

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Кособокова Михаила Сергеевича “*Формирование микро- и нанодоменных структур в ниобате лития и танталате лития после импульсного лазерного нагрева*”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Основной проблемой современного материаловедения является проблема получения материалов с прогнозируемыми физическими свойствами, удовлетворяющими потребностям различных областей техники. Один из путей ее решения связан с созданием наноструктурированных материалов, образующихся посредством самоорганизации метастабильных структурных неоднородностей, формирующихся в ходе релаксации системы. Примером такой самоорганизации может служить процесс образования нанодоменной структуры в сегнетоэлектрических кристаллах после электрополевого, или термического воздействия. Кинетика этого процесса, также как и закономерности формирования доменной структуры в различных сегнетоэлектрических материалах уже продолжительное время вызывают интерес исследователей. В реальных кристаллах эти процессы существенно зависят от совершенства кристаллической решетки, геометрических размеров образца, термической и электрической предыстории, типа электродов на поверхности и других факторов. Интенсивность проводимых в данном направлении исследований в значительной степени стимулируется широкими перспективами практического использования сегнетоэлектриков, в частности для создания различных оптоэлектронных преобразователей, создания устройств памяти и т.д.

Надо заметить, что к настоящему времени уже известен большой ряд научных трудов, посвященных решению этой проблемы. Однако в полной мере она до сих пор не решена.

В связи с вышеизложенным диссертация М.С. Кособокова, главной целью которой стало установление закономерностей формирования сегнетоэлектрической доменной структуры в конгруэнтном ниобате лития и конгруэнтном танталате лития после импульсного лазерного нагрева, представляется весьма актуальной, как для физики конденсированного состояния, так и для развития технологии наноструктур.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованных источников, включающего 144 наименования, списка сокращений и условных обозначений. Объем диссертации насчитывает 124 страницы машинописного текста, включая 79 рисунков и 2 таблицы.

Работа хорошо апробирована. Ее основные результаты были представлены на 11 российских и международных конференциях и семинарах, опубликованы в 19 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 исследова-

ния, 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. Описаны методы визуализации доменов в монокристаллах ниобата и танталата лития.

Во второй главе описано экспериментальное оборудование, используемое для формирования доменной структуры в монокристаллах ниобата и танталата лития и изучения кинетики этого процесса. Приведены технические характеристики применяемых приборов, представлена информация о пакете компьютерных программ, используемых для моделирования температурного и электрического полей.

Третья глава содержит анализ результатов исследований доменных структур, формирующихся в конгруэнтном монокристалле ниобата лития после однократного импульсного лазерного нагрева. Обсуждается кинетика доменной структуры, формирующейся в результате импульсного лазерного нагрева. Представлены мгновенные изображения доменов на поверхности кристаллов, полученные с использованием скоростной камеры. Получены изображения установившейся доменной структуры образцов со свободной поверхностью и поверхностью, покрытой тонкой проводящей пленкой оксида индия - олова.

Установлено, в частности, что область зарождения доменной структуры зависит от энергетической характеристики пятна теплового пучка и его длительности.

Обнаружено, 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.

В случае образцов с пленкой оксида индия - олова на поверхности сформировавшаяся после лазерного облучения доменная структура характеризуется более высокой анизотропией роста, которая слабо зависит от расстояния от центра облученной зоны и длительности лазерного импульса.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению процесса формирования доменной структуры в конгруэнтном танталате лития после однократного импульсного лазерного нагрева. В условиях эксперимента были получены три разновидности доменной структуры - доменные лучи и цепи, ориентированные преимущественно в Y- направлении; изолированные домены в узком кольце на краю области с лабиринтной доменной структурой; лабиринтная структура в центре облученной зоны.

Результаты проведенных исследований показали, что тип и параметры доменной структуры, формирующейся после импульсного лазерного воздействия, зависит от исходной температуры образца. При температурах ниже 453 К средний период лабиринтной доменной структуры приблизительно равен 100 нм, а при температурах выше 473 К увеличивается до 150 нм. Когда исходная температура образца выше 500 К, лабиринтная доменная структура не образуется.

Обнаружено, что изолированные домены дендритной формы (типа снежинка) имеют средний диаметр вдвое меньший среднего расстояния между центрами ближайших доменов.

Выявлены две стадии формирования дендритных доменов. Первая - изотропный рост круглых доменов. Вторая стадия заключается в неоднородном обратном переключении поляризации.

Отмечено, что анизотропия доменной структуры в виде лучей и цепей увеличивается с удалением от центра облученной зоны только для облучения с высокой плотностью энергии.

В кристаллах с поверхностью, покрытой слоем оксида индия - олова не происходит обратного переключения и формирования лабиринтных и дендритных доменных структур.

В пятой главе представлены результаты моделирования пространственно - временного распределения электрического поля, возникающего в результате пироэлектрического эффекта при лазерном воздействии. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментом.

Анализ совокупности экспериментальных данных и результатов расчета показал, что в ниобате лития процесс формирования доменной структуры определяется максимальной температурой нагрева поверхности тепловым импульсом, обуславливающей пространственное распределение электрического поля в кристалле.

Установлено, что при охлаждении после сильного локального нагрева поверхности тепловым импульсом, высокое значение пироэлектрического коэффициента в области температуры Кюри приводит к быстрому росту электрического поля вблизи движущейся к центру теплового пятна фазовой границы. Это в случае танталата лития обуславливает возникновение лабиринтной доменной структуры и изолированных доменов в области нагретой выше температуры сегнетоэлектрического фазового перехода.

Было обнаружено, что изолированные дендритные домены в форме снежинок образуются за счет обратного переключения поляризации в поверхностном слое растущих доменов, обусловленного сменой знака пироэлектрического поля вблизи поверхности в процессе охлаждения. С повышением средней температуры образца уменьшается максимальное значение, вызванного пироэлектрическим эффектом электрического поля, что приводит к увеличению среднего периода доменных лучей и цепей.

В шестой главе изложены результаты исследования доменных структур, формирующихся в монокристаллах ниобата и танталата лития в результате многократного импульсного лазерного нагрева. Результаты исследований, в частности, выявили, что многократный импульсный нагрев свободной поверхности ниобата лития приводит к формированию самоорганизованной квазирегулярной субмикронной доменной лабиринтной структурой с «переполаризованной» долей площади около 0,5. В ходе многократного лазерного облучения формируются области с разными типами доменной структуры: дендритная структура - в центре облученной зоны и квазирегулярные изолированные домены - на краю зоны. Показано, что при разрастании дендритных структур образуется лабиринтовая предельная доменная структура с большой плотностью доменных стенок.

Наряду с этим обнаружено, что многократный импульсный нагрев свободной поверхности танталата лития приводит к формированию квазирегулярной домен-

ной структуры, состоящей из изолированных круглых доменов вблизи границы области, нагреваемой тепловой радиацией лазера выше температуры Кюри.

В седьмой главе проведены результаты исследования формирования регулярной доменной структуры в монокристалле LiTaO_3 , поверхность которого предварительно была покрыта периодическими полосовыми тонкопленочными металлическими структурами. Сканирование лазерным лучом осуществлялось посредством линейного перемещения образца вдоль кристаллографического направления Y . После проведения такой обработки поверхности, были обнаружены полосовые и самоподобные структуры, состоящие из доменных цепей ориентированных вдоль направления сканирования. Доля площади, занятой полосовыми доменами, увеличивается с ростом скорости сканирования. Такая технология обработки кристалла танталата лития с периодическими полосовыми структурами на поверхности позволила получить стабильную регулярную полосовую доменную структуру с шириной доменов 500 нм, периодом 2 мкм и глубиной доменов до 8 мкм.

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

1. Экспериментально определены основные типы доменных структур, образовавшихся в конгруэнтном танталате лития в результате однократного импульсного лазерного воздействия. Получены зависимости размеров этих структур от ряда параметров лазерного импульса и исходной температуры кристалла.

2. Установлено, что при охлаждении после сильного локального нагрева поверхности тепловым импульсом, высокое значение пирозлектрического коэффициента в области температуры Кюри приводит к быстрому росту электрического поля вблизи движущейся к центру теплового пятна фазовой границы. В кристалле танталата лития это обуславливает возникновение лабиринтной доменной структуры и изолированных доменов в области нагретой выше температуры сегнетоэлектрического фазового перехода.

3. Показано, что многократный импульсный нагрев свободной поверхности приводит к формированию субмикронной квазирегулярной доменной структуры. Лабиринтной - в ниобате лития и структуры, состоящей из изолированных круглых доменов в танталате лития.

4. Посредством лазерного облучения движущегося образца танталата лития с периодическими полосовыми тонкопленочными структурами получена стабильная регулярная доменная структура с шириной доменов 500 нм, периодом 2 мкм и глубиной до 8 мкм.

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 соответствии основным законам физики твердого тела, а также известным литературным данным.

Диссертация М.С. Кособокова имеет важное **практическое значение**.

Автором продемонстрирована возможность создания квазирегулярных доменных структур с высокой концентрацией доменных стенок в результате многократного лазерного облучения. Разработана методика получения в танталате лития

регулярной системы доменов с периодом 2 мкм и глубиной до 8 мкм лазерным облучением движущегося образца с тонкоплёночной периодической полосовой металлизацией.

Определенные в работе режимы импульсного лазерного воздействия на конгруэнтные кристаллы ниобата и тангалата лития, а так же, полученные путем численного моделирования пространственно - временные распределения электрического поля, возникающего вследствие пироэлектрического эффекта, могут быть использованы для создания технологии формирования регулярной доменной структуры в этих кристаллах.

Полученные результаты 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), Воронежский государственный университет.

Предложенный в диссертации способ получения субмикронной периодической доменной структуры в ниобате лития с помощью импульсного лазерного излучения расширяет возможности применения этого материала для создания оптоэлектронных устройств. Данный метод может быть рекомендован для дальнейшего развития в соответствующих лабораториях ИК РАН им. Шубникова (г. Москва) и Тверского государственного университета.

Результаты исследований, полученные М.С. Кособоковым во время работы над диссертацией, следует рекомендовать для включения в учебные курсы "Физика полярных диэлектриков" и "Материалы электронной техники", преподаваемые студентам технических вузов.

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

1. Известно, что на процесс формирования доменной структуры и кинетику ее переключения в сегнетоэлектриках значительное влияние оказывают дефекты кристаллической решетки. Тем не менее, этот вопрос в диссертации не обсуждается.

2. В главе 5 при расчете напряженности электрического поля, возникающего в результате пироэлектрического отклика на импульсное излучение лазера, автор не учитывает существенно нелинейный характер поляризации и диэлектрической проницаемости материала.

3. Аппроксимация температурной зависимости поляризации осуществляется формулой (18), справедливой лишь для узкого интервала температур в окрестностях сегнетоэлектрического фазового перехода второго рода. Использование этого соотношения для описания температурной зависимости спонтанной поляризации при температурах существенно ниже температуры Кюри требует обоснования.

4. К сожалению, автор не приводит абсолютные значения электрических полей, определенных в результате моделирования. На всех зависимостях показаны значения электрического поля в относительных единицах.

5. В тексте диссертации достаточно много сокращений и аббревиатур, что затрудняет восприятие работы.

Однако, сделанные замечания не уменьшают ценность работы и не влияют

на ее основные выводы и защищаемые положения. Диссертация Кособокова М.С. 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, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кособоков Михаил Сергеевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

д.ф.-м.н., профессор,

03.06.2016 г.



Л.Н. Коротков



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.