ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Лесниковой Валерии Олеговны "*Спонтанная эволюция доменной структуры сегнетоэлектрических кристаллов группы триглицинсульфата*", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Доменная структура возникает в сегнетоэлектрических кристаллах ниже температуры Кюри и определяет ряд физических свойств сегнетоэлектрика, в том числе важных для практических применений. Изначально, сразу после перехода из параэлектрической в полярную фазу, доменная структура является существенно неравновесной. Процесс ее эволюции по мере продвижения к состоянию термодинамического равновесия зависит от множества факторов и может занимать достаточно длительное время.

Закономерности формирования сегнетоэлектрических доменов, их динамика, механизмы взаимодействия с дефектами решетки, реакция на воздействие электрических, магнитных и упругих полей и др. тщательно изучаются уже продолжительное время и широко освещены в научной литературе.

Большую часть информации о доменной структуре сегнетоэлектрических кристаллов получают косвенно из результатов диэлектрических, поляризационных, оптических и др. исследований. Данных, полученных путем непосредственного наблюдения доменов сравнительно немного, что связано с определенными трудностями в проведении экспериментов.

В последнее время значительное развитие получила атомная силовая микроскопия (АСМ), использование которой позволило с высоким разрешением проводить наблюдения, как статических доменных конфигураций, так и их изменений в режиме реального времени без какой-либо специальной подготовки (обработки) исследуемой поверхности.

Применение АСМ в совокупности с др. экспериментальными методами, например, диэлектрической спектроскопией, позволяет не только изучать эволюцию доменной системы, но и непосредственно увидеть связь между состоянием доменной структуры и определенным физическим свойством материала. Это обстоятельство открывает возможности, как для установления закономерностей формировании и эволюции доменной структуры, так и способствует развитию теоретических представлений о кинетике двухфазных систем.

В связи с вышеизложенным диссертация В.О. Лесниковой, главной **целью** которой стало установление закономерностей процессов формирования квазиравновесной доменной структуры модельных одноосных сегнетоэлектрических кристаллов группы ТГС вблизи точки Кюри, представляется весьма актуальной для физики сегнетоэлектриков.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 143 наименования, списка сокращений и условных обозначений. Объём диссертации насчитывает 134 страницы машинописного текста, включая 107 рисунков и 3 таблицы.

Работа **хорошо апробирована**. Ее основные результаты были представлены на 3 российских и международных конференциях и семинарах, опубликованы в 12 научных работах, 6 из которых входят в число рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация *соответствует* паспорту специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния». Ее автореферат *соответствует содержанию* и структуре диссертации и адекватно отражает полученные в работе результаты.

Во введении соискателем обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены основные задачи, определены объекты исследования, отмечены новизна и практическая ценность полученных результатов. Отмечен личный вклад автора. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о публикациях, апробации работы, ее структуре и объеме.

В первой главе изложен литературный обзор по теме диссертации. Представлены общие сведения об объектах исследования, их доменной и кристаллической структуре. Рассмотрены общие вопросы формирования и кинетики структуры доменов в сегнетоэлектрических кристаллах.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора объектов исследования и подготовке образцов к эксперименту. Описано экспериментальное оборудование, используемое для наблюдения доменной структуры в монокристаллах триглицинсульфата и сегнетовой соли и изучения ее кинетики. Приведены технические характеристики применяемых приборов, представлена информация о порядке расчета пространственно-временных корреляционных функций с помощью программы, специально созданной для этой цели в пакете MathCad.

Третья глава содержит результаты исследований температурных и временных зависимостей низкочастотной диэлектрической проницаемости (ε) кристаллов ТГС и влияния на нее дефектов различной природы и концентрации. Обнаружено, что спад ε, наблюдаемый в изотермических условиях, может быть описан выражением, представляющим собой сумму двух экспонент.

Анализ температурных зависимостей диэлектрической проницаемости кристаллов ТГС с различной степенью дефектности, измеренных при охлаждении из параэлектрической фазы и в ходе нагрева из сегнетоэлектрической фазы, позволил выделить доменную компоненту диэлектрического отклика. Показано, что дефекты кристаллической решетки подавляют доменную составляющую диэлектрической проницаемости.

Исследования доменного вклада в ε кристалла сегнетовой соли, показали, что в нем «доменная» составляющая диэлектрической проницаемости вблизи T_{C2} = 24°C по абсолютной величине заметно выше чем вблизи T_{C1} = −18°C.

Приведена совокупность данных относительно диэлектрических свойств кристалла ТГС, выращенного методом понижения температуры с переводом через точку Кюри. Установлено, что наивысшие значения ε демонстрирует образцы, вырезанные из той части кристалла, которая была выращена при температурах близким к T_C.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению процесса формирования доменных структур, визуализированных с помощью атомно-силовой микроскопии. Обнаружено универсальное поведение доменной структуры для всех исследованных кристаллов. Во время эксперимента наблюдается её укрупнение, которое включает в себя этапы с различными механизмами движения доменных стенок.

В начальные моменты времени при фиксированной температуре двумерная доменная картина, визуализированная на полярном сколе, состоит из множества мелких, вытянутых вдоль кристаллографического направления [100], доменов с изрезанными границами, которые сглаживаются с течением времени. Наблюдается «стягивание» доменов в кристаллографическом направлении [100]. Небольшие домены, находящиеся внутри крупных доменов с противоположным направлением спонтанной поляризации, исчезают со временем.

Представлен количественный анализ эволюции наблюдаемых двумерных доменных картин. В рамках двумерной модели Изинга 180-градусная доменная структура рассмотрена как двухфазная система, каждая фаза которой описывается скалярным параметром порядка P, принимающим значения +1 и –1. Эволюция доменной структуры при фиксированной температуре проанализирована с помощью пространственно-временных корреляционных функций, рассчитанных для всех исследованных кристаллов ТГС вдоль кристаллографических направлений [001] и [100].

Анализ корреляционных функций всех исследованных кристаллов ТГС вблизи температуры сегнетоэлектрического фазового перехода для разных моментов времени показал, что на начальном участке они имеют вид: $f(x) = 1- 0,5x$, являющийся универсальным для кинетики упорядочения двухфазных систем со скалярным параметром порядка.

Определены средние значения размеров доменов (w) и их изменение со временем при различных температурах. Установлено, что $w \sim t^{\alpha}$, где α - параметр, зависящий от характера протекания процесса. Полученные значения показателя α свидетельствует о том, что номинально чистый кристалл ТГС в рассматриваемом интервале температур в основном ведёт себя как система с неконсервативным макроскопическим параметром порядка.

На основании проведенных экспериментальных исследований соискателем получен ряд важных, принципиально ***новых результатов***:

1. Корреляционные функции доменных структур исследованных кристаллов ТГС демонстрируют слабую корреляцию одинаково ориентированных доменов в начальные моменты времени и при температурах наиболее близких к точке Кюри. С течением времени и при понижении температуры в исследованном температурном интервале корреляционные эффекты в доменных структурах усиливаются.

2. Характеристическая длина и средний размер доменов увеличиваются со временем по степенному закону с близкими по величине показателями степени.

3. Развитие полосчатой доменной структуры исследованных кристаллов ТГС анизотропно: оно происходит более интенсивно в кристаллографическом направлении [100] и менее - вдоль [001], что определяется большей кривизной доменных границ в направлении [100].

4. Спонтанная эволюция доменной структуры кристаллов группы ТГС вблизи температуры фазового перехода подчиняется общим закономерностям кинетики

упорядочения двухфазных систем разной природы, что подтверждается степенными временными зависимостями характерных размеров областей двух фаз (доменов) и скейлинговым поведением доменной структуры.

Отметим, что полученные в работе результаты представляются **достоверными**, а выводы и основные положения, выносимые на защиту - **обоснованными**, что, в частности, обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методик, воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием основным законам физики твердого тела, а также известным литературным данным.

Диссертация В.О. Лесниковой имеет ***практическое значение***.

В работе экспериментально показано, что наиболее качественные кристаллы триглицинсульфата получаются, когда температура в кристаллизаторе в процессе их выращивания из раствора близка к T_C.

Установленные автором закономерности формирования доменной структуры в кристаллах триглицинсульфата с различными концентрациями и различными типами дефектов кристаллической решетки могут быть использованы при разработке оптоэлектронных преобразователей, в частности, датчиков ИК излучения.

Результаты исследований могут быть востребованы на предприятиях и научных центрах, занимающихся разработкой изделий электронной техники. К числу таковых следует отнести, например, ИК РАН им. А.В. Шубникова (г. Москва), Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (университет), НПО "Микрон" (г. Зеленоград), Тверской государственный университет.

Вместе с тем, работа не лишена ***недостатков***, некоторые из которых отмечены ниже.

1. Отсутствует оценка погрешности определения величины доменного вклада в диэлектрический отклик, который в работе находится как разность значений диэлектрической проницаемости, измеренной в ходе охлаждения и в ходе нагрева исследуемого образца.
2. В выражении (12) на стр.44 слагаемые имеют различную размерность.
3. В выводе №1 (стр. 118) следовало бы отметить, что термодинамические свойства монокристалла в той или иной степени зависят, как от типа дефектов кристаллической решетки, так и от их концентрации.
4. Автором было установлено, что наиболее качественные кристаллы триглицинсульфата получаются, когда температура в кристаллизаторе близка к T_C. Следовало бы пояснить, с чем это связано?
5. Имеются замечания к некоторым рисункам. Например, на Рис. 4 в автореферате многочисленные кривые сливаются и их трудно различить, а на Рис. 1.10 в диссертации не указано, что изображено на вставке.

Однако, сделанные замечания не уменьшают ценность работы и не влияют на ее основные выводы и защищаемые положения. Диссертация В. О. Лесниковой по актуальности, новизне, масштабу проведенных в ней исследований и по совокупности полученных результатов отвечает критериям п. 9 и другим требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, ут-

5

верженного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Лесникова Валерия Олеговна, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

д.ф.-м.н., профессор, Л.Н Коротков

03. 08. 2019 г.

Леонид Николаевич Коротков - д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ВГТУ).

Раб. телефон: 4732 46 66 47
Электронный адрес: *l_korotkov@mail.ru*

Адрес организации: 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14, ФГБОУ ВО ВГТУ.