



Мамбетова Ксения Мустафиевна

**ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И АГРЕГИРОВАНИЕ
МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ,
ФОРМИРУЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3
И МИКРОСТРУКТУР $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ
И ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель:

Шандаров Станислав Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор ТУСУР

Официальные оппоненты:

Котова Светлана Павловна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией моделирования и автоматизации лазерных систем Самарского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева» РАН.

Лисицын Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа новых производственных технологий, профессор-консультант.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 9 июня 2021 г., в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе ТУСУР, 634050, г.Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУР <https://postgraduate.tusur.ru/urls/t7bhwg47>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Сильные электрические поля большой напряженности, формируемые в сегнетоэлектрических кристаллах вследствие фотогальванического (называемого также фотовольтаическим), пироэлектрического и пьезоэлектрического эффектов, являются в настоящее время предметом исследований, имеющих своей целью создание эффективных твердотельных источников электронных пучков, рентгеновского и нейтронного излучения [1, 2], а также реализацию оптически управляемых манипуляторов микро- и наночастицами (оптических пинцетов) [3, 4]. Сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития (LiNbO_3), характеризующиеся высокой температурой Кюри, хорошими пироэлектрическими и диэлектрическими свойствами, допускающие варьирование в широких пределах своих фотогальванических параметров и фотопроводимости путем легирования фоторефрактивными и нефоторефрактивными примесями [5, 6], являются перспективными материалами для создания на их основе элементов и микроструктур, использующих генерацию сильных электрических полей с напряженностью 10^5 В/м и более при термическом и лазерном воздействии.

Перспективным методом создания микроструктур на основе ниобата лития является диффузионное легирование [6], позволяющее управлять фотовольтаическими и фотопроводящими параметрами поверхностного слоя пластин полярного и неполярных срезов в значительных пределах. Это делает возможным оптимизацию условий оптически управляемого формирования над их поверхностью пространственных распределений сильных электрических полей. Диффузионное легирование может быть реализовано для коммерчески доступных пластин конгруэнтного ниобата лития; при этом по сравнению с традиционным способом легирования путем добавления примеси в исходную шихту, используемую для роста монокристаллического образца, оно имеет важные преимущества - возможность регулирования концентрации примеси и толщины микроструктурированного слоя. Разработанная в [6] методика диффузионного легирования, нацеленная на получение образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с однородным распределением ионов меди по толщине, составляющей 0,5 или 1 мм, продемонстрировала возможность создания фоторефрактивных элементов, в которых максимально достигаемые значения напряженности электрического поля можно оценить как $\sim 10^7$ В/м. В связи с этим, актуальным является практическая реализация технологии диффузионного легирования коммерчески доступных пластин ниобата лития ионами Cu и отработка режимов, позволяющих создавать на её основе образцы с предсказуемыми распределениями фотовольтаических и фоторефрактивных свойств в приповерхностной области. Актуальными являются и задачи определения распределения концентрации ионов меди Cu^+ и Cu^{2+} в приповерхностной области полученных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ и анализа формирования в ней поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток, в том числе и при освещении интерференционной картиной с высоким контрастом.

Сильные электрические поля, возникающие над поверхностью легированных ионами Fe и Cu кристаллов ниобата лития при лазерном воздействии за счет фотогальванического эффекта, представляют большой интерес для развития метода фотогальванического пинцета для манипулирования микро- и нанообъектами. В настоящее время активно исследуется использование легированных ионами Fe монокристаллов ниобата лития в качестве основы при конструировании лаборатории на чипе для управления биологическими объектами [7], так как данный метод позволяет неоднократно использовать монокристаллическую подложку и свести к мини-

муму вред от перегрева захватываемых частиц за счёт использования маломощного источника излучения. Таким образом, анализ формирования лазерными пучками над поверхностью фоторефрактивных кристаллов и микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ распределений эванесцентных электрических полей и создаваемых ими сил, действующих на микро- и наночастицы, требует дальнейшего развития.

При термическом воздействии на монокристаллические образцы LiNbO_3 полярного среза формирующиеся за счет пирозлектрического эффекта сильные электрические поля могут приводить к импульсной эмиссии электронов [8], что представляет значительный интерес для реализации импульсных генераторов рентгеновского излучения. Однако доза выходного рентгеновского излучения, генерируемого разработанными к настоящему времени пирозлектрическими источниками, является недостаточной для полноценной медицинской диагностики и других приложений. В связи с этим актуальными являются исследования физической природы и основных параметров пирозлектрической генерации электронных пучков, таких как временные характеристики, достигаемые плотности токов и суммарного переносимого заряда.

Все изложенное выше и определило цель и задачи диссертационной работы.

Целью работы является исследование эффектов генерации электронных пучков и агрегирования микро- и наночастиц в сильных электрических полях, формируемых на поверхности кристаллов LiNbO_3 и микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при термическом и лазерном воздействии, для развития научного и практического задела, позволяющего реализовать на их основе управляемые твердотельные источники электронов и рентгеновского излучения с улучшенными характеристиками, и фотовольтаические пинцеты.

Для достижения данной **цели** решались следующие основные **задачи**:

1. Создание микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ путем практической реализации технологии легирования пластин ниобата лития неполярного X -среза ионами Cu методом высокотемпературной диффузии из металлических и оксидных пленок и анализ распределения концентрации ионов меди Cu^+ и Cu^{2+} по глубине диффузионного слоя.

2. Экспериментальные исследования, теоретический анализ и численное моделирование динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных микроструктур (решеток) в пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X -среза при засветке картиной интерференции с контрастом $m \approx 1$, создаваемой лазерными пучками с длиной волны 532 нм.

3. Разработка методики и проведение экспериментального исследования агрегирования микро- и наночастиц электрическими полями, создаваемыми над поверхностью пластин $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза вследствие фотогальванического механизма перераспределения заряда при их засветке как картиной интерференции двух лазерных пучков Гаусса с радиальной симметрией или с эллиптическим поперечным сечением, так и единственным гауссовым пучком такого типа.

4. Анализ распределения диэлектростатических сил, индуцированных над поверхностью пластины X -среза ниобата лития, диффузионно-легированной фотовольтаически активной примесью, в приближении преобладающей в кристалле компоненты электрической напряженности поля пространственного заряда $E_z(x, z)$, наводимой одномерным гауссовым пучком.

5. Разработка установок, экспериментальных методик и проведение исследований динамики пирозлектрической генерации электронных пучков в микросекундном и наносекундном диапазонах, при термическом воздействии на монокристаллические образцы LiNbO_3 полярного Z -среза, при форвакуумном и атмосферном давлении.

Методы исследования

Для решения поставленных в работе задач применялись технологические, экспериментальные и теоретические методы, а именно:

- высокотемпературная диффузия меди из металлических и оксидных пленок в пластины конгруэнтного ниобата лития неполярного X -среза;

- формирование микроструктурированных распределений поля пространственного заряда (фоторефрактивных решеток) с использованием монокристаллов и микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ на основе неполярного X -среза и двухпучкового взаимодействия;

- дифракция считывающего пучка с длиной волны 655 нм на пропускающих фоторефрактивных решетках, формируемых двумя лазерными пучками с длиной волны 532 нм;

- теоретический анализ динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток в пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза с диффузионным и объемным легированием, при их засветке картиной интерференции с контрастом $m \approx 1$, создаваемой плоскими световыми волнами, и распределения диэлектростатических сил, индуцированных над поверхностью пластины X -среза ниобата лития одномерным гауссовым пучком, в приближении преобладающей в кристалле компоненты электрической напряженности поля пространственного заряда $E_z(x, z)$;

- численное моделирование;

- осциллография токов и напряжений в различных временных диапазонах, включая микросекундную и наносекундную области;

- подгонка аппроксимирующих расчетных зависимостей под экспериментальные данные с использованием метода наименьших квадратов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Практически реализованная технология легирования ионами меди пластин X -среза конгруэнтного ниобата лития из металлических и оксидных пленок при температуре 1000 °С характеризуется коэффициентом диффузии от 0,38 до 0,77 мкм²/с для ионов меди в зарядовом состоянии Cu^+ . Она позволила создать экспериментальные образцы микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ со следующими характеристиками:

- распределение концентрации $C_{\text{Cu}^+}(x)$ описывается функцией Гаусса с полушириной от ~220 до ~320 мкм и максимальными значениями $C_{\text{Cu}^+}(0)$ от $1,0 \cdot 10^{24}$ до $7,8 \cdot 10^{24}$ м⁻³;

- отношение средних концентраций $C_{\text{Cu}^+}/C_{\text{Cu}^{2+}}$ составляет от 0,06 до 0,92, где $C_{\text{Cu}^{2+}}$ относится к ионам меди в зарядовом состоянии Cu^{2+} .

2. Микроструктуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, полученные диффузионным легированием ионами меди из металлических пленок с толщинами 900 и 400 нм пластин неполярного X -среза конгруэнтного ниобата лития при температуре 1000 °С в течение 9 часов, характеризуются значениями констант Гласса $G_o \approx 10,3 \cdot 10^{-12}$ и $G_e \approx 9,4 \cdot 10^{-12}$ м/В и максимальными значениями концентрации $C_{\text{Cu}^{2+}}^m \approx 1,1 \cdot 10^{26}$ и $6,5 \cdot 10^{25}$ м⁻³, соответственно, что позволяет оценить для них достигаемую на границе $x = 0$ в момент времени t_m максимальную амплитуду поля пространственного заряда, индуцированного при освещении создаваемой излучением с длиной волны 532 нм интерференционной картиной с контрастом $m = 1$, как $E_1^{\text{max}}(0, t_m) \approx 4,2 \cdot 10^6$ и $2,2 \cdot 10^6$ В/м.

3. При распылении на воздухе порошка микро- и наночастиц с диаметрами от 40 нм до 8 мкм их агрегирование сильными электрическими полями, создаваемыми над поверхностью синтезированных микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза вследствие фотогальванического механизма перераспределения зарядов при засветке на длине волны 532 нм как картиной интерференции с пространственным периодом 45 мкм и контрастом $m \approx 1$ двух лазерных пучков Гаусса с радиальной симметрией или с эллиптическим поперечным сечением, так и единственным гауссовым пучком такого типа, для интенсивности в максимуме, превосходящей 30 мВт/см^2 , уверенно фиксируется визуально при времени экспозиции t , превышающем 30 с.

4. Разработанный диодный узел позволяет регистрировать в наносекундном диапазоне динамику пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков при термическом воздействии на монокристаллические образцы полярного Z-среза LiNbO_3 цилиндрической формы с толщиной от 1 до 7,0 мм и диаметром от 5 до 13 мм, в циклах нагрева и охлаждения от 25 до 80 °С при атмосферном давлении. Его использование позволило наблюдать для образца LiNbO_3 с толщиной 7.0 мм и диаметром 13 мм пироэлектрическую генерацию импульсных пучков электронов с временем нарастания переднего фронта от 1 до 1,9 нс, силой тока в максимуме I_{max} от 50 мА до 600 мА, переносимым зарядом q_d от 1,3 до 5,7 нКл, длительностью τ_p по уровню $0,1I_{max}$ от 24 до 40 нс и по полувывсоте – от 4 до 15 нс.

Достоверность научных результатов

В пользу достоверности защищаемых положений свидетельствует:

- качественное совпадение результатов расчетов по выведенным аналитическим выражениям и проведенных экспериментов;
- успешное использование синтезированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ как в экспериментах по формированию микроструктурированных распределений поля пространственного заряда при двуволновом взаимодействии лазерных пучков, так и по агрегированию этими полями микро- и наночастиц;
- отсутствием противоречий с экспериментальными данными других работ.

Достоверность полученных экспериментальных результатов базируется на использовании измерительных приборов и оптических элементов с известными характеристиками. При подгонке расчетных зависимостей под экспериментальные данные использовался метод наименьших квадратов. Относительная погрешность для измерений интенсивностей световых волн не превышала 15 %.

Достоверность результатов, полученных при теоретическом анализе и численных расчетах, обеспечивается постановкой задач с использованием обоснованных приближений и известных моделей фотоиндуцированного перераспределения зарядов в кристаллах с фотогальваническим механизмом фоторефрактивного отклика и дифракции света на формируемых в них при двухволновом взаимодействии объемных фазовых решетках.

Полученные в диссертации теоретические и расчетные результаты подтверждаются экспериментами, имеющими качественный характер, а также количественным согласием с экспериментальными данными в пределах погрешности измерений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней получены следующие результаты.

1. Теоретически и экспериментально исследована динамика формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток в микроструктурах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с диффузионным легированием, при их засветке картиной интерференции с контрастом $m \approx 1$, создаваемой плоскими световыми волнами. Получены соотноше-

ния, описывающие динамику формирования пространственных гармоник напряженности электрического поля фоторефрактивных решеток в микроструктурах X -среза на различных глубинах x от границы, учитывающие как распределения концентрации ионов $C_{\text{Cu}^+}(x)$ и $C_{\text{Cu}^{2+}}(x)$, так и соответствующую зависимость суммарной интенсивности записывающих волн $J(x)$, обусловленную оптическим поглощением; определены значения констант Гласса для трех диффузионно-легированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

2. Экспериментально реализовано и исследовано структурирование ансамблей, состоящих из диэлектрических ($90\%\text{Al}_2\text{O}_3+10\%\text{CeO}_2$; синтетический алмаз АСМ) микро- и наночастиц, а также из микрочастиц TiC с металлическим типом проводимости, на поверхности микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X -среза сильными электрическими полями, создаваемыми вследствие фотогальванического механизма перераспределения заряда при засветке как картиной интерференции двух лазерных пучков Гаусса с радиальной симметрией или с эллиптическим поперечным сечением, так и единственным гауссовым пучком такого типа.

3. Разработан диодный узел и установка для исследования динамики пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения кристалла ниобата лития при атмосферном давлении, а также соответствующая методика эксперимента.

4. Экспериментально обнаружены импульсы разряда, соответствующие пироэлектрической генерации электронных пучков с длительностью от 4 до 15 нс, с временем нарастания переднего фронта от 1 до 1,9 нс, с силой тока в максимуме до 600 мА, и с переносимым зарядом до 5,7 нКл, в циклах нагрева и охлаждения от 25 до 80 °С при атмосферном давлении монокристаллического образца полярного Z -среза LiNbO_3 цилиндрической формы с толщиной 7 мм и диаметром 13 мм.

Научная и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Практическая реализация технологии диффузионного легирования коммерчески доступных пластин ниобата лития ионами меди, с проведенной отработкой режимов синтеза, позволяет создавать на её основе микроструктурированные образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X -среза с предсказуемыми распределениями фотовольтаических и фоторефрактивных свойств в приповерхностной области, представляющие значительный интерес для развития метода фотогальванического пинцета с целью манипулирования микро- и нанообъектами, в том числе имеющими биологическую природу.

2. Результаты проведенных экспериментальных исследований, теоретического анализа и численного моделирования динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных микроструктур (решеток) над поверхностью пластин $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X -среза при засветке картиной интерференции с контрастом $m \approx 1$, создаваемой лазерными пучками с длиной волны 532 нм, наряду с экспериментальной демонстрацией агрегирования на поверхности таких образцов микро- и наночастиц, могут быть основой для создания экспериментальных образцов фотовольтаических пинцетов, использующих коммерчески доступные пластины конгруэнтного ниобата лития.

3. Разработанные диодный узел и установка для наблюдения термически индуцированной эмиссии электронов в циклах нагрева и охлаждения монокристаллических образцов полярного Z -среза LiNbO_3 цилиндрической формы при атмосферном давлении, а также результаты её экспериментальной реализации, демонстрируют воз-

возможность их использования для исследования динамики пироэлектрической генерации электронных пучков наносекундной длительности.

4. Полученные в диссертационной работе при исследовании пироэлектрической генерации электронных пучков экспериментальные результаты, развитые подходы и разработанные методы могут быть основой для реализации нового поколения компактных твердотельных импульсных источников электронов и рентгеновского излучения, использующих термическое воздействие на образцы полярных срезов одноосных сегнетоэлектрических кристаллов, таких как ниобат и танталат лития.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в следующих научно-исследовательских работах:

– проект № 2.1.1/9701 «Эффекты нелинейного пространственного и спектрального преобразования световых полей в квазирегулярных дифракционных, волноводно-оптических и доменных структурах на основе фотополимерных материалов, электрооптических и сегнетоэлектрических кристаллов» (проект по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)»);

– «Стабильные периодические и периодически-поляризованные структуры, фотонные решетки и сверхрешетки в кристаллах, фотополимерных композициях и оптических волноводах на их основе», выполненный в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2010–2014 годы, государственный контракт от 22 марта 2010 г. № 02.740.11.0553;

– «Взаимодействия и самовоздействие световых пучков в фоторефрактивных кристаллах, фотополимерных нанокompозитных материалах, волноводных периодически поляризованных структурах на ниобате лития, фотонных решетках и сверхрешетках в электрооптических и лазерных кристаллах, для обеспечения высокочувствительных адаптивных интерферометрических измерений и реализации волноводных нелинейно-оптических и лазерных компонентов», по государственному заданию Министерства образования и науки РФ на оказание услуг (выполнения работ) 01.01.2012-31.12.2014;

– «Анализ закономерностей взаимодействия световых пучков на динамических голограммах в кубических фоторефрактивных кристаллах и волноводных периодически поляризованных структурах на ниобате лития для обеспечения высокочувствительных адаптивных интерферометрических измерений», международный проект, выполняемый по гранту РФФИ-БРФФ № 12-02-90038-Бел_а (2012–2013 годы);

– Программа «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, тема проекта «Разработка оптически управляемого малогабаритного источника рентгеновского излучения», 2014 г.;

– Научно-исследовательская работа № 2491 «Исследование физических явлений в фоторефрактивных кристаллах, фотополимерных нанокompозитных материалах, фотонных решетках и сверхрешетках в электрооптических кристаллах, в элементах энергонезависимой памяти, пленках ИТО и диоксида кремния, модифицированного углеродом» – задание № 2014/225 на выполнение государственных работ в сфере «Задание Министерства на оказание услуг (выполнения работ)», 01.01.2012-31.12.2013;

– Научно-исследовательская работа «Развитие методов голографической интерферометрии для исследования механизмов нелинейного отклика при двухпучковом взаимодействии в фоточувствительных кристаллах» – Госзадание Министерства

науки и высшего образования Российской Федерации на 2017-2019 годы (задание 3.8898.2017/БЧ);

– Научно-исследовательская работа «Развитие методов линейной, нелинейной и дискретной дифракции световых полей для исследования параметров деформаций в структурированных микро-, нанослоях и гетероструктурах на основе сегнето-электрических функциональных материалов», Грант РФФИ № 16-29-14046_офи_м 2017–2019 гг.;

– Научно-исследовательская работа «Физические аспекты исследований в актуальных направлениях развития плазменной эмиссионной электроники, фотоники, оптического и космического материаловедения», Госзадание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2020-2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре ЭП ТУСУРа в виде выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ студентами, обучающимися по направлениям подготовки «Электроника и наноэлектроника» и «Фотоника и оптоинформатика»; они использовались в ООО «Кристалл Т», а также в процессе прохождения производственной, преддипломной и научно-исследовательской практик студентами кафедры Электронных приборов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: Российская научная студенческая конференция «Физика твердого тела» ФТТ-2010, ФТТ-2012, (г. Томск); Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2019» (г. Санкт-Петербург); Научная сессия ТУСУР–2013, 2015, 2016, 2020, Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, (г. Томск); Всероссийская с международным участием научная конференция «Полифункциональные химические материалы и технологии» (г. Томск, 21–23 ноября, 2013); XI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (г. Самара, 6–9 ноября 2013); XXVIII Школа-симпозиум по голографии и когерентной оптике (г. Нижний Новгород, 22–26 августа 2013 г.); XXXI международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике (г. Екатеринбург, 30 сентября – 4 октября 2019); V Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики «АПР-2013», (г. Томск); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects «EFRE 2014, 2018, 2020» (г. Томск); XIII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления 2017» (г. Томск, 2017); VI Международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (г. Москва, 1–3 февраля 2017 г.); XIV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП 2018)» (г. Новосибирск, 2018); XVII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2020») (г. Москва, 23–28 августа 2020 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 29 публикациях: 8 публикаций – в журналах из перечня ВАК, из них 5 публикаций в журналах, индексируемых в базах Scopus и/или Web of Science; 2 статьи – в сборниках международных конференций, индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus; 19 публикаций – в сборниках научных трудов и материалов научных и научно-практических конференций.

Личный вклад автора

В диссертации использованы только те результаты, в получении которых автору принадлежит определяющая роль. Опубликованные работы написаны в соавторстве с

членами научной группы, а также с А.А. Ельчаниновым, Б.И. Авдоченко, А.Д. Безпальным и со студентами А.И. Татьянниковым, Н.Н. Смалем, и др. Все соавторы указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. В совместных работах диссертант принимал определяющее участие в создании экспериментальных установок и разработке их основных узлов; в проведении экспериментов, теоретического анализа и численного моделирования; в обработке полученных результатов и их интерпретации.

Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации – 209 страниц, включая 77 рисунков и 12 таблиц. Нумерация формул и таблиц принята по главам. Список литературы содержит 148 наименований.

Содержание работы

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации, формируются цель и задачи работы и выносимые на защиту основные научные положения. Указываются научная новизна и практическая значимость результатов; приводится краткая аннотация содержания диссертации по главам.

В первой главе представлен обзор работ, посвященных исследованию явлений, связанных с индуцированными в сегнетоэлектрических кристаллах при термическом и световых воздействиях сильными электрическими полями и с использованием последних для генерации электронных пучков с энергией до 100 кэВ, рентгеновского и нейтронного излучения, а также для реализации устройств оптически управляемого манипулирования микрочастицами.

В подразд. 1.1 представлено описание свойств сегнетоэлектрических кристаллов и одного из уникальных сегнетоэлектриков – ниобата лития. Подразд. 1.2 посвящен генерации в ниобате и танталате лития сильных электрических полей. В п. 1.2.1 уделяется внимание пироэлектрическому эффекту и ускорению электронов полем связанных зарядов, индуцированных при нагреве и охлаждении образцов полярных срезов этих кристаллов. В п. 1.2.2 приводятся сведения о генерации рентгеновского и нейтронного излучения элементами на основе ниобата и танталата лития; описаны конструктивные особенности и показан внешний вид пироэлектрических генераторов рентгеновского излучения. В п. 1.2.3 рассмотрен фотогальванический эффект в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата и танталата лития, как способ генерации сильных электрических полей. Здесь приведены сведения о генерации электронных пучков и рентгеновского излучения при лазерном воздействии на кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ce}$. Значительное внимание уделено описанию электрических полей, возникающих над поверхностью кристаллов ниобата лития при засветке картиной интерференции световых волн, и их использованию для манипулирования микро- и нанообъектами. Отмечается, что такой подход является основой для создания так называемых фотогальванических пинцетов. В качестве примера их реализации представлены результаты структурирования ансамблей микро- и наночастиц на поверхности планарных волноводов, сформированных в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$.

В подразд. 1.3 данной главы, на основе проведенного в ней анализа сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты работ по практической реализации технологии легирования пластин ниобата лития ионами Cu и отработке режимов, позволяющих создавать на её основе образцы с высокими фотовольтаическими и фоторефрактивными свойствами в приповерхностной области.

В подразд. 2.1 рассмотрена технология нанесения пленок меди на пластины X-среза из номинально нелегированного конгруэнтного ниобата лития и пластины ниобата лития, легированного оксидом магния (MgO), включающая предварительные процессы подготовки подложек и измерения спектров оптического пропускания в диапазоне 320–1100 нм. Далее описаны режимы, при которых металлические пленки наносились методами магнетронного распыления, ионно-магнетронного и термического напыления, а оксидные – методом золь-гель синтеза.

Подразд. 2.2 посвящен описанию режимов для разработанной технологии диффузионного легирования, включающей использование методики подавления обратной диффузии Li₂O, нагрев до температуры 1000 °С и выдержку в течение промежутка времени от 2 до 20 часов. Характеристики используемых металлических и оксидных пленок и время диффузии для некоторых образцов LiNbO₃:Cu (№ 4 – № 7) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры некоторых образцов LiNbO₃:Cu, полученных поверхностным диффузионным легированием

Номер и толщина образца, подложка	Метод нанесения и тип пленки	Толщина пленки, нм	Время диффузии, час	Средняя концентрация ионов меди C_{Cu^+} , М ⁻³	Средняя концентрация ионов меди $C_{Cu^{2+}}$, М ⁻³
4 1,8 мм LiNbO ₃	магнетронное распыление, металлическая	900	9	$6,06 \cdot 10^{24}$	$2,69 \cdot 10^{25}$
5 1,2 мм LiNbO ₃	термическое напыление, металлическая	400		$1,82 \cdot 10^{24}$	$1,52 \cdot 10^{25}$
6 1,2 мм LiNbO ₃	ионно-магнетронное напыление, металлическая	550		$5,35 \cdot 10^{23}$	$9,32 \cdot 10^{24}$
7 1,2 мм LiNbO ₃	золь-гель синтез, оксидная	600		$7,01 \cdot 10^{23}$	$7,00 \cdot 10^{24}$

В подразд. 2.3 приведены результаты анализа спектральных зависимостей показателя оптического поглощения для исходных пластин LiNbO₃ и MgO:LiNbO₃ и для полученных диффузионным легированием образцов LiNbO₃:Cu и MgO:LiNbO₃:Cu. Использование известной методики [6] позволило по показателям поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм определить соответственно среднюю концентрацию ионов меди Cu⁺ и Cu²⁺ в этих образцах. Для образцов № 4 – № 7 данные средние значения представлены в таблице 1.

Результаты экспериментального исследования зависимости показателя поглощения $k_{532}(x)$ от координаты x на длине волны $\lambda = 532$ нм для образцов № 5 (рисунок 1, точки), № 6 и № 7, представленные в подразд. 2.4, свидетельствуют о необходимости учета микроструктурированного характера фотогальванически активных слоев LiNbO₃:Cu, создаваемых высокотемпературной диффузией меди в пластины X-среза конгруэнтного ниобата лития. Аппроксимация экспериментальных зависимостей

функцией Гаусса, показанная на рисунке 1 для образца № 5 сплошной кривой, позволила определить распределения для пропорциональных $k_{532}(x)$ концентраций ионов Cu^+ в микроструктурированных областях исследованных образцов.

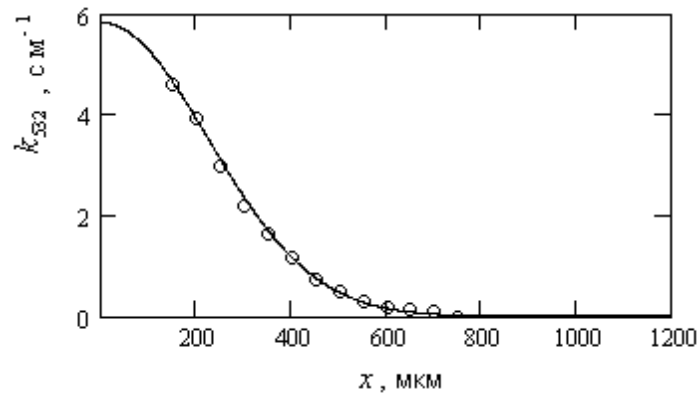


Рисунок 1 – Зависимость показателя оптического поглощения на длине волны 532 нм от глубины x в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5, сформированном диффузией меди из металлической пленки, нанесенной методом термического напыления на грань $x = 0$. Точки – эксперимент, сплошная линия – аппроксимация функцией Гаусса с полушириной $\Delta x = 316$ мкм

Такие распределения характерны для твердотельной диффузии из мгновенного поверхностного источника и описываются в исследованных микроструктурах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ полушириной гауссовых распределений от ~ 220 до ~ 320 мкм; максимальными значениями концентрации ионов Cu^+ – от $1,0 \cdot 10^{24}$ до $7,8 \cdot 10^{24}$ м⁻³; коэффициентом диффузии – от 0,38 до 0,77 мкм²/с, зависящим от метода нанесения пленок, из которых она осуществляется.

Третья глава посвящена исследованию формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток в легированных ионами Cu пластинах ниобата лития X -среза, в том числе и микроструктурированных (см. таблицу 1), полученных по технологии высокотемпературной диффузии.

В подразд. 3.1 описана экспериментальная установка, позволившая реализовать методику формирования сильных пространственно-неоднородных электрических полей в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза и исследования его динамики. Освещение исследуемого образца двумя лазерными пучками с длиной волны $\lambda_w = 532$ нм, образующими интерференционную картину с высоким контрастом ($m \approx 1$) и пространственным периодом от 2,44 до 45 мкм приводило к записи в нем фоторефрактивной решетки с вектором \mathbf{K} , параллельным полярной оси Z . Считывание ее в процессе формирования методом брэгговской дифракции светового пучка с длиной волны $\lambda_r = 655$ нм позволяло фиксировать с помощью системы обработки данных временные зависимости мощностей зондирующего и дифрагированного пучков $P_{p2}(t)$ и $P_d(t)$ через интервалы 0,1 с.

В подразд. 3.2 представлены результаты экспериментальных исследований динамики формирования фоторефрактивных решеток с пространственным периодом $\Lambda = 2,44$ мкм в семи микроструктурированных образцах, созданных по описанной в главе 2 технологии диффузионного легирования, а также в трех объемно-легированных пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза. Анализ кинетики дифракционной эффективности $\eta(t)$ соответствующего необыкновенным волнам считывающего пучка показал, что для

микроструктурированных образцов № 4, № 5 и № 6 достигаемые значения дифракционной эффективности составляли около 57, 55 и 17 % соответственно. Максимальное значение дифракционной эффективности $\eta(t) = 68$ % наблюдалось в объемно-легированном образце с толщиной 1,7 мм, концентрации ионов меди Cu^+ и Cu^{2+} для которого были оценены как $2,66 \cdot 10^{24}$ и $1,28 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Анализ полученных экспериментальных данных для начального участка формирования фоторефрактивных решеток излучением с длиной волны 532 нм в пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза проведен в подразделе 3.3. Показано, что в данном случае временная зависимость дифракционной эффективности удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией

$$\eta_{in}(t) = bt^2 + ct^3, \quad (1)$$

с коэффициентами b и c , которые были определены с использованием метода наименьших квадратов для трех микроструктурированных и двух объемно-легированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Сравнение динамики формирования фоторефрактивных решеток на начальном участке в исследованных образцах показало, что она имеет в них качественно одинаковый характер.

В подразд. 3.4 представлен анализ динамики формирования поля пространственного заряда в пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза, проведенный в приближении заданной интенсивности света и в пренебрежении эффектом насыщения ловушек, что позволило для начального условия, соответствующего включению записывающих пучков при $t = 0$, получить аналитическое выражение, описывающее динамику формирования поля пространственного заряда фоторефрактивной решетки в образцах с неоднородным распределением фотовольтаической примеси, с зависящим от координаты x временем релаксации. С использованием разложения в ряд по модифицированным функциям Бесселя из него получено аналитическое выражение для амплитуды первой пространственной гармоники фоторефрактивной решетки, как для произвольного времени формирования, так и для начального участка, где наблюдается её рост по линейному закону, с сохранением пространственной зависимости от координаты x .

В подразд. 3.5 проведен анализ эффективности дифракции считывающего светового пучка на фоторефрактивной решетке в микроструктурированной пластине $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, учитывающий зависимость от координаты x амплитуды первой пространственной гармоники возмущений показателя преломления, для начального участка фотовольтаической записи. Для случая точного выполнения условия Брэгга получены выражения, описывающие квадратичные временные зависимости эффективности дифракции для необыкновенного и обыкновенного считывающих пучков, включающие эффективную длину взаимодействия в микроструктурированном слое, определяемую интегральным выражением.

В подразд. 3.6 представлены результаты определения констант Гласса для пяти экспериментально исследованных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза по полученным соотношениям для динамики дифракционной эффективности формирования фоторефрактивных решеток на начальном участке. Константы Гласса при длине волны записывающего излучения $\lambda_w = 532$ нм для микроструктурированных образцов № 5 и № 6 были оценены для необыкновенных волн как $G_e \approx 9,4 \cdot 10^{-12}$ и $2,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, соответственно, а для № 4 для обыкновенных волн – как $G_o \approx 10,3 \cdot 10^{-12}$ м/В. Полученные константы Гласса для обыкновенных волн для образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с объемным легированием, с толщинами 5,0 и 8,0 мм и концентрацией ионов меди Cu^{2+} , составляю-

щей $5,04 \cdot 10^{24}$ и $7,88 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, оцениваемые как $G_o \approx 2,5 \cdot 10^{-12}$ и $G_o \approx 7,4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ соответственно, близки по порядку величины к значению, приведенному в известной монографии [5].

В **четвертой главе** представлены результаты работ по моделированию динамики сильных электрических полей фоторефрактивных решеток в пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза и по их использованию для фотовольтаического агрегирования микро- и наночастиц на поверхности образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза, как микроструктурированных, сформированных методом высокотемпературной диффузии из металлических пленок меди, так и изготовленных из объемно-легированных медью кристаллов ниобата лития.

Основанному на результатах главы 3 диссертации моделированию динамики поля пространственного заряда фоторефрактивной решетки в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза посвящен подразд. 4.1. При расчетах амплитуды первой пространственной гармоники поля пространственного заряда фоторефрактивной решетки $E_1(x,t)$ использовалось аналитическое выражение, описывающее динамику ее формирования в образцах с неоднородным распределением фотовольтаической примеси, с зависящим от координаты x временем релаксации. Получено, что при записи фоторефрактивной решетки световыми пучками с длиной волны $\lambda_w = 532 \text{ нм}$, формирующими интерференционную картину с контрастом $m = 1$ в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с диффузионным легированием № 4, № 5 и № 6, временная зависимость $E_1(x,t)$ имеет немонотонный характер. Для микроструктурированного образца № 5 (рисунок 2) при суммарной интенсивности записывающих пучков $J_0 = 128 \text{ мВт/см}^2$ максимальная амплитуда, наблюдаемая на границе кристалла $x = 0$, достигает значения $E_1^{max}(0, t_m) \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ при $t_m \approx 250 \text{ с}$. Для микроструктурированных образцов № 4 и № 6 эту максимальную амплитуду можно оценить, как $E_1^{max}(0, t_m) \approx 4,2 \cdot 10^6$ и $0,81 \cdot 10^6 \text{ В/м}$, соответственно. Численные расчеты для двух образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с объемным легированием медью показали, что характер временной эволюции $E_1(x,t)$ имеет в них качественно такой же характер. Из результатов проведенного моделирования следует вывод о перспективности использования микроструктурированных образцов № 4 и № 5 для реализации фотовольтаических пинцетов, где важную роль должна играть достигаемая на границе $x = 0$ амплитуда электрического поля первой пространственной гармоники фоторефрактивной решетки $E_1(x,t)$.

В подразд. 4.2 описана разработанная методика экспериментальной реализации агрегирования микро- и наночастиц сильными электрическими полями, создаваемыми над поверхностью пластин $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза вследствие фотогальванического механизма перераспределения зарядов при их засветке как картиной интерференции двух лазерных пучков Гаусса с радиальной симметрией или с эллиптическим поперечным сечением, так и единственным гауссовым пучком такого типа. В экспериментальных исследованиях по фотовольтаическому агрегированию использовался композиционный порошок на основе оксида алюминия и оксида церия, с составом $90\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ CeO}_2$, состоящий из наночастиц сферической формы, имеющих диаметр от 40 до 80 нм, а также абразивные порошки синтетического алмаза АСМ с диаметром 0,5 мкм и карбида титана TiC с диаметром частиц от 4 до 8 мкм.

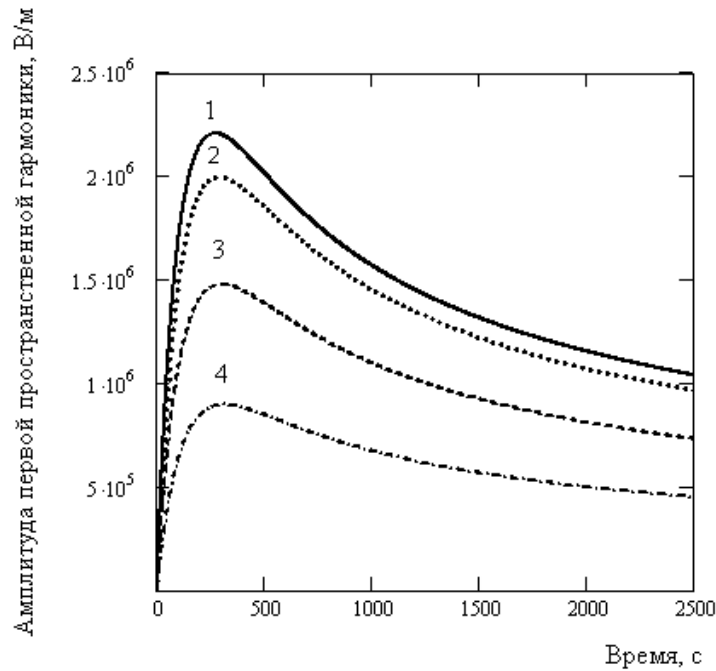


Рисунок 2 – Временная зависимость амплитуды первой пространственной гармоники электрического поля фоторефрактивной решетки в пластине № 5 $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с диффузионным легированием на глубинах $x = 0$ (1), 100 (2), 200 (3) и 300 мкм (4), рассчитанная для суммарной входной интенсивности записывающих пучков $J_0 = 128 \text{ мВт/см}^2$

Подразд. 4.3 посвящен экспериментальной реализации агрегирования микро- и наночастиц на поверхности пластин $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза. В п. 4.3.1 описаны результаты экспериментов по агрегированию микро- и наночастиц электрическими полями фоторефрактивных решеток с пространственным периодом 45 мкм на поверхности микроструктурированного образца № 5. С использованием разработанной методики, описанной в подразд. 4.2, были реализованы экспериментально эффекты агрегирования для порошков всех трех типов, как имеющих диэлектрические свойства (композиционный нанопорошок $90\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{CeO}_2$ и АСМ), так и обладающего металлическим типом проводимости (TiC). Типичные картины распределения частиц композиционного нанопорошка по поверхности пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5, зарегистрированные для суммарной входной интенсивности записывающих пучков $J_0 = 636 \text{ мВт/см}^2$, представлены на рисунке 3. Получено, что захват и агрегирование диэлектрических наночастиц композиционного порошка с диаметром 40–80 нм наблюдается уже при времени записи 30 с как при суммарной интенсивности $J_0 = 636 \text{ мВт/см}^2$, так и для $J_0 = 64 \text{ мВт/см}^2$. При интенсивности $J_0 = 64 \text{ мВт/см}^2$, для такого же времени записи, степень агрегирования диэлектрических микрочастиц синтетического алмаза с диаметром 0,5 мкм является сравнительно низкой, а для карбида титана с диаметром частиц 4–8 мкм агрегация практически отсутствует. Было также обнаружено уменьшение степени агрегации частиц в центре освещаемой интерференционной картиной области, особенно заметное при низкой суммарной интенсивности формирующих ее гауссовых пучков.

В п. 4.3.2 представлены результаты экспериментального исследования агрегирования микро- и наночастиц на поверхности микроструктурированного образца № 5 при его засветке единственным записывающим радиально-симметричным гауссовым пучком с $\lambda_w = 532 \text{ нм}$. Высказано предположение, что наблюдаемое в этом случае

уменьшение степени агрегирования микро- и наночастиц в области, вытянутой вдоль оси Y и расположенной в центре засвечивающего пучка, обусловлено наличием в её пределах отталкивающих частицы сил, связанных с нулевой пространственной гармоникой формирующегося за счет фотофольтаического эффекта электрического поля. Представленные в п. 4.3.3 результаты по экспериментальной реализации процессов агрегирования наночастиц композиционного порошка на поверхности двух образцов X -среза $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с объемным легированием показывают, что их качественные особенности соответствуют наблюдаемым для микрострурированного образца № 5.

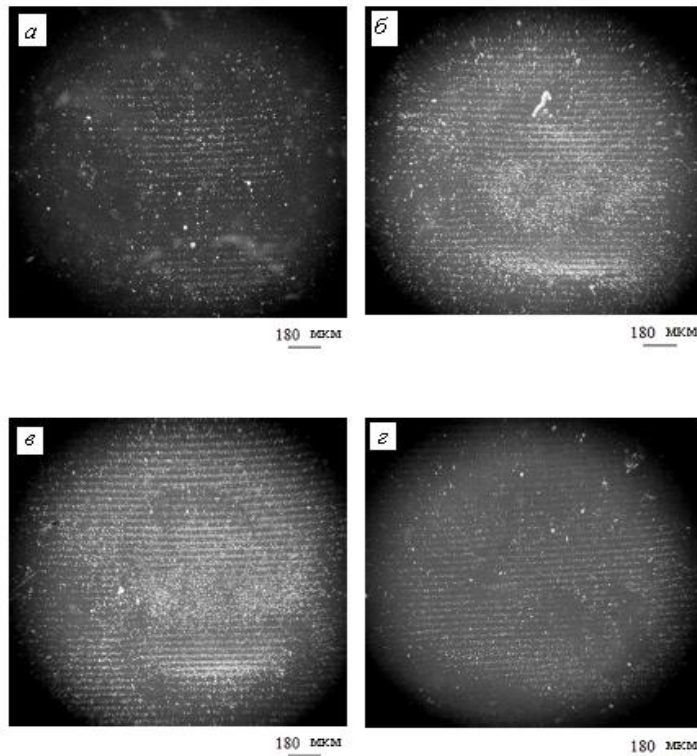


Рисунок 3 – Микрофотографии распределений наночастиц порошка с композицией $90\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{CeO}_2$ и диаметром 40-80 нм по поверхности X -среза образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5, подвергнутого предварительной засветке интерференционной картиной с пространственным периодом $\Lambda = 45$ мкм, контрастом $m \approx 1$ и суммарной входной интенсивностью записывающих пучков $J_0 = 636$ мВт/см², с продолжительностью $t_r = 30$ (а), 120 (б), 300 (в) и 1800 с (з). Полярная ось C кристалла расположена вертикально

Моделированию распределений диэлектрофоретических сил, создаваемых полем пространственного заряда фоторефрактивной решетки над поверхностью пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза, посвящен подразд. 4.4. В п. 4.4.1 описаны диэлектрофоретические силы, действующие на нейтральные частицы, находящиеся на поверхности $x = 0$ такой пластины. Вывод аналитических выражений для распределения электрического поля над поверхностью микроструктуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного среза, создаваемое исключительно тангенциальной составляющей поля фоторефрактивной решетки, записываемой одномерными гауссовыми пучками, представлен в п. 4.4.2. Полученные выражения использовались в п. 4.4.3 для анализа индуцируемого подобным пучком распределения диэлектрофоретических сил и соответствующего им диэлектрофоретического потенциала

$$V_{DEF}(x, z, t) = -\varepsilon_0 \alpha \left[\left(E_x^{out}(x, z, t) \right)^2 + \left(E_z^{out}(x, z, t) \right)^2 \right], \quad (2)$$

где α – поляризуемость частицы; $E_z^{out}(x, z, t)$ и $E_x^{out}(x, z, t)$ – компоненты электрического поля (тангенциальной и нормальной к границе $x = 0$), создаваемого фоторефрактивной решеткой над поверхностью кристалла. Результаты проведенного численного моделирования распределений $V_{DEF}(z)$ для наночастиц CeO_2 с радиусом $r_a = 30$ нм, наблюдаемых на расстоянии от поверхности кристалла $x = r_a$ при засветке образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5 рассмотренным выше одномерным гауссовым пучком с интенсивностью в максимуме $J_0 = 320$ мВт/см² (рисунок 4), продемонстрировали возможность заметного отсутствия агрегирования при $z = 0$ только для времени засветки $t_r > 600$ с, когда в центре пучка локальный минимум уже не имеет места.

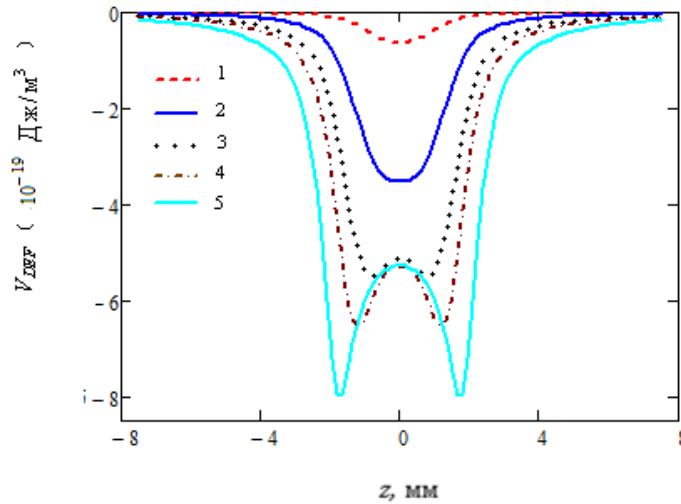


Рисунок 4 – Распределение диэлектрофоретического потенциала $V_{DEF}(z)$ для наночастиц CeO_2 с радиусом $r_a = 30$ нм, создаваемых на расстоянии от поверхности кристалла $x = r_a$ при засветке образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5 одномерным гауссовым пучком с интенсивностью $J_0 = 320$ мВт/см² при продолжительности засветки $t_r = 30$ с (1), 120 с (2), 300 с (3), 600 с (4), 2500 с (5)

На основании сравнения результатов моделирования с полученными в п. 4.3.2 экспериментальными данными, показывающими уменьшение степени агрегирования наночастиц при $z = 0$ для радиально-симметричного гауссова пучка при существенно меньших временах засветки t_r , чем 600 с, высказаны предположения о том, что это может быть связано как с принятыми в расчетах приближениями, так и с неприменимостью рассматриваемой диэлектрофоретической модели захвата частиц для поля пространственного заряда, создающего соответствующие силы над поверхностью неполярного X-среза кристалла за счет фотовольтаического механизма перераспределения заряда.

Экспериментальному исследованию агрегирования наночастиц при формировании электрического поля в микроструктурированном образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5 в результате его освещения как интерференционной картиной, создаваемой эллиптическими гауссовыми пучками, так и единственным пучком такого вида, посвящен подразд. 4.5. В этом случае возрастает степень применимости модели формирования поля пространственного заряда одномерными гауссовыми пучками, используемой в п. 4.4.2 и 4.4.3 для описания наблюдаемых экспериментально особенностей фотовольтаического агрегирования наночастиц. Однако проведенные эксперименты пока-

зали, что и при использовании эллиптических гауссовых пучков, в центральной части освещенной области концентрация агрегируемых наночастиц порошка с композицией 90% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{CeO}_2$ является минимальной при всех используемых значениях экспозиции, приводящих к его неравномерному осаждению на поверхность кристалла $x = 0$.

В пятой главе представлены результаты исследования динамики генерации электронных пучков в микросекундном и наносекундном диапазоне сильными электрическими полями, создаваемыми вследствие пирозлектрического эффекта при термическом воздействии на монокристаллические образцы LiNbO_3 полярного Z-среза, при форвакуумном и атмосферном давлении.

Подразд. 5.1 посвящен исследованию пирозлектрической генерации электронных пучков и рентгеновского излучения монокристаллическими образцами ниобата лития в циклах их нагрева и охлаждения при давлении в форвакуумном диапазоне. В п. 5.1.1 приведено описание экспериментальной установки и методики регистрации динамики генерации электронных пучков в микросекундном диапазоне и возникающего при этом рентгеновского излучения. В п. 5.1.2 представлены результаты проведенных при давлении $\sim 10^{-2}$ Торр экспериментов по пирозлектрической эмиссии электронов образцом Z-среза ниобата лития цилиндрической формы с толщиной $h_{cr} = 7,0$ мм и диаметром 13 мм и объемно-легированного медью образца в виде бруска с толщиной $h_{cr} = 3,6$ мм и поперечными размерами $10,5 \times 20,0$ мм². Получено, что наблюдаемые в микросекундном диапазоне колебания тока разряда в рассматриваемой схеме пирозлектрической генерации электронного пучка происходят с частотой продольных акустических колебаний используемых образцов ниобата лития. Механизм возбуждения этих колебаний связан с обратным пьезоэлектрическим эффектом, за счет изменения напряженности электрического поля, происходящего при быстрой нейтрализации поверхностного заряда кристалла, индуцированного благодаря пирозлектрическому эффекту, на начальной стадии электронной эмиссии. Результаты регистрации рентгеновского излучения, сопровождающего пирозлектрическую генерацию электронных пучков образцами Z-среза ниобата лития для давления в форвакуумном диапазоне, представлены в п. 5.1.3. При использовании цилиндрического образца для регистрации изображения металлической сетки на рентгеновской пленке потребовались три цикла «нагрев-охлаждение», в течение которых наблюдалось 6 эмиссионных импульсов, а в случае объемно-легированного медью образца в виде бруска это изображение было зарегистрировано после семи циклов «нагрев-охлаждение», в течение которых наблюдалось 37 импульсов эмиссии электронов.

В подразд. 5.2 представлена разработанная методика и результаты экспериментальных исследований динамики пирозлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения сегнетоэлектрического кристалла ниобата лития при атмосферном давлении. В п. 5.2.1 описан диодный узел, разработанный для регистрации в наносекундном диапазоне динамики пирозлектрической генерации импульсных электронных пучков при термическом воздействии на монокристаллические образцы полярного Z-среза LiNbO_3 цилиндрической формы с толщиной от 1 до 7,0 мм и диаметром от 5 до 13 мм, в циклах нагрева и охлаждения от 25 до 80 °С при атмосферном давлении. Коаксиальная конструкция узла позволяла использовать три значения сопротивления нагрузки, $R_l = 5,1, 2,55$ и $1,7$ Ома, и с помощью встроенного согласующего резистора $R_m = 50$ Ом обеспечивать передачу регистрируемого на нем импульсного напряжения $U_l(t)$ через разъем ВР-73Ф и коаксиальный кабель на 50-омный вход цифрового

осциллографа. В п. 5.2.2, посвященном описанию методики экспериментального исследования, представлена электрическая схема регистрации импульсов пьезоэлектрической генерации (рисунок 5) с использованием разработанного диодного узла.

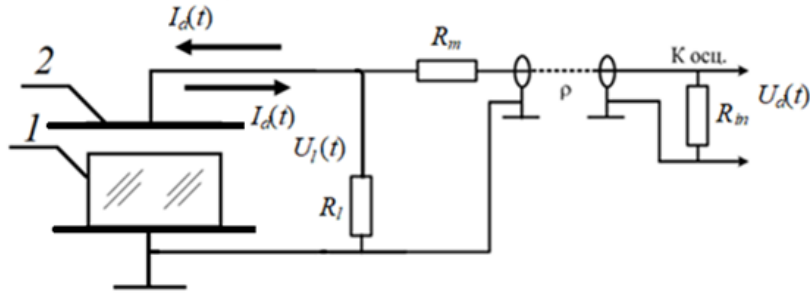


Рисунок 5 – Электрическая схема регистрации тока разряда: 1 – кристалл ниобата лития; 2 – анод; $R_{in} = 50$ Ом – входное сопротивление осциллографа

В пренебрежении неполным согласованием (в приближении $R_l \ll R_m = \rho = R_{in} = 50$ Ом) связь определяемого тока разряда $I_d(t)$ с измеряемым напряжением $U_d(t)$ может быть получена в следующем виде:

$$I_d(t) = U_l(t) \frac{(R_l + R_m + R_{in})}{R_l (R_m + R_{in})} = \frac{R_m + R_{in} + R_l}{R_{in}} \frac{1}{R_l} U_d(t). \quad (3)$$

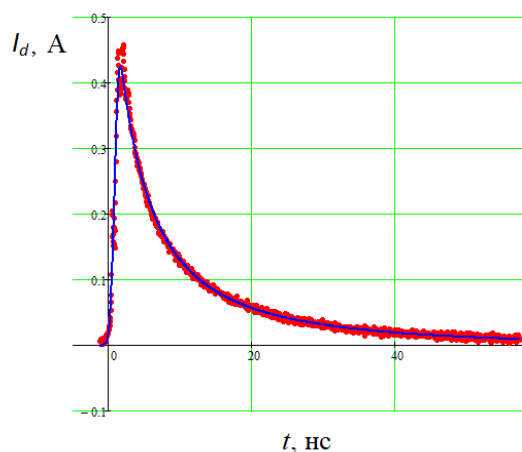
Для регистрации осциллограмм в циклах нагрева и охлаждения использовался ждущий режим с синхронизацией по нарастающему или спадающему фронту. Нагрев диодного узла с кристаллом от 25°C до 80°C происходил в течение 15–20 минут, а в цикле естественного охлаждения его температура снижалась до исходной за время ~ 30 мин. При этом для зазора 0,5 мм между верхней поверхностью кристалла и анодом (см. рисунок 5) регистрировалось более 50 импульсов разряда. Как правило, в цикле нагрева фиксировались импульсы отрицательной (ток $I_d(t)$ на схеме, представленной на рисунке 5, в этом случае течет справа налево, верхняя стрелка), а в циклах охлаждения – положительной полярности (ток $I_d(t)$ течет слева направо, нижняя стрелка), с амплитудами тока от 50 мА до 600 мА.

В п. 5.2.3 представлены результаты экспериментального исследования динамики пьезоэлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения цилиндрического нелегированного кристалла ниобата лития Z-среза с толщиной $h_{cr} = 7,0$ мм и диаметром 13 мм при атмосферном давлении. Проведенные исследования импульсов тока разряда в цикле охлаждения при нагрузке $R_l = 5,1$ Ом с использованием осциллографов Keysight DSO-X 3102T (1 ГГц, 5 Гвыб/с) и Tektronix MSO серии 6 (рисунок 6) показали, что регистрируемые ими импульсы разряда не имеют существенных различий по амплитуде тока и величине переносимого заряда. Однако регистрируемую более широкополосным осциллографом Tektronix MSO серии 6 длительность переднего фронта импульсов, составляющую около 1 нс, следует оценивать как более близкую к реальной.

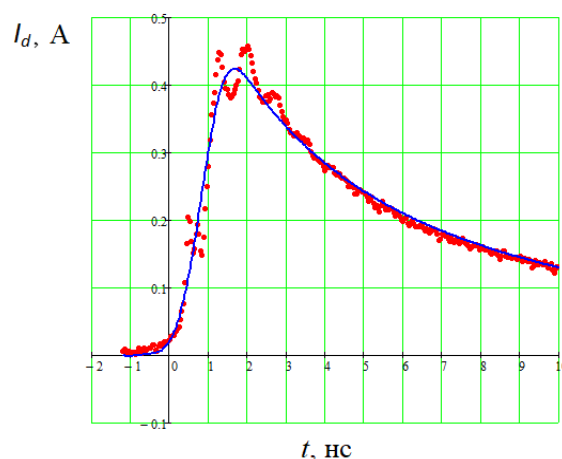
Как видно из рисунка 6,б, на начальном участке развития тока разряда наблюдаются колебания, которые можно связать с наличием паразитной индуктивности L_s анодной части диодного узла, не учтенной на электрической схеме регистрации (см. рисунок 5). Проведенный анализ показал, что временная зависимость для импульсов тока разряда, наблюдаемых в цикле охлаждения, может быть удовлетворительно аппроксимирована следующим выражением:

$$I_d(t) = I_{pm} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t+t_i}{\tau_i} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{t+t_f}{\tau_f} \right)^3 \right] \exp \left[- \left(\frac{t+t_g}{\tau_g} \right)^4 \right] \right\} \times \exp \left[-a \ln(1+bt+ct^3) \right], \quad (4)$$

где параметры модели могут быть определены из экспериментальных данных подгонкой по методу наименьших квадратов. Для рисунка 6 аппроксимирующей кривой соответствуют параметры: $I_{pm} = 0,663$ А, $t_i = -1,15$ нс, $t_f = 0,59$ нс, $\tau_i = 11,9$ нс, $\tau_f = 2,58$ нс, $\tau_g = 1,79$ нс, $a = 1,628$, $b = 17,03 \cdot 10^7$ с⁻¹, $c = 16,6 \cdot 10^{21}$ с⁻³. Амплитуда тока в основном максимуме для других зарегистрированных импульсов составляла от 60 до 350 мА, а переносимый заряд изменялся от 1,3 до 5,7 нКл. Исследование импульсов тока разряда в цикле нагрева при нагрузке $R_l = 5,1$ Ом с использованием осциллографа Keysight DSO-X 3102T показало, что они имеют отрицательную полярность, с максимальной амплитудой I_{max} , достигающей 240 мА, и переносимым зарядом от 1,3 до 4,3 нКл. Качественно картины спада тока разряда после достижения его максимума в режимах охлаждения и нагрева имеют одинаковый характер, при этом наблюдаемая динамика тока разряда $I_d(t)$ и временная зависимость переносимого заряда $q_d(t)$ в обоих случаях удовлетворительно аппроксимируются с использованием формулы (4). Отрицательная полярность всех регистрируемых импульсов разряда свидетельствует о том, что в цикле нагрева сегнетоэлектрического образца Z-среза ниобата лития с обращенной к аноду поверхностью Z+ перенос электронов происходит от поверхности кристалла к аноду. Эксперименты, проведенные для сопротивлений нагрузки $R_l = 2,55$ и $1,7$ Ом в цикле охлаждения при использовании осциллографа Keysight DSO-X 3102T и разработанной диодной системы, продемонстрировали характер и параметры импульсов тока разряда (максимальные значения тока I_{max} до 360 мА, переносимый заряд до 4,3 нКл, длительность импульсов около 15 нс, время нарастания $\sim 1,5$ нс), близкие к наблюдаемым для $R_l = 5,1$ Ом.



а



б

Рисунок 6 – Импульс тока разряда через сопротивление нагрузки $R_l = 5,1$ Ом, регистрируемый при пироэлектрической эмиссии в цикле охлаждения при атмосферном давлении цилиндрического кристалла Z-среза ниобата лития на осциллографе Tektronix MSO серии 6: а – для интервала времени t от -1 нс до 60 нс; б – для t от -1 нс до 10 нс. Точки – эксперимент, сплошная кривая – расчет по формуле (4)

В п. 5.2.4 на основе анализа связи напряженности электрического поля в воздушном промежутке между анодом и верхней поверхностью сегнетоэлектрического кристалла (см. рисунок 5) с изменением его температуры получено, что пробой (генерация импульсного электронного пучка) должен наблюдаться уже при $\Delta T \geq 1$ К, когда индуцируемый за счет пироэлектрического эффекта поверхностный заряд будет достигать значения $|\xi_{pyro}| \geq 11$ нКл. Однако из описанных в п. 5.2.3 экспериментов следует, что соответствующие генерации электронного пучка импульсы разряда наблюдаются только при $\Delta T = 8$ К. Это подтверждает вывод авторов работы [9] о влиянии на порог генерации электронных пучков в циклах нагрева и охлаждения кристаллов ниобата лития при атмосферном давлении не только связанного пироэлектрического заряда $\xi_{pyro}(t)$ поверхности кристалла Z^+ , но и параллельного формирования на ней обратного по знаку компенсирующего заряда с поверхностной плотностью $\xi_{comp}(t)$.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

1. В процессе практической реализации поверхностного легирования ионами меди пластин X-среза конгруэнтного ниобата лития отработаны технологические процессы высокотемпературной диффузии из металлических пленок, сформированных магнетронным напылением, термовакuumным напылением, комбинацией ионной имплантации и магнетронного распыления, а также из оксидных пленок, полученных методом золь-гель синтеза. Получено, что в рамках модели твердотельной диффузии из мгновенного поверхностного источника её коэффициент D_{Cu}^X изменяется, в зависимости от метода нанесения пленок, из которых она осуществляется, от 0,38 до 0,77 мкм²/с.

2. Экспериментально реализованы микроструктуры LiNbO₃:Cu с гауссовым распределением ионов меди по координате x образцов, с полуширинами от ~220 до ~320 мкм, с максимальными значениями концентрации ионов Cu⁺ от $1,0 \cdot 10^{24}$ до $7,8 \cdot 10^{24}$ м⁻³ и Cu²⁺ – от $1,0 \cdot 10^{25}$ до $7,8 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

3. Разработана методика эксперимента и установка для исследования динамики формирования фоторефрактивных микроструктур (решеток) с пространственными периодами от 2,44 до 45 мкм в пластинах LiNbO₃:Cu X-среза при засветке картиной интерференции с контрастом $m \approx 1$, создаваемой лазерными пучками с длиной волны $\lambda_w = 532$ нм.

4. Проведены экспериментальные исследования и теоретический анализ динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток в пластинах LiNbO₃:Cu X-среза с диффузионным и объемным легированием, при их засветке картиной интерференции с контрастом $m \approx 1$, создаваемой плоскими световыми волнами. Получены соотношения, описывающие динамику формирования пространственных гармоник напряженности электрического поля фоторефрактивных решеток в пластине X-среза на различных глубинах x от границы, учитывающие как распределения концентрации ионов $C_{Cu^+}(x)$ и $C_{Cu^{2+}}(x)$, так и соответствующую зависимость суммарной интенсивности записывающих волн $J(x)$, обусловленную оптическим поглощением.

5. Подгонка полученных теоретических зависимостей под экспериментальные данные по динамике дифракционной эффективности фоторефрактивных решеток показала, что эффективные длины взаимодействия для считывающего пучка с длиной

волны $\lambda_r = 655$ нм являются существенно меньшими, чем толщина используемых при диффузии Cu пластин LiNbO_3 X-среза. Полученные в результате подгонки значения констант Гласса для трех диффузионно-легированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ $G_e \approx 9,4 \cdot 10^{-12}$, $G_e \approx 2,8 \cdot 10^{-12}$ и $G_o \approx 10,3 \cdot 10^{-12}$ м/В близки по порядку величины к значению $5,5 \cdot 10^{-12}$ м/В, приведенному в [5] для монокристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с объемным легированием.

6. Проведено численное моделирование динамики для амплитуды $E_1(x, t)$ первой пространственной гармоники электрического поля фоторефрактивной решетки при её записи плоскими световыми волнами ($\lambda_w = 532$ нм), формирующими интерференционную картину с контрастом $m = 1$ в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с диффузионным и объемным легированием. Получено, что для реализации фотовольтаических пинцетов, где важную роль должна играть достигаемая на границе $x = 0$ амплитуда $E_1(0, t)$, наиболее перспективным является использование двух образцов с диффузионным легированием из металлических пленок с толщинами 900 и 400 нм, осуществляемым в течение 9 часов при температуре 1000 °С, а также объемно легированного образца с концентрацией ионов меди в зарядовом состоянии 2+, составляющей $7,88 \cdot 10^{25}$ м⁻³. Проведенные расчеты показали, что в данных образцах максимально достигаемые значения амплитуды поля можно оценить как $E_1^{max}(0, t_m) \approx 4,2 \cdot 10^6$, $2,2 \cdot 10^6$ и $2,1 \cdot 10^6$ В/м, соответственно.

7. Разработана методика экспериментального исследования агрегирования микро- и наночастиц электрическими полями, создаваемыми над поверхностью пластин $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза вследствие фотогальванического механизма перераспределения заряда при их засветке как картиной интерференции двух лазерных пучков Гаусса с радиальной симметрией или с эллиптическим поперечным сечением, так и единственным гауссовым пучком такого типа. Экспериментально реализовано и исследовано фотовольтаическое структурирование ансамблей, состоящих из диэлектрических (90% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{CeO}_2$; синтетический алмаз АСМ) микро- и наночастиц, а также из микрочастиц TiC с металлическим типом проводимости. Получено, что в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, созданном диффузионным легированием из металлической пленки с толщиной 400 нм, захват и агрегирование диэлектрических наночастиц композиционного порошка 90% $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{CeO}_2$ с диаметром 40–80 нм полем фоторефрактивной решетки с пространственным периодом 45 мкм, создаваемым при засветке картиной интерференции лазерных пучков с контрастом $m \approx 1$ и средней интенсивностью $J_0 = 64$ мВт/см² наблюдается уже при времени экспозиции $t = 30$ с.

8. Проведен анализ распределения диэлектрофоретических сил, индуцированных над поверхностью пластины X-среза ниобата лития, диффузионно-легированной фотовольтаически активной примесью, принимающий во внимание только преобладающую в кристалле компоненту электрической напряженности поля пространственного заряда $E_z(x, z) = E(x, z)$, наводимую одномерным гауссовым пучком. Выполненные расчеты показали, что распределение диэлектрофоретического потенциала по координате z вдоль полярной оси пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ для начального участка её экспозиции не согласуется с экспериментально наблюдаемым эффектом меньшей концентрации агрегируемых частиц в центральной области засвечивающего пучка, локализованной при $z = 0$. Расхождение результатов анализа с экспериментальными данными может быть связано как с принятыми приближениями, так и с неприменимостью рассматриваемой диэлектрофоретической модели захвата частиц электриче-

ским полем, создаваемым над поверхностью неполярного X-среза кристалла за счет фотовольтаического механизма перераспределения заряда.

9. При форвакуумном давлении проведены эксперименты по термическому воздействию на нелегированный монокристалл LiNbO_3 цилиндрической формы с толщиной $h_{cr} = 7,0$ мм и диаметром 13 мм и на объемно-легированный медью ниобат лития, имеющий вид бруска с толщиной $h_{cr} = 3,6$ мм и поперечными размерами $10,5 \times 20,0$ мм², с целью изучения в микросекундном диапазоне динамики пироэлектрической генерации электронного пучка. Получено, что ток разряда в этом диапазоне изменяется во времени с частотой продольных акустических колебаний используемых образцов полярного Z-среза ниобата лития. Механизм возбуждения этих колебаний связан с обратным пьезоэлектрическим эффектом, за счет изменения напряженности электрического поля, происходящего при быстрой нейтрализации поверхностного заряда кристалла, индуцированного благодаря пироэлектрическому эффекту, на начальной стадии электронной эмиссии.

10. Разработан диодный узел и установка для исследования динамики пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения кристалла ниобата лития при атмосферном давлении, а также соответствующая методика эксперимента.

11. Проведенные с использованием разработанного диодного узла и установки эксперименты по исследованию динамики пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения цилиндрического нелегированного кристалла ниобата лития Z-среза с толщиной $h_{cr} = 7,0$ мм и диаметром 13 мм при атмосферном давлении в температурном диапазоне от 25 до 80 °С позволили зарегистрировать импульсы разряда, соответствующие генерации электронных пучков с длительностью около 15 нс, временем нарастания от 1 до 1,9 нс, с силой тока в максимуме до 600 мА, и с переносимым зарядом от 1,3 до 5,7 нКл.

12. Экспериментально установлено, что при пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков в наносекундном диапазоне в кристалле ниобата лития Z-среза при атмосферном давлении в отдельных случаях на осциллограммах регистрируются сопровождающие основной максимум вторичные импульсы, в виде осцилляций тока с амплитудами до 450 мА и с частотой около 1,1 ГГц.

13. Подтвержден экспериментально вывод авторов работы [9] о влиянии на порог генерации электронных пучков в циклах нагрева и охлаждения кристаллов ниобата лития при атмосферном давлении не только связанного пироэлектрического заряда поверхности кристалла Z+, но и параллельного формирования на ней обратного по знаку компенсирующего поверхностного заряда.

Список цитируемой литературы

1. Brownridge, J.D. Investigations of pyroelectric generation of x-rays / J.D. Brownridge, Sol Raboy // J. Appl. Phys. - 1999. - V. 86, № 11. - P. 640.
2. Kukhtarev, N.V. Pyroelectric and photogalvanic crystal accelerators / N.V. Kukhtarev [et al.] // J. Appl. Phys. - 2009. - V. 106. - P. 014111.
3. Villarroel, J. Photovoltaic versus optical tweezers / J. Villarroel [et al.] // Opt Express. - 2011. - V. 19, № 24. - P. 24320-30.
4. Carrascosa, M. LiNbO_3 : A photovoltaic substrate for massive parallel manipulation and patterning of nano-objects / M. Carrascosa [et al.] // Appl. Phys. Rev. - 2015. - V. 2, № 4. - P. 040605.

5. Volk, T. Lithium Niobate: Defects, Photorefractive and Ferroelectric Switching / T. Volk, M. Wöhlecke. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. - 247 p.
6. Peithmann, K. Photorefractive properties of LiNbO₃ crystals doped by copper diffusion / K. Peithmann [et al.] // Phys. Rev. B. - 2001. - V. 61, № 7. - P. 4615-4620.
7. Blázquez-Castro, A. Biological applications of ferroelectric materials / A. Blázquez-Castro, A. García-Cabañes, M. Carrascosa // Applied Physics Reviews. - 2018. - V. 5. - P. 041101.
8. Bourim, E.M. Pyroelectric electron emission from -Z face polar surface of lithium niobate monodomain single crystal / E.M. Bourim [et al] // J. Electroceram. - 2006. - V. 17. - P. 479-485.
9. Андрианов, В.А. Пространственная и временная неоднородность электронного потока в пироэлектрических рентгеновских источниках / В.А. Андрианов, А.А. Буш, А.Л. Ерзинкян, К.Е. Каменцев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2017. - № 7. - С. 25-31.

Публикации по теме диссертации

Статьи в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, и в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:

1. Орликов, Л.Н. Газоразрядные генераторы высокой частоты для обработки материалов / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, **К.М. Мамбетова**, С.М. Шандаров // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2019. - Т. 62, № 11. - С. 101-104.

Переводная версия

1. Orlikov, L.N. Gas-discharge high-frequency generators for materials processing / L.N Orlikov, N.L. Orlikov, **К.М. Mambetova**, S.M. Shandarov // Russian Physics Journal. - 2020. - V. 62, № 11. - P. 2069-2072.

2. Безпальный, А.Д. Оптически индуцированные канальные волноводные структуры с пространственной модуляцией параметров в поверхностном слое ниобата лития / А.Д. Безпальный, В.М. Шандаров А.Е. Мандель, В.И. Быков, **К.М. Мамбетова** // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2019. - Т. 62, № 3. - С. 3-8.

Переводная версия

1. Bezpaly, A.D. Optically induced channel waveguide structures with spatial modulation of parameters in the surface layer of lithium niobate / A.D. Bezpaly, V.M. Shandarov, A.E. Mandel, V.I. Bykov, **К.М. Mambetova** Russian Physics Journal. - 2019. - V. 62, № 3. - P. 387-392.

2. **Мамбетова, К.М.** Агрегирование диэлектрических наночастиц на X-срезе кристалла LiNbO₃:Cu электрическими полями фоторефрактивных голограмм / **К.М. Мамбетова**, С.М. Шандаров, А.И. Татьянников, С.В. Смирнов // Известия вузов. Физика. - 2019. - Т. 62, № 4. - С. 89-93.

Переводная версия

1. **Mambetova, K.M.** Aggregation of dielectric nanoparticles on the X-cut of LiNbO₃:Cu crystal by electric fields of photorefractive holograms / **К.М. Mambetova**, S.M. Shandarov, A.I. Tatyannikov, S.V. Smirnov // Russian Physics Journal. - 2019. - V. 62, № 4. - P. 658-663.

2. **Мамбетова, К.М.** Формирование динамических фоторефрактивных решеток в кристалле LiNbO₃:Cu с поверхностным легированием / **К.М. Мамбетова**, С.М. Шан-

даров, Л.Н. Орликов, С.И. Арестов, С.В. Смирнов, Л.Я. Серебренников, В.А. Краковский // Оптика и спектроскопия. - 2019. - Т. 126, № 6. - С. 858-863.

Переводная версия

1. **Mambetova, K.M.** Formation of dynamic photorefractive gratings in a LiNbO₃:Cu surface-doped crystal / **K.M. Mambetova**, S.M. Shandarov, L. N. Orlikov, S.I Arestov, S.V. Smirnov, L.Y. Serebrennikov, V.A. Krakovskii // Optics and Spectroscopy. - 2019. - V. 126, № 6. - P. 781-786.

2. Орликов, Л.Н. Генерация рентгеновского излучения при термическом воздействии на ниобат лития / Л.Н. Орликов, **К.М. Мамбетова**, А.О. Злобин, С.М. Шандаров // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2018. - Т. 61, № 9/2. - С. 211-216.

3. Орликов, Л.Н. Источник электронов на основе ниобата лития, легированного железом / Л.Н. Орликов, **К.М. Мамбетова**, С.И. Арестов, С.М. Шандаров // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2016. -Т. 59, № (9-3). - С. 123-126.

4. **Мамбетова, К.М.** Динамика формирования пропускающих голограмм в кристаллах ниобата лития, легированных медью методом высокотемпературной диффузии / **К.М. Мамбетова**, Н.Н. Смаль, С.М. Шандаров, Л.Н.Орликов, С.И. Арестов, С.В. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. - 2014. - Т. LVII, № 8-9. - С. 675-682.

Переводная версия

1. **Mambetova, K.M.** Formation Dynamics of Transmission Holograms in Lithium Niobate Crystals Doped by Copper Through High-Temperature Diffusion. Radiophysics and Quantum Electronics/ **K.M. Mambetova**, N. N. Smal', S. M. Shandarov, L. N. Orlikov, S. I. Arestov, S. V. Smirnov// Radiophysics and Quantum Electronics. - 2015. - V. 57, № 8. - P. 603-609.

2. **Мамбетова, К.М.** Исследование формирования сильных электрических полей в легированных медью кристаллах ниобата лития / **К.М. Мамбетова**, С.М. Шандаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2013. - Т. 15, № 6-1. - С. 113-116.

Доклады в трудах конференций, индексируемых в международных базах данных цитирования Web of Science или Scopus

1. Orlikov, L.N. Pulse source of electrons based on the pyroeffect / L.N. Orlikov, **К.М. Mambetova**, S.I. Arestov, S.M. Shandarov, N.I. Burimov, B.I. Avdochenko, A.A. Elchaninov // PROCEEDINGS 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) Tomsk, Russia, September 14 – 26, 2020. - P. 408-412.

2. Orlikov, L.N. Generation of ionizing radiation from lithium niobate crystals / L.N. Orlikov, N.L. Orlikov, S.I. Arestov, **К.М. Mambetova**, S.M. Shandarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2017. - V. 168, № 1. - P. 012074.

Публикации в других научных изданиях:

1. **Mambetova, K.M.** Kinetics of pyroelectric generation of pulse electron flows by lithium niobate crystals / **K.M. Mambetova**, L.N. Orlikov, S.I. Arestov, S.M. Shandarov, N.I. Burimov, B.I. Avdochenko, A.A. Elchaninov // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online) September 14–25, 2020 Tomsk, Russia: Abstracts. - Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020. - P. 427.

2. Orlikov, L.N. Pulse source of electrons based on the pyroeffect / L.N. Orlikov, **К.М. Mambetova**, S.I Arestov, S. M. Shandarov // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online): Abstracts. - Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020. - P. 146.

3. Шандаров, С.М. Регулярные структуры в фоторефрактивных и сегнетоэлектрических кристаллах: формирование, физика волновых взаимодействий и приложения / С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, Е.Н. Савченков, **К.М. Мамбетова**, В.В. Шепелевич // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2020») 23-28 августа 2020 года, под общей редакцией канд. физ.-мат. наук А.Н. Калиша. - С. 56.

4. Колмаков, А.А. Агрегирование диэлектрических наночастиц на поверхности кристаллов ниобата лития электрическими полями фоторефрактивных голограмм / А.А. Колмаков, Р.И. Анисимов, А.С. Темерева, **К.М. Мамбетова** // Физика твердого тела: сборник материалов XVII Российской научной студенческой конференции (г. Томск, 18 мая 2020 г.) / под ред. В.А. Новикова. - Томск: Изд-во НТЛ, 2020. - С. 119-121.

5. Бакаулова, Е.В. Моделирование динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных голограмм в кристаллах ниобата лития с поверхностным легированием / Е.В. Бакаулова, К.Б. Кемелханова, **К.М. Мамбетова** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. - Ч. 1. - С. 220-224.

6. **Мамбетова, К.М.** Фотовольтаическое агрегирование микро- и наночастиц в кристаллах ниобата лития с поверхностным легированием / **К.М. Мамбетова**, С.М. Шандаров, Л.Н. Орликов, С.И. Арестов, С.В. Смирнов, Л.Я. Серебренников, В.А. Краковский // Сборник трудов XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2019». Санкт-Петербург. 21-25 октября 2019 / под ред. проф. С.А. Козлова. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. - С. 142-144.

7. **Мамбетова, К.М.** Агрегирование наночастиц композиционного порошка на кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ фоторефрактивными решетками // XXXI Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике : материалы школы-симпозиума / под ред. д-ра техн. наук А.П. Владимирова ; УрФУ им. Б.Н. Ельцина. - Екатеринбург, 2019. - С. 133.

8. **Мамбетова, К.М.** Агрегирование диэлектрических наночастиц на поверхности легированных медью кристаллов ниобата лития при лазерном воздействии / **К.М. Мамбетова**, А.И. Татьянников, С.М. Шандаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП 2018): Труды XIV Международной научно-технической конференции. - Новосибирск: НГТУ, 2018. - Т. 8. - С. 36-40.

9. **Mambetova, K.M.** X-Ray Generation Based On Lithium Niobate Crystal Heating / **K.M. Mambetova**, L.N. Orlikov, A.O. Zlobin, S.M. Shandarov // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE2018, September 16-22, 2018 in Tomsk, Russia.): 18th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter Abstracts. - Tomsk: TPU Publishing House, 2018. - 66 pp.

10. Орликов, Л.Н. Генерация волн ионизации при пироэффекте на ниобате лития / Л.Н. Орликов, С.М. Шандаров, **К.М. Мамбетова** // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». - 2017. - № 1-1. - С. 249-252.

11. **Мамбетова, К.М.** Динамика пироэлектрической генерации электронного пучка монокристаллическими образцами ниобата лития / **К.М. Мамбетова**, С.И. Арестов, Л.Н. Орликов, С.М. Шандаров, Ю.В. Кулешов // VI Международная конференция Фотоника и информационная оптика, 1-3 февраля 2017 года, Сборник научных трудов. - Москва: НИЯУ МИФИ, 2017. - С. 38-39.

12. **Мамбетова, К.М.** Оптические и фоторефрактивные свойства структур

LiNbO₃:Cu, сформированных высокотемпературной диффузией меди / **К.М. Мамбетова**, А.И. Татьянников // Научная сессия ТУСУР-2016: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2016 г. – Томск: В-Спектр, 2015: в 6 частях. - Ч. 2. - С. 271-274.

13. Orlikov, L.N. Source of electrons based on lithium niobate crystal doped by iron / L.N. Orlikov, **К.М. Mambetova**, S.M. Shandarov, S.I. Arestov // 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2016, October 2-7, 2016 in Tomsk, Russia): Abstracts. - Tomsk: TPU Publishing House, 2016. - P. 21.

14. **Мамбетова, К.М.** Определение оптимальных условий для реализации управляемой оптическим воздействием эмиссии электронов из кристаллов ниобата лития / **К.М. Мамбетова**, С.М. Шандаров, Л.Н. Орликов // Сборник материалов X Всероссийской Школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ИННОВАТИКА-2014» (г. Томск, 23.04.2014 – 25.04.2014 гг.) / под ред. проф. А.Н. Солдатова, доц. С.Л. Минькова. - Томск: ТГУ, 2014. - С. 170-173.

15. Кистенева, М.Г. Исследование фотоиндуцированных явлений в фоторефрактивных кристаллах в лабораторном физическом эксперименте / М.Г. Кистенева, С.М. Шандаров, А.С. Акрестина, **К.М. Мамбетова**, Э.В. Поздеева, Ю.Ф. Каргин // VIII Международный оптический конгресс «Оптика XXI век»: конференция «Оптика и Образование-2014», 23-24 октября, 2014 г. Сборник трудов: под общ. редакцией проф. А.А. Шехонина. - СПб.: Университет ИТМО, 2014. - С. 53-55.

16. **Мамбетова, К.М.** Исследования динамики формирования поля пространственного заряда пропускающих голограмм в кристалле LiNbO₃:Cu / **К.М. Мамбетова**, Н.Н. Смаль, А. К. Зими́на, И.А.Егорова // Научная сессия ТУСУР-2013: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Томск: В-Спектр, 2013. - Ч. 2. - С. 27-30.

17. **Мамбетова, К.М.** Фоторефрактивные эффекты в кристаллах ниобата лития, легированных медью методом высокотемпературной диффузии / **К.М. Мамбетова**, С.М. Шандаров // Материалы Всероссийской с международным участием научной конференции «Полифункциональные химические материалы и технологии» (Томск, 21-23 ноября, 2013). - 2013. - Т. 1. - С. 192-193.

18. **Мамбетова, К.М.** Динамика формирования фоторефрактивных голограмм в кристаллах LiNbO₃:Fe / **К.М. Мамбетова** // Физика твердого тела: сборник материалов XIII Российской научной студенческой конференции ; под ред. М.Ф. Жаровков, А.Н. Тюменцев и др. - Томск: Изд-во ТМЛ-Пресс, 2012. - С. 187-189.

19. **Мамбетова, К.М.** Динамика формирования пропускающих голограмм в кристаллах ниобата лития с диффузионным легированием медью / **К.М. Мамбетова**, Н.Н. Смаль, С.М. Шандаров, Л.Н. Орликов, С.И. Аrestов, С.В. Смирнов // Голография: теоретические и прикладные вопросы : Материалы XXVIII Школы-симпозиума по голографии и когерентной оптике (Нижний Новгород, 22–26 августа 2013 г.) / отв. ред. Ю.Н. Захаров. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. - С. 155-158.

Тираж экз. Заказ .
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. 533018.