

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники,
к.т.н., доцент



А. Г. Лошилов

« 25 » 03 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «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» выполнена на кафедре электронных приборов.

В период подготовки диссертации соискатель Мамбетова Ксения Мустафиевна обучалась в ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». В настоящее время работает в НОЦ "Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии" (НОНЛТ) на кафедре Электронных приборов в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор Шандаров Станислав Михайлович, основное место работы: ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», гл. н. сотр. НОЦ НОНЛТ, профессор кафедры электронных приборов.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация К. М. Мамбетовой является научно-квалификационной работой, в которой содержатся результаты исследования 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, имеющее важное значение для реализации управляемых

твердотельных источников электронов и рентгеновского излучения с улучшенными характеристиками, а также фотовольтаических пинцетов.

Актуальность темы и направленность исследования.

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.

При термическом воздействии на монокристаллические образцы LiNbO_3 полярного среза формирующиеся за счет пирозлектрического эффекта сильные электрические поля могут приводить к импульсной эмиссии электронов, что представляет значительный интерес для реализации компактных твердотельных наносекундных генераторов рентгеновского излучения.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

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. Безпалым и со студентами А.И. Татьянниковым, Н.Н. Смалем, и др. В совместных работах Мамбетова К.М. принимала 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.

Степень достоверности результатов проведённых исследований.

Достоверность полученных экспериментальных результатов базируется на использовании измерительных приборов и оптических элементов с известными характеристиками. 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 формирования микроструктурированных распределений поля пространственного заряда в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата и танталата лития.

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 соотношения, описывающие динамику формирования пространственных гармоник напряженности электрического поля фоторефрактивных решеток в таких микроструктурах 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 микро- и наночастиц, а также из микрочастиц с металлическим типом проводимости, на поверхности микроструктур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X -среза сильными электрическими полями, создаваемыми 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 пирозлектрической 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 пирозлектрической 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.

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 $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с предсказуемыми распределениями фотовольтаических и фоторефрактивных свойств в приповерхностной области.

2. Результаты проведенных экспериментальных исследований, теоретического анализа и численного моделирования динамики формирования поля пространственного

заряда фоторефрактивных микроструктур над поверхностью пластин $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ неполярного X-среза, 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 возможность их использования для исследования динамики пирозлектрической генерации электронных пучков наносекундной длительности.

4. Полученные в диссертационной работе при исследовании пирозлектрической 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 одноосные сегнетоэлектрические кристаллы, такие как ниобат и танталат лития.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

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.

Результаты работы регулярно докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях и Школах, проводимых в 2010 – 2020 годах.

Список работ, опубликованных 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

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

2. Безпалый, А.Д. Оптически индуцированные канальные волноводные структуры с пространственной модуляцией параметров в поверхностном слое ниобата лития / А.Д. Безпалый, 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

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

3. Мамбетова, К.М. Агрегирование диэлектрических наночастиц на Х-срезе кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ 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

Mambetova, K.M. Aggregation of dielectric nanoparticles on the X-cut of $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ crystal by electric fields of photorefractive holograms/ K.M. Mambetova, S.M. Shandarov, A.I. Tatyannikov, S.V. Smirnov // Russian Physics Journal.- 2019.-V.62.- № 4.- P.658-663.

4. Мамбетова, К.М. Формирование динамических фоторефрактивных решеток в кристалле $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ с поверхностным легированием / К.М. Мамбетова, С.М. Шандаров, 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

Mambetova, K.M. Formation of dynamic photorefractive gratings in a $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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

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.

8. 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

9. Orlikov, L.N. Pulse source of electrons based on the pyroeffect / L.N. Orlikov, K.M. 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.

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

Публикации в других научных изданиях:

11. 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.

12. Orlikov, L.N. Pulse source of electrons based on the pyroeffect / L. N. Orlikov, K.M. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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. Аrestов, 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.

17. 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.т.н. А.П.Владимирова ; УрФУ им. Б.Н. Ельцина. — Екатеринбург, 2019. —С.133.

18. 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.

19. 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.

20. Орликов, Л.Н. Генерация волн ионизации при пироэфекте 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.

21. 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.

22. Мамбетова, К.М. Оптические и фоторефрактивные свойства структур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, 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.

23. Orlikov, L.N. Source of electrons based on lithium niobate crystal doped by iron / L.N. Orlikov, K.M. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Мамбетова, К.М. Исследования динамики формирования поля пространственного заряда пропускающих голограмм в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ / К.М. Мамбетова, Н.Н. Смаль, А. К. Зимина, 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.

27. 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).- Т.1.- С. 192-193.

28. Мамбетова, К.М. Динамика формирования фоторефрактивных голограмм в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ / 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.

29. 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. Арестов, 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.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности.

Материалы диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.04 – Физическая электроника в области исследований «Эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии, эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц» (п. 1 паспорта специальности), «Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника,

оптоэлектроника, криоэлектроника» (п. 2 паспорта специальности), «Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях» (п. 4 паспорта специальности).

Диссертация «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» Мамбетовой Ксении Мустафиевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 Физическая электроника.

Заключение принято на заседании научно-технического семинара кафедры Электронных приборов факультета электронной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовали на заседании 10 чел. Результаты голосования: «за» – 10 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 03-21 от 25 марта 2021 г.

Заведующий кафедрой:

доктор физико-математических наук,

профессор кафедры Электронных приборов  Буримов Николай Иванович

Секретарь семинара:

кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры Электронных приборов  Акрестина Анна Сергеевна