

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

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

Разнообразие физических явлений в сегнетоэлектрических кристаллах привлекает к ним значительное внимание исследователей. Одним из таких явлений является пирозлектрический эффект, позволяющий в циклах нагрева и охлаждения кристаллов с низкой проводимостью, таких как ниобат и танталат лития, создать за счет изменения поверхностного заряда электрический потенциал, достигающий значений 100 кВ. В этих же кристаллах, легированных фотовольтаически активными ионами Fe или Cu, сильные электрические поля генерируются при их засветке световым излучением видимого диапазона. Как пирозлектрический, так и фотовольтаический эффекты являются в настоящее время предметом исследований, имеющих своей целью создание эффективных твердотельных источников электронных пучков, рентгеновского и нейтронного излучения. Интересной является и другая прикладная задача - создание оптически управляемых манипуляторов микро- и наночастицами (фотовольтаических пинцетов). Изложенное выше позволяет считать тему диссертационной работы Мамбетовой К. М., нацеленной на 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, и на развитие задела, позволяющего реализовать на их основе управляемые твердотельные источники электронов и фотовольтаические пинцеты, актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 209 страниц и включает 77 рисунков, 12 таблиц, и список литературы, содержащий 148 наименований.

Во **введении** приводится обоснование актуальности темы диссертации, формулируются ее цель и задачи, а также выносимые на защиту основные научные положения. Описываются научная новизна и практическая значимость результатов; дается краткая аннотация содержания диссертации по главам.

В **первой главе** представлен обзор работ, посвященных исследованию явлений, обусловленных индуцированными в сегнетоэлектрических кристаллах при термическом и световых воздействиях сильными электрическими полями, и с использованием этих полей для генерации электронных пучков, рентгеновского и нейтронного излучения, и для реализации устройств оптически управляемого манипулирования микрочастицами.

Во **второй главе** приведены результаты работ Мамбетовой К. М. по практической реализации технологии диффузионного легирования пластин ниобата лития ионами Cu и отработке режимов, позволяющих создавать с ее использованием образцы с высокими фотовольтаическими свойствами в приповерхностной области. Проведенные экспериментальные исследования полученных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ показали, что метод диффузии меди из металлических и оксидных пленок при температуре 1000 °С в пластины ниобата лития X-среза позволяет сформировать приповерхностный фотовольтаически активный слой, имеющий микроструктурированный характер.

В **третьей главе** представлены результаты исследования формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток в объемно-легированных и микроструктурированных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза. Приведен теоретический анализ динамики формирования этого поля при заданной интенсивности света; описаны результаты экспериментальных исследований динамики дифракционной эффективности,

наблюдаемыми при формировании фоторефрактивных голограмм в пяти образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, три из которых являются микроструктурированными. Эти экспериментальные данные позволили определить, с использованием полученного аналитического выражения, константы Гласса для всех пяти исследованных образцов.

В четвертой главе представлены результаты работ автора по моделированию динамики развития сильных электрических полей в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза и по их использованию для фотовольтаического агрегирования микро- и наночастиц на поверхности таких образцов, как микроструктурированных, так и объемно-легированных. Экспериментально эффекты фотовольтаического агрегирования микро- и наночастиц на поверхности образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза наблюдались К.М. Мамбетовой для двух вариантов их засветки. В результате была показана возможность эффективного фотовольтаического агрегирования диэлектрических частиц нанопорошка $90\%\text{Al}_2\text{O}_3+10\%\text{CeO}_2$ и микропорошка синтетического алмаза АСМ, а также микрочастиц карбида титана TiC с металлическим типом проводимости, как для объемно-легированных, так и для микроструктурированных образцов.

В пятой главе описаны результаты работ по исследованию в микросекундном и наносекундном диапазонах динамики пироэлектрической генерации электронных пучков с использованием образцов Z-среза ниобата лития. Для изучения этого эффекта в микросекундном диапазоне автором разработана установка и методика экспериментального исследования для форвакуумного диапазона давлений, позволившая зафиксировать колебания тока разряда, происходящих с частотой продольных акустических колебаний используемых образцов ниобата лития. Для исследования динамики пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения кристалла ниобата лития при атмосферном давлении Мамбетовой К. М. совместно с коллегами разработан диодный узел коаксиальной конфигурации и методика исследования. Это позволило К.М. Мамбетовой провести экспериментальные исследования, в результате которых в циклах нагрева и охлаждения нелегированного кристалла ниобата лития Z-среза при атмосферном давлении, были зарегистрированы импульсы разряда, соответствующие генерации электронных пучков с длительностью около 15 нс и с силой тока в максимуме до 600 мА.

В заключении приводятся основные результаты и выводы по работе.

Сформулированы следующие 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 $\text{мкм}^2/\text{с}$ 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 $7,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$;

– 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 $G_e \approx 9,4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ и максимальными значениями концентрации $C_{\text{Cu}^{2+}}^m \approx 1,1 \cdot 10^{26}$ и $6,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, 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 $E_1^{\max}(0, t_m) \approx 4,2 \cdot 10^6$ 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 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. Его использование позволило наблюдать для образца LiNbO_3 с толщиной 7,0 мм и диаметром 13 мм пирозлектрическую 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 полувысоте – от 4 до 15 нс.

Выносимые на защиту научные положения являются выводами по конкретным разделам работы и представляют собою описание конкретных экспериментальных и теоретических исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечивается постановкой задач с использованием обоснованных приближений и известных теоретических моделей, базируется на применении измерительных приборов и оптических элементов с известными характеристиками и апробированных методик измерений; подтверждается высокой степенью повторяемости результатов, а также хорошим согласием экспериментальных данных с проведенными теоретическими расчетами.

Научная и практическая значимость полученных в работе результатов

Полученные автором результаты, такие как практическая реализация технологии диффузионного легирования коммерчески доступных пластин ниобата лития ионами меди, позволяет создавать на её основе микроструктурированные образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X-среза с заданными распределениями фотовольтаических и фоторефрактивных свойств в приповерхностной области; 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 и результаты ее экспериментальной реализации; экспериментальная демонстрация агрегирования на поверхности микроструктурированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ микро- и наночастиц представляют заметный вклад в физику пирозлектрической генерации электронных пучков и светоиндуцированного формирования сильных электрических полей сегнетоэлектрическими кристаллами, и являются основой для их использования при решении прикладных задач.

Основные результаты диссертации опубликованы в 29 работах, в том числе 8 – в журналах из перечня ВАК, из них 5 статей индексированы в базах Scopus и/или Web of

Science. Эти результаты неоднократно обсуждались на представительных Российских и Международных конференциях.

Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

По диссертации можно сделать следующие замечания и рекомендации.

1. Название работы состоит из 25 слов. Обычно рекомендуется название размером до 12 слов. Из начала названия: «Генерация электронных пучков ...» следовало бы ожидать информацию о характеристиках электронного пучка. Представленная информация в работе много шире.

2. Выводы по работе представляют собою совокупность кратких описаний конкретных результатов. Нет обобщающих заключений, свидетельствующих о развитии представлений о процессах, использованных технологий.

3. Интересен цикл исследований по агрегации частиц порошков фотовольтаическими полями, формирующимися при освещении пластин LiNbO_3 . К сожалению, из анализа результатов исследований остаются неясными причины различия степени агрегации порошков разных типов, зависимости от интенсивности засветки. Создается впечатление о незаконченности исследований. Хотя для настоящей работы можно было остановиться только на демонстрации эффекта и обнаруженных закономерностях.

4. Не описано обоснование формулы 5.2, параметров формулы на стр. 170. Приведение значений характеристических времен с точностью до 0.001нс, очевидно, не оправдано. Как понимать наличие разных по величине значений t_i, t_f . Почему они разные на стр 170, 174, 176?

5. Обнаружено появление вторичных импульсов генерации электронов, наблюдаемых, как сказано в диссертации, «в отдельных случаях». Вторичные импульсы имеют форму, отличающуюся от первичных. Вероятно и природа их иная?

6. В списке использованной литературы приведено много ссылок на работы, в которых описана генерация электронов и рентгеновского излучения. Есть две ссылки на работы 2005 и 2007гг, в которых сказано об обнаружении генерации нейтронов. Есть ли работы более поздние с доказательством обнаружения нейтронов?

7. В целом в диссертация написана очень грамотно. Тем не менее некоторые неточности есть. Например, на стр.151 в подписи к рис.5.1: «Штуцер для откачки внутреннего объема». В тексте много тяжелых фраз, понимание которых возможно лишь при многократном прочтении.

Замечания, отмеченные выше, не влияют на общую **положительную оценку** диссертации в целом.

Заключение.

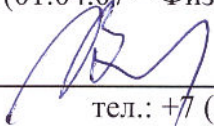
Диссертационная работа Мамбетовой К.М. представляет собою крупное исследование важной для практического использования проблемы формирования электрических полей на поверхности кристаллов LiNbO_3 и микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при термическом и лазерном воздействии и применении эффекта для создания управляемых твердотельные источников электронов и фотовольтаических пинцетов. Мамбетовой К.М. выполнен огромный объем исследований, который по охвату тем соответствует диссертациям докторского уровня. Получены новые интересные результаты, полезные для развития физики индуцированных термическим и лазерным видами воздействий явлений в сегнетоэлектрических кристаллах, и совершенствования количественных и качественных характеристик фотовольтаических пинцетов и твердотельных источников электронных пучков, практического использования. Диссертация написана хорошим языком и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны обоснованные выводы.

Диссертационные исследования Мамбетовой К.М. соответствует паспорту специальности 01.04.04 Физическая электроника в пунктах 1 и 2: Эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии,

эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц. Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника.

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» является законченным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне, вносящим весомый вклад в физику индуцированных термическим и лазерным видами воздействий явлений в сегнетоэлектрических кристаллах, и совершенствование характеристик фотовольтаических пинцетов и твердотельных источников электронных пучков. По 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 ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Профессор-консультант Инженерной школы
новых производственных технологий
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика твердого тела),
профессор


Лисицын Виктор Михайлович
тел.: +7 (3822) 24-19-83
e-mail: lisitsyn@tpu.ru

«16» мая 2021 г.

Подпись Лисицына В.М. заверяю:
И.О. учёного секретаря Учёного совета ТПУ



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (просп. Ленина, д.30, Томск, Томская область, 634050, тел.: +7(3822)60-63-33, e-mail: tpu@tpu.ru, <https://www.tpu.ru/>)