

На правах рукописи

САВЕЛЬЕВ Евгений Дмитриевич

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ
И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ,
МОДИФИЦИРОВАННОМ МЕТОДОМ ПРОТОННОГО ОБМЕНА**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2023

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: **Кострицкий Сергей Михайлович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, ООО Научно-Производственная
Компания «Оптолинк», г. Москва, Зеленоград,
технический директор Зеленоградского
отделения;

Волынец Анатолий Борисович,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГАОУ ВО «Пермский
государственный национальный
исследовательский университет», г. Пермь,
заведующий кафедрой нанотехнологий и
микросистемной техники.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет»,
г. Екатеринбург.

Защита состоится 27 октября 2023 в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.133.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского Отделения Российской Академии наук (ИФМ УрО РАН), расположенном по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imf.uran.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат.наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Сегнетоэлектрические кристаллы широко применяются в акустике [1], микроэлектронике [2] и оптике [3]. В последние годы бурно развивается доменная инженерия [4] - область знаний, изучающая способы создания в сегнетоэлектриках доменной структуры (ДС) заданной геометрии для практических применений.

Одним из наиболее широко используемых сегнетоэлектрических кристаллов является ниобат лития (LiNbO_3). Хорошо разработанная технология выращивания кристаллов методом Чохральского позволяет получать высококачественные кристаллы ниобата лития конгруэнтного состава (CLN) большого размера. CLN обладает высокими значениям пьезоэлектрических и нелинейно-оптических коэффициентов [5] и высокой температурой фазового перехода, что позволяет применять его для создания различных устройств акустооптики, нелинейной и интегральной оптики [6].

Для применений в области телекоммуникаций и интегральной оптики в кристаллах CLN создают оптические волноводы. Одним из наиболее популярных методов создания оптических волноводов в CLN является протонный обмен (proton exchange, PE) [7]. В этом случае изменение коэффициента преломления в приповерхностном слое пластины CLN происходит за счет замены ионов лития на протоны. В качестве источника протонов обычно используют бензойную кислоту. Для реализации мягкого протонного обмена (soft proton exchange, SPE) в бензойную кислоту добавляют бензоат лития, что замедляет процесс обмена и приводит к созданию волновода с градиентом состава [8].

Создание регулярных доменных структур (РДС) в монокристаллах CLN позволяет использовать эффект фазового квазисинхронизма [9] для реализации генерации второй гармоники (ГВГ) и параметрической генерации света с рекордно высокой эффективностью. Наиболее распространенным методом создания РДС является приложение внешнего электрического поля с использованием системы полосовых электродов, созданных с помощью фотолитографии. В последнее время развиваются новые методы создания РДС с помощью локального переключения поляризации сканированием сфокусированным пучком электронов или ионов, а также применением поля проводящим зондом сканирующего зондового микроскопа. Следует отметить, что важное практическое значение имеет создание оптических волноводов с регулярной доменной структурой для преобразования длины волны излучения, что требует исследования кинетики доменной структуры в кристаллах PE CLN. Следует отметить, что низкая проводимость модифицированного приповерхностного слоя PE CLN [10] затрудняет экранирование деполяризующего поля при переключении поляризации. При этом эволюция доменной структуры представляет собой сильно неравновесный процесс, который рассматривается как аналог фазового перехода первого рода. Создание оптических волноводов методом PE

приводит к формированию градиента состава в приповерхностном слое, который создает «встроенное» электрическое поле, оказывающее существенное влияние на кинетику доменной структуры. Кроме того, приповерхностный слой является искусственным диэлектрическим зазором, который уменьшает эффективность внешнего экранирования и приводит к запаздыванию экранирования деполяризующего поля. Исследование особенностей эволюции доменной структуры при переключении поляризации при неполном экранировании деполяризующего поля и наличии градиента состава является важной фундаментальной задачей физики сегнетоэлектриков.

Цели работы:

Изучить формирование регулярной доменной структуры и преобразование длины волны лазерного излучения в модифицированных монокристаллах ниобата лития.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие **основные задачи:**

1. Выявить и объяснить особенности аномального роста полосовых доменов на полярной поверхности при переключении поляризации в монокристаллах ниобата лития, модифицированных методом мягкого протонного обмена.
2. Установить критерии контролируемого изменения пространственного распределения состава в поверхностном слое для управления диапазоном полей, в котором наблюдается аномальная кинетика доменной структуры в модифицированных монокристаллах ниобата лития.
3. Выявить условия создания квазипериодических и регулярных полосовых доменных структур в модифицированных монокристаллах ниобата лития.
4. Реализовать генерацию второй гармоники в ближнем УФ диапазоне в монокристаллах ниобата лития, легированных магнием, с регулярной доменной структурой, созданной методом сканирования сфокусированным электронным пучком.

Объекты исследования.

Пластины CLN толщиной 0,5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси и отполированные до оптического качества, в которых проведен мягкий протонный обмен длительностью от 12 до 72 часов в бензойной кислоте с добавлением 3,0% бензоата лития при температуре 300°C.

Пластины конгруэнтного ниобата лития, легированного Mg с регулярной доменной структурой, созданной облучением сфокусированным электронным пучком Z- полярной поверхности, покрытой слоем фоторезиста.

Научная новизна работы:

1. Изучен эффект формирования и анизотропного роста полосовых доменов

на полярной поверхности одноосного сегнетоэлектрика с модифицированным поверхностным слоем в однородном электрическом поле.

2. Изучен эффект аномального уменьшения пороговых полей формирования и роста полосовых доменов на полярной поверхности одноосного сегнетоэлектрика с модифицированным поверхностным слоем, вызванный наличием градиента состава.
3. Продемонстрировано формирование квазипериодических полосовых доменных структур, растущих от плоской доменной стенки в модифицированных монокристаллах одноосного сегнетоэлектрика.

Теоретическая значимость проведенных исследований.

1. Продемонстрирована необходимость учета влияния градиента состава на пороговые поля образования и роста доменов в кристаллах с пространственно неоднородным составом.
2. Показано, что формирование структуры полосовых доменов в одноосном сегнетоэлектрике при переключении в растущем поле может быть описано в рамках модифицированной модели Колмогорова-Аврами.

Практическая значимость проведенных исследований

1. Исследованный анизотропный рост полосовых доменов открывает возможности для изготовления регулярных доменных структур в волноводах, созданных в монокристаллах ниобата лития методом мягкого протонного обмена.
2. Контролируемое значительное уменьшение пороговых полей при увеличении длительности протонного обмена представляет значительный интерес для развития методов доменной инженерии в интегральной оптике.
3. Получение излучения с длиной волны 374 нм методом генерации второй гармоники в монокристаллах ниобата лития с регулярной доменной структурой с периодом 2 мкм, созданной методом сканирования сфокусированным электронным пучком, представляет значительный интерес для генерации ультрафиолетового излучения.

Методология и методы исследования.

Систематические экспериментальные исследования доменной структуры проводились с использованием современного высокоточного аналитического оборудования. *In situ* визуализация эволюции ДС производилась при помощи оптической микроскопии с использованием высокоскоростной камеры. Пространственное распределение ионов H^+ в исследуемых пластинах измерялось с помощью конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния света (КМКР). Неразрушающая визуализация ДС на поверхности выполнялась сканирующей микроскопией пьезоэлектрического отклика (СМПО). Визуализация доменов в объеме проводилась с использованием КМКР и микроскопии генерации второй гармоники Черенкова (МГВГ). Для

создания изолированных доменов и доменных структур использовалось локальное переключение поляризации зондом сканирующего зондового микроскопа.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением поверенных и калиброванных средств измерений, аттестованных методик измерений, надежной статистикой экспериментов, применением современных и независимых методов обработки экспериментальных данных, согласием с результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям. Достоверность расчетов подтверждается обоснованностью допущений, а также согласованностью с экспериментальными результатами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аномальный рост полосовых доменов на полярной поверхности при переключении поляризации в монокристаллах ниобата лития, модифицированных методом мягкого протонного обмена, обусловлен неэффективным экранированием деполяризующего поля, вызванным наличием диэлектрического зазора.
2. Аномальное уменьшение порогового поля зарождения и роста полосовых доменов в результате проведения мягкого протонного обмена обусловлено формированием в приповерхностном слое связанного внутреннего электрического поля, пропорционального градиенту состава.
3. Формирование квазипериодических доменных структур при росте полосовых доменов от плоской доменной стенки обусловлено электростатическим взаимодействием полосовых доменов с заряженными доменными стенками.
4. Создание стабильной регулярной доменной структуры с периодом 500 нм при локальном переключении спонтанной поляризации зондом сканирующего зондового микроскопа при повышенной температуре 358 К обусловлено ростом эффективности экранирования и уменьшением пороговых полей.
5. Генерация второй гармоники излучения с длиной волны 373 нм в легированном магнием ниобате лития с регулярной доменной структурой, созданной сфокусированным электронным пучком, с нормированной эффективностью 0,4%/(Вт·см), обусловлена высоким совершенством доменной структуры.

Апробация результатов.

Основные результаты работы были представлены на 5 российских и международных конференциях и симпозиумах: 1) Международной конференции “Исследование сегнетоэлектрических материалов российскими учеными. Столетие открытия сегнетоэлектричества” (СЭ-100) (Екатеринбург, 2020), 2) XXII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXII) (Екатеринбург, 2021), 3) IV Международном семинаре «Современные нанотехнологии» (IWMN-2022) (Екатеринбург, 2022),

4) Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская Фотоника – 2022» (Красноярск, 2022), 5) Международной конференции International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF-FPM-ЕСAPD-2022) (Тур, Франция, 2022).

Соответствие паспорту научной специальности. Результаты, представленные в диссертационной работе, соответствуют пункту №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» Паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты опубликованы в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных журналах, определенных Перечнем ВАК РФ и входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS, в 5 тезисах международных и всероссийских конференций и разработана одна программа для ЭВМ. Диссертационная работа выполнена с использованием оборудования Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» Института естественных наук и математики УрФУ в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (грант 20-32-90192 Аспиранты).

Основные результаты были получены лично автором или при его активном участии. Выбор направления исследований, обсуждение результатов и формулировка задач проводились совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором В. Я. Шуром, к.ф.-м.н., с.н.с. А.Р. Ахматхановым. Изготовление образцов, переключение поляризации, визуализация ДС методами оптической микроскопии и КМКР, исследование параметров ДС, обработка результатов проводились автором. Локальное переключение поляризации и визуализация ДС методом СМПО проводились с к.ф.-м.н., м.н.с. Б.Н. Слаутиным, м.н.с. Л.В. Гимадеевой и м.н.с. А.С. Абрамовым. Визуализация ДС методом МГВГ проводилась совместно с н.с. М. С. Небогатиковым и к.ф.-м.н., м.н.с. А.С. Слаутиной.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем работы составляет 119 страниц, включая 65 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 170 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы научно-квалификационной работы и степень ее разработанности, сформулирована основная цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту, определены объекты исследования, показаны научная новизна результатов, теоретическая и

практическая значимости проведенных исследований, описаны методология и методы исследования. Представлены сведения о достоверности и апробации результатов, о публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе представлен обзор современных представлений о формировании и эволюции ДС во внешнем электрическом поле с учетом процессов экранирования. Описаны основные физические свойства и особенности ДС одноосного сегнетоэлектрика CLN. Представлены основные методы создания планарных и канальных волноводов в монокристаллах CLN. Уделено внимание особенностям различных методов протонного обмена. Рассмотрены методы визуализации ДС на поверхности и в объеме сегнетоэлектриков. Представлены результаты создания регулярной ДС и генерации второй гармоники в волноводных структурах.

Вторая глава является методической и содержит параметры образцов, описание экспериментальных установок и использованных методик.

Протонный обмен проводился при температуре 300°C в бензойной кислоте с добавлением бензоата лития. Для проведения протонного обмена образец закреплялся в верхней части циркониевого контейнера (Рисунок 1а). Для уменьшения влияния адсорбированной воды контейнер с образцом подвергался отжигу в вакууме при 110°C . Последующие манипуляции с контейнером проводились в сухой атмосфере. В нижнюю часть контейнера помещался источник протонов (Рисунок 1а), контейнер закрывался и откачивался до 10^{-3} мБар. Протонный обмен проводился при 300°C .

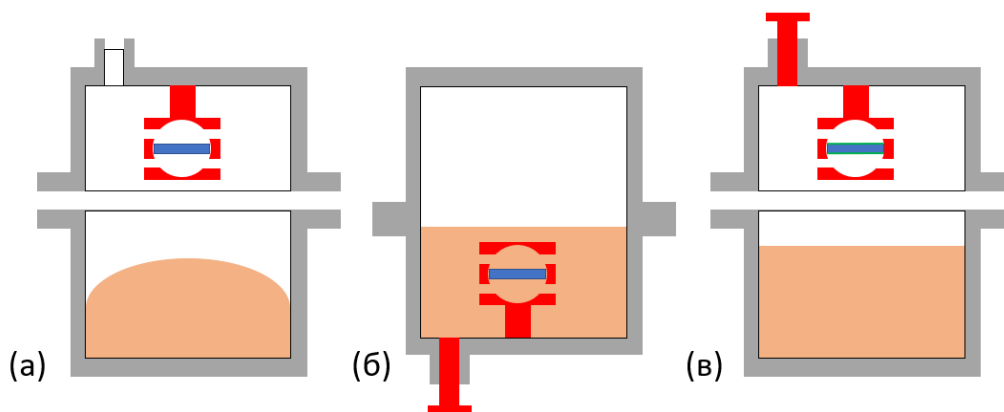


Рисунок 1 – Этапы протонного обмена: (а) – сборка ячейки, (б) – протонный обмен, (в) – завершение протонного обмена

Разогретый до 300°C контейнер переворачивали (Рисунок 1б) и образец погружался в источник протонов. После завершения протонного обмена контейнер переворачивали и охлаждали до комнатной температуры (Рисунок 1в). Скорости изменения температуры не превышали $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

В результате протонного обмена в приповерхностном слое образовывалось соединение $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ с неоднородно распределенной по глубине концентрацией H^+ . Распределение концентрации H^+ измерялось методом конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния (КМКР) с субмикронным разрешением с помощью Alpha 300 AR, WiTec (Германия).

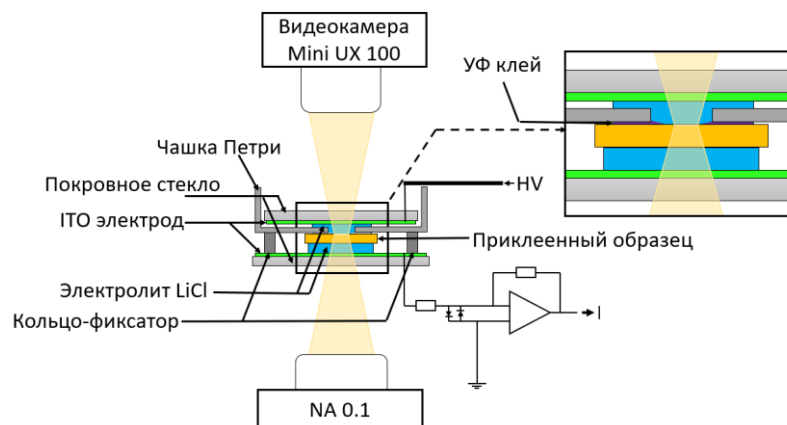


Рисунок 2 – Схема установки для переключения поляризации в однородном поле с *in situ* визуализацией кинетики доменной структуры

Для переключения поляризации в однородном поле образцы помещались в ячейку с прозрачными жидкими электродами на основе насыщенного раствора LiCl (Рисунок 2). Переключение осуществлялось (Рисунок 3а) прямоугольными импульсами (в постоянном поле) длительностью до 300 с и амплитудой от 0,1 до 25 кВ/мм, а также треугольными импульсами (в растущем поле) (Рисунок 3б) со скоростью возрастания поля 200 В/(мм·с). Импульсы генерировались АЦП/ЦАП платой PCI-6251 (National Instruments, США) или генератором сигналов AFG1022 (Tektronix, США) и усиливались с помощью высоковольтного усилителя Trek 20/20с (Trek inc., США). Переключение в растущем поле использовалось для определения пороговых полей роста доменов разной формы: полосовых и гексагональных.

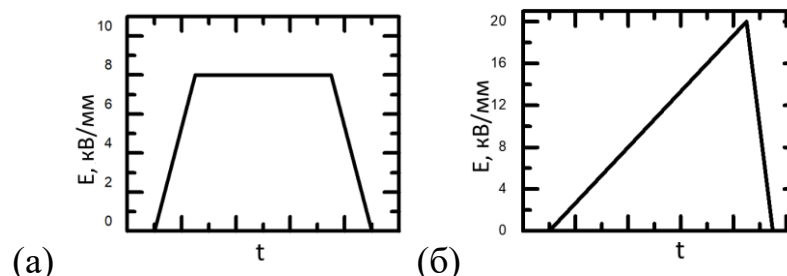


Рисунок 3 – Форма переключающих импульсов: (а) – прямоугольный, (б) – треугольный

In situ визуализация доменной структуры осуществлялась при помощи оптического микроскопа LMA10 (Carl Zeiss, Германия) с высокоскоростной видеокамерой Fastcam Mini UX100 (Photron, Япония), синхронизированной с импульсами поля.

Визуализация статической доменной структуры производилась как на поверхности, так и в объеме. На поверхности: (1) методом сканирующей микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО) с разрешением около 30 нм с помощью сканирующего зондового микроскопа Ntegra Aura (НТ-МДТ, Россия) и (2) оптической микроскопии с разрешением около 500 нм с помощью микроскопа VX-61 (Olympus, Япония). В объеме: (1) методом КМКР на основе анализа пространственного распределения смещений линий 581 см^{-1} E(TO₈) и 872 см^{-1} A₁(LO₄) в спектре комбинационного рассеяния с разрешением около 500 нм и (2) методом микроскопии генерации второй

гармоники (МГВГ) с использованием установки, изготовленной на базе Ntegra Spectra (NT-MDT, Россия) с разрешением около 1 мкм.

Зависимость от глубины концентрации H^+ ($C(z)$) в образце определялась методом КМКР. Измерялись параметры линии спектра комбинационного рассеяния 3492 см^{-1} , соответствующей колебаниям OH^- группы, которая пропорциональна концентрации ионов H^+ [11] (Рисунок 4а). Максимальная интенсивность линии определялась с помощью аппроксимации результатов измерений функцией Лоренца (Рисунок 4б).

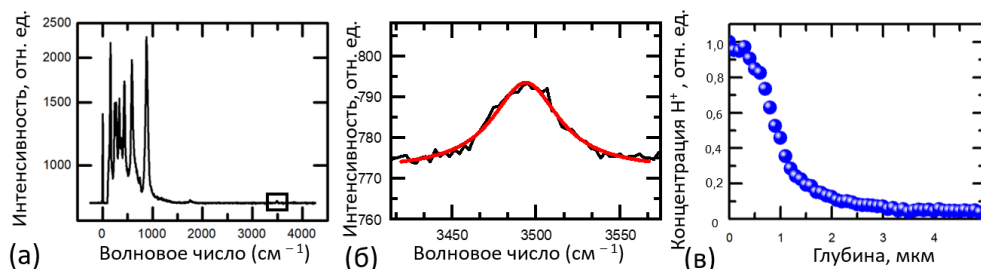


Рисунок 4 – (а) – Спектр комбинационного рассеяния SPE CLN. (б) – Линия спектра 3492 см^{-1} , аппроксимированная функцией Лоренца. (в) – Зависимость от глубины относительной концентрации ионов H^+

Создание изолированных доменов и доменных структур методом локального переключения, а также их визуализация на поверхности методом СМПО производились при помощи сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) MFP-3D (Oxford Instruments, США) и Ntegra Aura (NT-MDT, Россия). Использовались кремневые зонды с проводящим покрытием NSC 01 (Mikromash, Эстония) и HA_NC/W₂C (ScanSens, Германия).

Регулярная доменная структура (РДС) создавалась облучением Z-полярной поверхности сфокусированным электронным пучком. Облучаемая поверхность методом центрифугирования покрывалась слоем фоторезиста AZ nLOF 2020 (MicroChemicals, Германия) толщиной 2 мкм. На противоположную (Z^+) полярную поверхность магнетронным распылением наносился медный электрод толщиной 100 нм. Период созданной РДС составлял 2 мкм при площади $1,5 \times 0,5\text{ мм}^2$. Использовался сканирующий электронный микроскоп Auriga Crossbeam Workstation (Carl Zeiss, Германия) с системой электронно-лучевой литографии Elphy Multibeam (Raith GmbH, Германия). Ускоряющее напряжение составляло 8 кВ, ток пучка 1,29 нА, скорость сканирования 0,52 мм/с, доза 2,5 мКл/ cm^2 .

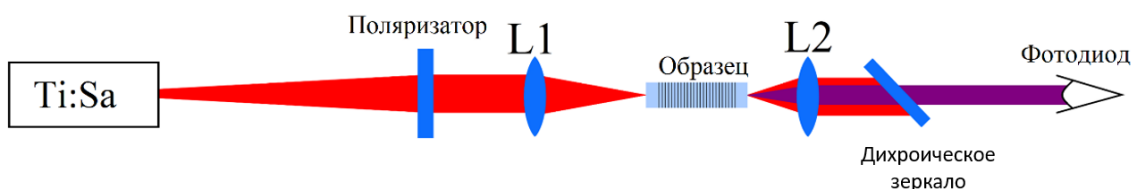


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки для исследования генерации второй гармоники в кристаллах с РДС

Для изучения генерации второй гармоники (ГВГ) линейно поляризованное излучение накачки Ti:Sapphire лазера MBR-110 (Coherent,

США) мощностью 100 мВт фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 30 мм. Диаметр перетяжки пучка составлял 30 мкм. Мощность сигнала ГВГ, выделенного с помощью однополосного фильтра BrightLine 375/110 нм (Semrock, США), измерялась фотодиодом S130VC (Thorlabs, США).

Третья глава посвящена изучению особенностей образования и роста полосовых доменов в SPE CLN при переключении в однородном электрическом поле.

Исследовалась кинетика доменной структуры при переключении поляризации в однородном поле в пластинах CLN, в которых был проведён мягкий протонный обмен длительностью от 12 до 48 часов при 300°C и концентрации бензоата лития 3,0%. Исследования проводились при переключении в растущем и постоянном поле через два месяца после проведения протонного обмена.

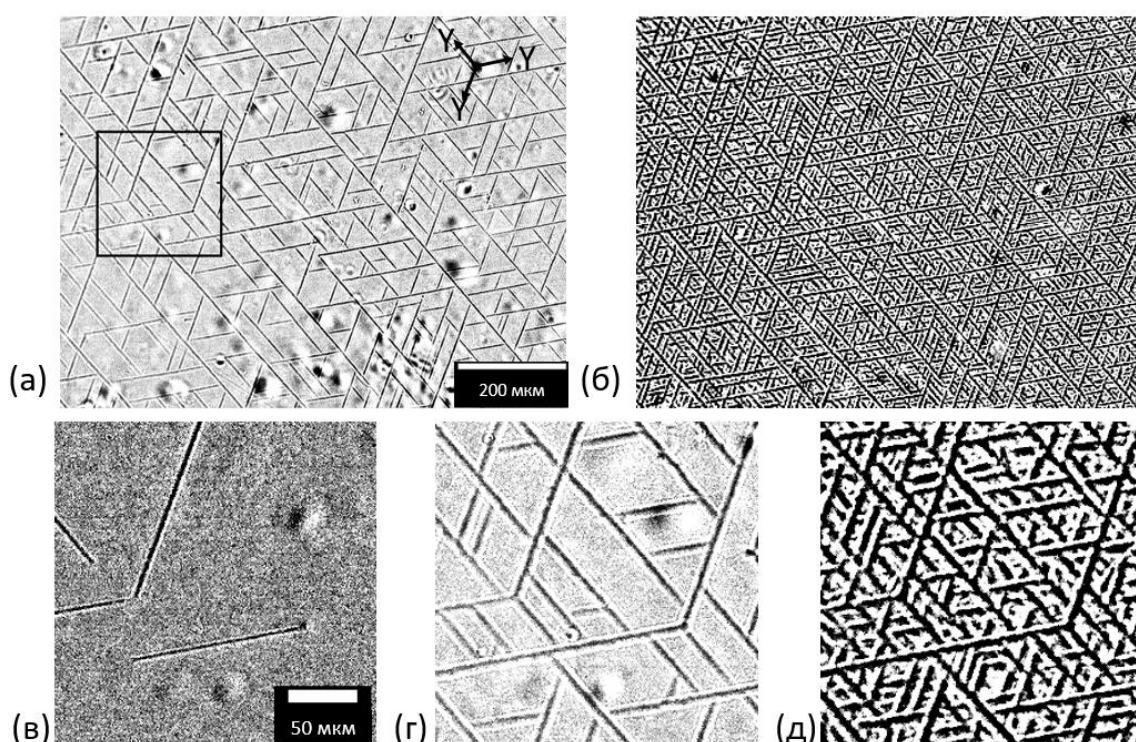


Рисунок 6 – Мгновенные оптические изображения доменной структуры при переключении поляризации в растущем поле в моменты времени от начала переключения: (а) – 37 с ($E = 8$ кВ/мм), (б) – 95 с ($E = 19$ кВ/мм). Увеличенный фрагмент изображения, выделенный на (а), в моменты времени: (в) – 22 с ($E = 4,5$ кВ/мм), (г) – 37 с ($E = 8$ кВ/мм), (д) – 95 с ($E = 19$ кВ/мм). Скорость нарастания поля 0,2 кВ/(мм·с). Длительность протонного обмена 48 часов при 300°C, доля бензоата лития 3,0 %

Переключение в растущем поле показало, что во всех исследованных образцах образование и рост доменов начинались в полях значительно меньших по сравнению с кристаллами CLN. Наблюдалась аномальная эволюция доменной структуры, представляющая собой образование полосовых доменов и их рост в трех выделенных направлениях (Рисунок 6). Рост полосового домена прекращался при приближении к полосовому домену, растущему в другом направлении. В результате длительного переключения формировалась сетчатая структура полосовых доменов с эффективным

периодом около 10 мкм. Следует отметить, что формирование и анизотропный рост полосовых доменов субмикронной ширины наблюдались ранее для доменной структуры, образующейся в результате импульсного нагрева CLN излучением ИК лазера [12].

Визуализация методом КМКР полосовой доменной структуры позволила определить среднюю ширину доменов около 4 мкм и глубину до 30 мкм (Рисунок 7).

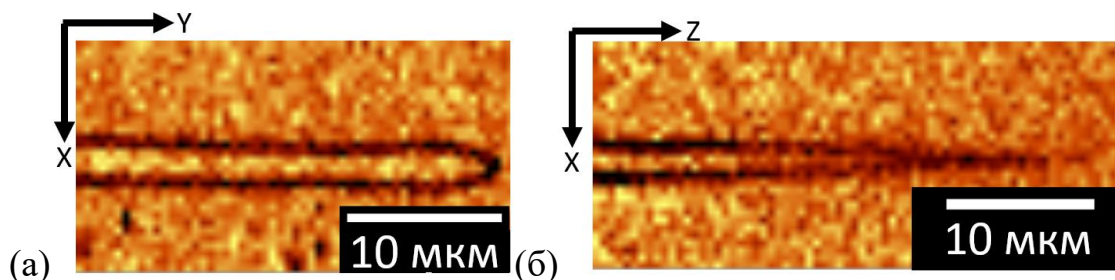


Рисунок 7 – КМКР изображения полосового домена, полученного при переключении поляризации в постоянном поле 5 кВ/мм: (а) – на полярной поверхности, (б) – в YZ сечении. Длительность протонного обмена 48 ч при 300°C, доля бензоата лития 3,0 %

Визуализация полосовых доменов в объеме методом МГВГ на разной глубине показала, что только вблизи поверхности наблюдаются полосовые домены, а на глубине более 30 мкм они разбиваются на цепи изолированных доменов диаметром около микрона, то есть они имеют гребенчатую форму (Рисунок 8) [13].

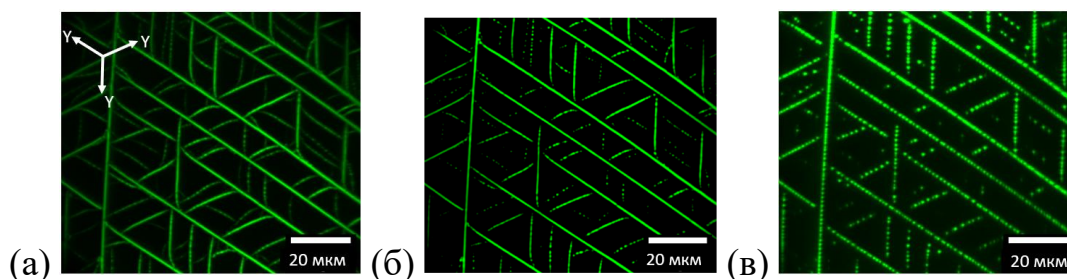


Рисунок 8 – МГВГ изображения доменной структуры на разной глубине от Z-полярной поверхности, мкм: (а) – 0, (б) – 8, (в) – 32. Амплитуда поля 20 кВ/мм, длительность импульса 100 с. Длительность протонного обмена 12 часов при 300°C, доля бензоата лития 3,0 %

Для статистического анализа ориентаций полосовых доменов проводилась обработка последовательности мгновенных оптических изображений доменной структуры с использованием следующего алгоритма (Рисунок 9): (1) Из всех изображений вычитался фон (первый кадр видеозаписи) (Рисунок 9б). (2) Полученные изображения бинаризовались методом Ли [14]. (3) Рассчитывался Фурье-образ бинаризованного изображения (Рисунок 9в). (4) Производилась угловая свертка Фурье-образа относительно центра (Рисунок 9г). Алгоритм обработки кадров видеозаписи и представления результатов был реализован с использованием библиотек OpenCV, scipy, skimage и matplotlib.

Проведенный анализ показал, что полосовые домены, образующиеся в течение всего процесса переключения, ориентированы вдоль трех эквивалентных с точки зрения симметрии CLN (C_{3v}) Y кристаллографических направлений.

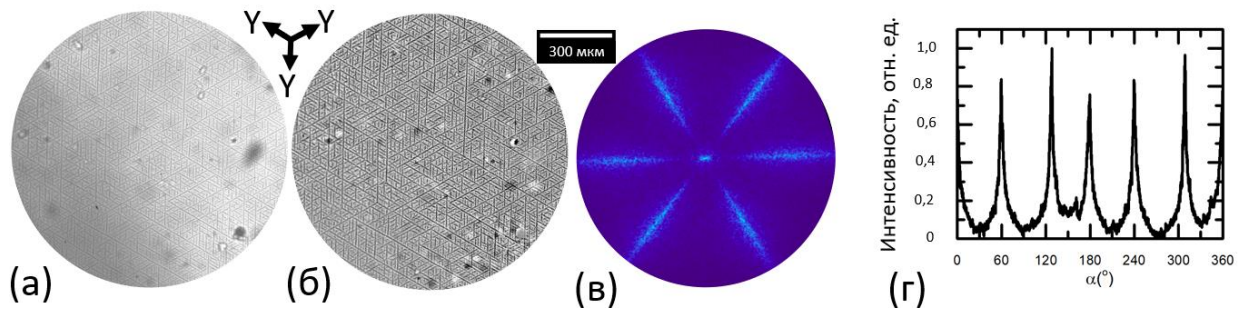


Рисунок 9 – (а) – Мгновенное оптическое изображение доменной структуры, (б) – изображение после вычитания фона, (в) – Фурье-образ изображения. (г) – угловое распределение Фурье-образа. Переключение в постоянном поле 8 кВ/мм. Длительность протонного обмена 48 часов при 300 °С, доля бензоата лития 3,0 %

Для количественного описания кинетики доменной структуры при переключении в растущем поле был проведен анализ зависимости от времени суммарной длины полосовых доменов L (Рисунок 6а) и среднего эффективного периода доменной структуры $T = A/L$, где A – переключенная площадь. Использован модифицированный подход Колмогорова-Аврами [15-17], который применялся ранее для анализа зависимости от времени суммарной площади доменов [18]. При этом учитывалось, что на начальном этапе увеличение L происходит за счет роста полосовых доменов, возникших на существующих дефектах, что соответствует β -модели Колмогорова-Аврами. При дальнейшем переключении в момент времени t_{cat} эволюция доменной структуры качественно изменяется и наблюдается формирование и рост полосовых доменов, образующихся в результате ветвления, что соответствует α -модели Колмогорова-Аврами (Рисунок 6б).

Экспериментальная зависимость от времени суммарной длины полосовых доменов $L(t)$ (Рисунок 10а) аппроксимировалась формулой:

$$L(t) = \begin{cases} L_{\beta}(t), & t \leq t_{cat} \\ L_{\alpha}(t - \Delta t), & t \geq t_{cat} \end{cases} \quad (1)$$

На первой стадии

$$L_{\beta}(t) = L_{max} \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{t - t_{st}}{t_{\beta}} \right)^2 \right) \right) \quad (2)$$

где $t_{\beta} = (\mu\beta R/2)^{-1/2}$, β – концентрация центров возникновения полосовых доменов, μ – подвижность вершины домена, $t_{st} = E_{th}/R$ – время начала переключения, E_{th} – пороговое поле, $R = dE/dt$ – скорость увеличения поля, L_{max} – конечная суммарная длина доменов.

На второй стадии:

$$L_{\alpha}(t) = L_{max} \left[1 - \exp \left(-a \left[\frac{-1}{6} R(t^3 - t_{st}^3) + \frac{1}{2} E_{th}(t^2 - t_{st}^2) + \left(\frac{1}{2} R t^2 - E_{th} t \right) (t - t_{st}) \right] \right) \right] \quad (3)$$

где $a = \alpha\mu$, α – вероятность ветвления на единицу длины полосовых доменов.

Зависимость от времени среднего эффективного периода доменной структуры (Рисунок 10б) аппроксимировалась формулой:

$$T(t) = \frac{A}{L(t)} \quad (4)$$

В результате аппроксимации $L(t)$ для SPE CLN с временем протонного обмена 48 час при фиксированных $L_{\max} = 96$ мм, $R = 0,2$ кВ/(мм·с) и $E_{th} = 3,6$ кВ/мм были получены следующие значения параметров: $a = (7,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$ мм/(кВ·с²), $\Delta t = -(30 \pm 1)$ с, $t_{\beta} = (25 \pm 1)$ с.

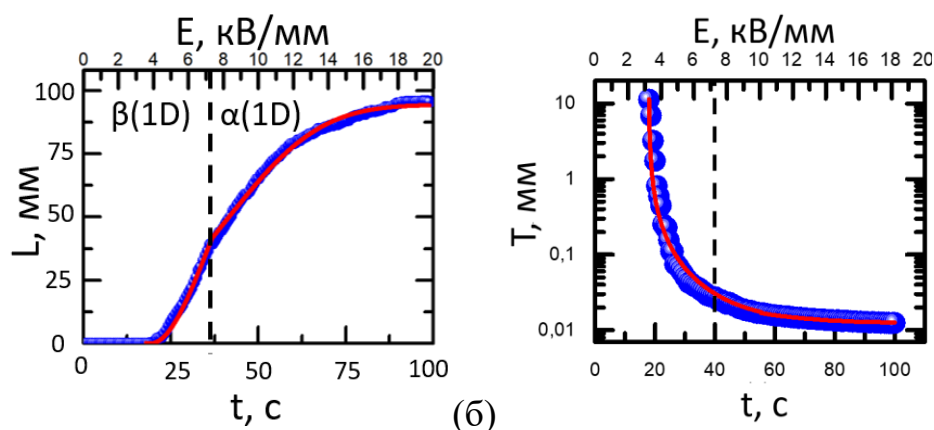


Рисунок 10 – Зависимости от времени: (а) – суммарной длины полосовых доменов и (б) – эффективного периода, аппроксимированные уравнениями (1) и (4), соответственно. Длительность протонного обмена 48 часов при 300 °С, доля бензоата лития 3,0 %

При переключении в постоянном поле, превышающем пороговое значение для переключения поляризации в CLN (21,5 кВ/мм) во всех исследованных образцах, наблюдался традиционный рост гексагональных доменов с доменными стенками, параллельными Y кристаллографическим направлениям. При этом наблюдался характерный для CLN эффект стабильности формы, то есть гексагональная форма быстро восстанавливалась после слияния доменов за счет роста сверхбыстрых короткоживущих стенок (Рисунок 11) [19].

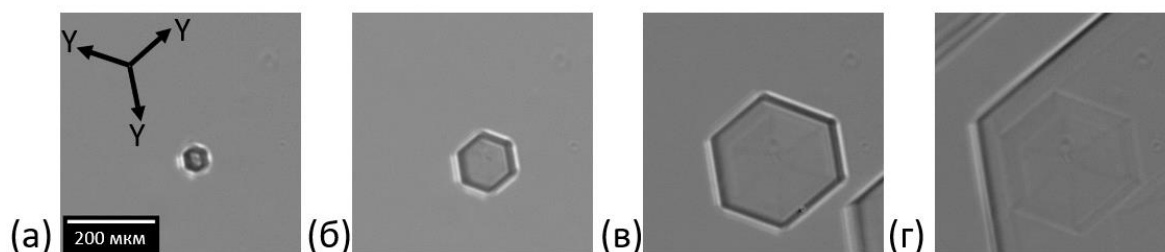


Рисунок 11 – Рост гексагональных доменов при переключении поляризации в постоянном поле 22 кВ/мм. Мгновенные оптические изображения доменной структуры. Интервалы времени от начала переключения, мс: (а) – 220, (б) – 228, (в) – 236, (г) – 244. Оптическая микроскопия, проходящий свет. Длительность протонного обмена 48 часов при 300°С, доля бензоата лития 3,0 %

Квазипериодические доменные структуры

Исследовался процесс формирования квазипериодической структуры полосовых доменов при изменении режима переключения. В этом случае

процесс переключения состоял из двух этапов. На первом этапе создавалась протяженная доменная стенка вблизи края электрода переключением в поле 22 кВ/мм. На втором этапе образец покрывали сплошным электродом, при этом переключение серией прямоугольных импульсов с амплитудой 10 кВ/мм и длительностью 100 мс с интервалом между импульсами 10 с приводило к образованию квазипериодической структуры полосовых доменов, растущих от созданной доменной стенки вдоль Y кристаллографического направления (Рисунок 12 а,б).

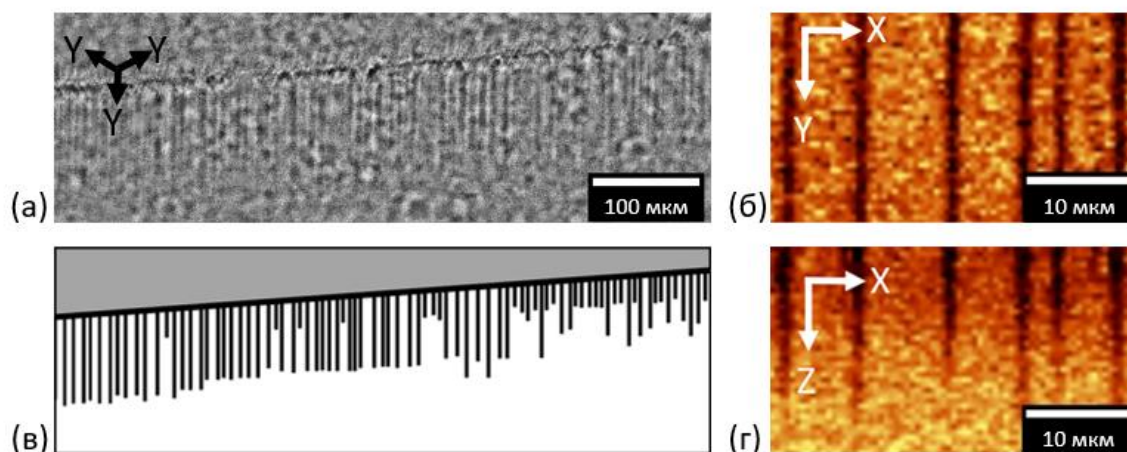


Рисунок 12 – Квазипериодическая структура полосовых доменов, растущих от плоской доменной стенки при переключении поляризации серией прямоугольных импульсов. (а) – Оптическое изображение. КМКР изображения: (б) – XY плоскость, (г) – XZ плоскость. (в) – Схема доменной структуры

Ширина полосовых доменов составляла около 2 мкм, длина – до 100 мкм, средний период - около 5 мкм (Рисунок 12в), глубина - до 20 мкм (Рисунок 12г).

Самоорганизованное формирование в однородном поле квазипериодической структуры, состоящей из параллельных полосовых доменов, обусловлено электростатическим взаимодействием несквозных полосовых доменов с заряженными доменными стенками. Полученный эффект открывает возможности для создания РДС в SPE оптических волноводах.

Зависимость от длительности протонного обмена пороговых полей роста полосовых доменов и пространственного распределения состава.

Проводились сравнительные исследования пространственного распределения состава и пороговых полей для образцов SPE CLN с различной длительностью протонного обмена 12, 24, 36 и 48 часов при одинаковой температуре 300°C и концентрации бензоата лития 3,0 %. Результаты измерений изменения состава с глубиной представлены на Рисунке 13. Зависимости $C(z)$ вблизи полярной поверхности аппроксимировались линейной зависимостью для определения величины приповерхностного градиента состава dC/dz (Рисунок 14б). Зависимость от длительности протонного обмена пороговых полей, измеренных при переключении в

растущем поле, представлена на Рисунке 15а. Видно, что уменьшение пороговых полей по сравнению с немодифицированным CLN увеличивается с ростом длительности протонного обмена. Известно, что градиент состава в кристалле может рассматриваться как источник внутреннего поля [20]. Показано, что с увеличением длительности протонного обмена уменьшается толщина слоя с градиентом (рисунок 14а) и существенно увеличивается градиент (рисунок 14б).

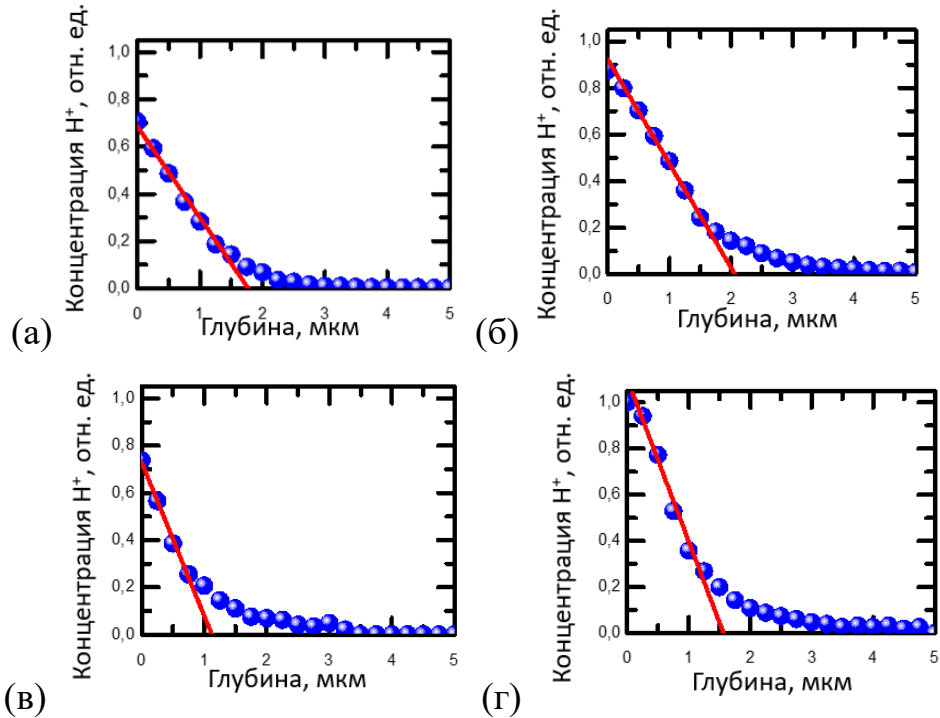


Рисунок 13 – Зависимость концентрации ионов H^+ от глубины вблизи Z- полярной поверхности для времени протонного обмена: (а) – 12 ч, (б) – 24 ч, (в) – 36 ч и (г) – 48 ч при температуре $300^{\circ}C$ с долей бензоата лития 3,0%

Анализировалась зависимость величины поля, в котором начиналось переключение от величины градиента состава. Предполагалось, что переключение происходит под действием суммы приложенного поля и связанного внутреннего поля, которое пропорционально градиенту концентрации ионов H^+ .

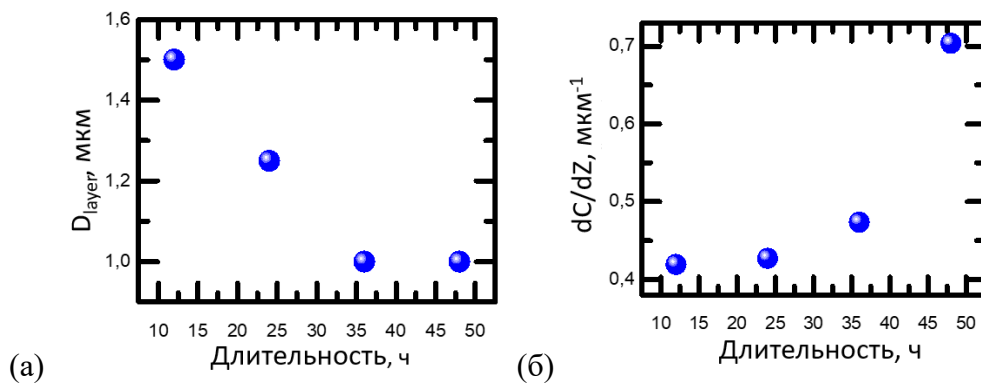


Рисунок 14 – Зависимости от длительности протонного обмена: (а) – толщины градиентного слоя и (б) – градиента относительной концентрации ионов H^+ . Температура $300^{\circ}C$, доля бензоата лития 3,0%

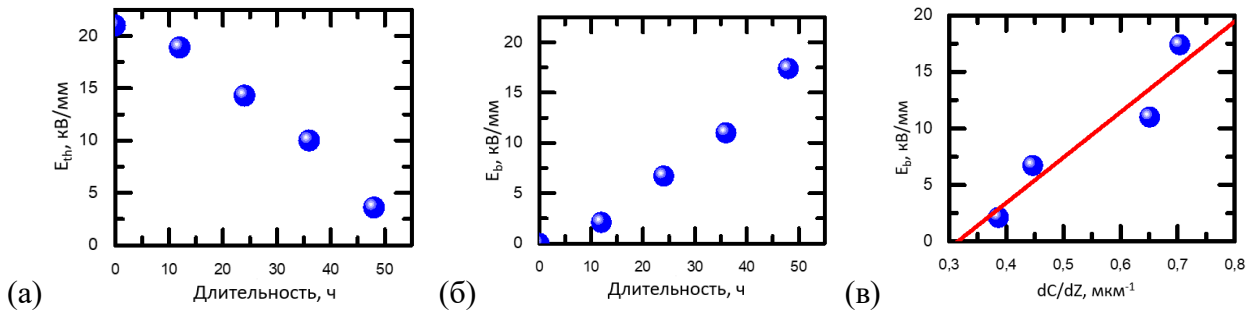


Рисунок 15 – Зависимости от длительности протонного обмена: (а) – поля начала переключения и (б) – связанного внутреннего поля. (в) – Зависимость связанного внутреннего поля от градиента концентрации ионов H^+ в приповерхностном слое. Температура $300^\circ C$, доля бензоата лития 3,0%

Показано (Рисунок 15б), что в экспериментально реализованных условиях связанное внутреннее поле E_b линейно возрастает с увеличением длительности протонного обмена и достигает значения 17 кВ/мм, что приводит уменьшению порогового поля до 4 кВ/мм. Таким образом, экспериментально подтверждено предположение, что напряженность связанного внутреннего поля пропорциональна градиенту концентрации ионов H^+ (Рисунок 15в).

Четвертая глава посвящена изучению эволюции доменной структуры в SPE CLN кристаллах и созданию периодических доменных структур при локальном переключении зондом СЗМ.

Для переключения поляризации использовались пластины SPE CLN, вырезанные перпендикулярно полярной оси и отполированные до оптического качества толщиной 0,5 мм. В пластинах был проведён мягкий протонный обмен длительностью 12, 24, 36, 48 и 72 часа при $300^\circ C$ и концентрации бензоата лития 3,0%. Использовалось точечное переключение и переключение линейным сканированием.

При точечном переключении на зонд СЗМ, который находился в контакте с поверхностью образца, подавался импульс напряжения. Зонд отводился от поверхности еред завершением импульса. Амплитуда импульсов до 300 В при длительности от 1 мс до 100 с. Записывались цепи изолированных доменов с различными расстояниями между точками приложения напряжения.

Установлено, что в образцах с длительностью протонного обмена менее 48 часов во всем диапазоне напряжений и длительностей не наблюдалось локальное переключение. Все дальнейшие исследования проводились в образцах с длительностью протонного обмена 48 и 72 часа.

Анализировались зависимости эффективного радиуса точечных доменов от длительности и амплитуды импульса напряжения (Рисунок 16а). Полученная зависимость диаметра от приложенного напряжения аппроксимировалась уравнением [21]:

$$r(U_{tip}) = \sqrt{a \left(\frac{U_{tip}}{E_{th}} \right)^{2/3} - R_{tip}^2} \quad (5)$$

где $a = \sqrt[3]{\frac{CR_{tip}}{2\pi\epsilon_0(1+\epsilon)}}$, U_{tip} – приложенное напряжение, R_{tip} – радиус закругления зонда, E_{th} пороговое поле, C – емкость зонда, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ – диэлектрическая проницаемость образца, E_{th} – пороговое поле.

Полученное значение порогового напряжения для длительности импульса 1 с составляет около 50 В.

Для круглых доменов при длительности импульсов менее 10 с наблюдалась традиционная для локального переключения в одноосных сегнетоэлектриках логарифмическая зависимость диаметра домена от длительности импульса (Рисунок 16б). При длительности импульсов более 10 с зависимость становилась линейной (Рисунок 16в на вставке). Наблюдаемая особенность может быть отнесена за счет перехода от стохастического зародышеобразования к детерминированному [21].

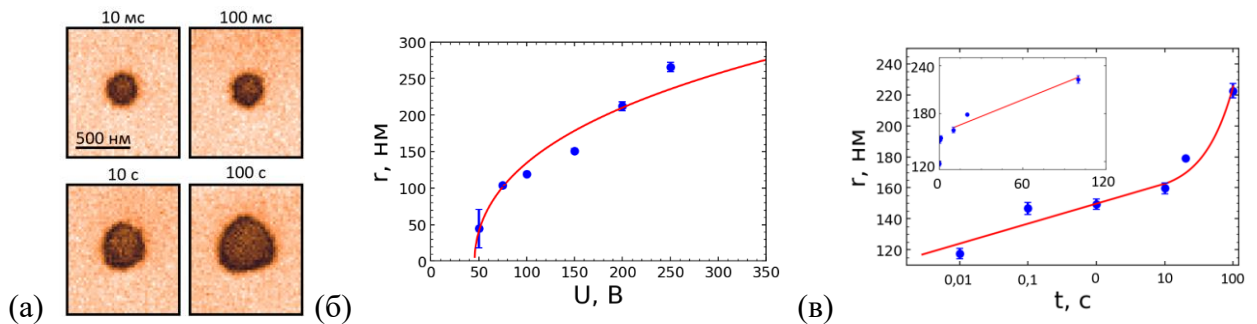


Рисунок 16 – (а) – СМПО изображения изолированных доменов, полученных при точечном переключении при различной длительности импульса, напряжение 200 В. Зависимости эффективного радиуса доменов: (б) – от напряжения при длительности импульса 1 с, аппроксимированная уравнением (5) (в) – от длительности импульса при напряжении 200 В, аппроксимированная для $t < 10$ с логарифмической функцией, а для $t > 10$ с - линейной. Длительность протонного обмена 72 часа, 300°C, доля бензоата лития 3,0%

Исследовалась зависимость размеров точечных доменов в цепи от периода. Было показано, что круглая форма доменов искажалась при расстояниях между центрами приложения напряжения менее 500 нм и диаметр доменов уменьшался с уменьшением периода (Рисунок 17а). Уменьшение размера обусловлено двумя эффектами: (1) уменьшением переключающего поля домена за счет вклада деполаризующего поля, созданного предыдущим доменом в цепи, (2) частичным обратным переключением переключенного домена под действием деполаризующего поля созданного домена. Первый эффект проявляется в уменьшении размеров доменов в цепи по сравнению с первым доменом, а второй к искажению круглой формы доменов (Рисунок 17б). При периоде менее 300 нм домены сливаются с образованием полосового домена, ширина которого не зависит от периода (Рисунок 17в) и составляет 150 нм.

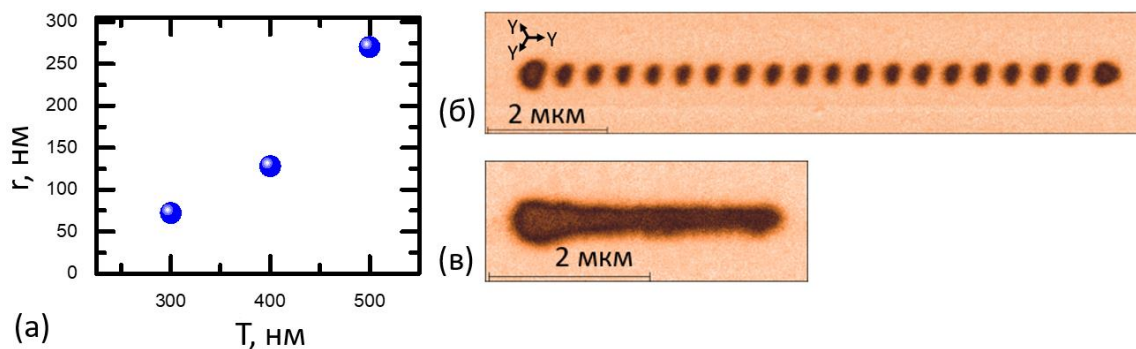


Рисунок 17 – (а) – Зависимость эффективного радиуса доменов от периода, СМПО, Цепи точечных доменов с различным периодом, нм: (б) – 500, (в) – 150. Длительность протонного обмена 72 часа, 300°С, доля бензоата лития 3,0 %

Создание полосовых доменов производилось сканированием вдоль Y кристаллографического направления (Рисунок 18б-в). При этом полосовые домены формировались при напряжениях более 150 В (Рисунок 18б-г).

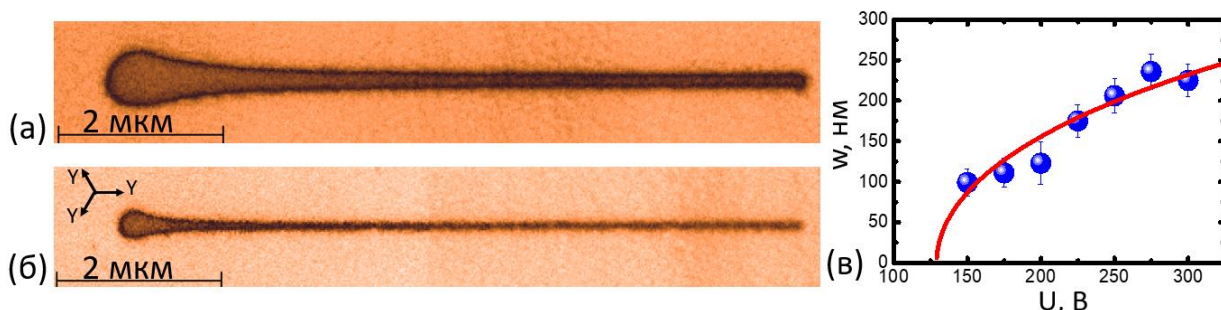


Рисунок 18 – СМПО изображения полосовых доменов, полученных при переключении сканированием при различном напряжении, В: (а) – 150, (б) – 270. (в) – Зависимость ширины полосового домена от напряжения, аппроксимированная уравнением (5). Скорость сканирования 1 мкм/с. Длительность протонного обмена 72 часа, температура 300°С, доля бензоата лития 3,0%

Анализировалась зависимость установившейся ширины полосового домена от напряжения. Полученная зависимость аппроксимировалась уравнением (5). При этом пороговое значение составило 130 В, а максимальная ширина достигала 250 нм. Установлено, что даже при многократной визуализации в течение одного часа не наблюдалось заметного изменения размеров созданной структура полосовых доменов

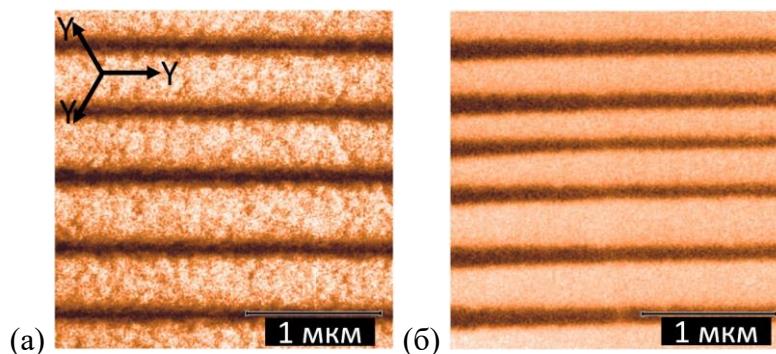


Рисунок 19 – СМПО изображения регулярных доменных структур, созданных при переключении сканированием, период 500 нм. Длительность протонного обмена (а) – 48 ч, (б) – 72 ч, 300°С, доля бензоата лития 3,0%

Для создания РДС каждый полосовой домен сканировался дважды: слева направо и справа налево. При комнатной температуре не удавалось получить РДС, субмикронного периода, что вызвано взаимодействием доменов, ранее исследованным при точечном переключении. Для уменьшения взаимодействия переключение проводилось при повышенных температурах, что ускоряло объемное экранирование и уменьшало пороговое поле. Стабильную РДС с периодом 500 нм удавалось создавать при сканировании напряжением 200 В при 85°C (Рисунок 19).

Пятая глава посвящена исследованию генерации второй гармоники в образцах MgOCLN с РДС, созданной сканированием сфокусированным электронным пучком.

Оптические изображения созданной доменной структуры на обеих полярных поверхностях представлена на Рисунке 20. Видно, что структура является несквозной.

Измерение зависимости мощности ГВГ от длины волны накачки (Рисунок 21 а) показало, что максимальная эффективность преобразования наблюдается при 744 - 747 нм. Полная ширина основного пика на полувысоте равна 4 нм, что указывает на высокую чувствительность процесса ГВГ к длине волны накачки. Нормализованная эффективность ГВГ в созданной регулярной доменной структуре длиной 1,5 мм составила 0,3%/(Вт·см).

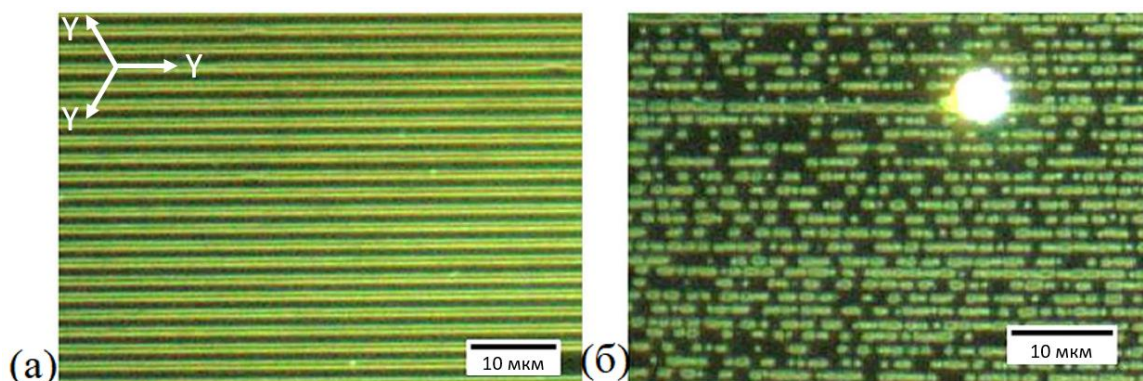


Рисунок 20 – Регулярная доменная структура с периодом 2 мкм на (а) – Z- и (б) – Z+ полярных поверхностях. Выявлена селективным химическим травлением. Оптическая микроскопия, темное поле

Зависимость мощности ГВГ от положения фокуса излучения накачки при перемещении вдоль Z координаты показала, что глубина РДС, в которой происходит эффективная генерация второй гармоники, составляла около 300 мкм (Рисунок 21 б).

Температура фазового квазисинхронизма для длины волны накачки 747 нм составила 32°C (Рисунок 21 в), что близко к расчётному значению 47°C, полученному с использованием уравнения Селлмейера [22]. Нормированная эффективность генерации второй гармоники в элементе длиной 1,5 мм с учетом потерь за счет отражения составила 0,4%/(Вт·см).

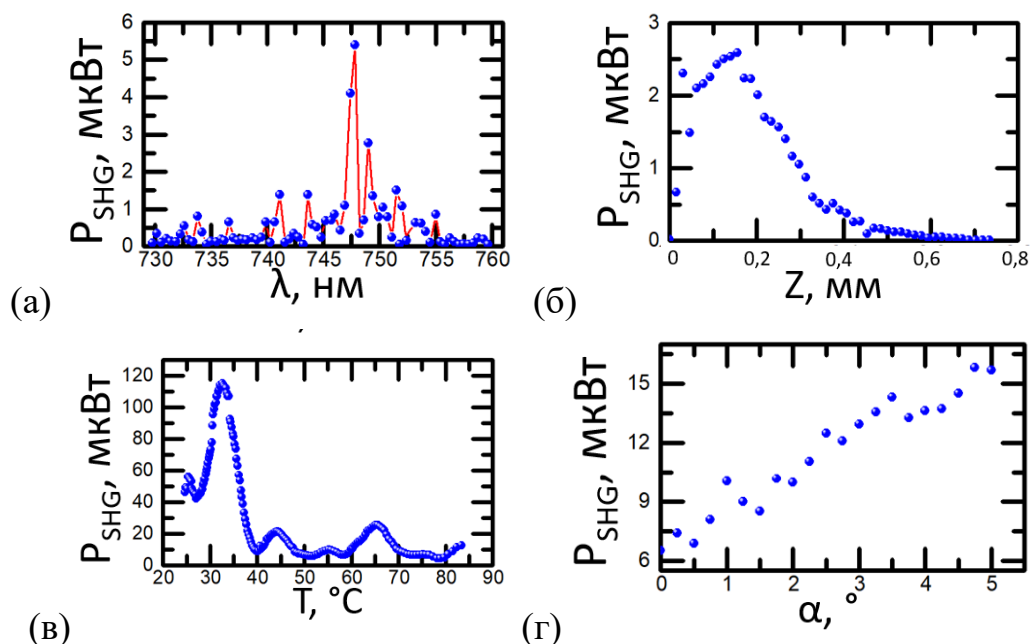


Рисунок 21 – Зависимость мощности ГВГ от: (а) – длины волны накачки, (б) – Z координаты пучка накачки, (в) – температуры, (г) – угла поворота образца относительно оси Z . Длина волны накачки в (б-г) составляет 747 нм

Поворот кристалла с РДС относительно оси Z на 5 градусов, что соответствует эффективному увеличению периода структуры на 8 нм, приводил к значительному увеличению мощности (Рисунок 21г).

Таким образом удалось впервые получить излучение с длиной волны 373 нм методом генерации второй гармоники в кристалле легированного магнием ниобата лития с РДС с периодом 2 мкм, созданной сканированием сфокусированным электронным пучком.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Показано что, аномальный рост полосовых доменов на полярной поверхности при переключении поляризации в монокристаллах ниобата лития, модифицированных методом мягкого протонного обмена, обусловленный неэффективным экранированием деполяризующего электрического поля, вызванным наличием диэлектрического зазора.
2. Показано, что аномальное уменьшение порогового поля образования доменов после проведения мягкого протонного обмена обусловлено формированием в приповерхностном слое внутреннего электрического поля смещения, пропорционального градиенту состава.
3. Установлено, что самоорганизованное формирование квазипериодических доменных структур при росте полосовых доменов от плоской доменной стенки вызвано электростатическим взаимодействием доменов.
4. Показано, что переключение электрической поляризации зондом сканирующего зондового микроскопа при повышенной температуре 358 К позволяет создавать стабильную регулярную структуру полосовых доменов с периодом 500 нм, что обусловлено ростом эффективности

объемного экранирования и уменьшением пороговых полей.

5. Установлено, что создание сфокусированным электронным пучком регулярной доменной структуры с периодом 2 мкм в легированном магнием ниобате лития позволило методом генерации второй гармоники получить излучение с длиной волны 373 нм с нормированной эффективностью 0,4%/(Вт·см), что обусловлено созданием зонда из электронов, локализованных в слое нанесенного на поверхность резиста.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, будут использованы для продолжения развития методов доменной инженерии при создании регулярных доменных структур в оптических волноводах. Будут разработаны методы создания оптических волноводов с регулярной доменной структурой для преобразования длины волны с использованием фазового квазисинхронизма. Оптические волноводы, изготовленные методом протонного обмена в кристаллах ниобата лития, с прецизионной регулярной доменной структурой будут использованы в устройствах квантовых коммуникаций.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. High-frequency resonance in acoustic superlattice of LiNbO₃ crystals/ Y. Zhu, et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1988. – Vol. 53. – P. 2278–2280.
2. Khan A.I. The future of ferroelectric field-effect transistor technology / A.I. Khan, A. Keshavarzi, S. Datta // *Nat. Electron.* – 2020. – Vol. 3. – P. 588–597.
3. Hu X. Nonlinear beam shaping in domain engineered ferroelectric crystals / X. Hu, Y. Zhang S. Zhu // *Adv. Mat.* – 2020. – Vol. 32 – P. 1903775.
4. Nanodomain engineering for programmable ferroelectric devices / A. Lipatov et al. // *Nano Lett.* – 2019. – Vol. 19. – P. 3194.
5. Kores C C. Quasi-phase matching waveguides on lithium niobate and KTP for nonlinear frequency conversion: A comparison / C. C. Kores, C. Canalias, F. Laurell // *APL Photonics.* – Vol. 6. – 2021. – P. 091102.
6. Bazzan M. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications. / M. Bazzan, C. Sada // *App. Phys. Rev.* – Vol. 2:4. – 2015. – P. 040603.
7. Soft-proton-exchange tapers for low insertion-loss LiNbO₃ devices / D. Castaldini, et al. // *IEEE J. Light. Technol.* – Vol. 25. – 2007. – P. 1588–1593.
8. Soft proton exchange on periodically poled LiNbO₃: A simple waveguide fabrication process for highly efficient nonlinear interactions / L. Chanvillard et al. // *Appl. Phys. Lett.* – Vol. 76:9. – 2000. – P. 1089–1091.
9. Hum, D. S. Quasi-phasematching / D. S. Hum, M. M. Fejer // *Comptes Rendus Phys.* – 2007. – Vol. 8:2. – P. 180–198.
10. Reduction of lattice defects in proton-exchanged lithium niobate waveguides / H. G. Muller et al. // *J. App. Phys.* – 2011. – Vol. 110. – P. 033539.
11. Pershin S. M. Raman spectroscopy of the OH group vibrations in structural complexes of liquid water / S. M. Pershin // *Opt. Spectrosc.* – 2005. – Vol. 98. – P. 543–554.
12. In situ investigation of formation of self-assembled nanodomain structure in lithium niobate after pulse laser irradiation / V. Ya. Shur, et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 99. – P. 082901.
13. Dimensionality increase of ferroelectric domain shape by pulse laser irradiation, / V.Ya. Shur, M.S. et al. // *Acta Mater.* – 2021. – Vol. 219. – P. 117270.

14. Li, C.H. Minimum cross entropy thresholding / C.H. Li and C.K. Lee // Pattern Recognition. – Vol. 26. – 1993. – P. 617.
15. Kolmogorov A.N. On the statistical theory of crystallization of metals / A.N. Kolmogorov. // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Matematicheskaya. – 1937. – Vol. 3. – P. 355–359.
16. Avrami M. Kinetics of phase change. I General theory. / M. Avrami // J. Chem. Phys. – 1939. – Vol. 7. – P. 1103-1112.
17. Shur V. Kinetics of phase transformations in real finite systems: Application to switching in ferroelectrics / V. Shur, E. Romyantsev, S. Makarov // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84:1. – P. 445.
18. Abnormal domain growth during polarization reversal in lithium niobate crystal modified by proton exchange / E. Savelyev et al. // Cryst. – 2023. – Vol. 13. – P. 72. – 82.
19. Investigation of jerky domain wall motion in lithium niobate / I.S. Baturin, et al. // Ferroelectrics. – 2008. – Vol. 374. – P. 136–143.
20. Shur V.Ya. Arising and evolution of the domain structure in ferroics / V.Ya. Shur, E.L. Romyantsev // J. Korean Phys. Soc. – 1998. – Vol. 32. – P. 727–732.
21. Domain structure formation by local switching in the ion sliced lithium niobate thin films // B. N. Slautin et al. / App. Phys. Lett. – 2020. – Vol. 116. – P. 152904
22. Jundt D.H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate / D.H. Jundt // Opt. Lett. – 1997. – Vol. 22:20. – P. 1553–1555.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список публикаций по теме диссертационной работы в рецензируемых научных журналах, определенных Перечнем ВАК и включенных в систему цитирования Web of Science и Scopus:

- A1. Savelyev E. D. Second harmonic generation in periodically poled MgO:LN crystal with 2 μm period created by e-beam irradiation / **E. D. Savelyev**, A. R. Akhmatkhanov, D. S. Chezganov, E. O. Vlasov, E. A. Pashnina, V. Ya. Shur, H. Tronche, F. Doutre, T. Lunghi & P. Baldi // Ferroelectrics. – 2021. – Vol. 576. – P. 50-54, DOI: 10.1080/00150193.2021.188825
- A2. Savelyev E. D. Domain growth in LiNbO₃ with surface layer modified by soft proton exchange / **E. D. Savelyev**, A. R. Akhmatkhanov, E. D. Greshnyakov, A. S. Abramov, H. Tronche, F. Doutre, T. Lunghi, P. Baldi, M. M. Neradovskiy, V. Ya. Shur // Ferroelectrics. – 2022. – Vol. 592. – P. 64-71. DOI: 10.1080/00150193.2022.2052247
- A3. Savelyev E. Abnormal domain growth during polarization reversal in lithium niobate crystal modified by proton exchange / **E. Savelyev**, A. Akhmatkhanov, M. Kosobokov, H. Tronche, F. Doutre, T. Lunghi, P. Baldi, V. Shur // Crystals. – 2023. – Vol. 13. – P. 72. DOI: 10.3390/cryst13010072

Материалы конференций и тезисы докладов:

- A4. Генерация второй гармоники в периодически поляризованном кристалле MgO:LN с периодом 2 мкм, полученном облучением электронным пучком / **Е.Д. Савельев**, А.Р. Ахматханов, Д.С. Чезганов, Е.О. Власов, Е.А. Пашнина, В.Я. Шур, Н. Tronche, F. Doutre, T. Lunghi, P. Baldi // Исследование сегнетоэлектрических материалов российскими учеными. Столетие открытия сегнетоэлектричества [Электронный ресурс]. Труды Международной конференции, Екатеринбург, Россия, 17-19 августа, 2020, С. 235.
- A5. Формирование доменных лучей при переключении поляризации в аномально слабых полях в монокристаллах ниобата лития, модифицированных методом протонного обмена / **Е.Д. Савельев**, А.Р. Ахматханов, В.Я. Шур // XXII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXII) [Электронный ресурс]. Труды Всероссийской конференции, Екатеринбург, Россия, 25-28 августа, 2021, С.

А6. Аномальная эволюция доменной структуры в монокристаллах семейства ниобата лития модифицированных методом мягкого протонного обмена / **Е.Д. Савельев**, А.С. Слаутина, Л.В. Гимадеева, А.Р. Ахматханов, В.Я. Шур // Международная конференция «Современные нанотехнологии» [Электронный ресурс]. Труды Международной конференции, Екатеринбург, Россия, 24-27 августа, 2022, С. 112-113.

А7. Периодически поляризованные сегнетоэлектрические кристаллы для нелинейно-оптических преобразований и управления волновым фронтом / В. Я. Шур, А. Р. Ахматханов, А. А. Есин, М. А. Чувакова, **Е. Д. Савельев**, Д. Б. Колкер, А. А. Бойко, В. С. Павельев // Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская Фотоника – 2022» [Электронный ресурс]. Труды Всероссийской конференции, Красноярск, Россия, 14-19 сентября 2022, Т. 1, С. 186.

А8. Formation of domain rays in extremely low fields in lithium niobate crystals modified by soft proton exchange / **E. Savelyev**, A. Akhmatkhanov, E. Greshnyakov, A. Abramov, H. Tronche, F. Doutre, T. Lunghi, P. Baldi, M. Neradovskiy, V. Shur // International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF-PFM-ECAPD-2022) Труды Международной конференции, Тур, Франция, 27 июня – 1 июля, 2022.

Программа для ЭВМ:

А9. Свидетельство 2021668342. Программ для описания эволюции исследуемой структуры в терминах изменения ее анизотропии / Савельев Е.Д., Ахматханов А.Р. (RU) ; Правообладатель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». № 2021667809; заявл. 11.11.21; опубл. 15.11.21. 144 Кб.