

## **О Т З Ы В**

официального оппонента на диссертацию

**КОСОБОКОВА Михаила Сергеевича**

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОДОМЕННЫХ СТРУКТУР**

**В НИОБАТЕ ЛИТИЯ И ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ**

**ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – *Физика конденсированного состояния*

Диссертационная работа Кособокова М.С. посвящена актуальной проблеме контролируемого формирования микро- и нано-доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах. Целью работы являлось исследование особенностей формирования доменной структуры в одноосных сегнетоэлектрических кристаллах ниобата и танталата лития в процессе импульсного лазерного нагрева и после него. Изучение этого явления представляет значительный практический интерес и связано с фундаментальной проблемой кинетики фазовых переходов.

Безусловным достоинством диссертационной работы является разнообразие экспериментальных и расчетных методов исследования, использованных автором. Необходимо также отметить, что достигнутая в работе точность расчета временной зависимости пространственного распределения пироэлектрического поля позволило согласовано объяснить большинство полученных экспериментальных результатов.

Работа состоит из семи основных глав, которые последовательно раскрывают логику проведенного исследования. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, практическая и теоретическая значимость, приведены методы исследования, указан личный вклад автора, степень достоверности, апробация работы и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы. В ней представлены основные свойства сегнетоэлектриков, современные представления о переключении поляризации, кинетике доменной структуры и методах визуализации сегнетоэлектрических доменов.

Приведены основные физические свойства ниобата лития и танталата лития и известные особенности доменной структуры этих материалов. Тщательный анализ приведенных литературных данных позволяет автору сформулировать основные задачи исследования.

Вторая глава является методической. В ней описаны методики лазерного нагрева пластин ниобата лития и танталата лития, экспериментальные методики исследования статических доменных структур и кинетики их роста. Также описана методика моделирования доменных структур методом конечных элементов.

Третья и четвертая главы посвящены исследованию доменных структур, формирующихся в конгруэнтных ниобате и танталате лития после однократного импульсного лазерного нагрева.

В ниобате лития выявлено два сценария эволюции доменной структуры: 1) образование изолированных доменов в центре облученной зоны и рост доменных лучей к краю, 2) образование доменов в кольце на краю зоны и рост лучей к центру. Установлено, что для ниобата лития со свободной поверхностью увеличение плотности энергии лазерного нагрева приводит к уменьшению среднего периода структуры и увеличению анизотропии в центре облученной зоны, при этом параметры доменной структуры на краю области практически не изменяются. Показано, что для доменной структуры, полученной после облучения образцов ниобата лития, покрытых прозрачными электродами, среднее значение анизотропии роста доменной структуры значительно выше и не зависит от расстояния от центра облученной зоны и длительности лазерного импульса.

Установлено, что импульсный лазерный нагрев танталата лития приводит к формированию в облученной зоне областей с разными типами доменных структур: 1) доменные лучи и цепи, 2) лабиринтовая структура, и 3) изолированные домены. Показано, что при начальной температуре образца от 300 К до 453 К средний период лабиринтовой доменной структуры равен 100 нм, а при 473 К увеличивается до 150 нм. Выше 500 К в танталате лития лабиринтовая доменная структура не формируется. Выявлено увеличение плотности зародышеобразования с расстоянием до внешнего края кольцевой области изолированных доменов в этом материале. Обнаружено формирование изолированных доменов дендритной формы, подобной снежинкам и показано, что для всех начальных температур средний диаметр доменов вдвое меньше

среднего периода структуры (среднего расстояния между центрами ближайших доменов). Выявлены две стадии формирования дендритных доменов: (1) изотропный рост круглых доменов и (2) неоднородное обратное переключение. Анализ СЭМ изображений позволил детально исследовать формирование изолированных доменов дендритной формы. Показано, что анизотропия доменных лучей и цепей увеличивается с удалением от центра облучённой зоны только для облучения с высокой плотностью энергии. Обнаружено, что в кристаллах с поверхностью, покрытой прозрачным электродом, не происходит обратного переключения и формирования лабиринтовых и дендритных доменных структур.

Пятая глава посвящена моделированию зависимости от времени пространственного распределения пьезоэлектрического поля и объяснению экспериментально полученных результатов. Для расчётов был применён метод конечных элементов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило автору сделать следующие заключения. В ниобате лития сценарий эволюции доменной структуры зависит от максимальной температуры нагрева поверхности, определяющей пространственное распределение пьезоэлектрического поля. Лабиринтовая доменная структура и изолированные домены формируются в области нагретой выше температуры сегнетоэлектрического фазового перехода. Высокое значение пьезоэлектрического коэффициента при температурах близких к  $T_c$  приводит к быстрому росту пьезоэлектрического поля вблизи движущейся к центру фазовой границы, несмотря на высокую объемную проводимость кристалла. Изолированные дендритные домены в форме снежинок образуются за счет обратного переключения поляризации в поверхностном слое растущих доменов, обусловленного сменой знака пьезоэлектрического поля вблизи поверхности в процессе охлаждения. С ростом начальной температуры образца уменьшается максимальное значение пьезоэлектрического поля во всей области доменной структуры и во всем температурном диапазоне, что приводит к увеличению среднего периода доменных лучей и цепей.

Шестая глава посвящена исследованию доменных структур, формирующихся в кристаллах конгруэнтных ниобата и танталата лития после многократного импульсного лазерного нагрева. Показано, что многократный импульсный нагрев свободной поверхности ниобата лития приводит к формированию самоорганизованной

квазирегулярной субмикронной «предельной» доменной лабиринтовой структурой с перекрытой долей площади около 0,5. Обнаружено, что в результате многократного лазерного облучения в ниобате лития формируются области с разными типами доменной структуры: дендритная структура - в центре облученной зоны и квазирегулярные изолированные домены - на краю зоны. В ниобате лития выделены основные стадии эволюции доменных лучей в процессе многократного облучения, приводящие к формированию дендритной доменной структуры. Показано, что при разрастании дендритных структур образуется лабиринтовая предельная доменная структура с большой плотностью доменных стенок. Впервые при облучении поверхности ниобата лития, покрытой проводящим слоем оксида индия и олова, продемонстрировано формирование после каждого импульса цепей изолированных нанодоменов, расположенных вдоль предыдущего положения доменных стенок, что позволило детально исследовать эволюцию формы доменов. Обнаружено, что многократный лазерный нагрев свободной поверхности танталата лития приводит к формированию самоорганизованной квазирегулярной доменной структуры, состоящей из изолированных круглых доменов вблизи границы области, нагретой выше температуры сегнетоэлектрического фазового перехода

В седьмой главе проведено исследование формирования регулярной доменной структуры в кристаллах конгруэнтного танталата лития в результате сканирования лазерным лучом. Выявлено, что в этих кристаллах после сканирования лазерным лучом свободной поверхности формируются полосовые и самоподобные доменные структуры, состоящие из доменных цепей, ориентированных вдоль  $Y$  направлений. Установлено, что доля площади, занятой полосовыми доменами, увеличивается с ростом скорости сканирования лазерным лучом. Впервые в танталате лития лазерным облучением движущегося образца с периодическими полосовыми тонкоплёночными структурами получена стабильная регулярная полосовая доменная структура с шириной доменов 500 нм, периодом 2 мкм и глубиной доменов до 8 мкм.

В заключении ясно сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы. Список литературы содержит обширную библиографию, касающуюся затронутых в диссертации вопросов. Достоверность

полученных Кособоковым М.С. экспериментальных результатов и расчетных данных полностью обоснована.

Ознакомление с диссертационной работой Кособокова М.С. оставляет после себя весьма благоприятное впечатление. Следует отметить усилия автора сделать текст интересным и понятным. Однако некоторые места все же нуждаются в пояснениях, что приводит к необходимости сделать несколько замечаний:

1. В работе допущено довольно много опечаток. Большинство из них не существенны для восприятия текста, но встречаются и такие на которых нельзя не остановиться. Так на стр. 10 говорится о списке литературы из 144 наименований. Однако последняя ссылка на литературные источники, приведенная на стр. 101 снабжена номером 70. Также нумерация основных задач работы на стр. 45 вызывает очевидные вопросы.
2. Достоинством работы является наличие в ней списка сокращений и условных обозначений. Однако размещение его после основного текста делает этот список, практически, бессмысленным.
3. При описании термостата THMSE 600 на стр. 48 допущена двусмысленность при описании точности контроля температуры.
4. При описании методики моделирования методом конечных элементов на стр. 58-59 не приведены данные о материальных константах исследуемых кристаллов, заложенные в программу расчета.

Сделанные замечания не снижают общего благоприятного впечатления от работы. Диссертация представляет собой комплексное исследование в области физики конденсированного состояния, 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».

Диссертация Кособокова М.С. «Формирование микро- и нанодоменных структур в ниобате лития и танталате лития после импульсного лазерного нагрева» является

законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне с применением современной экспериментальной и вычислительной техники.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и отражает полученные результаты.

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

к.ф.-м.н., доцент  
30. 05. 2016 г.

Шнайдштейн И.В.

Подпись Шнайдштейна И.В.

Заверяю

Декан физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н., профессор



Сысоев Н.Н.

Илья Владимирович Шнайдштейн – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Раб. телефон: +7(495)939-11-28

Электронный адрес: [shnidshtein@physics.msu.ru](mailto:shnidshtein@physics.msu.ru)

Адрес организации: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, дом 1, строение 2, Физический факультет