

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и  
инновациям Воронежского

государственного университета, доцент

 КОЗАДРОВ О.А.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
ТУРЫГИНА Антона Павловича «Эволюция доменной структуры  
сегнетоэлектриков при локальном переключении поляризации и эффекты  
самоорганизации», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Турыгина А.П. посвящена исследованию локального переключения поляризации на неполярных срезах одноосного сегнетоэлектрика ниобата лития, а также в отдельных зернах бессвинцовых сегнетоэлектрических керамик (феррит висмута, легированный самарием, ниобат натрия-калия, легированный стронцием и титанат-цирконат бария-кальция) под действием электрического поля, создаваемого проводящим зондом сканирующего зондового микроскопа.

### **Актуальность темы диссертации**

Исследование кинетики фазовых переходов в физике конденсированного состояния представляет значительный интерес для изучения общих закономерностей кинетики фазовых превращений. Процесс переключения

поляризации в сегнетоэлектриках может быть рассмотрен как аналог фазового перехода первого рода, сопровождаемый изменением доменной структуры.

Исследование эволюции доменной структуры является важной фундаментальной задачей физики сегнетоэлектриков. Рост доменов в полярном направлении (“прямое прораствание”) является одной из основных стадий эволюции доменной структуры при переключении поляризации, которая практически не изучалась экспериментально из-за сложности визуализации доменов в объеме. Наличие доменных стенок в сегнетоэлектриках оказывает существенное влияние на диэлектрические, пьезоэлектрические и нелинейно-оптические свойства. Поэтому исследование кинетики доменной структуры представляет значительный интерес для развития методов микро- и нанодоменной инженерии. Основной целью доменной инженерии является изменение характеристик сегнетоэлектриков, важных для применения путем создания стабильных доменных структур с необходимыми параметрами для улучшения характеристик устройств за счет пространственной модуляции пьезоэлектрических, электрооптических, фоторефрактивных и нелинейно-оптических свойств.

Цель диссертационной работы Турыгина А. П. «Исследование особенностей формирования доменной структуры на неполярном срезе одноосного сегнетоэлектрика ниобата лития и в отдельных зернах бессвинцовых пьезокерамик при локальном переключении поляризации» является актуальной как с практической, так и с фундаментальной точек зрения.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списков сокращений, условных обозначений и цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 126 страниц, включая 73 рисунка, 4 таблицы, список сокращений и условных обозначений и список литературы из 136 наименований.

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 диссертации является обзорной. В ней представлены основные свойства сегнетоэлектриков, современные представления о переключении поляризации, кинетике доменной структуры и методах визуализации сегнетоэлектрических доменов. Подробно рассмотрено использование различных методов сканирующей зондовой микроскопии при исследовании сегнетоэлектриков. Приведены основные физические параметры и особенности доменной структуры (ДС) исследованных материалов: ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  (LN), его легированного магнием варианта  $\text{MgO:LN}$ , бессвинцовых сегнетоэлектрических керамик:  $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.90}\text{Zr}_{0.10}\text{O}_3$  (BCZT),  $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{1-2x}\text{Sr}_x\text{NbO}_3$  (KNN:Sr),  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$  (BFO:Sm).

Вторая глава является методической и содержит параметры образцов, описание экспериментальных установок и методик.

Третья глава посвящена исследованию прорастания доменов в полярном направлении на неполярных срезах ниобата лития. Выявлены основные закономерности роста доменов при локальном переключении на X и Y срезах конгруэнтного ниобата лития, обнаружено формирование аномально длинных доменов на Y срезе ниобата лития, легированного магнием.

Четвёртая глава посвящена исследованию взаимодействия изолированных доменов на неполярном срезе. Было выявлено три режима чередования длин доменов в ряду: равномерный, квазипериодический и хаотический, была построена фазовая диаграмма реализации различных режимов в зависимости от напряжения и интервала между доменами.

Пятая глава посвящена исследованию формирования самоорганизованных доменных структур на неполярном срезе ниобата лития. Было обнаружено формирование самоорганизованной доменной структуры при сканировании с одновременным приложением напряжения и при сканировании заземлённым зондом без приложения напряжения вблизи ранее созданного домена. Выявлены режимы чередования длин доменов в ряду: однородный, удвоение и учетверение периода, и хаотическое поведение. Также проведено моделирование рядов доменов, позволившее объяснить полученные результаты.

В шестой главе представлены результаты исследования исходной доменной структуры и локального переключения поляризации в отдельных зернах сегнетоэлектрической керамики. Показано, что увеличение диэлектрической проницаемости с ростом степени легирования в пьезокерамике KNN:Sr обусловлено увеличением концентрации проводящих заряженных доменных стенок, играющих роль проводящих включений в диэлектрической матрице. Кроме того, было обнаружено, что кинетика доменных стенок при локальном переключении поляризации в отдельных зернах исследованных пьезокерамик KNN:Sr, BFO:Sm, BCZT, подчиняется активационному закону с учетом поля смещения.

В **заключении** диссертации представлены выводы по результатам работы.

Полученные в работе результаты обладают следующей новизной:

- 1) Проведено исследование прямого прорастания доменов на неполярном срезе с высоким пространственным разрешением.
- 2) Предложена модель для описания процесса роста домена за счет генерации ступеней на доменной стенке и движения взаимодействующих заряженных кинков.
- 2) При локальном переключении поляризации на неполярных срезах монокристаллов MgO:LN выявлено три режима чередования длин образующихся доменов: однородный, прерывистый квазипериодический и хаотический.

- 3) Обнаружено формирование самоорганизованной доменной структуры на неполярных срезах CLN при сканировании зондом СЗМ с приложением напряжения. Измерена полевая зависимость длины доменов и периода структуры, выявлены режимы кратного увеличения периода структуры - удвоения и учетверения.
- 4) Обнаружено формирование самоорганизованной доменной структуры на неполярных срезах CLN при сканировании заземленным зондом СЗМ без приложения напряжения вблизи ранее переключённого домена.
- 5) Проведено моделирование формирования квазирегулярных рядов изолированных доменов на неполярном срезе LN с учетом электростатического взаимодействия доменов с заряженными доменными стенками.
- 6) Выявленное увеличение диэлектрической проницаемости с ростом степени легирования в KNN:Sr отнесено за счет увеличения концентрации проводящих заряженных доменных стенок, являющихся проводящими включениями в диэлектрической матрице, что создает эффект релаксации Максвелла-Вагнера.
- 7) Анализ зависимостей радиуса домена от длительности и амплитуды импульса при локальном переключении в отдельных зернах бессвинцовых пьезокерамик, позволил определить поля активации и поля смещения, характеризующие движение доменных стенок.

**Достоверность** результатов подтверждена 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. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, прошли апробацию, были представлены на международных и всероссийских

конференциях, опубликованы в статьях в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

Диссертация А.П. Турыгина имеет важное **практическое значение**.

Результаты работы представляют интерес для развития технологий создания регулярных доменных структур и могут быть использованы для развития инженерии доменных стенок и создания субмикронных периодических доменных структур.

Выявленные в ходе выполнения работы закономерности, показывающие реальную связь между химическим составом, доменной структурой материалов и их свойствами указывают на новые возможные способы управления характеристиками материалов, актуальные для практического материаловедения. Использование их на практике с очевидностью приведет к существенному обновлению материальной базы современного материаловедения, основанному на активном внедрении в элементную базу электронной и информационной техники новых материалов.

#### **Замечания и вопросы:**

Говоря о работе в целом хотелось бы отметить высокую результативность и информативность подхода, используемого для изучения доменной структуры на боковом срезе, большое структурное разнообразие исследуемых материалов, позволяющее выделить в относительно «очищенном» виде влияние целого ряда физически важных факторов, воздействующих на свойства материалов, что безусловно было бы невозможно на ограниченном наборе исследуемых составов.

1). К недостаткам работы по нашему мнению можно отнести неучет при расчете полей активации (помимо, безусловно, важных процессов экранирования) структурных искажений в области центров зарождения доменов.

2). В соответствии с представленными данными видно, что внутреннее поле смещение, существующее в материале, не меняется от образца к образцу и,

значит, не связано с меняющейся внутренней структурой образцов, а, скорее всего, обусловлено внешними причинами (например, приэлектродными процессами и др.). Учитывая, что указанные поля оказывают определенное влияние на рассчитываемые характеристики, следовало бы прояснить их происхождение.

3). Влияние границ зерен на процессы эволюции доменной структуры в исследуемых керамических образцах в данном исследовании не учитывались. Представляется, что вопрос можно было бы обсудить более подробно.

Отмеченные недостатки не являются существенными и не изменяют общего хорошего впечатления от диссертационной работы.

#### **Заключение по диссертации А.П. Турыгина.**

Содержание диссертации соответствует Паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, пункт 1 – «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов, как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления». Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и отражает полученные результаты.

Диссертация А.П. Турыгина «Эволюция доменной структуры сегнетоэлектриков при локальном переключении поляризации и эффекты самоорганизации» является законченной научно-квалификационной работой. Замеченные недостатки не умаляют ее научной значимости.

Работа отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Турыгин Антон Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертация и отзыв на нее обсуждены и приняты на семинаре кафедры экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» 26 апреля 2019 года, протокол № 8.

Председатель семинара

Заведующий кафедрой экспериментальной физики

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет»

доктор физ.-мат. наук

Дрождин Сергей Николаевич

Профессор кафедры экспериментальной физики

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет»

доктор физ.-мат. наук

Сидоркин Александр Степанович

Секретарь семинара

Доцент кафедры экспериментальной

Физики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет»

кандидат физ.-мат. наук

Нестеренко Лолита Павловна

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Краткое наименование: ФГБОУ ВО «ВГУ»

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

Телефон: +7 (473) 220-75-22

Адрес электронной почты: [office@main.vsu.ru](mailto:office@main.vsu.ru)

Официальный сайт: <http://www.vsu.ru>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<i>Дрождин С.Н.</i>
	<i>Сидоркина А.С.</i>
	начальник отдела кадров
	должность
	О.И. Зверева 2604 20 19
	асифирровка подписи

  

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<i>Нестеренко Л.П.</i>
заверяю	начальник отдела кадров
	должность
	О.И. Зверева 2604 20 19
	асифирровка подписи

ВРАЩАЮЩИЙСЯ КВАДРАТНЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОД