

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации **Лисьих Бориса Игоревича** «*Формирование доменной структуры в объеме сегнетоэлектриков ультракороткими лазерными импульсами*», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Основной проблемой современного материаловедения является проблема получения материалов с заданными физическими свойствами, удовлетворяющими потребностям различных областей техники. В случае полярных кристаллов один из путей ее решения связан с формированием заданной конфигурации сегнетоэлектрических доменов, образующихся посредством их самоорганизации в результате внешних воздействий.

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. Важную роль при формировании доменной структуры играют электропроводность и внутренние электрические и упругие поля. Применяя различные способы обработки материала можно изменять влияющие факторы, добиваясь образования требуемой конфигурации доменов.

Интенсивность проводимых в данном направлении исследований в значительной степени стимулируется широкими перспективами практического использования сегнетоэлектриков, в частности, для создания различных устройств нелинейной оптики, оптоэлектронных преобразователей, устройств памяти и т.д.

В связи с этим диссертация *Лисьих Б.И.*, целью которой стало экспериментальное исследование доменной структуры, формирующейся в одноосных сегнетоэлектрических кристаллах семейства ниобата лития и танталата лития в результате лазерного облучения: микросекундным импульсом излучения дальнего ИК-диапазона, поглощаемого в поверхностном слое, и сериями фемтосекундных импульсов излучения ближнего ИК-диапазона, сфокусированного в объеме., представляется **актуальной**, как с точки зрения физики конденсированного состояния, так и с точки зрения доменной инженерии.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследована зависимость от плотности энергии геометрии полосовой доменной структуры, возникающей в конгруэнтном ниобате лития в результате

локального облучения поверхности микросекундным импульсом лазерного излучения дальнего ИК-диапазона, поглощаемого в поверхностном слое.

2. Изучен процесс формирования доменной структуры в конгруэнтном нибате лития, легированного магнием, в результате локального облучения сфокусированным в объеме излучением фемтосекундного лазера ближнего ИК диапазона, и ее эволюция в результате последующего термического отжига.

3. Исследованы особенности доменной структуры, формирующейся в объеме под действием локального облучения сериями фемтосекундных импульсов лазерного излучения ближнего ИК - диапазона различных одноосных сегнетоэлектриков: (1) конгруэнтного нибата лития, (2) конгруэнтного танталата лития, легированного магнием, и (3) стехиометрического нибата лития.

4. Изучены на примере конгруэнтного нибата лития особенности доменной структуры, возникающей в объеме в результате линейного сканирования фемтосекундным лазерным излучением.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературных источников, который включает в себя 150 наименований. Общий объем работы составляет 106 страниц, 47 рисунков и 1 таблицу.

Работа *хорошо апробирована*. Ее основные результаты были представлены на четырех международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 10 трудах, из которых четыре научные работы опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Диссертация отвечает паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Ее автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации и адекватно отражает полученные в работе результаты. Публикации соискателя соответствуют изложенному материалу.

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. Изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о публикациях, апробации работы, ее структуре и объеме.

Первая глава содержит литературный обзор по теме исследования. Представлены общие сведения о сегнетоэлектриках и реализующейся в них доменной структуре. Изложены сведения о физических свойствах исследуемых материалов. Отдельное внимание уделено особенностям формирования доменных структур в результате воздействия лазерного излучения, а также

особенностям взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками.

Во второй главе дано описание образцов, экспериментальных установок и методик исследования доменных структур. В качестве материалов были выбраны танталат и ниобат лития различных составов.

Для создания доменов определенной конфигурации осуществлялось облучение образцов при помощи микросекундного CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм, а также при помощи фемтосекундного твердотельного лазера с длиной волны 1030 нм. Для исследования доменных структур использовались оптическая и сканирующая электронная микроскопия, а также микроскопия генерации второй гармоники.

В третьей главе изложены результаты изучения закономерностей формирования доменных структур в танталате лития при облучении материала микросекундным лазерным излучением дальнего ИК-диапазона. Показано, что облучение несфокусированным лазерным лучом приводит к формированию трех зон с характерными полосовыми доменами, вид которых определяется расстоянием от центра лазерного пучка. В центральной области возникают искривленные полосовые домены со слабо выраженной ориентацией вдоль трех кристаллических направлений. В промежуточной области выявлены полосовые домены с разветвленной структурой, со значительно более выраженной ориентацией. Внешняя область содержала только параллельные домены. Наблюдаемые различия связаны с различными величинами превышения пирозлектрического поля над порогом, что обусловлено неоднородным распределением температуры при лазерном воздействии.

Четвертая глава посвящена вопросам формирования доменов в легированном магнием ниобате лития при облучении сфокусированным в объеме фемтосекундным лазерным лучом ближнего ИК-диапазона. Показано, что домены формируются на микротреках – областях кристалла, возникающих в результате облучения. При повышении энергии лазерных импульсов происходит рост доменов в сторону Z- полярной поверхности. Форма доменов заметно меняется в зависимости от глубины фокусировки излучения. Установлено, что нагрев кристаллов после облучения приводит к прорастанию доменов от микротреков к обеим полярным граням на всю глубину кристалла.

Пятая глава содержит результаты анализа различных форм доменов, образующихся в исследуемых материалах в результате облучения фемтосекундным лазерным излучением. Различие в форме доменов определяется величиной локального превышения пирозлектрического поля, возникающего вследствие локального нагрева, над порогом.

В чистом ниобате лития конгруэнтного состава формируются только обволакивающие микротреки домены. В легированном магнием танталате лития при малых дозах облучения также образуются обволакивающие домены, однако по мере возрастания поглощенной дозы наблюдается сначала рост веретенообразных доменов, а затем доменов с поперечным сечением в форме трехлучевых звезд. В последнем случае лучи были ориентированы в +Y кристаллографических направлениях. В стехиометрическом танталате лития домены имеют веретенообразную форму со скругленным поперечным сечением.

В шестой главе обсуждаются результаты линейного сканирования ниобата лития фемтосекундным лазерным излучением, сфокусированным в объеме.

Линейное сканирование приводит к формированию линейных микротреков, на которых были локализованы полосовые домены со структурой в форме двойного гребня. Исследование поперечного среза образца показало, что микротреки обладали квазипериодической субструктурой, на которой образуется связанный электрический заряд, являющийся источником деполяризующего поля. Действие последнего приводило к формированию доменов, а их рост происходил под действием пирозлектрического поля, которое возникало при охлаждении материала.

В заключении сформулированы основные результаты выводы по диссертации.

На основании проведенных экспериментальных исследований соискателем получен ряд важных, принципиально **новых результатов**, некоторые из которых перечислены ниже:

1. Показано, что облучение конгруэнтного танталата лития, с нанесенным на поверхность проводящим слоем, импульсным лазерным излучением дальнего ИК, поглощаемым в поверхностном слое, приводит к формированию гребневых доменов, ориентация которых зависит от плотности энергии.

2. Установлено, что в результате облучения сфокусированным в объеме фемтосекундным лазерным излучением возникают локализованные в объеме домены, обволакивающие структурные повреждения (микротреки).

3. Показано, что домены в объеме имеют форму гексагональных пирамид и растут под действием пирозлектрического поля к Z-полярной поверхности, а после прорастания приобретают форму гексагональных призм.

4. Установлено, что при линейном сканировании сфокусированным в объеме фемтосекундным лазерным излучением формируется квазипериодическая структура микротреков и обволакивающих их доменов, рост которых приводил к образованию в объеме доменов в форме двойных гребней.

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 *Лисьих Б.И.* имеет важное **практическое значение**.

Автором развит лабораторный метод модификации доменной структуры в ниобате и танталате лития с использованием лазерного излучения. Определены закономерности влияния технологических режимов обработки на форму доменов, которые могут быть использованы в доменной инженерии.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть востребованы на предприятиях и научных центрах, занимающихся разработкой изделий оптической и электронной техники. К числу таковых следует отнести, например, Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (университет), НПО "Микрон" (г. Зеленоград), Воронежский государственный университет.

Предложенные в диссертации методы модификации доменной структуры в ниобате и танталате лития расширяют возможности применения этого материала для создания оптоэлектронных устройств.

Вместе с тем имеются замечания к тексту диссертации.

1. При анализе формирования доменной структуры под действием импульсного лазерного излучения (раздел 3.2) автор учитывает действие электрического поля, возникающего вследствие пирозлектрического эффекта. Вместе с тем, оценки локальной температуры и напряженности поля здесь не представлены. Не обсуждается влияние электропроводности и упругих напряжений, возникающих из-за локального разогрева образца.

2. На стр. 60 написано: «В результате облучения фемтосекундным лазерным излучением, сфокусированным ниже полярной поверхности, в объеме MgOCLN формировались аморфизованные области (микротреки).» Было бы целесообразно пояснить их параметры (структуру, размеры) и доказательства того, что они являются аморфными. (В литобзоре (стр. 35) говорится только о «создании модифицированных областей в объеме прозрачных диэлектриков фемтосекундным лазерным излучением»)

3. В подразделе «6.2. Рост доменов от микротреков» было бы целесообразно обсудить роль микротреков в формировании доменов.

4. В подразделе «*Моделирование распределения деполяризующего поля*» не представлены сведения о том, как учитывалась анизотропия диэлектрической проницаемости и ее нелинейность.

5. В тексте много аббревиатур, что затрудняет его восприятие.

6. В диссертации встречаются технические ошибки. Например, подпись к рис. 1.15 расположена на 2 стр., и др.

Вместе с тем, сделанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации Лисьих Б.И. Работа содержит новые научные результаты и является полноценным научным исследованием в области физики сегнетоэлектриков.

Заключение по диссертации.

Диссертация Лисьих Бориса Игоревича «Формирование доменной структуры в объеме сегнетоэлектриков ультракороткими лазерными импульсами» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу. Замеченные недостатки не снижают ее научной значимости.

Содержание диссертации соответствует научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

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 - Лисьих Борис Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Коротков Леонид Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры твердотельной электроники
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Адрес: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, дом 84
Телефон: 4732 46 66 47
Адрес электронной почты: l_korotkov@mail.ru

_____ / Коротков Л.Н. / «_11»__ сентября _____ 2024 г.

Подпись Короткова Л.Н. удостоверяю
Ученый секретарь ученого совета ВГТУ



Трофимов В.П.