

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу **Пряхиной Виктории Игоревны** «Формирование и эволюция заряженных доменных стенок в монокристаллах ниобата лития и танталата лития», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Пряхиной В.И. посвящена экспериментальному исследованию формирования и эволюции доменной структуры с заряженными доменными стенками в монокристаллах сегнетоэлектриков ниобата лития и танталата лития с увеличенной электропроводностью поверхностных слоев и с градиентом состава. Изучено влияние ионно-плазменного облучения и отжига в вакууме на электропроводность и оптические свойства ниобата лития и танталата лития, а также на изменение пороговых полей переключения поляризации. Исследованы эволюция доменной структуры при переключении поляризации и формирование заряженных доменных стенок в ниобата лития и танталата лития после ионно-плазменного облучения Z^+ полярной поверхности и в ниобате лития с поверхностными слоями, модифицированными отжигом в вакууме. Изучены особенности исходной доменной структуры, образующейся в результате охлаждения после фазового перехода, в танталате лития с различным пространственным распределением состава. Кроме того, исследовано изменение с глубиной формы изолированных доменов в ниобате лития и танталате лития с поверхностными слоями, модифицированными высокотемпературным отжигом.

Актуальность темы диссертации

Интерес к исследованию одноосных сегнетоэлектриков семейства ниобата лития и танталата лития объясняется возможностями их широкого применения, благодаря уникальному сочетанию электрооптических, нелинейно-оптических, акустических и пьезоэлектрических свойств, а также

возможности создания контролируемой доменной структуры (доменная инженерия). Ниобат лития (LN) и танталат лития (LT), обладающие сравнительно простой доменной структурой со 180° доменными стенками и высокими температурами Кюри, являются модельными объектами для исследований.

Существует особый интерес к инженерии доменных стенок в связи с тем, что заряженные доменные стенки с высокой проводимостью могут быть использованы в качестве подвижного электронно-активного интерфейса в цельном непроводящем материале. Наличие связанных зарядов на заряженной доменной стенке приводит к увеличению их электропроводности на несколько порядков по сравнению с электропроводностью материала. Создание в кристалле пространственно неоднородного распределения носителей обеспечивает эффективную компенсацию деполяризующего поля, что необходимо для стабильного существования заряженных доменных стенок.

Формирование доменной структуры в пространственно неоднородных условиях является важной фундаментальной задачей, поскольку процесс переключения поляризации может рассматриваться как аналог фазового превращения первого рода, а для описания экспериментально наблюдаемых различных метастабильных доменных структур может использоваться кинетический подход. Таким образом, исследование процессов контролируемого создания заряженных доменных стенок имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений. В каждой главе сформулированы выводы. Содержание диссертации изложено ясно, грамотно и последовательно, выводы логичны. Список литературы из 156 наименований достаточен и

актуален для получения представления о современном состоянии исследований по теме.

В первой главе приведен обзор современного состояния исследований по теме. В ней представлены основные особенности сегнетоэлектриков, современные представления об эволюции доменной структуры, в том числе при переключении поляризации в неравновесных условиях, характеристики нейтральных и заряженных доменных стенок. Приведены сведения об исследуемых LN и LT, особенностях их состава и доменной структуры. Описаны эффекты, возникающие в LN и LT в результате различных вариантов высокотемпературного отжига.

Вторая глава является методической и содержит характеристики исследуемых образцов, описание экспериментальных установок и методик. Исследовались монокристаллические пластины ниобата лития и танталата лития конгруэнтного состава (CLN и CLT), толщиной 0,5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси. Пластины подвергались трем видам воздействиям: (1) ионно-плазменному облучению Z^+ полярной поверхности CLN и CLT, (2) отжигу в вакууме CLN, (3) высокотемпературному отжигу в парах лития CLT (vapor transport equilibration, VTE). Изменение длительности воздействий позволяло пространственно неоднородно изменять состав и электропроводность исследуемых образцов.

Третья глава посвящена исследованию влияния ионно-плазменного облучения на электропроводность и оптическое поглощение, а также на эволюцию доменной структуры и формирование заряженных доменных стенок в CLN и CLT.

Выявлен эффект понижения порогового напряжения переключения поляризации в CLN и CLT после ионно-плазменного облучения за счет уменьшения толщины переключаемого слоя и неоднородного распределения

электрического поля, вызванного увеличением электропроводности облученного слоя.

Показано, что при переключении поляризации в CLN и CLT после ионно-плазменного облучения образуются изолированные домены аномальной формы. Полевая зависимость формы доменов объяснена неоднородным распределением переключающего поля на доменной стенке, вызванным неэффективным экранированием деполяризующего поля.

Обнаруженное формирование заряженных доменных стенок хвост-к-хвосту при переключении поляризации в CLN и CLT вблизи границы слоя, модифицированного ионно-плазменным облучением, отнесено за счет несквозного прорастания и слияния доменов, образующихся на необлученной полярной поверхности.

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей эволюции доменной структуры и формирования заряженных доменных стенок в пластинах CLN после отжига в вакууме при различных температурах.

В отожженном в вакууме CLN, обнаружено две стадии переключения поляризации в растущем поле: (1) рост нанодоменов, образовавшихся под действием пирозлектрического поля при охлаждении после отжига вблизи Z-полярной поверхности, и (2) образование и рост доменов вблизи Z+ поверхности. Показано, что формирование двух заряженных доменных стенок на первой стадии обусловлено аномальным слиянием нанодоменов в объеме, вызванным увеличением поля с глубиной.

Обнаруженное понижение порогового напряжения вблизи Z-поверхности CLN после отжига в вакууме обусловлено полем, создаваемым градиентом концентрации экранирующих зарядов вблизи модифицированного поверхностного слоя с увеличенной электропроводностью.

В отожженном в вакууме CLN вблизи модифицированных поверхностей образуются дендритные домены, что вызвано уменьшением поля и

взаимодействием заряженных доменных стенок субмикронных несквозных доменов.

Пятая глава посвящена исследованию особенностей формирования доменной структуры в пластинах LT с пространственно неоднородным распределением состава, полученным в результате VTE отжига и отжига на воздухе.

В LT с неоднородным распределением состава, полученным VTE отжигом, в исходной полидоменной доменной структуре, формирующейся при фазовом переходе, образуются приповерхностные монодоменные слои, обусловленные существованием градиента состава. Увеличение длительности отжига приводит к исчезновению полидоменного слоя и образованию заряженной доменной стенки.

Показано, что для заряженных доменных стенок голова-к-голове с повышенной электропроводностью изменение формы под действием пироэлектрического поля при охлаждении существенно меньше, чем для заряженных доменных стенок хвост-к-хвосту.

Выявлена корреляция изменения с глубиной локального состава и формы сечений доменов, растущих от заряженной доменной стенки к поверхности, под действием пироэлектрического поля при охлаждении.

Полученные результаты обладают **научной новизной**. Продемонстрирован эффект внутри объемного переключения поляризации с формированием заряженных доменных стенок в модифицированных пластинах с повышенной электропроводностью в поверхностных слоях. Обнаружен рост изолированных доменов оригинальной формы в виде многоугольников с вогнутыми углами, а также ветвление растущих доменов в модифицированных пластинах. Особенности формы отнесены за счет неоднородного распределения остаточного деполяризующего поля на доменной стенке в условиях запаздывания экранирования. Показано, что увеличение электропроводности в

поверхностных модифицированных слоях приводит к значительному уменьшению пороговых напряжений за счет неоднородного распределения поля в объеме.

Выявленные закономерности влияния ионно-плазменного облучения и отжига в вакууме на форму доменов и образование заряженных доменных стенок обладают **практической значимостью** и могут быть использованы для развития методов доменной инженерии и инженерии доменных стенок.

Теоретическая значимость работы заключается в возможности объяснения процессов формирования доменных структур с заряженными доменными стенками изолированных доменов разнообразной формы в рамках кинетического подхода, использующего аналогию между ростом доменов при переключении поляризации и фаз при фазовом превращении.

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

Достоверность проведенных исследований 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. 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.

Диссертационная работа представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, но она не свободна от **некоторых недостатков** и упущений:

1. В работе нет объяснения, почему наблюдаемые эффекты увеличения электропроводности и оптической плотности в результате отжига в

вакууме отнесены к формированию только биполяронов, подобно воздействию ионно-плазменного облучения (раздел 4.1, Рис. 4.1). Однако оптическая плотность увеличилась на глубину до 20 мкм, а электропроводность до 150 мкм (Рис.4.2(a)). Таким образом, вывод, сделанный в работе (Раздел 4.1), о качественном соответствии пространственных распределений электропроводности и оптической плотности с глубиной не соответствует экспериментальным результатам, представленным в работе. Также необходимо отметить, что для зависимости электропроводности от глубины (Рис.4.2(a)) нет описания условий отжига образца в вакууме, что делает невозможным сравнение этих изменений с литературными данными.

2. В работе нет количественных оценок пироэлектрических полей, подтверждающих то, что некоторые наблюдаемые изменения доменной структуры, обусловлены этими полями.
3. Согласно использованному определению (Раздел 3.1, стр. 43), оптическая плотность образца не может быть равна 0 (Рис.1 в автореферате и Рис.3.2 в диссертации). Однако в диссертации в подписи к рисунку 3.2 правильно указано, что это оптическое поглощение, но на рисунке написано «оптическая плотность».

Разумеется, сделанные замечания не затрагивают существа диссертационной работы и ни в коей мере не снижают благоприятного впечатления от этой хорошей работы. Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что она представляет собой актуальное исследование, выполненное на высоком научном и техническом уровне.

Заключение по диссертации Пряхиной В.И.

Диссертация Пряхиной В.И. «Формирование и эволюция заряженных доменных стенок в монокристаллах ниобата лития и танталата лития» является законченной научно-квалификационной работой. Выводы диссертации

достаточно обоснованы. Замеченные недостатки не умаляют общей научной значимости.

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

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

18 марта 2019 г.

Кострицкий Сергей Михайлович

доктор физико-математических наук, доцент,
технический директор Зеленоградского отделения

ООО «Научно-производственная компания «Оптолинк»»

Адрес: 124489, Россия, Москва, Зеленоград, Сосновая аллея, д. 6А, стр. 5

Телефон: +7(495)6631760 (доб.103)

Адрес электронной почты: skostritskii@optolink.ru

Подпись Кострицкого С.М. удостоверяю:

Генеральный директор ООО НПК Оптолинк,
д-р физ.-мат. наук, проф.

Коркишко Ю.Н.