

Отзыв

официального оппонента

на диссертацию Мамбетовой Ксении Мустафиевны

«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», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

Диссертация К. М. Мамбетовой посвящена исследованию 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, имеющих важное значение для реализации управляемых твердотельных источников электронов и рентгеновского излучения с улучшенными характеристиками, а также фотовольтаических пинцетов.

Генерация электрических полей большой напряженности в сегнетоэлектрических кристаллах при термическом, механическом и световом видах воздействия представляет значительный интерес как с точки зрения изучения физической природы данных явлений, так и для их практических приложений. Важными прикладными задачами, предполагающими использование номинально чистых и легированных кристаллов ниобата лития, являются реализация фотовольтаических пинцетов и эффективных твердотельных источников электронных пучков, рентгеновского и нейтронного излучения. При этом для оптических видов воздействия, обеспечивающих формирование сильных электрических полей в приповерхностной области монокристаллических образцов, оптимальным является использование микроструктур с заданным распределением легирующей фотоактивной примеси, такой, например, как Fe, Cu, Mn, Ni. В связи с изложенным выше, тема данной диссертационной работы, целью которой 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, а также фотовольтаические пинцеты, представляется **актуальной** и имеющей большое практическое значение.

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

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации, формулируются цель и задачи работы и выносимые на защиту основные научные положения.

В главе 1 представлен обзор работ, посвященных исследованию явлений в сегнетоэлектрических кристаллах при термическом и световом воздействиях, сопровождающихся формированием сильных электрических полей, и с использованием этих полей с целью реализации устройств для оптически управляемого манипулирования микрочастицами, а также для генерации электронных пучков, рентгеновского и нейтронного излучения.

В главе 2 представлены результаты 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. Проведенные автором экспериментальные исследования синтезированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ показали, что при использованных режимах высокотемпературной диффузии меди в пластинах ниобата лития X-среза формируется фотогальванически активный слой, имеющий микроструктурированный характер.

Глава 3 посвящена исследованию формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток в легированных ионами Cu пластинах ниобата лития X-среза, как объемно-легированных, так и микроструктурированных, полученных по технологии высокотемпературной диффузии. Здесь К.М. Мамбетовой проведены экспериментальные исследования и теоретический анализ динамики формирования поля пространственного заряда в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза, позволивший определить константы Гласса для пяти образцов, три из которых являются микроструктурированными.

В главе 4 приведены результаты работ автора по моделированию динамики формирования сильных электрических полей в пластинах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза при их засветке как картиной интерференции лазерных пучков, так и единственным одномерным гауссовым пучком, а также по экспериментальной реализации фотовольтаического агрегирования микро- и наночастиц на поверхности образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза. Здесь К.М. Мамбетовой, в частности, показана возможность эффективного фотовольтаического агрегирования диэлектрических наночастиц композиционного нанопорошка $90\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{CeO}_2$, диэлектрических микрочастиц порошка синтетического алмаза АСМ и микрочастиц карбида титана с металлическим типом проводимости не только для объемно-легированных, но и для микроструктурированных образцов.

Глава 5 посвящена исследованию 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. Важными результатами данной главы является разработка автором диодного узла для регистрации в наносекундном диапазоне динамики пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков при термическом воздействии на монокристаллические образцы полярного Z-среза LiNbO_3 и методики осциллографических исследований, позволившими ей обнаружить импульсы разряда, соответствующие генерации электронных пучков с длительностью около 15 нс, с силой тока в максимуме до 600 мА, и с переносимым зарядом до 5,7 нКл.

В заключении приводятся основные результаты и выводы по работе, которые представляются надежно обоснованными.

Новизна полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций

Все основные результаты работы, сделанные по ним выводы и рекомендации, а также выносимые на защиту научные положения, являются новыми. Среди наиболее значимых результатов, полученным в ходе проведенного К.М. Мамбетовой диссертационного исследования, представляется целесообразным отметить следующие:

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 соотношения, описывающие динамику формирования пространственных гармоник напряженности электрического поля фоторефрактивных решеток в микроструктурах X-среза на различных глубинах x от границы; 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. 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°C при атмосферном давлении монокристаллического образца полярного Z-среза LiNbO_3 цилиндрической формы с толщиной 7 мм и диаметром 13 мм.

Достоверность полученных результатов

обеспечивается корректным использованием современных представлений о физических процессах в сегнетоэлектрических фоторефрактивных кристаллах и соответствующих математических моделей, использованием апробированных методик измерений; она подтверждается высокой степенью повторяемости результатов, а также хорошим согласием экспериментальных данных и теоретических расчетов.

Научная и практическая значимость полученных в работе результатов

Полученные автором результаты, а именно, 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. 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 $m \approx 1$, и экспериментальная демонстрация агрегирования на поверхности таких образцов микро- и наночастиц, 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 представляют заметный вклад в физику явлений в сегнетоэлектрических кристаллах, вызываемых термическим и лазерным видами воздействия, и являются основой для их широкого использования в решении прикладных задач.

Автором **опубликовано 29 работ**, в том числе **8** – в журналах из перечня ВАК, из которых 5 статей индексируются в базах Scopus и/или Web of Science. Результаты, полученные в диссертационной работе, неоднократно обсуждались на представительных Российских и Международных конференциях и симпозиумах.

Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

В числе **недостатков** диссертации стоит отметить следующие.

1. Выполнена большая работа по нанесению различными методами пленок, из которых проводилось диффузионное легирование в очищенные подложки LiNbO_3 . Нет предварительного обоснования выбора методов.
2. В работе рассматриваются различные методы поверхностного легирования ионами меди пластин X-среза конгруэнтного ниобата лития (процессы высокотемпературной диффузии из металлических пленок, сформированных магнетронным напылением, термовакуумным напылением, комбинацией ионной имплантации и магнетронного

распыления, а также из оксидных пленок, полученных методом золь-гель синтеза), рассматриваются образцы, легированные традиционным способом. Однако в тексте работы нет четкой рекомендации, где, какой тип образцов предпочтительнее использовать.

3. Существенная часть работы посвящена вопросам агрегирования микро- и наночастиц на поверхности кристаллов LiNbO_3 , то есть так называемому фотогальваническому пинцету. В литературе известен ряд работ, когда управление упорядочением и движением микроскопических и наноразмерных объектов осуществляется в комбинированных схемах, в которых существенную роль играет внешнее электрическое поле. Следовало бы осветить эти работы в обзорной части.
4. В пункте 1.2.3 и в начале главы 4 отмечается, что "Метод фотогальванического пинцета для захвата и манипулирования объектами по сравнению с традиционными оптическими манипуляторами позволяет неоднократно использовать монокристаллическую подложку и свести к минимуму вред от перегрева захватываемых частиц за счёт использования маломощного источника излучения". Это утверждение недостаточно обосновано. В лазерных пинцетах, в которых захват и удержание объектов происходит за счет полей, формируемых лазерным пучком, перегрева избегают за счет выбора длины волны и формы ловушки.
Также следует отметить, что функциональные возможности фотогальванического пинцета в сильной степени ограничены.
5. Отсутствуют экспериментальные данные по генерации электронного пучка в наносекундном диапазоне при форвакуумном давлении.

Также имеется ряд замечаний по оформлению. Отмечу некоторые из них.

6. Рисунки 3.1, 4.1-4.6. Ряд надписей на рисунках выполнен слишком мелким шрифтом.
7. На стр.126. Рис. 4.10. В подписи к рисунку пропущено - (в) для карбида титана.
8. Стр.156. Рис. 5.5. Не обозначены части рисунка а и б.

Отмеченные замечания не влияют на общую **положительную оценку работы**, которая является законченным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне, вносящим заметный вклад в физику явлений в сегнетоэлектрических кристаллах, вызываемых термическим и лазерным видами воздействия, и создающим предпосылки для улучшения характеристик твердотельных источников рентгеновского и нейтронного излучения и оптических пинцетов. Диссертация написана доходчиво и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны достаточно четкие выводы.

Считаю, что рассматриваемая диссертационная работа Мамбетовой К.М «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» по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 01.10.2018 г.) (пп. 9 – 14), а ее автор, Мамбетова Ксения Мустафиевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

И. о. зав. лабораторией когерентной оптики
Самарского филиала федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физического института
имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук,
в.н.с., к.ф.-м.н.

С.П. Котова
18 мая 2021 г.

Котова Светлана Павловна

443011 г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221, <http://www.fian.smr.ru>,
тел.: +7 (846) 334-14-81
e-mail: kotova@fian.smr.ru

Подпись Котовой С.П. удостоверяю
И.о. ученого секретаря СФ ФИАН



А.М. Майорова