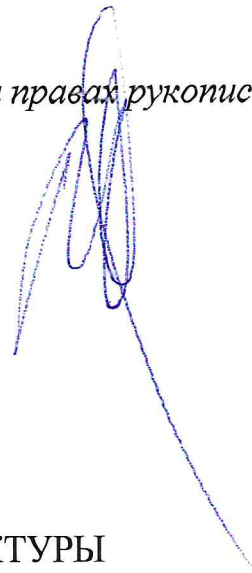


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

*На правах рукописи*



Лисьих Борис Игоревич

ФОРМИРОВАНИЕ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
В ОБЪЕМЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ УЛЬТРАКОРОТКИМИ  
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния и наноразмерных систем Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,  
**Шур Владимир Яковлевич**

Официальные оппоненты: **Коротков Леонид Николаевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный техни-  
ческий университет», профессор кафедры твердо-  
тельной электроники;

**Мишина Елена Дмитриевна**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологиче-  
ский университет», г. Москва, заведующий лабора-  
торией фемтосекундной оптики для нанотехноло-  
гий кафедры наноэлектроники института перспек-  
тивных технологий и индустриального программ-  
рования;

**Пугачев Алексей Маркович**,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБУН Институт автоматизации и метрологии Си-  
бирского отделения Российской академии наук, г.  
Новосибирск, старший научный сотрудник лабора-  
тории спектроскопии конденсированных сред

Защита состоится «27» сентября 2024 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета **УрФУ 1.3.02.06** по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=6196>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ищенко Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования и степень её разработанности

По состоянию на текущее время сегнетоэлектрические материалы находят широчайшее применение в таких областях как интегральная оптика, микроэлектроника, акустооптика, сегнетоэлектрики являются основой для создания устройств на основе пиро- и пьезоэлектрических преобразователей, пьезоактуаторов. Основой для прикладного применения сегнетоэлектриков является контролируемое создание доменных структур (ДС) с заданными параметрами [1-3]. Наряду с разработкой и применением прикладных методов создания ДС к задачам высокого приоритета относится изучение фундаментальных механизмов их формирования.

Одноосные сегнетоэлектрики ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) и изоморфный ему танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ , LT) обладают удачным сочетанием нелинейно-оптических свойств, простотой ДС, состоящих из  $180^\circ$  доменных стенок и высокими температурами Кюри (которые обеспечивают стабильность ДС) [2,4], что делает их одними из наиболее удобных материалов нелинейной оптики при реализации частотно-геометрических преобразований лазерного излучения. Основой для последних являются регулярные доменные структуры (РДС), создание которых относится к задачам доменной инженерии. На сегодняшний день основные методы создания РДС [5] позволяют создавать только двумерные структуры, что ограничивает возможности практического применения.

За последние годы прогресс в развитии и распространении фемтосекундных лазеров определил новые методы и перспективы создания нелинейно-оптических преобразователей на основе трехмерных сегнетоэлектрических РДС. В ряде работ была продемонстрирована реализация нелинейных фотонных кристаллов для частотных и геометрических преобразований лазерного излучения [6-9]. Тем не менее несмотря на наличие публикаций, посвященных созданию РДС при помощи лазерного излучения ультракоротких импульсов для преобразований лазерного излучения, трактовки описания механизмов формирования и эволюции доменов зачастую поверхностны и противоречат ранее опубликованным работам [10,11].

Актуальность проводимых исследований обусловлена как необходимостью понимания механизмов зарождения и роста доменов в объеме сегнетоэлектрических материалов, так и перспективами применения трехмерных ДС.

### Цели и задачи исследования

**Цель работы** – 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 фемтосекундными импульсами излучения ближнего ИК-диапазона, сфокусированного в объеме.

### Основные задачи:

1. Исследовать на примере LT конгруэнтного состава зависимость от плотности энергии геометрии полосовой ДС, возникающей в результате локального

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

2. Изучить на примере конгруэнтного LN, легированного Mg, процесс формирования ДС в результате локального облучения сфокусированным в объеме излучением фемтосекундного лазера ближнего ИК диапазона, а также ее эволюцию в результате последующего термического отжига.
3. Исследовать особенности ДС, формирующейся в объеме в результате локального облучения сериями фемтосекундных импульсов лазерного излучения ближнего ИК диапазона различных одноосных сегнетоэлектриков: LN конгруэнтного состава, конгруэнтного LT, легированного Mg, и стехиометрического LT.
4. Изучить на примере CLN особенности ДС, возникающей в объеме в результате линейного сканирования фемтосекундным лазерным излучением.

### **Объекты исследования**

Исследовались монокристаллические пластины толщиной 1 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси, одноосных сегнетоэлектриков семейства LN и LT: (1) конгруэнтного LN (CLN), (2) конгруэнтного LN, легированного 5 мол.% Mg (MgOCLN), (3) конгруэнтного LT, легированного 8 мол.% Mg (MgOCLT), (4) стехиометрического LT (SLT).

### **Научная новизна**

1. Показано, что облучение CLT, 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. Впервые установлено, что в результате облучения сфокусированным в объеме фемтосекундным лазерным излучением возникают локализованные в объеме домены, обволакивающие структурные повреждения (микротрещины).
3. Показано, что домены в объеме имеют форму гексагональных пирамид и растут под действием пироэлектрического поля к Z- полярной поверхности, а после прорастания приобретают форму гексагональных призм.
4. Впервые на примере MgOCLT обнаружено формирование и рост в объеме доменов, сечения которых имеют форму трехлучевых звезд с лучами, ориентированными в Y+ кристаллографических направлениях.
5. Впервые систематизировано разнообразие форм доменов, возникающих в объеме CLN, MgOCLT и SLT, и измерены зависимости размеров от параметров фемтосекундного лазерного излучения.
6. Впервые при использовании линейного сканирования сфокусированным в объеме фемтосекундным лазерным излучением выявлено формирование дискретной квазипериодической структуры микротрещинок и обволакивающих их доменов, рост которых приводил к образованию в объеме доменов в форме двойных гребней.

### **Теоретическая и практическая значимость проведенных исследований**

1. Фундаментальная значимость проведенного исследования заключается в развитии представлений о формировании и росте доменов в объеме

сегнетоэлектрических кристаллов при отсутствии внешнего экранирования деполяризующих полей, а также в демонстрации определяющей роли искусственных структурных повреждений в образовании доменов.

2. Установлено, что форма доменов, формирующихся в результате облучения фемтосекундными лазерными импульсами, сфокусированными в объеме образца, зависит от локального превышения остаточного деполяризующего поля над порогом.
3. Представленные в работе основы методик создания регулярных ДС при помощи фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона представляют существенный интерес для изготовления преобразователей длины волны лазерного излучения.
4. Выявленные закономерности образования и роста доменов различных форм в объеме одноосных сегнетоэлектриков представляют значительный интерес для дальнейшего развития методов доменной инженерии.

### **Методология и методы исследования**

Было проведено две серии экспериментов по созданию ДС при помощи: (1) микросекундного лазерного излучения дальнего ИК-диапазона, поглощаемого в поверхностном слое, и (2) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона, сфокусированного в объеме. Использовались локальное облучение сериями импульсов и линейное сканирование лазерным пучком.

Созданные в результате облучения локальные повреждения кристаллической структуры (микротреки) были визуализированы в объеме с помощью оптической микроскопии и на поперечных сечениях с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Доменная структура, сформированная на поверхностях образцов, визуализировалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) после селективного химического травления и сканирующей зондовой микроскопии в режиме силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО). Для визуализации доменов в объеме и создания трехмерных изображений доменной структуры использовалась микроскопия генерации второй гармоники типа Черенкова (МГВГ). Для изучения ДС, созданной сканированием лазерным излучением, образцы разрезались перпендикулярно направлению сканирования и на полированных срезах домены и микротреки визуализировались с помощью АСМ и СМПО.

Моделирование пространственного распределения температуры и полярной компоненты пироэлектрического поля при импульсном облучении фемтосекундными импульсами сфокусированного в объеме излучения, проводилось методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multyphysics.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Образование трех выраженных областей с различной геометрией гребневых доменов, возникающих в результате локального облучения поверхности CLT микросекундным импульсом сфокусированного лазерного излучения дальнего ИК-диапазона, поглощаемого в поверхностном слое, обусловлено пространственной неоднородностью концентрации зародышей, образующихся под действием пироэлектрического поля.

2. Формирование параллельных полосовых доменов за пределами зоны, облученной микросекундным импульсом лазерного излучения дальнего ИК-диапазона, обусловлено наличием поверхностного проводящего слоя, приводящего к существованию во внешней области пироэлектрического поля, достаточного лишь для удлинения полосовых доменов.
3. Образование в результате воздействия сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения локализованных в объеме доменов, обволакивающих структурные повреждения (микротрещины), обусловлено действием деполаризующих полей, возникающих вблизи фазовых границ.
4. Рост в результате термического отжига обволакивающих микротрещины доменов, сформированных фемтосекундным облучением ближнего ИК диапазона, обусловлен локальным превышением полярной компоненты пироэлектрического поля над пороговым полем генерации ступеней на доменных стенках.
5. Изменение формы доменов при прорастании к поверхности от гексагональных пирамид с заряженными доменными стенками к гексагональным призмам с нейтральными стенками обусловлено встречным движением и аннигиляцией кинков с зарядом противоположного знака.
6. Разнообразие форм доменов, возникающих в объеме изученных кристаллов семейства LN и LT в использованном диапазоне параметров фемтосекундного лазерного излучения обусловлено различными превышениями пироэлектрического поля над пороговыми значениями, вызванными различием пороговых полей у различных представителей семейства.
7. Образование в объеме в результате линейного сканирования сфокусированным фемтосекундным лазерным излучением доменов в форме двойных гребней обусловлено формированием дискретной квазипериодической структуры микротрещин и ростом обволакивающих их доменов в пироэлектрическом поле.

### **Апробация результатов**

Результаты работы были представлены на четырех международных и всероссийских конференциях: (1) IV Семинар современные нанотехнологии (IWMN-2022, Екатеринбург, Россия, 2022); (2) International conference Materials Science and Nanotechnology (MSN-2023, Екатеринбург, Россия, 2023); (3) International conference Advanced Laser Technologies (ALT'23, Самара, Россия, 2023); (4) XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXIII, Тверь, Россия, 2023).

### **Публикации и личный вклад автора.**

Основные результаты опубликованы в 10 печатных работах, включая 4 статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, и 6 тезисов международных и всероссийских конференций. Диссертационная работа выполнялась с использованием оборудования Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» Института Естественных Наук и Математики УрФУ в рамках исследований, проводимых по программе Приоритет-2030, а также при поддержке РФФИ (проект № 19-12-00210).

Основные результаты получены лично автором или при его активном участии. Направление исследований, формулировка задач и обсуждение исследований проводились совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., проф. Шуром В.Я. и к.ф.-м.н., н.с. Кособоковым М.С. Проведение экспериментов, визуализация ДС методами оптической микроскопии и МГВГ осуществлялись лично автором, визуализация ДС методом СМПО и АСМ – совместно с к.ф.-м.н., н.с. Турыгиным А.П., визуализация ДС методом СЭМ – совместно с к.ф.-м.н., с.н.с. Кузнецовым Д.К, математическая обработка результатов проводилось совместно с к.ф.-м.н., н.с. Кособоковым М.С. В работе [3] из списка выносимых на защиту работ автором проводились эксперименты по созданию микротрещин в объеме CLN при помощи фемтосекундного лазерного излучения, а также оптическая визуализация, полученных структур.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объем работы составляет 106 страниц, включая 47 рисунков, 1 таблицу, список литературы, состоящий из 150 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы научно-квалификационной работы, сформулированы основные цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, определены объекты исследования, описана научная новизна полученных результатов, представлены теоретическая и практическая значимость проведенной работы, описаны методология и методы исследования. Также представлены сведения, подтверждающие достоверность и апробацию результатов, список публикаций, личный вклад автора.

**Первая глава** представляет собой обзор современных представлений об этапах эволюции ДС сегнетоэлектриков и механизмах экранирования деполяризующего поля. Описаны физические свойства и особенности исследованных в работе одноосных сегнетоэлектриков семейства LN и LT. Представлены основные особенности ДС, созданной переключением поляризации без приложения электрического поля при помощи лазерного излучения. Особое внимание уделено имеющимся экспериментальным данным по созданию ДС в сегнетоэлектриках фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК диапазона, сфокусированным в объеме кристаллов. Высокая интенсивность излучения приводит к многофотонному поглощению и к значительно большей локализации воздействия на материалы в сравнении с использованием лазерных импульсов большей длительности [12-14].

**Вторая глава** является методической и содержит описание исследуемых образцов и использованных в работе экспериментальных установок и методик исследования.

### ***Исследуемые материалы***

Объектами исследования были выбраны монокристаллы чистого CLN и MgOCLN, CLT, SLT и MgOCLT. CLN (Sipat, Китай и Gooch&Housego, США) и MgOCLN (Jiangxi Unicrystal Technology, Китай), MgOCLT (Yamaju Ceramics, Япония),

CLT и SLT (Oxide Corp, Япония). Стехиометрический состав образцов SLT достигался за счет отжига пластин конгруэнтного состава в атмосфере, насыщенной Li. Исследуемые образцы представляли собой монокристаллические пластины толщиной 1 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси с поверхностями, отполированными до оптического качества. Размеры образцов составляли 10×15×1 мм<sup>3</sup>.

### *Экспериментальная установка*

Облучение лазерным излучением дальнего ИК диапазона проводилось при помощи CO<sub>2</sub> лазера VLS3.50 (Universal Laser Systems, США) с длиной волны 10,6 мкм, длительностью импульсов 350 мкс и максимальной выходной энергией до 40 Вт. Лазерное излучение фокусировалось при помощи ZnSe линзы.

Источником лазерного излучения фемтосекундных импульсов в экспериментальной установке для облучения образцов служила лазерная система, представляющая собой фемтосекундный регенеративный усилитель TETA-10 (Avesta Project, Россия) на основе твердотельного Yb-лазера. Длина волны - 1030 нм, длительность импульсов ~ 250 фс, частота следования импульсов от 1 Гц до 200 кГц. Средняя выходная мощность - до 10 Вт. Для позиционирования образцов использовался 3D-моторизованный позиционер (Zolix Instruments, Китай), состоящий из закрепленного на вертикальной оси 2D-позиционера XY5050 и 1D-позиционера KA050-Z. Для прецизионного перемещения использовался пьезоэлектрический 3D-позиционер (P18.XYZ200S-001, CoreMorrow, Китай) с диапазоном перемещения 200 мкм по всем направлениям и точностью около 5 нм. Фемтосекундное лазерное излучение фокусировалось при помощи микрообъектива (Thorlabs Inc., США) с просветляющим покрытием, числовой апертурой NA = 0,65 и увеличением 50х.

### *Методика эксперимента*

Облучение лазерным излучением дальнего ИК диапазона проводилось в фиксированных точках. На Z+ полярную поверхность образца CLT при помощи магнетронного напыления наносился проводящий слой оксида индия-олова (ITO) толщиной 200 нм. Фокус располагался на 10 мм выше Z+ поверхности образца, после чего проводилось облучение единичными импульсами с энергией 14 мДж. По окончании эксперимента слой ITO удалялся травлением в HCl.

Проводились два вида облучений образцов сериями фемтосекундных лазерных импульсов: 1) в фиксированной точке и 2) при линейном сканировании.

Облучения в точке были проведены в CLN, MgOCLN, MgOCLT и SLT. Лазерное излучение фокусировалось на глубине от 200 до 800 мкм от полярной поверхности (Рисунок 1а). Количество импульсов варьировалось от 1 до 65000 при фиксированной частоте следования 100 кГц с энергиями от 0,7 до 10,7 мкДж.

Облучение линейным сканированием на постоянной глубине (Рисунок 1б) было проведено в CLN, MgOCLN и MgOCLT. Глубина фокусировки - 500 мкм. Скорость сканирования - 2 мм/с, при частоте импульсов 100 кГц и энергии от 0,7 до 10,7 мкДж.



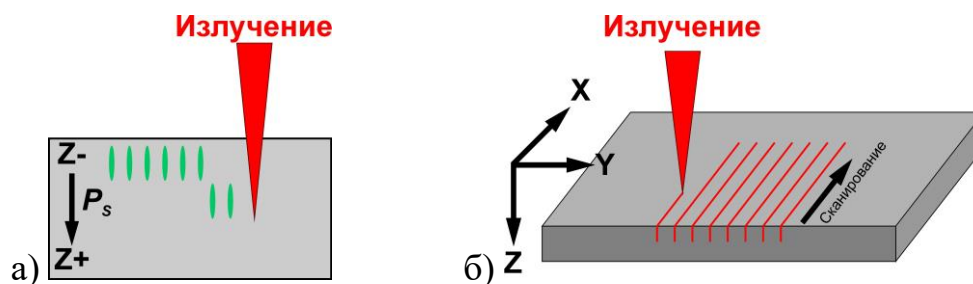


Рисунок 1 – Схема экспериментов по облучению фемтосекундными лазерными импульсами: (а) в точке, (б) линейным сканированием с последующим разрезанием образца.

Кроме того, проводилось исследование формирования ДС в результате локального облучения фемтосекундными импульсами излучения, сфокусированного в объеме образца MgOCLN и последующего термического отжига. Для контролируемого изменения температуры использовался термостойлик THMS600 (Linkam Scientific Instruments, Великобритания). Отжиг проводился при 250°C в течение 5 минут. Скорости нагрева и охлаждения - 5°C/мин.

### ***Визуализация доменной структуры***

Оптический микроскоп (Olympus VX-61, Olympus, Япония) был использован для визуализации ДС, сформированной на поверхности в результате воздействия микросекундного лазерного излучения, и микротрещок, созданных в объеме фемтосекундным лазерным излучением. ДС визуализировалась в режиме темного поля после селективного химического травления в HF в течение 3 мин, а микротрещки - в просвечивающем режиме. Оптический контраст микротрещок вызван локальным изменением показателя преломления.

Визуализация доменных стенок в объеме с разрешением около 1 мкм производилась с помощью МГВГ [15,16]. Контраст доменных стенок возникает вследствие скачка нелинейного коэффициента второго порядка  $\chi^{(2)}$ . Установка, была создана на базе микроскопа Ntegra Spectra (NT-MDT, Россия). Использовался Yb-волоконный лазер с длиной волны 1064 нм, средней выходной мощностью до 50 мВт, частотой следования 5 МГц и длительностью импульсов 2 нс. Излучение фокусировалось объективом 50x с апертурой 0,55. Шаг смещение фокуса по вертикальной оси составлял около 8 мкм. Получение 3D-изображений ДС проводилось из набора 2D-изображений при помощи программного пакета Fiji ImageJ.

Визуализация ДС на поверхности проводилась с помощью СЭМ и СМПО. Для СЭМ визуализации использовался сканирующий электронный микроскоп EVO LS 10 (Carl Zeiss, Германия). Предварительно селективным химическим травлением формировался соответствующий доменам рельеф поверхности, и для компенсации накопления электрического заряда поверхность покрывалась проводящим слоем Cr толщиной 200 нм. Разрешение метода около 10 нм.

Для исследования поперечных сечений микротрещок и доменов, сформированных в результате сканирования, образцы разрезались перпендикулярно направлению сканирования прецизионной дисковой пилой DAD 3220 (Disco Corporation, Япония). Полученные X-срезы полировались Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> порошками. Финальная механохимическая полировка коллоидными наночастицами SiO<sub>2</sub> на станке PM5 (Logitech, Великобритания) создавала шероховатость менее 1 нм.

Визуализация поперечных сечений микротрещин и доменов проводилась с помощью сканирующего зондового микроскопа NTEGRA Aura (NT-MDT, Россия) в режимах АСМ и СМПО. Радиус закругления зонда с Pt покрытием составлял 30 нм (МикроМаш, Россия), коэффициент жесткости - 2,8 Н/м, первая резонансная частота – 400-500 кГц. Для СМПО визуализации на зонд подавалось постоянное напряжение 10 В, частота модулирующего сигнала - 20 кГц.

**Третья глава** посвящена изучению формирования ДС в CLT в результате локального облучения поверхности микросекундным импульсом лазерного излучения дальнего ИК-диапазона, поглощаемого в поверхностном слое.

Для создания ДС производилось облучение Z+ полярной поверхности образца, одиночным импульсом длительностью 350 мкс и энергией 14 мДж. Энергия гауссова пучка была распределена по поверхности образца с дисперсией 480 мкм. Облучаемая поверхность была покрыта проводящим слоем ИТО толщиной 200 нм. После удаления ИТО и селективного химического травления проводилась визуализация доменов при помощи оптической микроскопии в режиме темного поля и СЭМ. Удалось выявить три области с различными типами ДС (Рисунок 2): (1) центральная - с искривленными полосовыми доменами; (2) промежуточная - с прямыми фрагментами полосовых доменов и ветвями, ориентированным вдоль Y осей; (3) внешняя - с параллельными полосовыми доменами, ориентированными вдоль одной Y-оси. Для статистического анализа ориентации доменов проводилось Фурье-преобразование изображений ДС (Рисунок 2д-ж). Ширина доменов - от 200 до 500 нм.

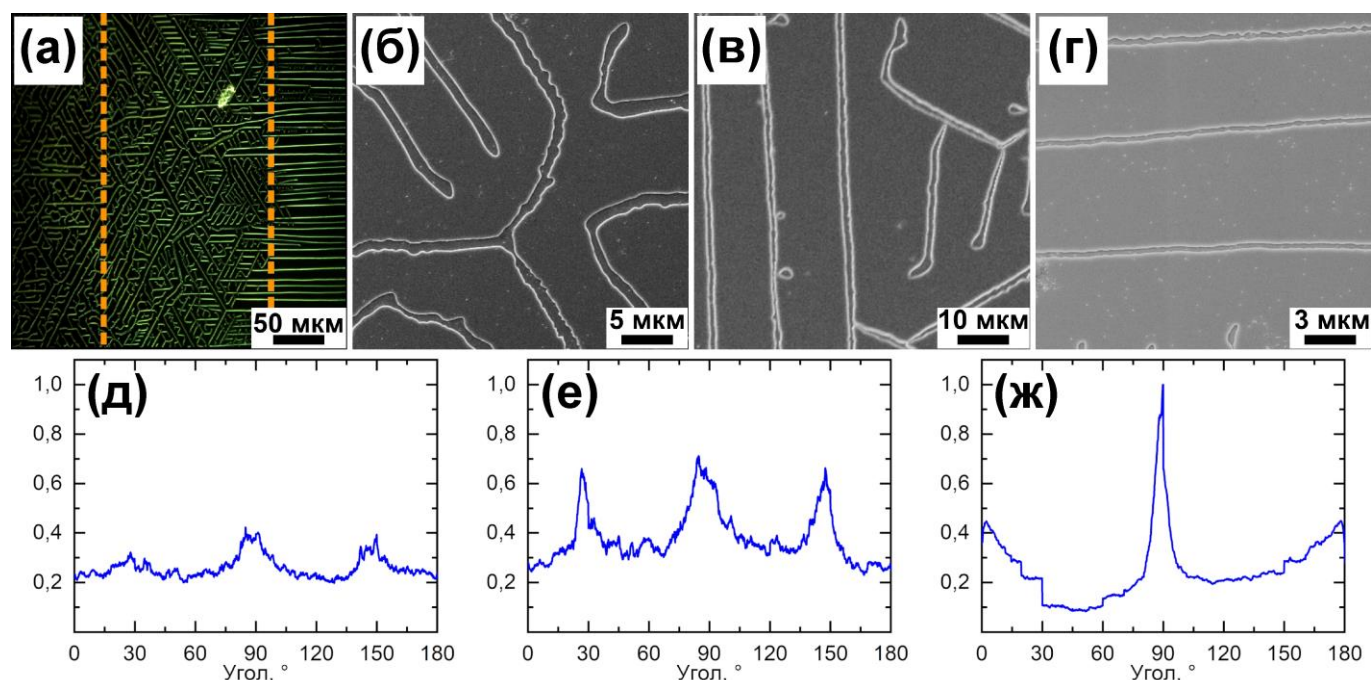


Рисунок 2 – (а) Оптическое изображение ДС в режиме темного поля после облучения излучением дальнего ИК диапазона. Линии показывают границы областей с различными типами ДС. (б-г) СЭМ-изображения ДС, (д-ж) угловые свертки Фурье-преобразований изображений ДС в различных областях: (б,д) центральная, (в,е) промежуточная, (г,ж) внешняя. Длительность импульса 350 мкс, энергия 14 мкДж.

В центральной области ориентации доменов вдоль  $Y$ -осей была слабо выражена (Рисунок 2в), что обусловлено многочисленными плавными изменениями направлений роста взаимодействующих доменов [17].

В промежуточной области образовывались ветви и прямые фрагменты полосовых доменов, ориентированные вдоль  $Y$ -осей (Рисунок 2г). Эффект ветвления под действием облучения ИК лазером наблюдался ранее в LN [18]. Скругленная форма обусловлена изменениями направлений роста. Уменьшение вклада взаимодействия растущих доменов обусловлено меньшей концентрацией зародышей.

Во внешней области формировались полосовые параллельные домены длиной до 200 мкм, ориентированные вдоль одной  $Y$ -оси (Рисунок 2д). Ориентация доменов различалась для разных сторон облученной зоны. Зародышеобразование полностью отсутствовало и все домены росли из промежуточной области.

МГВГ визуализация в объеме выявила гребневую форму полосовых доменов. Средняя глубина доменов около 50 мкм в центральной и промежуточной областях и около 25 мкм во внешней области. Гребневая форма полосовых доменов, при импульсном облучении ИК лазером, была связана с увеличением угла отклонения доменной стенки от полярной оси под действием пироэлектрического поля. Заряженными доменные стенки становились источником деполяризующего поля, которое при превышении порогового значения, приводило к генерации ступеней на стенке и росту клиновидных доменов за счет движения заряженных кинков [11].

Формирование доменов в результате облучения излучением дальнего ИК диапазона связано с действием пироэлектрического поля  $E_{pyr}$  [11,18]. Эффективное поглощение излучения в поверхностном слое ЛТ приводит к нагреву поверхности и охлаждению после завершения импульса. Различается знак  $E_{pyr}$  при нагреве и охлаждении. В монодоменном образце переключение происходит только при охлаждении. Образование областей с различными типами ДС обусловлено неоднородностью  $E_{pyr}$ . Превышение над порогом локального значения полярной компоненты  $\Delta E = E_{pyr,z} - E_{th}$  - движущая сила образования и роста доменов [19].

Величина  $E_{pyr}$  была максимальна в центральной области и уменьшалась с расстоянием от центра облученной зоны. Эта особенность приводила к формированию максимальной концентрации новых доменов в центральной области. Формирование и рост полосовых доменов обусловлены запаздыванием экранирования деполяризующего поля,  $E_{dep}$  [11,18], а рост в направлении трех  $Y$ -осей соответствовал  $C_{3v}$  симметрии ЛТ [19]. Взаимодействие растущих доменов приводило к плавному изменению направления роста.

В промежуточной области меньшее значение  $E_{pyr}$  приводило к уменьшению концентрации образующихся доменов и к формированию фрагментов полос с ориентацией вдоль  $Y$ -осей. Увеличение расстояния между полосовыми доменами стимулировало рост ветвей за счет образования ступеней на доменных стенках.

Во внешней области  $E_{pyr}$  превышало  $E_{th}$  только для удлинения доменов за счет генерации ступеней, что открывало возможности роста вдоль одной  $Y$ -оси, только доменов, образовавшихся на внешней границе промежуточной области.

Наличие проводящего слоя на поверхности образца привело к более однородному распределению пьезоэлектрического поля в области облучения и распространению поля за пределы облученной зоны [18].

В четвертой главе представлены результаты исследования формирования ДС в MgOCLN в результате локального облучения сфокусированным в объеме излучением фемтосекундного лазера ближнего ИК диапазона, а также изменения созданной ДС в результате последующего термического отжига.

### *Облучение в объеме*

Локальное облучение монодоменных образцов MgOCLN производилось излучением, сфокусированным в объеме на глубине от 200 до 800 мкм, сериями из 5000 фемтосекундных лазерных импульсов с энергией в диапазоне от 2,0 до 10,7 мкДж. Точки облучения располагались в виде матриц 6×6 с расстоянием 30 мкм между строками и столбцами с фиксированной энергией излучения.

В результате облучения в объеме образцов формировались микротреки, визуализированные с помощью оптической микроскопии. МГВГ позволила выявить наличие доменов, обволакивающих микротреки. При достаточно больших энергиях домены росли от микротреков к Z- полярной поверхности (Рисунок 3). Порог энергии, выше которого наблюдался рост доменов, составлял около 2,5 мкДж при глубине фокусировки 200 мкм и возрастал при увеличении глубины.

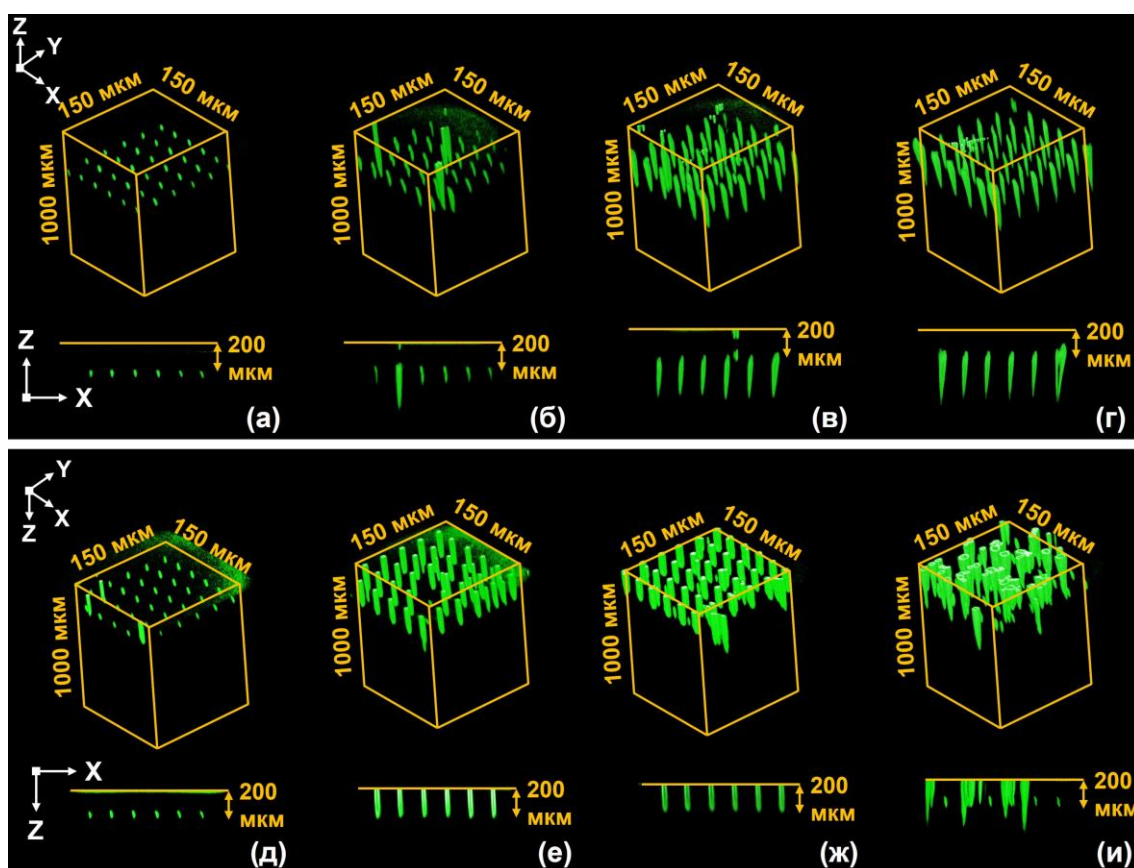


Рисунок 3 – 3D МГВГ изображения матриц доменов в объеме MgOCLN. (а-г) Облучение через Z+ поверхность, (д-и) облучение через Z- поверхность, глубина фокусировки 200 мкм. Энергии импульсов, мкДж: (а) 2,7, (б) 5,4, (в) 8,0, (г) 9,4, (д) 2,7, (е) 4,0, (ж) 6,7, (и) 8,0.

При облучении Z- полярной поверхности и глубине фокусировки 200 мкм часть доменов прорастала до облучаемой поверхности (Рисунок 3е-и). Кроме того,

образовывались дополнительные домены в форме гексагональных пирамид, ориентированных от поверхности в объем образца, положение которых не было связано с точками облучения. Концентрация таких доменов увеличивалась с ростом энергии. При энергиях более 6,7 мкДж рост доменов от поверхности подавлял рост доменов от микротрещин (Рисунок 3и). Рост доменов от полярной поверхности при облучении лазерным излучением, наблюдавшийся ранее в LN, был отнесен за счет действия пироэлектрического поля, возникающего при охлаждении образца [10].

Форма доменов существенно различалась. Проросшие домены имели форму гексагональных призм с нейтральными стенками (Рисунок 4а, Рисунок 5в,г), характерную для кристаллов семейства LN [20].

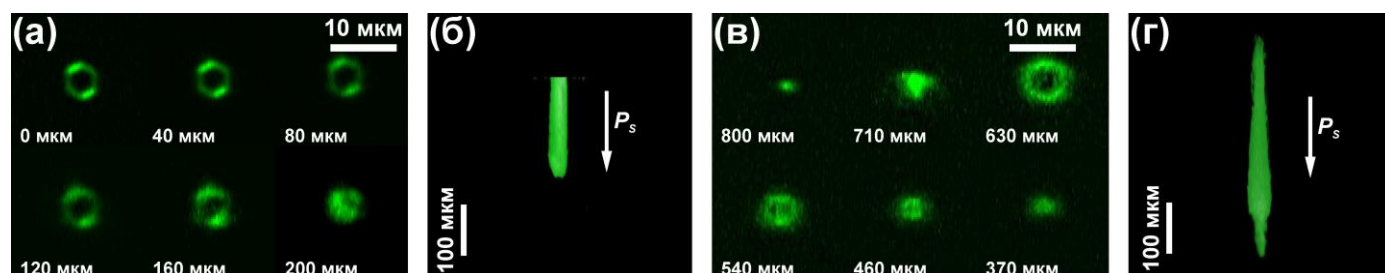


Рисунок 4 – 2D МГВГ изображения доменов в объеме MgO:LN. Облучение через Z- поверхность: (а,б) глубина фокусировки 200 мкм, энергия 5,4 мкДж; (в,г) глубина фокусировки 800 мкм, энергия 10,7 мкДж. (а,в) Изображения на различной глубине, (б,г) вид сбоку. Количество импульсов 5000.

Домены в объеме имели форму гексагональных пирамид с заряженными доменными стенками и росли к Z- полярной поверхности (Рисунок 4б, Рисунок 5а,б). Домены, растущие от поверхности, имели аналогичную форму и всегда росли в объеме.

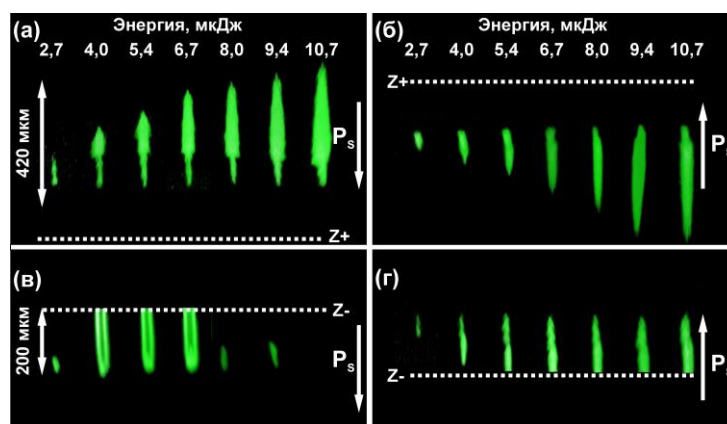


Рисунок 5 – 2D МГВГ изображения доменов в объеме, образовавшихся при различных энергиях импульсов в MgO:LN в результате облучения: (а) и (в) Z- поверхности, (б) и (г) Z+ поверхности, вид сбоку. Глубина фокусировки: (а) и (г) 800 мкм, (б) и (в) 200 мкм, количество импульсов 5000.

Длина локализованных в объеме доменов линейно увеличивалась с энергией импульсов (Рисунок 5а). При энергии больше 7 мкДж отсутствовал рост обволакивающих доменов в объеме (Рисунок 5в). Вместе с тем резко увеличивалась доля суммарной площади доменов, растущих от поверхности (Рисунок 5б). Последнее связано с уменьшением величины пироэлектрического поля вблизи обволакивающих доменов, вызванного образованием доменов, растущих от поверхности. Следует отметить, что дополнительный нагрев поверхности поглощенным излучением увеличивается при уменьшении глубины фокусировки.

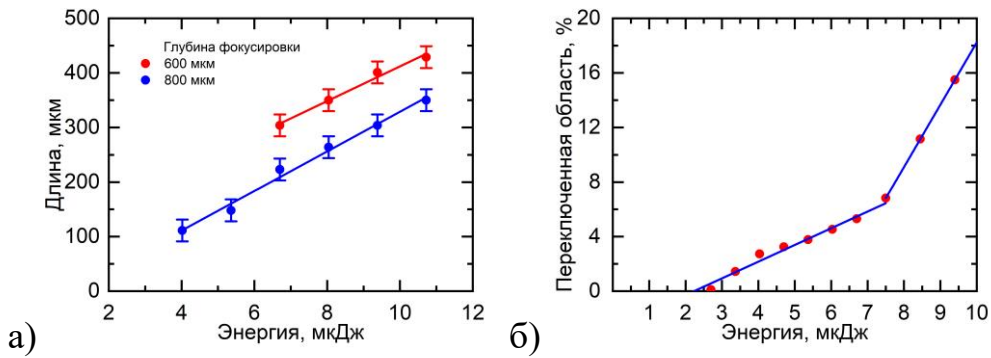


Рисунок 6 – Зависимость от энергии импульсов: (а) длины доменов при различной глубине фокусировки, (б) доли переключенной области на поверхности при глубине фокусировки 200 мкм. Создание доменов в объеме MgOCLN. Облучении через Z- поверхность.

### *Изменение созданной ДС в результате термического отжига.*

Для изучения роста созданных локальным облучением доменов в однородном пироэлектрическом поле использовались образцы, которые были предварительно облучены 5000 фемтосекундными лазерными импульсами с частотой 100 кГц и энергией от 2,7 до 5,4 мкДж при глубине фокусировки 230 мкм. Точки облучения образовывали матрицу 6×6 с расстоянием 30 мкм между строками и столбцами (Рисунок 7а,б). Производился отжиг при температуре 250°C в течение 5 мин и последующее охлаждение со скоростью 5°C/мин образцов.

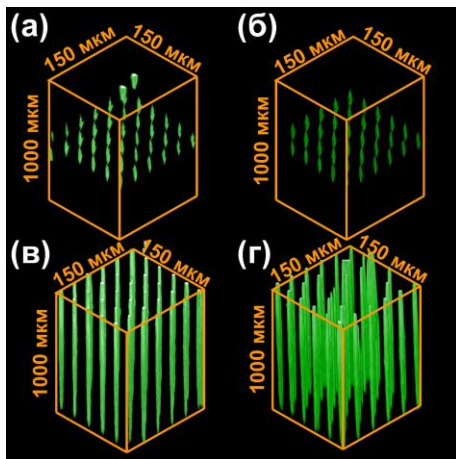


Рисунок 7 – 3D МГВГ изображения доменов в MgOCLN: (а,б) до и (в,г) после отжига. Энергии импульсов: (а,в) 2,7 мкДж и (б,г) 4,0 мкДж. Глубина фокусировки 400 мкм, 5000 импульсов.

В результате отжига домены проросли до обеих полярных поверхностей (Рисунок 7в,г). Все домены имели форму усеченных гексагональных пирамид, типичную для кристаллов симметрии  $C_{3v}$  [20] (Рисунок 8). Размеры доменов на полярных гранях составляли: около 3 мкм для 2,5 мкДж и около 5 мкм при 5,4 мкДж. Размеры и форма доменов на поверхности не зависели от расстояний между позициями облучения. Кроме того, вдали от точек облучения формировались сквозные изолированные домены (Рисунок 8).

Использованная методика создания сквозных доменов в MgOCLN облучением фемтосекундным лазером и последующим температурным отжигом отличается от ранее опубликованной [8,9]. Ранее при облучении использовалось изменение глубины фокусирования (вертикальное сканирование). Предложенная в данной работе методика позволяет существенно ускорить процесс создания ДС.

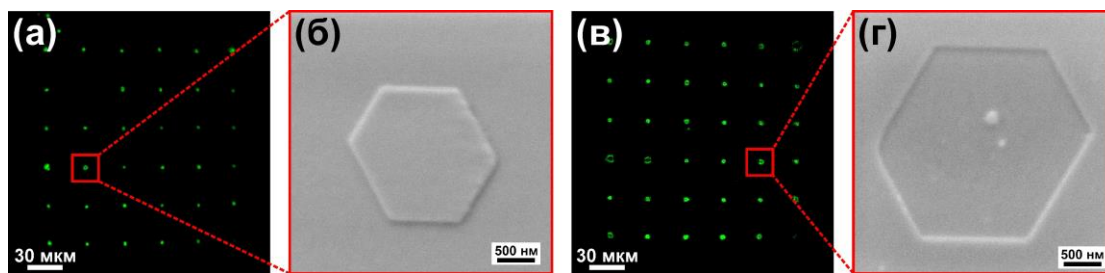


Рисунок 8 – (а,в) МГВГ и (б,г) СЭМ изображения доменов на (а,б) Z- и (в,г) Z+ полярных поверхностях (энергия импульсов 2,7 мкДж) после отжига MgOCLN.

Образование доменов в объеме вблизи микротрека может быть рассмотрено в рамках кинетического подхода, основанного на аналогии между ростом доменов и кристаллов [2]. Ранее было показано экспериментально, что микротрек, возникающий после облучения фемтосекундным лазером, представляет собой микроаморфизованную область кристалла [21], то есть является неполярным включением. В сегнетоэлектрике на границах микротрека возникают связанные заряды, создающие деполаризующее поле, которое приводит к переключению поляризации в окрестности микротрека и формированию обволакивающего домена. Таким образом, удается формировать зародыши в объеме сегнетоэлектрика.

Дальнейший рост доменов вплоть до полярных поверхностей происходил под действием пироэлектрического поля, которое возникало при температурном отжиге.

**Пятая глава** посвящена изучению формирования ДС в объеме CLN, MgOCLT и SLT в результате локального облучения сериями ультракоротких импульсов лазерного излучения ближнего ИК диапазона.

В CLN проводилось локальное облучение через Z- полярную поверхность при глубине фокусировки 230 мкм. Количество импульсов - от 5 до 10000, а энергия - от 0,7 до 6,0 мкДж. Во всем диапазоне параметров импульсов домены формировались в объеме, но не прорастали к поверхности (Рисунок 9а). Длина доменов линейно росла при увеличении энергии (Рисунок 9в) и не зависела от количества импульсов.

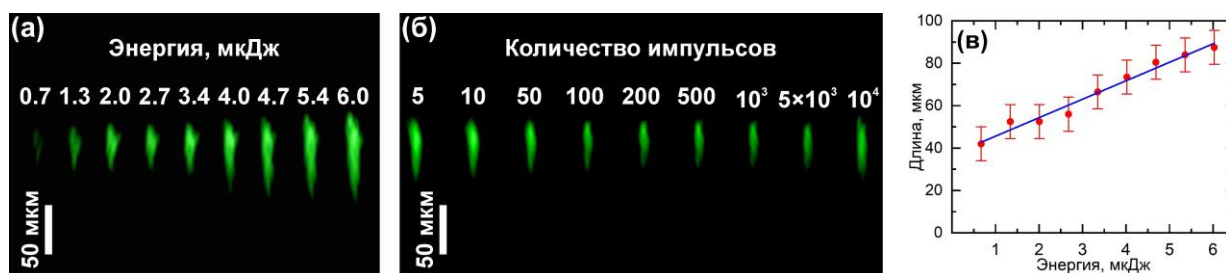


Рисунок 9 – 2D МГВГ изображения доменов в CLN: (а) 10000 импульсов, (б) энергия 4 мкДж; (в) зависимость длины доменов от энергии для 10000 импульсов. Глубина фокусировки 230 мкм.

В отличие от MgOCLN домены локализованы на микротреках во всем диапазоне энергий, то есть создаваемое пироэлектрическое поле не превышает порога генерации ступеней. Это вызвано тем, что пороговое поле в CLN ( $E_{th} = 21$  кВ/мм) [22] значительно больше, чем в MgOCLN ( $E_{th} = 5$  кВ/мм) [23].

В MgOCLT проводилось локальное облучение через Z- полярную поверхность при глубине фокусировки 300 мкм. Количество импульсов изменялось от 1 до 512, а энергия от 1,3 до 6,7 мкДж. При этом удалось выявить качественное отличие формы доменов по сравнению с CLN и MgOCLN.

При малом количестве импульсов форма доменов, как и в MgOCLN, была близкой к веретенообразной с гексагональным сечением на глубине фокусировки (Рисунок 10а). При увеличении количества импульсов сечения доменов приобретали форму трехлучевых звезд с лучами, ориентированными в Y+ направлениях (Рисунок 11а). Домены росли от микротреков по направлению к обеим полярным поверхностям, с существенно большим удлинением к Z- поверхности.

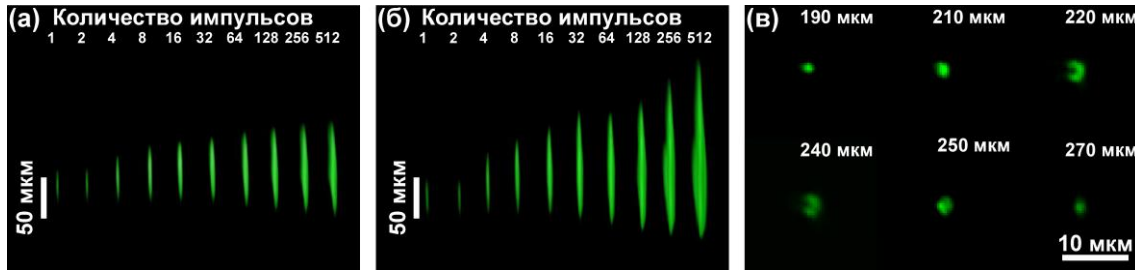


Рисунок 10 – 2D МГВГ изображения доменов в объеме MgOCLT для различного количества импульсов. Облучения Z- поверхности. Энергия импульсов: (а) 1,3 мкДж, (б) 4,0 мкДж, (в) 1,3 мкДж. Количество импульсов 256. Глубина фокусировки 300 мкм.

3D изображения показали, что «крылья» доменов имели форму двухсторонних гребней (Рисунок 11в,г), в отличие от односторонних гребней, формирующихся при облучении поверхности CLT лазерным излучением дальнего ИК-диапазона (Глава 3).

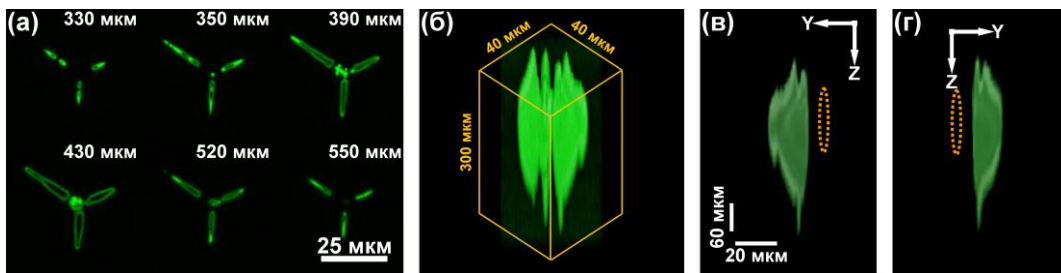


Рисунок 11 – (а) 2D и (б) 3D МГВГ изображения домена в объеме MgOCLT. Облучение Z- поверхности, 512 импульсов с энергией 6,1 мкДж. Глубина фокусировки 470 мкм. (в,г) Изображения отдельных крыльев домена, пунктирными линиями отмечено положение микротрека.

Зависимость длины доменов от энергии была успешно аппроксимирована по аналогии с полевой зависимостью длины доменов при локальном переключении на неполярном срезе [24] (Рисунок 12а):

$$L(w) = k\sqrt{w - w_{th}}, \tag{1}$$

где  $w$  – энергия импульсов,  $w_{th}$  – энергетический порог формирования домена,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

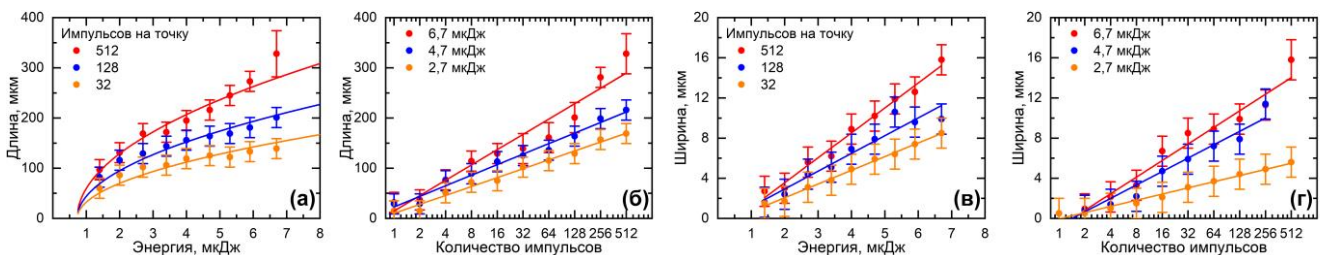


Рисунок 12 – Зависимости длины и ширины крыльев доменов в MgOCLT (а), (б) от энергии импульсов, (б),(г) от количества импульсов. Облучение Z- поверхности. Глубина фокусировки 300 мкм.



Пороговое значение энергии формирования домена составило 0,7 мкДж. Логарифмическая зависимость длины доменов от количества импульсов аналогична зависимости размеров изолированного домена от длительности импульса при локальном переключении [25] (Рисунок 12б). Такая зависимость свидетельствует о том, что пироэлектрическое поле не исчезает в паузе между импульсами. Аналогичные зависимости наблюдались и для ширины крыльев (Рисунок 12в,г).

Полученные особенности формы могут быть объяснены: (1) анизотропией роста, (2) существенным превышением пироэлектрического поля над пороговым, (3) неэффективным экранированием деполяризующего поля [20]. Трехлучевая форма доменов на полярной поверхности ранее наблюдалась в CLN при переключении поляризации с запаздыванием экранирования деполяризующего поля [26].

**В SLT** локальное облучение производилось через Z- полярную поверхность при глубине фокусировки 600 мкм импульсами с энергией от 1,4 до 5,4 мкДж при количестве импульсов от 1 до 1000.

Формы доменов аналогичны MgOCLN. При малых энергиях и количестве импульсов наблюдались обволакивающие домены, а при увеличении энергии и количества импульсов от микротрещок росли веретенообразные домены (Рисунок 13). Пороговое значение количества импульсов уменьшалось с ростом энергии.

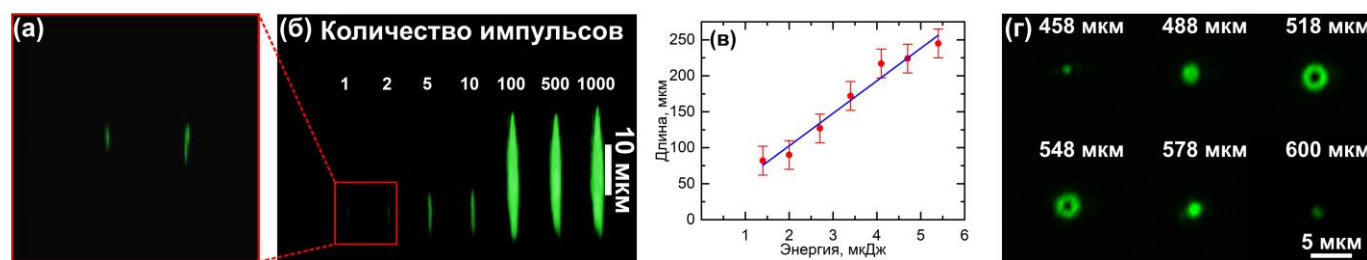


Рисунок 13 – (а) и (б) 2D МГВГ изображения доменов, созданных при различном количестве импульсов в SLT при глубине фокусировки 600 мкм и энергии импульсов 2,7 мкДж, вид сбоку. (в) Зависимость длины доменов от энергии для 1000 импульсов. (г) 2D МГВГ изображения поперечных сечений домена в объеме, 100 импульсов, 2,7 мкДж.

Поперечные сечения домена имели скругленную гексагональную форму, изменяющуюся до круглой к обоим концам домена.

### Объяснение

Представленное разнообразие форм возникающих доменов можно объяснить в рамках кинетического подхода. Ранее при изучении роста изолированных доменов в одноосных сегнетоэлектриках в широком диапазоне полей было показано, что в кристаллах с симметрией  $C_{3v}$  форма растущих доменов на поверхности изменяется от круглой для малых доменов к ограненной [2]. Увеличение превышения поля над порогом для генерации ступеней приводит к последовательному изменению формы доменов от трехлучевых звезд до треугольных, шестиугольных и круглых. Определяющую роль в изменении формы играет неизбежное запаздывание экранирования деполяризующих полей, которое приводит к наличию остаточного деполяризующего поля  $E_{rd} = E_{dep} - E_{scr}$  ( $E_{scr}$  – экранирующее поле), локальная величина которого уменьшается при уменьшении локальной кривизны доменной границы. Поэтому генерация ступеней происходит на вершинах многоугольных

доменов, а кинки растут вдоль стенок в выделенных  $Y$  направлениях. Незначительное превышение порога для генерации ступеней на вершинах домена приводит к формированию и росту доменов в форме трехлучевых звезд. При большем превышении растут треугольные и шестиугольные домены, а переход к стохастическому зародышеобразованию с равновероятной генерацией ступеней приводит к росту круглых доменов [27].

Отсутствие роста доменов, обволакивающих микротреки в CLN и при малых энергиях в SLT и MgOCLT, свидетельствует о том, что пироэлектрическое поле не превышает порогового значения даже для движения кинков [28].

Трехлучевая форма, образующаяся в MgOCLT обусловлена малым  $\Delta E$ , что приводит к генерации ступеней только вблизи вершин многоугольников и дальнейшему движению кинков вдоль  $Y$ -осей.

Гексагональная форма образующаяся в MgOCLN характерна для средних значений  $\Delta E$ , с генерацией ступеней только на вершинах многоугольников, соответствующих  $Y$ -осям и движением кинков вдоль всей доменной стенки.

Домены с круглым сечением формируются в MgOCLN и MgOCLT при больших величинах  $\Delta E$ , что приводит к стохастической генерации ступеней, поскольку пироэлектрическое поле превышает пороги генерации 2D-ступеней по всей границе зародыша. Такая форма характерна и для доменов малого размера.

Веретенообразные домены с круглым сечением формируются в SLT за счет аномально низких пороговых полей и значительному превышению порога, что приводит к стохастическому зародышеобразованию.

**Шестая глава** содержит результаты по созданию ДС в CLN линейным сканированием фемтосекундным лазерным излучением, сфокусированным в объеме.

Полосовые микротреки шириной около 1 мкм, возникающие в результате сканирования в объеме (Рисунок 1б) образцов CLN, визуализировались с помощью оптической микроскопии (Рисунок 14а).

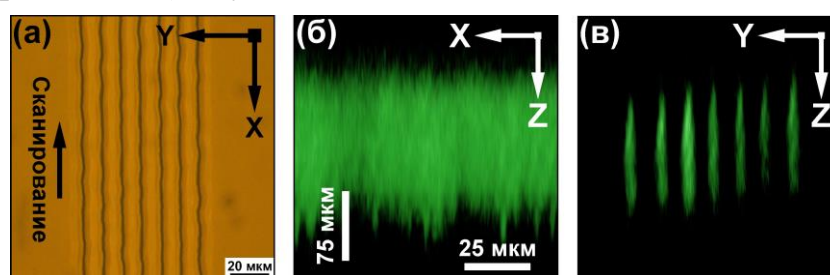


Рисунок 14 – (а) Оптическое и (б,в) 2D МГВГ изображения полосовых доменов в CLN. Сканирование через Z- поверхность. (б) XZ и (в) YZ поперечные сечения. Глубина фокусировки 500 мкм. Энергия импульсов (а) 6,7 и (б,в) 4,7 мкДж.

МГВГ визуализация показала, что домены, сформированные в объеме, имеют двойную гребневую форму (Рисунок 14б) в отличие от гребневой формы доменов, сформированных при нагреве поверхности CLT лазерным излучением дальнего ИК-диапазона (Рисунок 5). Длина гребневых доменов возрастала с увеличением энергии.

Особенности формы доменов и микротреков удалось выявить при помощи СМПО и АСМ визуализации с высокими пространственным разрешением поперечных сечений образцов, перпендикулярных направлению сканирования

(Рисунок 15). При энергии импульса менее 1,3 мкДж обволакивающие домены были локализованы вблизи геометрического фокуса излучения. Сечения доменов имели форму полос с заостренными концами. Удалось также визуализировать положение микротреков в объеме доменов (Рисунок 15а,в). На топографических изображениях поперечных сечений видны дискретные структуры микротреков с субволновым периодом. Эти структуры являются модифицированными областями кристалла, соответствующими максимумам стоячей волны, которая формировалась при интерференции падающего и отраженного от плазмы лазерного излучения [29].

При энергии более 1,3 мкДж сканирование приводило к формированию двух систем доменов на разной глубине от поверхности (Рисунок 15в,г). Эффект раздвоения связан с расщеплением лазерного пучка при прохождении через поверхность двулучепреломляющего кристалла [30]. При этом два фокуса соответствуют обыкновенному и необыкновенному лучам, с разными показателями преломления  $n_o = 2,234$  и  $n_e = 2,157$ .

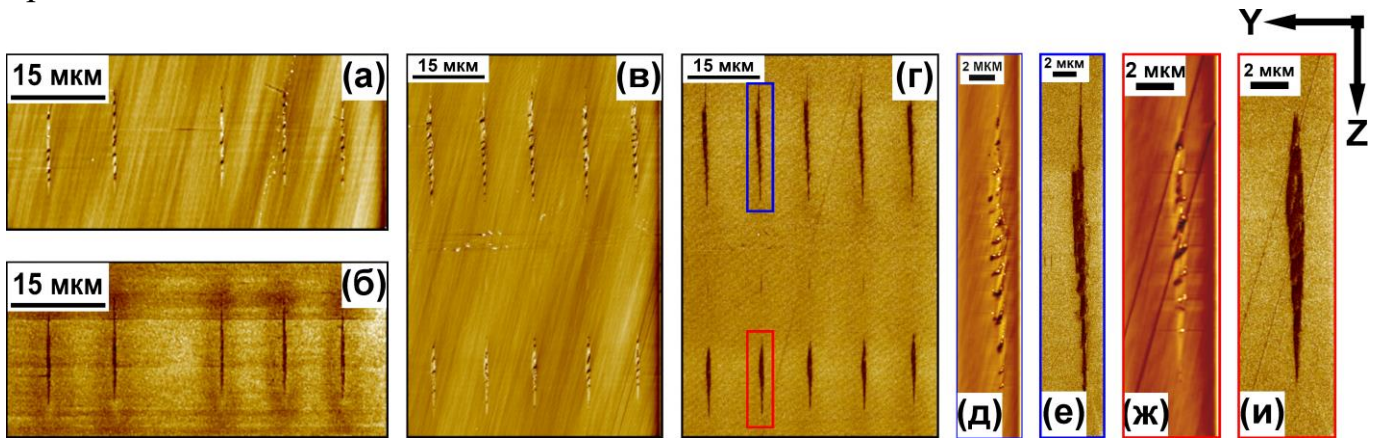


Рисунок 15 – Изображения поперечных сечений полосовых доменов в CLN. Сканирование через Z-поверхность. Энергии импульсов: (а,б) 1,3 мкДж, (в-и) 3,4 мкДж. (а,в,д,ж) топография, (б,г,е,и) фаза. Глубина фокусировки 500 мкм. Скорость сканирования 2 мм/с.

Наличие двух фокусов формировало две области образования плазмы в объеме CLN, приводящих к микроаморфизации. С ростом энергии происходило удлинение поперечного сечения микротреков в сторону источника излучения, обусловленное самофокусировкой при высоких интенсивностях излучения (Рисунок 15в,г).

Дискретная структура микротреков обусловлена превышением порога плотности энергии для изменения кристаллической структуры в максимумах интерференции падающего и отраженного от плазмы излучения [29].

### Рост домена

Объяснение формы доменов и их роста под действием пироэлектрического поля проводится в рамках кинетического подхода [19]. Движущей силой генерации ступеней, определяющей скорость движения стенки, является превышение полярной компоненты локального поля  $E_{loc.z}$  над пороговым значением  $\Delta E = E_{loc.z} - E_{th.s}$ ,

$$\frac{dn}{dt}(\mathbf{r}, t) = p\Delta E(\mathbf{r}, t) = p(E_{loc.z}(\mathbf{r}, t) - E_{th.s}), \quad (2)$$

где  $n$  – количество ступеней,  $p$  – коэффициент.

$$E_{loc.z}(\mathbf{r}, t) = E_{pyr.z}(\mathbf{r}, t) + E_{dep.z}(\mathbf{r}, t) - E_{b.scr.}(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

где  $E_{pyr.z}$  и  $E_{dep.z}$  – полярные компоненты пирозлектрического (Рисунок 16а) и деполаризующего (Рисунок 16б) полей,  $E_{b.scr.}$  – поле объемного экранирования [11].

Аналогичное рассмотрение было использовано ранее при экспериментальном изучении роста домена на неполярном срезе CLN при локальном приложении электрического поля проводящим зондом СЗМ. При этом рост основания клиновидного домена с заряженными стенками происходил за счет генерации ступеней под действием приложенного поля, а прямое прорастание домена - за счет движения кинков в поле, создаваемом соседними заряженными кинками [25,31].

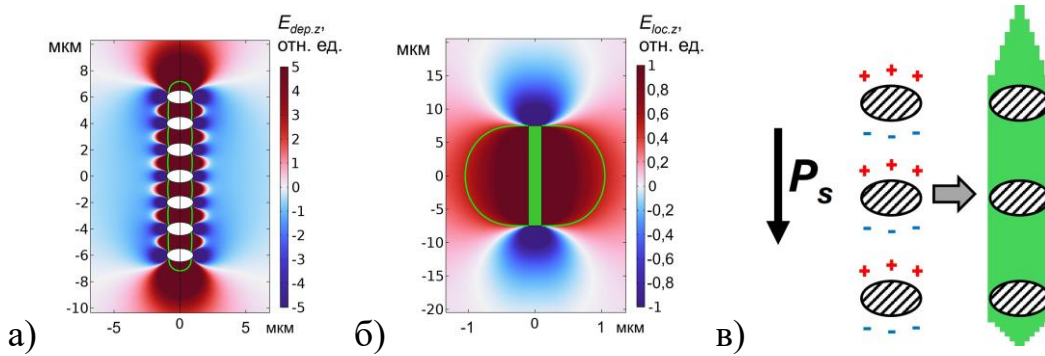


Рисунок 16 – Пространственное распределение  $E_{loc.z}$ : (а) вблизи цепи микротроек эллиптической формы (зеленая линия - граница области генерации ступеней  $E_{loc.z} - E_{th.s} = 0$ ); (б) вблизи обволакивающего домена после облучения. (в) Схема формирования обволакивающего домена, локализованного на цепи микротроек.

Предложенный механизм позволяет объяснить формирование нейтральных доменных стенок проросших доменов (Рисунок 5в,г). После прорастания доменов до Z- поверхности на ней начиналась генерация ступеней и встречное движение кинков с зарядом противоположного знака. В результате аннигиляции кинков доменная стенка становилась нейтральной.

Расчет пространственного распределения полярной компоненты локального поля вблизи цепи микротроек (Рисунок 16а) показал, что обволакивающий домен формируется в области генерации ступеней  $E_{loc.z} - E_{th.s} = 0$ . Веретенообразная форма обволакивающего домена обусловлена движением кинков (Рисунок 16б). Дальнейший рост домена после облучения фемтосекундными импульсами происходит за счет генерации ступеней в более широкой области (Рисунок 16б).

Рост сформированных в объеме доменов в результате температурного отжига обусловлен действием  $E_{pyr}$ , которое возникает при охлаждении. Для формирования сквозных доменов с нейтральными стенками необходимо, чтобы  $E_{loc.z}$  превосходило порог движения кинков ( $E_{th.k}$ ), но было меньше порога генерации ступеней ( $E_{th.s}$ ) [19]:

$$E_{th.k} < E_{loc.z} < E_{th.s}. \quad (4)$$

Величину  $E_{loc.z}$  можно контролировать за счет изменения температуры отжига и скорости охлаждения образца.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Исследование формирования доменной структуры в кристаллах семейства LN и LT в результате облучения импульсным лазерным излучением дальнего и ближнего ИК диапазона позволило сделать следующие основные выводы:

1. Показано, что геометрия полосовой ДС, формируемой в CLT в результате локального облучения микросекундным импульсом поглощаемого в поверхностном слое лазерного излучения, зависит от концентрации зародышей, образующихся под действием пироэлектрического поля.
2. Установлено, что облучение CLT с проводящим слоем на поверхности излучением дальнего ИК-диапазона приводит к формированию за пределами зоны облучения параллельных полосовых доменов, благодаря наличию во внешней области пироэлектрического поля достаточного лишь для удлинения доменов.
3. Показано, что в результате облучения фемтосекундным лазерным излучением, сфокусированным в объеме сегнетоэлектрика, формируются, обволакивающие области структурных повреждений (микротреки) домены под действием деполяризующих полей, возникающих вблизи границ микротреков.
4. Установлено, что рост сформированных облучением обволакивающих доменов в результате термического отжига, обусловлен локальным превышением полярной компоненты пироэлектрического поля над порогом генерации ступеней на доменных стенках.
5. Показано, что изменение формы доменов при прорастании к поверхности от гексагональных пирамид к гексагональным призмам обусловлено встречным движением и аннигиляцией кинков с зарядом противоположного знака.
6. Установлено, что различные формы доменов, формирующихся в объеме исследованных кристаллов семейства LN и LT, определяются локальным превышением пироэлектрического поля над пороговыми значениями для генерации ступеней и движения кинков.
7. Впервые показано, что облучение фемтосекундным лазерным излучением позволяет создать в объеме MgOCLT домены с поперечным сечением в форме трехлучевых звезд.
8. Впервые показано, что линейное сканирование сфокусированным фемтосекундным лазерным пучком приводит к формированию в объеме одноосного сегнетоэлектрика доменов в форме двойных гребней.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Полученные результаты будут использованы для дальнейшего развития методов доменной инженерии при создании нелинейных фотонных кристаллов на основе сегнетоэлектриков. Дальнейшие исследования особенностей формирования доменных структур под действием сфокусированного в объеме ИК фемтосекундного лазерного излучения, будут направлены на поиск новых возможностей по управлению формой доменов при создании трехмерных фотонных кристаллов.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bazzan, M. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications / Bazzan M. and Sada C. // *Appl. Phys. Rev.* – 2015. – Vol. 2. – № 4. – P. 040603.
2. Shur, V. Y. Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate / V. Y. Shur, A. R. Akhmatkhanov, I. S. Baturin // *Appl. Phys. Rev.* – 2015. – Vol. 2. – P. 040604.
3. Shape of charged domain walls in bidomain lithium tantalate plates with composition gradients / Greshnyakov E.D. et al. // *Ferroelectrics* – 2022. – Vol. 592. – № 1. – P. 26-36.
4. Shur, V.Ya. Micro- and nanodomain imaging in uniaxial ferroelectrics: Joint application of optical, confocal Raman, and piezoelectric force microscopy / V.Ya. Shur and P.S. Zelenovskiy // *J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 116. – № 6. – P. 066802.
5. Arie, A. Periodic, quasi-periodic, and random quadratic nonlinear photonic crystals / Arie A. and Voloch N. // *Laser Photon. Rev.* – 2010. – Vol. 4. – № 3. – P. 355-373.
6. Zhang, B. Recent advances in femtosecond laser processing of LiNbO<sub>3</sub> crystals for photonic applications / B. Zhang B., L. Wang, F. Chen // *Laser Photonics Rev.* – 2020. – Vol. 14. – № 8. – P. 1900407.
7. Quasi-phase matching via femtosecond laser-induced domain inversion in lithium niobate waveguides / Chen X. et al. // *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41. – № 11. – P. 2410.
8. Local domain inversion in MgO-doped lithium niobate by pyroelectric field-assisted femtosecond laser lithography / Imbrock J. et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2018. – Vol. 113. – № 25. – P. 252901.
9. Thermally assisted fabrication of nonlinear photonic structures in lithium niobate with femtosecond laser pulses / Imbrock J. et al. // *Opt. Express* – 2022. – Vol. 30. – № 22. – P. 39340.
10. *In situ* investigation of formation of self-assembled nanodomain structure in lithium niobate after pulse laser irradiation / Shur V.Ya. et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 99. – № 8. – P. 082901.
11. Dimensionality increase of ferroelectric domain shape by pulse laser irradiation / Shur V.Ya. et al. // *Acta Mater.* – 2021. – Vol. 219. – P. 117270.
12. Sakakura, M. Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass / Sakakura M. and Terazima M. // *Phys. Rev. B* – 2005. – Vol. 71. – № 2. – P. 024113.
13. Observation of pressure wave generated by focusing a femtosecond laser pulse inside a glass / Sakakura M. et al. // *Opt. Express* – 2007. – Vol. 15. – № 9. – P. 5674-5686.
14. Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications / Tan D., Sharafudeen K.N., Yue Y., Qiu J. // *Prog. Mater. Sci.* – 2016. – Vol. 76. – P. 154-228.
15. Generation of optical harmonics / Franken P.A. et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 1961. – Vol. 7. – № 4. – P. 118-119.
16. Three-dimensional ferroelectric domain visualization by Čerenkov-type second harmonic generation / Sheng Y. et al. // *Opt. Express* – 2010. – Vol. 18. – № 16. – P. 16539-16545.
17. Formation of self-similar surface nano-domain structures in lithium niobate under highly nonequilibrium conditions / Shur V.Ya. et al. // *Ferroelectrics* – 2006. – Vol. 341. – № 1. – P. 85-93.
18. Self-assembled shape evolution of the domain wall and formation of nanodomain wall traces induced by multiple IR laser pulse irradiation in lithium niobate / Shur V.Ya. et al. // *J. Appl. Phys.* – 2020. – Vol. 127. – № 9. – P. 094103.
19. Shur, V.Ya. Kinetics of ferroelectric domains: Application of general approach to LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub> / Shur V.Ya. // *J. Mater. Sci.* – 2006. – Vol. 41. – № 1. – P. 199-210.
20. Shur, V.Ya. Micro- and nanodomain engineering in lithium niobate / V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov, I.S. Baturin // *Appl. Phys. Rev.* – 2015. – Vol. 2. – № 4. – P. 040604.
21. 3D Imprinting of voxel-level structural colors in lithium niobate crystal / Wang Z. et al. // *Adv. Mater.* – 2023. – Vol. 35. – № 47. – P. 2303256.
22. Role of stoichiometric point defect in electric-field-poling lithium niobate / Bermúdez V. et al. // *Appl. Phys. A* – 2000. – Vol. 70. – № 5. – P. 591-594.
23. Effect of Mg concentration on the domain reversal of Mg-doped LiNbO<sub>3</sub> / Chen Y. et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 87. – № 21. – P. 212904.

24. Tip-induced domain growth on the nonpolar cut of lithium niobate with various stoichiometry deviations / Greshnyakov E.D. et al. // J. Appl. Phys. – 2022. – Vol. 131. – № 21. – P. 214103.
25. Tip-induced domain growth on the non-polar cuts of lithium niobate single-crystals / Alikin D.O. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 106. – № 18. – P. 182902.
26. Shape evolution of isolated microdomains in lithium niobate / Shur V.Ya. et al. // Ferroelectrics – 2011. – Vol. 360. – № 1. – P. 111-119.
27. Shape of isolated domains in lithium tantalate single crystals at elevated temperatures / Shur V.Ya. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 103. - № 24. – P. 242903.
28. Shur, V.Ya. Domain shapes in bulk uniaxial ferroelectrics / Shur V.Ya., Pelegova E.V. and Kosobokov M.S. // Ferroelectrics – 2020. – Vol. 569. – № 1. – P. 251-265.
29. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses / Shimotsuma Y. et al. // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 91. – № 24. – P. 247405.
30. Laser-writing inside uniaxially birefringent crystals: fine morphology of ultrashort pulse-induced changes in lithium niobate / Karpinski P. et al. // Opt. Express – 2016. – Vol. 24. - № 7. – P. 7456-7476.
31. Forward growth of ferroelectric domains with charged domain walls. Local switching on non-polar cuts / V.Ya. Shur et al. // J. Appl. Phys. – 2021. – Vol. 129. – № 4. – P. 044103.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Kudryashov, S. Ferroelectric nanodomain engineering in bulk lithium niobate crystals in ultrashort-pulse laser nanopatterning regime / S. Kudryashov, A. Rupasov, M. Kosobokov, A. Akhmatkhanov, G. Krasin, P. Danilov, **B. Lisjikh**, A. Turygin, E. Greshnyakov, M. Kovalev, V. Shur // Nanomaterials – 2022. Vol. 12. – № 23. – P. 4147. – 0,71 п.л./ 0,07 п.л. – (Scopus, Web of Science).
2. Lisjikh, B.I. Thermally assisted growth of bulk domains created by femtosecond laser in magnesium doped lithium niobate / **B.I. Lisjikh**, M.S. Kosobokov, A.V. Efimov, D.K. Kuznetsov, V.Ya. Shur // Ferroelectrics – 2023. – Vol. 604. – № 1. – P. 46-51. – 0,41 п.л./ 0,2 п.л. – (Scopus, Web of Science).
3. Gulina, Y. Dimensional analysis of double-track microstructures in a lithium niobate crystal induced by ultrashort laser pulses / Y. Gulina, J. Zhu, A. Gorevoy, M. Kosobokov, A. Turygin, B. Lisjikh, A. Akhmatkhanov, V. Shur, S. Kudryashov // Photonics – 2023. – Vol. 10. – № 10. – P. 582. – 0,7 п.л./ 0,08 п.л. – (Scopus, Web of Science).
4. Lisjikh, B. Creation of a periodic domain structure in MgOLN by femtosecond laser irradiation / B. Lisjikh, M. Kosobokov, A. Turygin, A. Efimov, V. Shur // Photonics – 2023. – Vol. 10. – № 11. – P. 1211. – 0,95 п.л./ 0,5 п.л. – (Scopus, Web of Science).

*Другие публикации:*

5. Лисьих, Б.И. Локальное переключение поляризации в ниобате лития в результате облучения сфокусированным излучением фемтосекундного лазера / **Б.И. Лисьих**, М.С. Кособоков, А.В. Ефимов, А.Р. Ахматханов, В.Я. Шур // Сборник тезисов IV семинара «Современные нанотехнологии» (IWMN-2022), Екатеринбург, Россия, 24-27 Августа, 2022. – С. 103-104. 0,13 п.л. / 0,08 п.л.
6. Lisjikh, B.I. Formation of ferroelectric domains in MgO-doped lithium niobate by femtosecond laser irradiation / **B.I. Lisjikh**, M.S. Kosobokov, A.V. Efimov, D.K. Kuznetsov, V.Ya. Shur // Abstract Book of International Conference Materials Science and Nanotechnology (MSN-2023), Ekaterinburg, Russia, August 27-30, 2023. – P. 61. 0,08 п.л. / 0,05 п.л.
7. Kosobokov, M. Hierarchical nanopatterns inscribed by femtosecond laser pulses in lithium niobate / M. Kosobokov, S. Kudryashov, A. Rupasov, A. Akhmatkhanov, G. Krasin, P. Danilov, **B. Lisjikh**, A. Turygin, A. Abramov, E. Greshnyakov, E. Kuzmin, M. Kovalev, A. Efimov, V.

- Shur // Abstract Book of International Conference Materials Science and Nanotechnology (MSN-2023), Ekaterinburg, Russia, August 27-30, 2023. – P. 60. 0,08 п.л. / 0,005 п.л.
8. Lisjikh, B. Bulk domains growth created by femtosecond laser in magnesium doped lithium niobate / **B. Lisjikh**, M. Kosobokov, A. Efimov, D. Kuznetsov, V. Shur // Book of Abstracts of International Conference Advanced Laser Technologies (ALT'23), Samara, Russia, September 18-21, 2023. – P. 67. 0,09 п.л. / 0,06 п.л.
  9. Lisjikh, B. Hierarchical multi-scale coupled periodical photonic nanopatterns inscribed in lithium niobate by femtosecond laser / M. Kosobokov, S. Kudryashov, A. Rupasov, A. Akhmatkhanov, G. Krasin, P. Danilov, **B. Lisjikh**, A. Turygin, A. Abramov, E. Greshnyakov, E. Kuzmin, M. Kovalev, A. Efimov, V. Shur // Book of Abstracts of International Conference Advanced Laser Technologies (ALT'23), Samara, Russia, September 18-21, 2023. – P. 250. 0,08 п.л. / 0,005 п.л.
  10. Лисьих, Б.И. Создание доменных структур в кристаллах ниобата лития при помощи ультракоротких лазерных импульсов / **Б.И. Лисьих**, М.С. Кособоков, А.В. Ефимов, Д.К. Кузнецов, В.Я. Шур // Сборник тезисов XXIII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXIII), Тверь, Россия, 3-6 Октября, 2023. – С. 50. 0,09 п.л. / 0,06 п.л.