

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Ушакова Андрея Дмитриевича «Исследование эволюции доменной структуры при переключении поляризации кристаллов семейства многоосного релаксорного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Целью рецензируемой диссертационной работы Ушакова Андрея Дмитриевича является экспериментальное исследование эволюции доменной структуры при переключении поляризации кристаллов семейства многоосного релаксорного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца.

### **Актуальность темы**

Одной из важнейших прикладных задач является создание в сегнетоэлектрических кристаллах стабильных доменных структур заданной геометрии. Такие структуры создают приложением неоднородного электрического поля с помощью соответствующей структуры электродов. Однако, недостаточное исследование особенностей эволюции доменной структуры при переключении поляризации в кристаллах PMN-PT различных фаз затрудняет решение этих проблем. Таким образом, актуальность данной работы для физики конденсированного состояния не вызывает сомнений.

### **Структура и основное содержание работы**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 129 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 124 страниц, содержит 76 рисунков и 6 таблиц. Автор имеет 9 публикаций по теме диссертации, входящих в системы индексирования Web of Science или Scopus.

*Во введении* ставятся цели и задачи, решаемые в данной работе, обосновывается выбор использованных методов, обоснована актуальность, новизна и практическая значимость выполненного исследования.

*В первой главе* сделан квалифицированный обзор современных представлений о переключении поляризации и кинетике доменной структуры сегнетоэлектриков, в том числе многоосных. Приведены основные физические свойства и особенности доменной структуры кристаллов магнониобата-титаната свинца. Рассмотрены методы исследования эволюции доменной структуры, измерения пьезоэлектрических деформаций, петель диэлектрического гистерезиса и тока переключения.

*Во второй главе* описаны экспериментальные установки и исследовательские методики, процедура монодоменизации, представлено описание методики визуализации кинетики доменной структуры и одновременного измерения тока переключения. Отдельно рассмотрены этапы обработки оптических изображений.

*В третьей главе* представлено поэтапное исследование особенностей переключения поляризации и кинетики доменной структуры в образцах Т-PMN-PT. Показано, что переключение поляризации в подобных образцах происходит за счёт конкурирующих процессов двухэтапного 90-градусного и прямого 180-градусного переключения, сопровождаемых образованием доменных структур с нейтральными и заряженными доменными стенками на пересечениях *a*-доменов. Сравнительный анализ формы тока переключения и записей оптических изображений мгновенных доменных конфигураций во время переключения поляризации показал, что основной пик тока переключения обусловлен ростом *c*-доменов. Обнаружен эффект увеличения диэлектрической проницаемости образца на два порядка за счёт образования доменов с заряженными доменными стенками.

*В четвертой главе* приведены результаты исследования кинетики доменной структуры в образцах R111-PMN-PT. Подробно изучены типы доменных структур, наблюдаемые при переключении поляризации: показано, что переключение происходит из  $c\uparrow$ -состояния за счёт роста  $a\uparrow$ -доменов, образования  $a\downarrow$  доменов на пересечении  $a\uparrow$ -доменов, роста переключенных  $c\downarrow$ -доменов. Сравнительный анализ кинетической карты и тока переключения показал, что увеличение токов вызвано ускорением бокового движения границы  $c\downarrow$ -доменной области при слиянии  $c\downarrow$ -доменов. При переключении в диапазоне температур от 100 до 120°C выявлен переход от макродоменной структуры к микродоменной, чем обусловлено наличие «тройной» петли диэлектрического гистерезиса.

*В пятой главе* показаны результаты исследования эволюции доменной структуры в (001)-ориентированных кристаллах PIN-PMN-PT ромбоэдрической фазы при переключении переменным полем. Выявлены два основных типа доменных структур, участвующих в переключении: линзовидная, вносящая основной вклад в ток переключения, и замороженная, отнесённая к нежелательной. Предложена методика оптимизации количества импульсов электрического поля с целью достижения высокого пьезокоэффициента и предотвращения растрескивания образца. Отмечено, что на данный момент пьезоэлектрические коэффициенты образцов, исследованных в данной работе, имеют один из самых высоких значений среди [001]-ориентированных ромбоэдрических кристаллов PIN-PMN-PT.

*В шестой главе* продемонстрированы результаты исследования кинетики доменной структуры в образцах R001-PMN-PT. Визуализирована статическая исходная доменная структура с помощью оптической микроскопии и микроскопии пьезоэлектрического отклика, изучена эволюция доменной структуры при приложении постоянного электрического поля с амплитудой в диапазоне от 80 до 170 В/мм. Анализ токов переключения в рамках подхода

Колмогорова-Аврами, модифицированного для переключения поляризации в конечных средах, позволил выявить этапы эволюции доменной структуры.

*В заключении* сформулированы результаты диссертационной работы

**Научная новизна и практическая значимость** этого исследования заключаются в применении взаимодополняющей методики оптической визуализации с одновременной записью тока переключения для исследования кинетики доменной структуры в кристаллах семейства многоосного сегнетоэлектрика PMN-PT. Стоит отметить, что в кристаллах PIN-PMN-PT ромбоэдрической фазы в результате переключения поляризации переменным полем за счёт обнаруженного эффекта уменьшения доли замороженной доменной структуры при многократном переключении возможно достижение рекордных значений пьезоэлектрических коэффициентов, что представляет значительный интерес для производства пьезоэлектрических устройств точного позиционирования.

**Обоснованность и 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.

По диссертационной работе Ушакова А. Д. имеются следующие **замечания**:

1. В работе недостаточно четко прозвучало то, что кристаллы семейства PMN-PT, исследуемые в третьей, четвертой и шестой главах диссертации являются твердыми растворами.

2. Не уверен, что стоило включать во вторую главу (методики) диссертации раздел, связанный с ростом образцов, достаточно было вынести этот материал в литературный обзор.
3. Диссертация содержит опечатки и пропуски местоимений, что, впрочем, не искажает смысла фраз.

Сделанные замечания не снижают благоприятного впечатления от этой работы. Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что она представляет собой актуальное исследование, выполненное на высоком научном и техническом уровне. Хотелось бы отметить одно обстоятельство, не очень раскрытое в тексте диссертации. Речь идет о прекрасной научной базе, которую закладывает эта работа для следующих после нее исследований релаксорных сегнетоэлектриков. Возможность синхронизировать исследования перестройки доменных структур в твердых растворах на основе релаксорных сегнетоэлектриков с исследованиями аномального поведения в них физических свойств в окрестности фазовых переходов и превращений помогут выявить вклады доменов и их перестройки в поведение, например, электрокалорического эффекта. Напрашивается и следующий шаг в развитие настоящей работы - исследования возможной иерархической структуры доменной структуры, я верю, будут следующим этапом в исследованиях релаксорных сегнетоэлектриков.

#### **Заключение по диссертации Ушакова А. Д.**

Диссертационная работа Ушакова Андрея Дмитриевича «Исследование эволюции доменной структуры при переключении поляризации кристаллов семейства многоосного релаксорного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца» представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Замеченные недостатки не умаляют общей научной значимости.

Работа отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Ушаков А. Д. заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник –  
заведующий лабораторией физики  
сегнетоэлектричества и магнетизма  
отделения физики диэлектриков и  
полупроводников Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки «Физико-  
технический институт им. А. Ф.  
Иоффе Российской академии наук»,  
доктор физико-математических наук

Лушников  
Сергей  
Германович

29 октября 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-  
технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук»  
адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26  
Телефон: +7 (812) 515-66-60  
Адрес электронной почты: sergey.lushnikov@mail.ioffe.ru

По  
за

ию  
ре

С.М.

Федеральное