

### **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу **Гимадеевой Любови Вячеславовны** «Исследование эволюции доменной структуры при переключении поляризации и фазовых переходах в сегнетоэлектрической керамике титаната бария», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Работа Гимадеевой Любови Вячеславовны посвящена экспериментальному исследованию особенностей эволюции доменной структуры при переключении поляризации в сегнетоэлектрической керамике титаната бария. Исследование эволюции доменной структуры сегнетоэлектриков и выявление взаимосвязи между доменной структурой и пьезоэлектрическими и диэлектрическими характеристиками представляет значительный фундаментальный и практический интерес для дальнейшего развития физики сегнетоэлектриков и методов доменной инженерии. Керамические материалы используются при создании актюаторов, генераторов, пьезодатчиков, устройств накопления электрической энергии, что делает тему диссертации чрезвычайно актуальной.

В ходе выполнения работы была разработана экспериментальная методика точной количественной оценки величины смещения поверхности под действием электрического поля зонда атомно-силового микроскопа, основанная на калибровке вертикального и латерального сигналов при помощи измерения силовых кривых с учётом эффекта прогиба кантилевера. Исследована эволюция доменной структуры при приложении однородного электрического поля в керамике. Было изучены особенности кинетики доменов при локальном переключении поляризации в монокристаллах и отдельных зернах керамики титаната бария. Исследовано формирование доменной структуры при сегнетоэлектрическом фазовом переходе при приложении электрического поля и без поля. Был обнаружен эффект частичного сохранения полярного состояния в

керамике при температуре выше фазового перехода с использованием методов визуализации доменной структуры с высоким разрешением и измерение локального пьезоотклика.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы, состоящего из 133 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 103 страницы, включая 56 рисунков и 2 таблицы. Общие выводы и перспективы дальнейшей разработки темы представлены в заключении.

В первой главе представлена информация об основных понятиях и определениях, используемых в физике сегнетоэлектриков, а также о структуре и основных свойствах исследуемой в работе керамики титаната бария. Детально описаны современные представления о кинетике доменной структуры и теоретические модели переключения поляризации в сегнетоэлектрической керамике и формирования доменной структуры при фазовом переходе. Представлена информация о современных методах визуализации доменных структур на поверхности и в объеме сегнетоэлектриков.

Вторая глава является методической и содержит основные характеристики исследуемых образцов, описание экспериментальных установок и методик. Исследовалась керамика титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ , ВТО), синтезированная методом двухступенчатого твердофазного и монокристаллы ВТО, вырезанные перпендикулярно (001) оси.

Третья глава посвящена исследованию эволюции доменной структуры при переключении поляризации в керамике титаната бария в однородном поле. Впервые методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика выявлены закономерности формирования доменной структуры в отдельных зернах керамики титаната бария при фазовом переходе и при переключении поляризации в однородном электрическом поле. Продемонстрировано

отсутствие существенных смещений границ супердоменов в керамике с крупными зёрнами при переключении поляризации в однородном электрическом поле обусловлено наличием значительных механических напряжений.

Четвертая глава посвящена исследованию локального переключения поляризации с помощью зонда сканирующего зондового микроскопа в монокристаллах и керамике титаната бария, находящихся в тетрагональной фазе. Выявленное в монокристалле изменение зависимости от времени радиуса домена при локальном переключении областей с нанодоменами, возникшими под действием пьезоэлектрического поля, обусловлено переходом от изотропного роста за счет стохастической генерации ступеней к росту за счет слияния с нанодоменами. Меньшие, чем в монокристалле, значения полей активации и смещения в керамике обусловлены тем, что размеры зёрен керамики значительно меньше, чем толщина монокристаллической пластины.

Пятая глава посвящена исследованию эволюции доменной структуры при сегнетоэлектрическом фазовом переходе без поля и при приложении электрического поля. Изучены особенности формирования доменной структуры при сегнетоэлектрическом фазовом переходе в керамике титаната бария. Обнаруженное частичное сохранение полярного состояния выше температуры фазового перехода обусловлено влиянием полей, создаваемых зарядами объемного экранирования, локализованными на макроскопических дефектах и границах зёрен.

**Степень обоснованности, достоверности, научная новизна, практическая и теоретическая значимость положений и выводов, сформулированных в диссертации.**

Научные положения автора, вынесенные на защиту, достаточно обоснованы, их достоверность подтверждается рядом публикаций в рецензируемых научных журналах, входящих в списки Web of Science и Scopus. Экспериментальные данные согласованы между собой и не противоречат общепризнанным

физическим моделям. Научная новизна данного исследования заключается в том, что впервые методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика выявлены закономерности формирования доменной структуры в отдельных зернах керамики титаната бария при фазовом переходе и при переключении поляризации в однородном электрическом поле. Сравнительный анализ движения доменных стенок при локальном переключении поляризации в монокристалле и в отдельных зернах керамики позволил выявить существенное различие полей активации и полей смещения. Было продемонстрировано частичное сохранение полярной фазы в керамике выше температуры сегнетоэлектрического фазового перехода с использованием методов визуализации доменной структуры с высоким разрешением и измерением локального пьезоотклика. При локальном переключении в монокристалле титаната бария с квазирегулярной исходной нанодоменной структурой обнаружен переход от изотропного роста домена за счет стохастической генерации ступеней к росту за счет формирования макроступеней при слиянии с нанодоменами.

Полученные автором результаты являются новыми и имеют важное значение для физики конденсированного состояния и ее приложений. Выводы полны, логичны и адекватны.

#### **Вопросы и недостатки в содержании и оформлении диссертации.**

1. В работе не приведены формулы с помощью которых проводилась аппроксимация зависимости на Рис. 2.8 б,в,д.
2. Неясно, использовались ли предложенные методы для минимизации вклада прогиба кантилевера и восстановления направления поляризации и значения пьезоэлектрического коэффициента при измерениях в главе 5.

Отмечу, что сделанные замечания не затрагивают защищаемые положения и основные выводы работы. Таким образом, сделанные замечания ни в коей мере не снижают хорошего впечатления от рассматриваемой работы.

