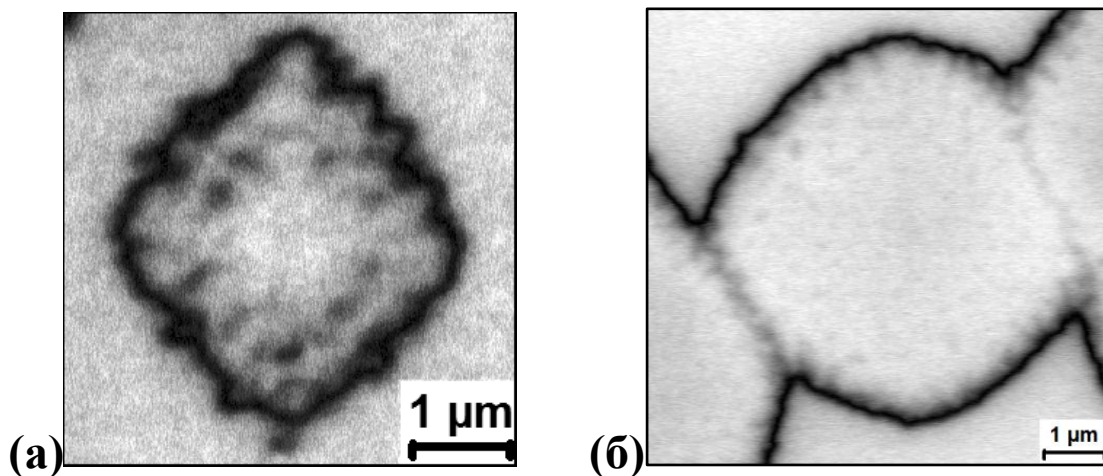


Рис. 16 (а) Самопроизвольное обратное переключение поляризации внутри домена (б) Остаточная нанодоменная структура на границе слияния двух микродоменов.

Была продемонстрирована возможность создания стабильных нанодоменных структур в SBN с помощью локального приложения поля проводящим зондом СЗМ.

Предварительная монодоменизация производилась сканированием квадратной области с приложенным к зонду постоянным напряжением (50 В). При исследовании процесса локальное переключение производилось одиночными прямоугольными импульсами различных длительностей и амплитуд. Пример матрицы доменов записанной в SBN импульсами с амплитудой $U_{sw} = 50 \text{ В}$ и длительностями (t_{sw}) от 1 мс до 1 с представлен на Рис. 17а.

В отличие от LN и LT в процессе переключения наблюдалось частичное восстановление исходной доменной структуры, приводившее к сложной форме доменов (Рис. 17а). Вместе с тем зависимость $r(t_{sw})$ имеет тот же вид, что и в монокристаллах LN и LT, что подтверждает подобие механизмов локального переключения поляризации. Продемонстрирована возможность формирования сложных стабильных доменных структур с разрешением около 80 нм (Рис. 17б).

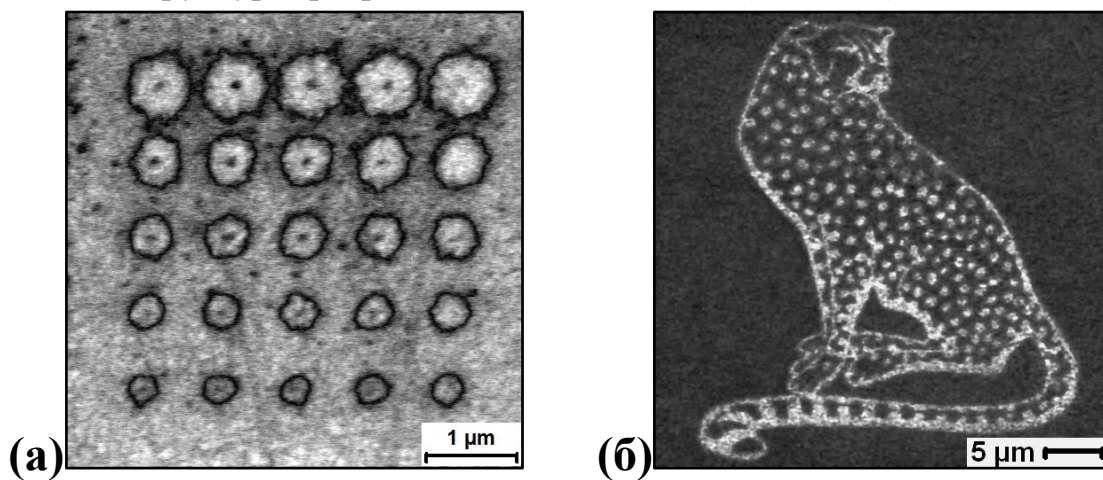


Рис. 17 (а) Матрица доменов, записанная в SBN переключающими импульсами различных длительностей. (б) Сложная доменная структура, созданная в SBN многократным локальным переключением поляризации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате проведенных систематических исследований микро- и нанодоменных структур в одноосных сегнетоэлектрических монокристаллах ниобата лития, танталата лития и ниобата бария стронция методами сканирующей зондовой микроскопии могут быть сделаны следующие основные выводы.

1. Разработаны оригинальные методики оптимизации измерительных параметров при визуализации доменных структур с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика и при измерении локальных петель гистерезиса.
2. На примере ниобата лития и танталата лития впервые экспериментально показано, что рост доменов при локальном переключении поляризации с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа обусловлен наличием адсорбционного слоя с низкой проводимостью. Экспериментальные результаты объяснены в рамках оригинальной предложенной модели «ограниченного током роста доменов».
3. Впервые на примере ниобата лития изучена кинетика доменной структуры при локальном переключении поляризации вблизи плоской доменной стенки. Выявленные особенности: сдвиг доменной стенки, образование треугольного выступа и рост нанодоменной цепи, при локальном переключении поляризации биполяр-

ными треугольными импульсами отнесены за счет неполного экранирования деполяризующих полей. Результаты объяснены с учетом эффекта коррелированного зародышеобразования вблизи переключенного домена, наличия шлейфа остаточных деполяризующих полей за движущейся доменной стенкой и локального внешнего экранирования при сканировании заземленным зондом. Используются результаты проведенных расчетов распределения остаточных деполяризующих полей в одноосном монокристалле с диэлектрическим поверхностным слоем вблизи изолированных доменов различной формы и размеров.

4. Экспериментально изученный эффект взаимодействия растущих изолированных доменов при локальном переключении поляризации в ниобате лития отнесен за счет изменения переключающего поля вблизи доменной стенки на расстоянии, определяемом толщиной диэлектрического зазора, при неполном экранировании деполяризующего поля.
5. Впервые обнаружено формирование нанодоменных структур при переключении поляризации в однородном поле в монокристалле одноосного релаксорного сегнетоэлектрика ниобата бария стронция. Выявлены механизмы формирования нанодоменов: (а) дискретное переключение вблизи доменной стенки, (б) самопроизвольное обратное переключение поляризации внутри доменов, (в) образование остаточных нанодоменов при слиянии микродоменов. Продемонстрировано, что основные закономерности формирования и роста микро- и нанодоменных структур в ниобате бария стронция и ниобате лития качественно подобны.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Cho Y. et al. Tbit/inch² ferroelectric data storage based on scanning nonlinear dielectric microscopy // *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 81, № 23. P. 4401.
2. Шур В.Я. Доменная структура одноосных сегнетоэлектриков: Дис. докт. физ.-мат. наук. Свердловск, 1990. 335 с.
3. Schmelzer J. Nucleation theory and applications // *Nucleation Theory and Applications*. WILEY-VCH / ed. Schmelzer J. Weinheim, 2005. P. 178–214.
4. Soergel E. Piezoresponse force microscopy (PFM) // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011. Vol. 44, № 46. P. 464003.
5. Kalinin S.V. et al. Local polarization dynamics in ferroelectric materials // *Reports on Progress in Physics*. 2010. Vol. 73, № 5. P. 056502.
6. Fujimoto K., Cho Y. High-speed switching of nanoscale ferroelectric domains in congruent single-crystal LiTaO₃ // *Applied Physics Letters*. 2003. Vol. 83, № 25. P. 5265.
7. Jesse S. et al. Resolution theory, and static and frequency-dependent cross-talk in piezoresponse force microscopy. // *Nanotechnology*. 2010. Vol. 21, № 40. P. 405703.
8. Jungk T., Hoffmann A., Soergel E. Quantitative analysis of ferroelectric domain imaging with piezoresponse force microscopy // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89, № 16. P. 163507.
9. Jesse S., Baddorf A.P., Kalinin S.V. Switching spectroscopy piezoresponse force microscopy of ferroelectric materials // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88, № 6. P. 062908.

10. Зеленовский П.С. и др. Визуализация нанодоменов в монокристаллах ниобата лития методом сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния // ФТТ. 2011. Т. 53, № 1. сс. 13–16.
11. Paruch P., Tybell T., Triscone J.-M. Nanoscale control of ferroelectric polarization and domain size in epitaxial $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ thin films // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79, № 4. P. 530.
12. Morozovska A. et al. Local polarization switching in the presence of surface-charged defects: Microscopic mechanisms and piezoresponse force spectroscopy observations // Physical Review B. 2008. Vol. 78, № 5. P. 1–17.
13. Rodriguez B.J. et al. Domain growth kinetics in lithium niobate single crystals studied by piezoresponse force microscopy // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 86, № 1. P. 012906.
14. Shur V.Y. Kinetics of ferroelectric domains: Application of general approach to LiNbO_3 and LiTaO_3 // Journal of Materials Science. 2006. Vol. 41, № 1. P. 199–210.
15. Shur V.Y. et al. Recent achievements in domain engineering in lithium niobate and lithium tantalate // Ferroelectrics. 2001. Vol. 257, № 1. P. 191–202.
16. Shur V.Y., Rumyantsev E.L. Kinetics of ferroelectric domain structure during switching: Theory and experiment // Ferroelectrics. 1994. Vol. 151. P. 171–180.
17. Shur V.Y. et al. Micro- and nanoscale domain engineering in lithium niobate and lithium tantalate // SPIE Proceedings. 2000. Vol. 3992. P. 143–154.
18. Hayashi M. Kinetics of Domain Wall Motion in Ferroelectric Switching. I. General Formulation // Journal of the Physical Society of Japan. 1972. Vol. 33, № 3. P. 616–628.
19. Miller R., Weinreich G. Mechanism for the Sidewise Motion of 180° Domain Walls in Barium Titanate // Physical Review. 1960. Vol. 117, № 6. P. 1460–1466.
20. Batchko R.G. et al. Backswitch poling in lithium niobate for high-fidelity domain patterning and efficient blue light generation // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 75, № 12. P. 1673–1675.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах:

1. E.I. Shishkin, **A.V. Ievlev**, E.V. Nikolaeva, M.S. Nebogatikov, and V.Ya. Shur, Local Study of polarization reversal kinetics in ferroelectric crystals using scanning probe microscopy. // Ferroelectrics – 2008 – V. 374 – pp. 170-176.
2. **A.V. Ievlev**, E.V. Nikolaeva, E.I. Shishkin, and V.Ya. Shur, Shape of local hysteresis loops measured by piezoresponse force microscopy. // Ferroelectrics – 2010 – V. 398 – pp. 26-33.
3. D.O. Alikin, E.I. Shishkin, E.V. Nikolaeva, V.Ya. Shur, M.F. Sarmanova, **A.V. Ievlev**, M.S. Nebogatikov, and N.V. Gavrilov, Formation of self-assembled domain structures in lithium niobate modified by Ar ions implantation. // Ferroelectrics – 2010 – V. 399 – pp. 35-42.
4. V.Ya. Shur, D.K. Kuznetsov, E.A. Mingaliev, E.M. Yakunina, A.I. Lobov, and **A.V. Ievlev**, In situ investigation of formation of self-assembled nanodomain structure

- in lithium nNiobate after pulse laser irradiation. // Appl. Phys. Lett. – 2011 – V. 99 – No. 8 – pp. 082901-1-3.
5. V.Ya. Shur, M.S. Nebogatikov, D.O. Alikin, P.S. Zelenovskiy, M.F. Sarmanova, **A.V. Ievlev**, E.A. Mingaliev, D.K. Kuznetsov, Investigation of the nanodomain structure formation by piezoelectric force microscopy and raman confocal microscopy in LiNbO_3 and LiTaO_3 crystals. // J. Appl. Phys. – 2011 – V. 110 – No. 5 – pp. 052013-1-6.
 6. V.Ya. Shur, **A.V. Ievlev**, E.V. Nikolaeva, E.I. Shishkin, and M.M. Neradovskiy, Influence of adsorbed surface layer on domain growth in the field produced by conductive tip of scanning probe microscope in lithium niobate. // J. Appl. Phys. – 2011 – V. 110 – No. 5 – pp. 052017-1-5.s
 7. В.Я. Шур, В.А. Шихова, Д.В. Пелегов, **А.В. Иевлев**, Л.И. Ивлева, Формирование ансамблей нанодоменов при переключении поляризации в монокристаллах $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6:\text{Ce}$. // ФТТ – 2011 – т. 53 – № 11 – с. 2195-2199.

Подписано в печать 28 апреля 2012 г. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ.л. 1,5. Тираж 100 экз.
Отпечатано на принтере в лаборатории сегнетоэлектриков
НИИ ФПМ Института естественных наук УрФУ
620000, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 48а, к.209