


На правах рукописи



Безпалый Александр Дмитриевич

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
И ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТРАНСТВЕННО-
НЕОДНОРОДНЫХ И ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР
В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ
НИОБАТА ЛИТИЯ**

Специальность 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2023

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

Научный руководитель: **Мандель Аркадий Евсеевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор каф. СВЧиКР ТУСУР

Официальные оппоненты: **Тихомиров Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологического приборостроения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), г. Томск;

Злоказов Евгений Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Защита диссертации состоится 04 июля 2023 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/jc1la6hh>

Автореферат разослан «__» мая 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01,
доктор физ.-мат. наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Элементы локализации оптического излучения и управления световыми потоками на основе оптических материалов, такие как дифракционные решетки и волноводные структуры, являются неотъемлемой частью интегрально-оптических схем приборов фотоники. В качестве сред для генерации и управления характеристиками оптического излучения (преобразования частоты, фазы, интенсивности и поляризации) используются электрооптические кристаллы. Одним из таких широко применяемых на практике материалов является кристалл ниобата лития (LiNbO_3), обладающий уникальным набором электрооптических, физических, акустических, химических и механических свойств. Благодаря эффекту фоторефракции, в ниобате лития, как и в некоторых других кристаллических материалах, возможно оптическое индуцирование дифракционных и волноводных элементов со сложной топологией. Время хранения оптически индуцированных элементов в фоторефрактивном LiNbO_3 может составлять от долей секунды до нескольких лет, в зависимости от условий хранения.

Оптическое индуцирование волноводных структур в кристаллических материалах осуществляется различными способами, в том числе путем воздействия на материал высокоинтенсивного излучения фемтосекундных лазеров. Однако оптически реконфигурируемые волноводные и дифракционные элементы могут создаваться в кристаллических образцах ниобата лития также путем воздействия лазерного излучения с более низкой интенсивностью. При этом возможно использование двухлучевых голографических схем, однолучевых схем с амплитудной маской, а также применение последовательной экспозиции областей материала фокусированным лазерным пучком.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной диссертационной работы является формирование и исследование характеристик пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития.

Для достижения данной цели в работе решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальных установок для формирования и оптического зондирования пространственно-неоднородных и волноводных структур.
2. Разработка методики поточечного индуцирования пространственно-неоднородных и волноводных структур световыми пучками в поверхностно легированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X- и Y-срезов.
3. Исследование интерферометрическим методом изменений показателя преломления, индуцированных поточечным лазерным экспонированием в поверхностно легированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.
4. Исследование характеристик волноводных структур, поточечно индуцированных лазерным излучением в поверхностно легированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Поточечное экспонирование поверхностно легированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ лазерным излучением видимого диапазона позволяет формировать различные топологии пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития.

2. Индуцированные изменения показателя преломления в поверхностно легированном кристалле ниобата лития ($\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$) X-среза с общей средней концентрацией Cu порядка $16,8 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ при экспонировании фокусированным световым пучком с длиной волны света $\lambda = 532 \text{ нм}$ и плотностью мощности, не превышающей 500 Вт/см^2 , составляют величину Δn от $4,5 \cdot 10^{-4}$ до $14,5 \cdot 10^{-4}$ при длительности засветки от 2 до 40 секунд.

3. Разработанный оптико-электронный комплекс, состоящий из непрерывного источника излучения, автоматизированных синхронно работающих позиционера и затвора, интерферометра Маха-Цендера и анализатора лазерных пучков, позволяет формировать и исследовать пространственно-неоднородные и волноводные структуры в поверхностно легированных кристаллах LiNbO_3 .

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается выбором современных методик экспериментальных исследований, использованием апробированных методов обработки экспериментальных данных и отсутствием противоречий с результатами исследований других авторов.

Научная новизна

1. Впервые реализован и исследован метод поточечного индуцирования пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X- и Y-срезов лазерным излучением видимого диапазона.

2. Впервые показано, что поточечное экспонирование поверхности $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X- и Y-срезов фокусированным световым пучком делает возможным формирование пространственно-неоднородных структур в направлении оптической оси кристалла.

3. Разработан оптико-электронный комплекс, позволяющий формировать и исследовать пространственно-неоднородные и волноводные структуры, индуцированные в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития.

Научная и практическая значимость результатов работы

Научная значимость результатов работы заключается в разработке метода формирования реконфигурируемых пространственно-неоднородных и волноводных структур различных топологий в поверхностно легированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X- и Y-срезов.

Практическая значимость заключается в том, что разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет формировать и исследовать пространственно-неоднородные и волноводные структуры в поверхностно леги-

рованных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, необходимые для реализации гибридных и полностью оптических элементов оптоэлектронных устройств.

Внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, а также использованы при выполнении научно-исследовательских работ.

Апробация результатов работы

Результаты исследований диссертационной работы были представлены и обсуждены на конференциях, форумах и выставках Международного и Всероссийского, а также Регионального уровня:

The 8th International Conference "Photonics Prague" (Czech Republic, Prague, August 28-30, 2017); II Всероссийский молодежный научный форум "Наука будущего - наука молодых" (Нижний Новгород, 12-14 сентября 2017); 7-я Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы радиофизики" (Томск, 18-22 сентября 2017); XXX Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике (Калининград, 2-6 октября 2017); 6-я Открытая региональная выставка научных достижений молодых ученых "Рост.Ур 2017" (Томск, 28-29 ноября 2017); XIII Международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления" (Томск, 29 ноября - 1 декабря 2017); 5-я Международная Школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018» (Санкт-Петербург, 2-5 апреля, 2018 г.); XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 24–27 апреля 2018 г.); XXIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР–2018" (Томск, 16-18 мая 2018 г.); Европейская конференция по применению полярных диэлектриков / European Conference on Applications of Polar Dielectrics "ЕСAPD-2018" (Москва, 25-28 июня 2018 г.); X Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, 15-19 октября 2018 г.); XIV Международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления" (Томск, 28-30 ноября 2018 г.); XIV Международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления" (Томск, 28-30 ноября 2018 г.); XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 23-26 апреля 2019 г.); XXIV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научной сессии ТУСУР» (Томск, 22-24 мая 2019 г.); XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (Москва, 26-31 мая 2019 г.); XXXI международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике (Екатеринбург, 30 сентября – 4 октября 2019 г.); XI Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2019» (Санкт-Петербург, 21-25 октября 2019 г.);

Международная конференция «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 22-24 октября 2019 г.); XV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 20-22 ноября 2019 г.); XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 21-24 апреля 2020 г.); XXV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2020» (Томск, 25-27 мая 2020 г.); XVII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 19-21 ноября 2021 г.); XXXII международная Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике (г. Санкт-Петербург, 30 мая – 3 июня 2022 г.); XXXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022») (г. Можайск, 5-10 июня 2022 г.); Азиатско-Тихоокеанская конференция по фундаментальным проблемам опто- и микроэлектроники 2022 (APCOM-2022) (г. Владивосток, 2-6 октября 2022 г.); Международная конференция Физика.СПб (г. Санкт-Петербург, 17-21 октября 2022 г.).

Публикации

Основные результаты работы изложены в 45 публикациях: 6 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 7 работ в зарубежных журналах, индексируемых наукометрическими базами Web of science и Scopus, 2 статьи в рецензируемых журналах, 29 публикаций в сборниках трудов Международных и Всероссийских конференций.

Личный вклад диссертанта

Личный вклад соискателя заключается в разработке экспериментальных установок и методик проведения исследований, обработке и анализе полученных экспериментальных результатов, подготовке к опубликованию статей. Постановка целей и задач исследований и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научными руководителями: д-ром физ.-мат. наук, профессором В.М. Шандаровым и д-ром физ.-мат. наук, профессором А.Е. Манделем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из:

- введения;
- четырех глав основной части,
- заключения,
- списка литературы, включающего 141 наименование.
- приложений.

Полный объем диссертации составляет 120 страниц, включая 57 рисунков, 1 таблицу, 3 приложения.

Содержание работы

Введение

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, а также выносимые на защиту научные положения. Определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложены структура и содержание диссертации.

Первая глава

В первой главе проведен анализ роли и значимости волноводных структур в современных оптоэлектронных устройствах, а также рассмотрены состояние проблемы и способы реализации волноводных структур на основе оптических материалов, в частности, в электрооптических кристаллах.

Анализ рассмотренных источников литературы показал следующее:

1. В современных оптических системах требуется передача, прием и обработка больших объемов данных. В связи с этим возникает задача реализации многофункциональных интегрально-оптических и оптоэлектронных устройств и приборов на основе одной подложки.

2. Волноводные структуры являются неотъемлемой частью современных гибридных и полностью оптических приборов и устройств фотоники. Поэтому важной задачей является возможность реализации относительно быстрых и упрощенных методов формирования волноводных каналов в кристаллических материалах.

3. Метод оптического индуцирования позволяет формировать в электрооптических кристаллах, в частности в ниобате лития, волноводные структуры с различными топологиями, индивидуальными характеристиками и возможностью реконфигурации параметров.

4. Существующий в настоящее время метод прямой лазерной записи направлен на формирование волноводных структур в объеме кристаллических образцов ниобата лития. Это усложняет процесс формирования, поскольку для формирования канальных волноводных структур необходимо ограничение по двум поперечным координатам.

На основе материалов обзора сформулированы цели и задачи исследований диссертационной работы.

Вторая глава

Во второй главе исследованы возможности формирования пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ непрерывным источником лазерного излучения милливаттной мощности с гауссовым профилем распределения интенсивности на длине волны $\lambda = 532$ нм. Представленные результаты показывают, что экспонирование поверхности кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ Y- и X-срезов отдельными пятнами позволяет индуцировать волноводные структуры любой топологии с пространственной модуляцией параметров и различными поперечными размерами (рисунок 1).

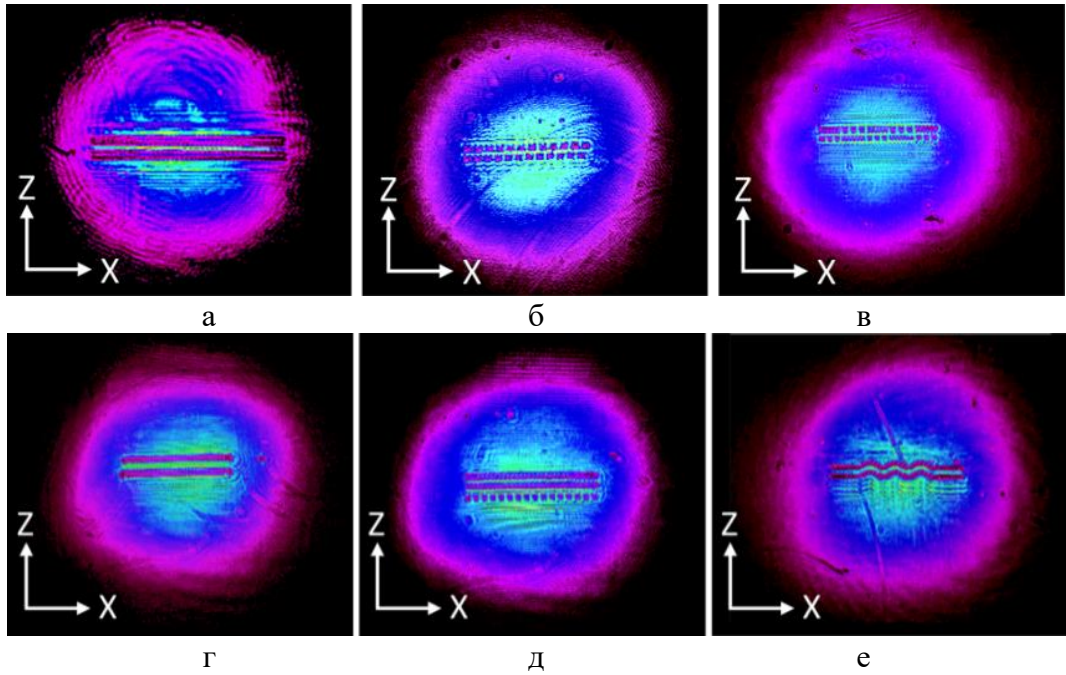


Рисунок 1 – Результаты оптического зондирования волноводных структур с различными топологиями

Влияние изменения шага экспонирования на однородность сформированных волноводных структур в продольном направлении исследовалось путем анализа дифракции светового поля на сформированных структурах в дальней зоне. Полученные дифракционные картины свидетельствуют о периодическом изменении показателя преломления кристалла вдоль экспонируемых полос.

Эффективность дифракционных максимумов η в экспериментах определялась по формуле:

$$\eta = \frac{I_{дn}}{I_{пр} + I_{д}}, \quad (1)$$

где $I_{дn}$ – интенсивность n -го дифракционного максимума; $I_{пр}$ – интенсивность основного прошедшего максимума; $I_{д}$ – суммарная интенсивность дифракционных максимумов.

Численное моделирование распределения интенсивности дифракционного поля на периодической структуре в дальней зоне проводилось с использованием соотношения:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(U)}{U} \right)^2 \cdot \frac{\sin^2(N\delta)}{\sin^2(\delta)}, \quad (2)$$

где I_0 – амплитудный множитель $U = \frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)$ – множитель, который описывает дифракцию света на каждой щели; $\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta)$ – множитель, который учитывает интерференцию световых полей, излучаемых всеми щелями; N – количество штрихов решетки; b – ширина «светлой» области, d – период решетки; λ – длина волны излучения, прошедшего через периодическую структуру.

Сопоставление экспериментальных и рассчитанных по формуле (2) результатов представлено на рисунках 2 и 3.

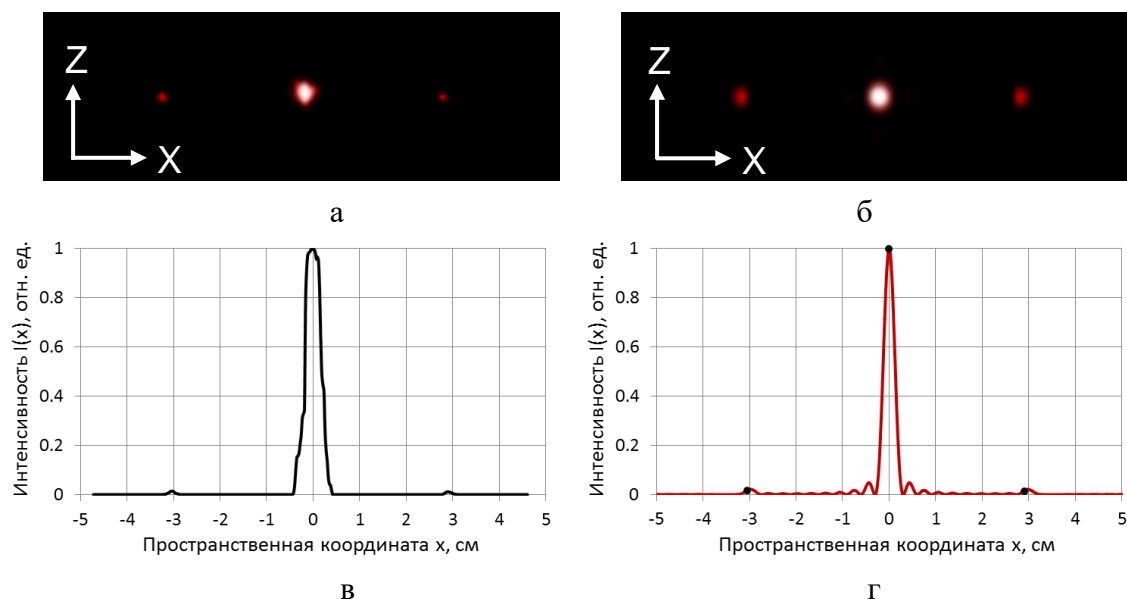


Рисунок 2 – Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на структуре, индуцированной с шагом 25 мкм: а – результат эксперимента; б – результат расчета; в, г – дифракционная картина вдоль оси X кристалла

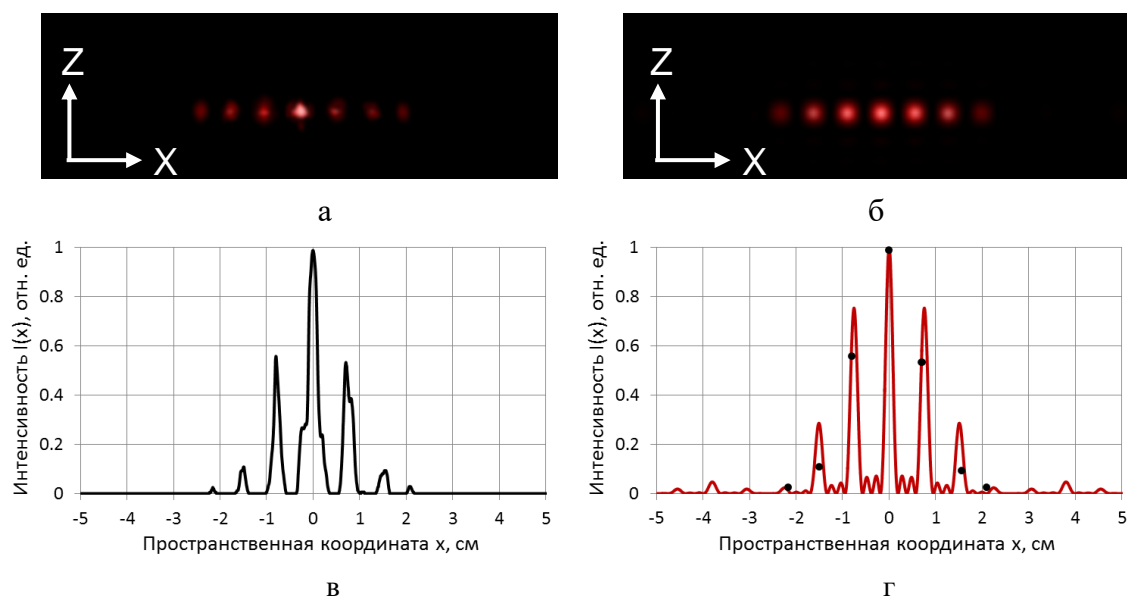


Рисунок 3 – Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на структуре, индуцированной с шагом 100 мкм: а – результат эксперимента; б – результат расчета; в, г – дифракционная картина вдоль оси X кристалла

Полученные нами результаты свидетельствуют о возможности формирования методом поточечного индуцирования волноводных и дифракционных структур с различными характеристиками в поверхностно легированном кристалле ниобата лития.

Третья глава

В третьей главе представлены результаты исследований величины и пространственного распределения поточечно индуцированных изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

X-среза. Экспериментальным образцом, в котором исследовались изменения показателя преломления, являлась пластина $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с размерами $1,25 \times 10 \times 14 \text{ мм}^3$ по осям X, Y и Z, соответственно. Ионы меди в кристалл вводились поверхностным легированием. Общая средняя концентрация ионов легирующей примеси составляла Cu порядка $16,8 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Толщина легированного слоя определялась путем зондирования торца кристалла лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 532 \text{ нм}$. По измеренным данным с шагом 25 мкм был рассчитан коэффициент поглощения внутри кристалла. Экспериментальная зависимость поглощения лазерного излучения внутри образца при перемещении луча вдоль оси X кристалла приведена на рисунке 4. Толщина легированного слоя оценивалась по уровню 0,1 от максимального значения коэффициента α и составляла величину $h \approx 600 \text{ мкм}$.

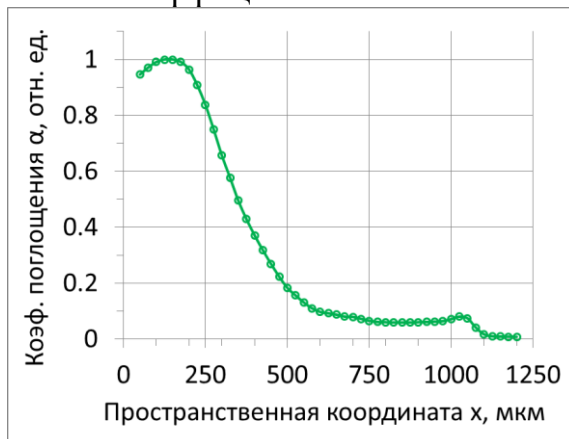


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента поглощения света при распространении вдоль оси Y от распределения примеси по глубине кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Индукцированные изменения показателя преломления исследовались при помощи интерферометра Жамена. Для этого в легированном слое кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ предварительно формировались прямолинейные структуры поточечным методом. В качестве источника излучения использовался твердотельный $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ лазер, работающий в непрерывном режиме с удвоением частоты ($\lambda = 532 \text{ нм}$). Экспериментальный образец размещался на микрометрическом позиционере с точностью перемещения 5 мкм. Световой пучок фокусировался на поверхность образца микрообъективом с $10\times$ увеличением. Диаметр светового пучка составлял $\sim 50 \text{ мкм}$ по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности. Поляризация лазерного излучения соответствовала необыкновенной волне кристалла. Плотность мощности световой волны не превышала $\sim 500 \text{ Вт/см}^2$. Время экспонирования поверхностного слоя одним фокусированным световым пятном в разных экспериментах изменялось от 2 до 60 секунд. Путем индуцирования набора точек создавались области в виде прямых полос вдоль оси Y кристалла с измененным показателем преломления. Каждая полоска состояла из 40 точек, расположенных на расстоянии 25 мкм друг от друга. Типичный пример изображения выходной грани кристалла с индуцированными полосками приведен на рисунке 5.

Количественная оценка изменений показателя преломления Δn , вносимых при поточечном индуцировании волноводных структур в поверхностном слое кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, проводилась с использованием интерферометра Жамена (рисунок 6). Источником излучения в интерферометре служил He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633 \text{ нм}$. Поляризация зондирующего излучения соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Диаметр выходного пучка лазера составил $\sim 1 \text{ мм}$ и коллиматором увеличился до $\sim 15 \text{ мм}$.

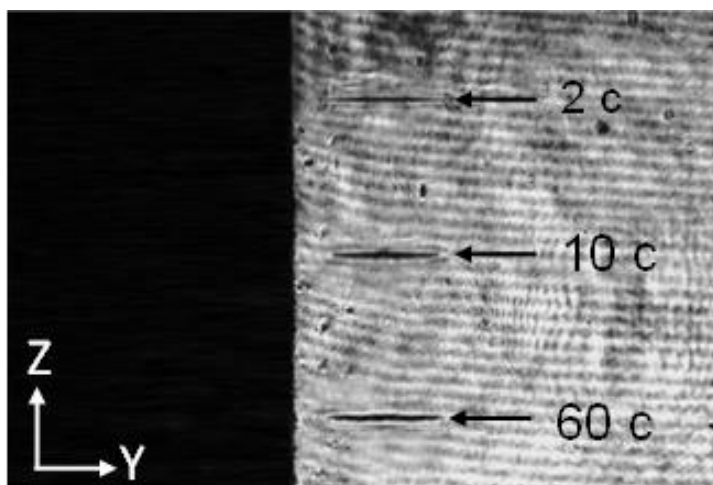


Рисунок 5 – Изображение выходной грани кристалла в области поточно индуцированных структур

Исследуемый образец размещался в одном из плеч интерферометра. На выходе второго зеркала формировалась интерференционная картина, передаваемая линзой на ПЗС-камеру, сопряженную с персональным компьютером. Типичные примеры интерферограмм, зафиксированных ПЗС-камерой приведены на рисунке 7.

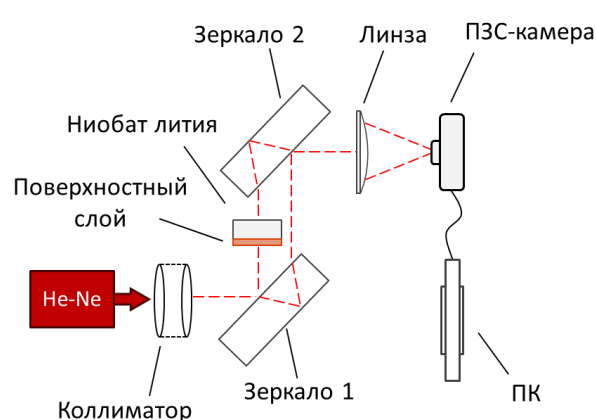


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки на основе интерферометра Жамена для исследования индуцированных изменений Δn

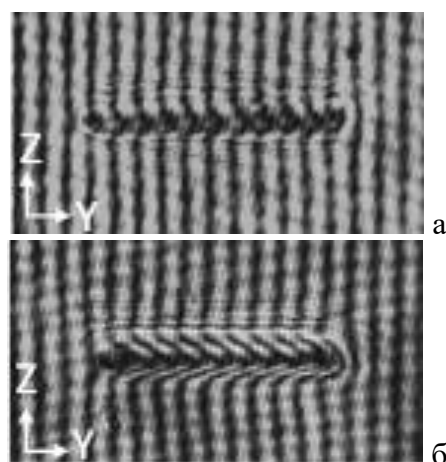


Рисунок 7 – Интерференционные картины в областях поточно индуцированных структур: а – время индуцирования одной точки 2 секунды; б – 60 секунд

Величина и характер индуцированных изменений показателя преломления в экспонированных областях поверхностного слоя изучались путем обработки полученных интерферограмм в программе «Визуализатор волнового фронта». Интерфейс программы изображен на рисунке 8.

Программа «Визуализатор волнового фронта» позволяет:

- считывать цифровые голограммы в графическом формате;
- восстанавливать волновой фронт интерференционных картин, образованных световыми волнами;
- определять величину и размеры индуцированных изменений в оптических материалах;
- отображать результаты расчетов на каждом этапе обработки по строкам и столбцам из рассчитанного изображения в виде двумерной плоскости;
- экспортировать обработанные данные в графическом формате и в виде числовых матриц.

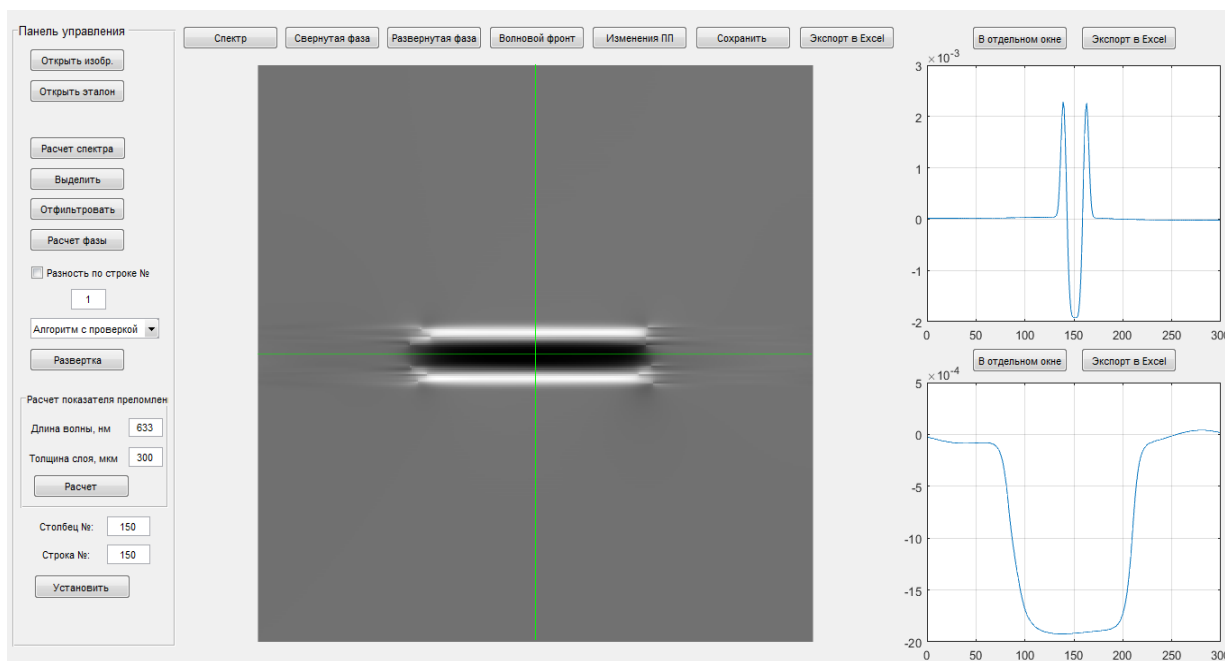


Рисунок 8 – Интерфейс программы «Визуализатор волнового фронта»

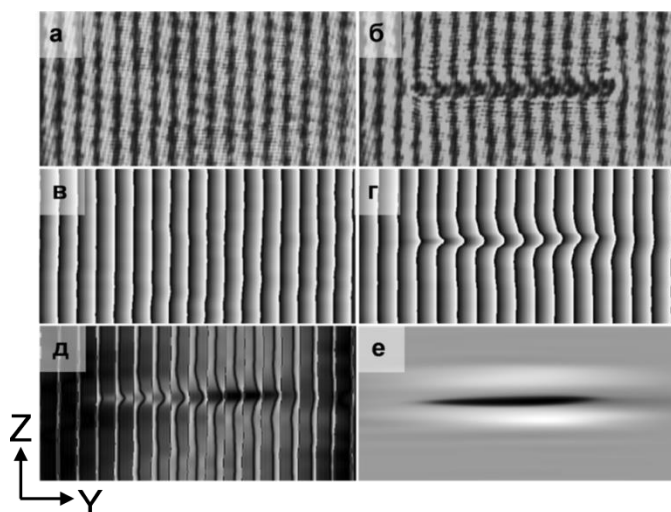


Рисунок 9 – Этапы исследования и визуализации индуцированных изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при 2-секундном экспонировании одной точки: а – интерферограмма до экспонирования кристалла; б – интерферограмма после экспонирования кристалла; в – свернутая фаза, полученная из интерферограммы «а»; г – свернутая фаза, полученная из интерферограммы «б»; д – разность между свернутыми фазами «в» и «г»; е – фазовый фронт волны, прошедшей через область индуцированных изменений

Восстановление волнового фронта световой волны, прошедшей через индуцированную структуру, позволяет оценить величину и распределение индуцированных изменений показателя преломления. Значения изменений показателя преломления Δn_e вдоль оси Z кристалла могут быть определены по формуле:

$$\Delta n(z) = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi(z)}{2\pi \cdot d_x}, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучения в интерферометре, $\Delta\varphi(z)$ – фазовый сдвиг; d_x – глубина индуцированных изменений показателя преломления вдоль оси X кристалла.

В формуле (3) фазовый сдвиг интерференционных полос $\Delta\varphi(z)$, вносимый областью с измененным показателем преломления, усреднялся по всей длине индуцированной полосы. Для определения глубины индуцированных

изменений d_x вдоль оси X кристалла были проведены дополнительные исследования.

Вблизи торца кристалла, путем поточечного экспонирования светом с длиной волны $\lambda = 532$ нм, формировались области с измененным показателем преломления в виде полос длиной ~ 1000 мкм. Каждая полоска в плоскости ZY состояла из 30 точек, расположенных на расстоянии 25 мкм друг от друга (рисунок 10). Время экспонирования кристалла одним фокусированным световым пятном изменялось от 2 до 60 секунд.

Типичный пример интерферограмм с торцевой поверхности образца (плоскость XZ), полученных при размещении кристалла в одном из плеч интерферометра Жамена представлен на рисунке 11.

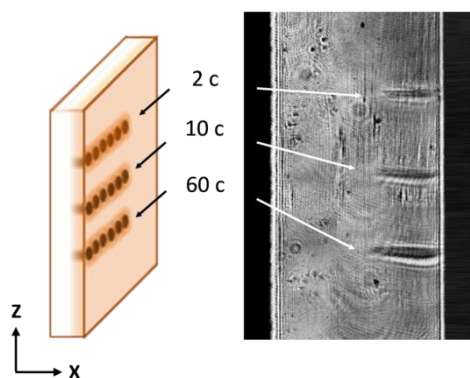


Рисунок 10 – Индуцированные изменения показателя преломления вдоль оси X образца

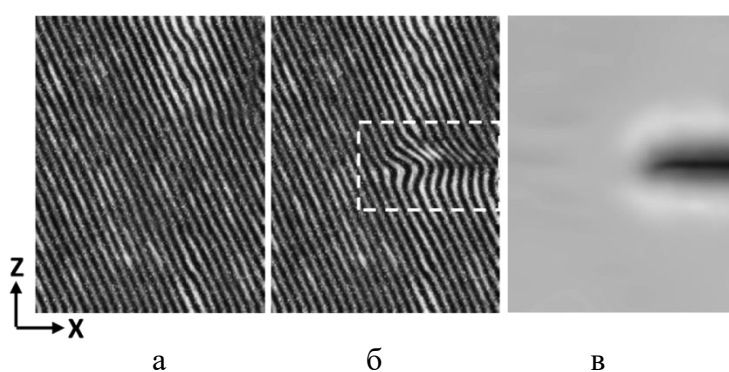


Рисунок 11 – Интерферограммы, полученные на выходном торце до и после экспонирования поверхности YZ кристалла (а, б); фазовый фронт в области индуцированной полоски (в)

Профили волнового фронта в области индуцированных изменений показателя преломления по глубине экспериментального образца, приведены на рисунке 12. Максимальные индуцированные изменения показателя преломления происходят в легированном слое кристалла на глубине $d_x = 300$ мкм. На глубине ~ 600 мкм индуцированные в кристалле изменения показателя преломления практически отсутствовали.

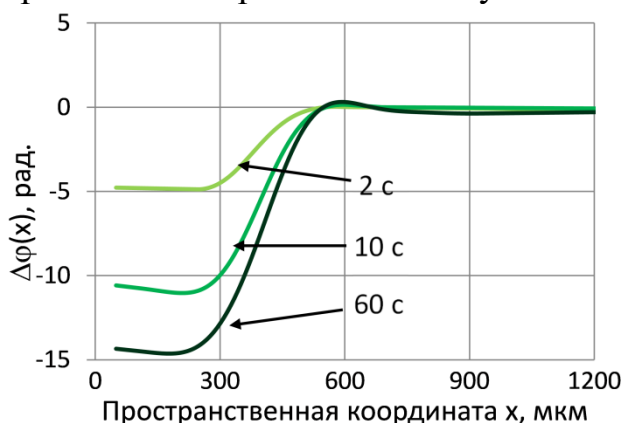


Рисунок 12 – Распределение $\Delta\varphi$ в области индуцированных изменений показателя преломления в направлении оси X кристалла

Значения изменений показателя преломления Δn_e поверхностного слоя вдоль оси Z при разном времени экспонирования рассчитывались с учетом глубины индуцированных изменений показателя преломления вдоль оси X кристалла. Индуцированные изменения показателя преломления вдоль оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при разном времени экспонирования одним световым пятном приведены на рисунке 13.

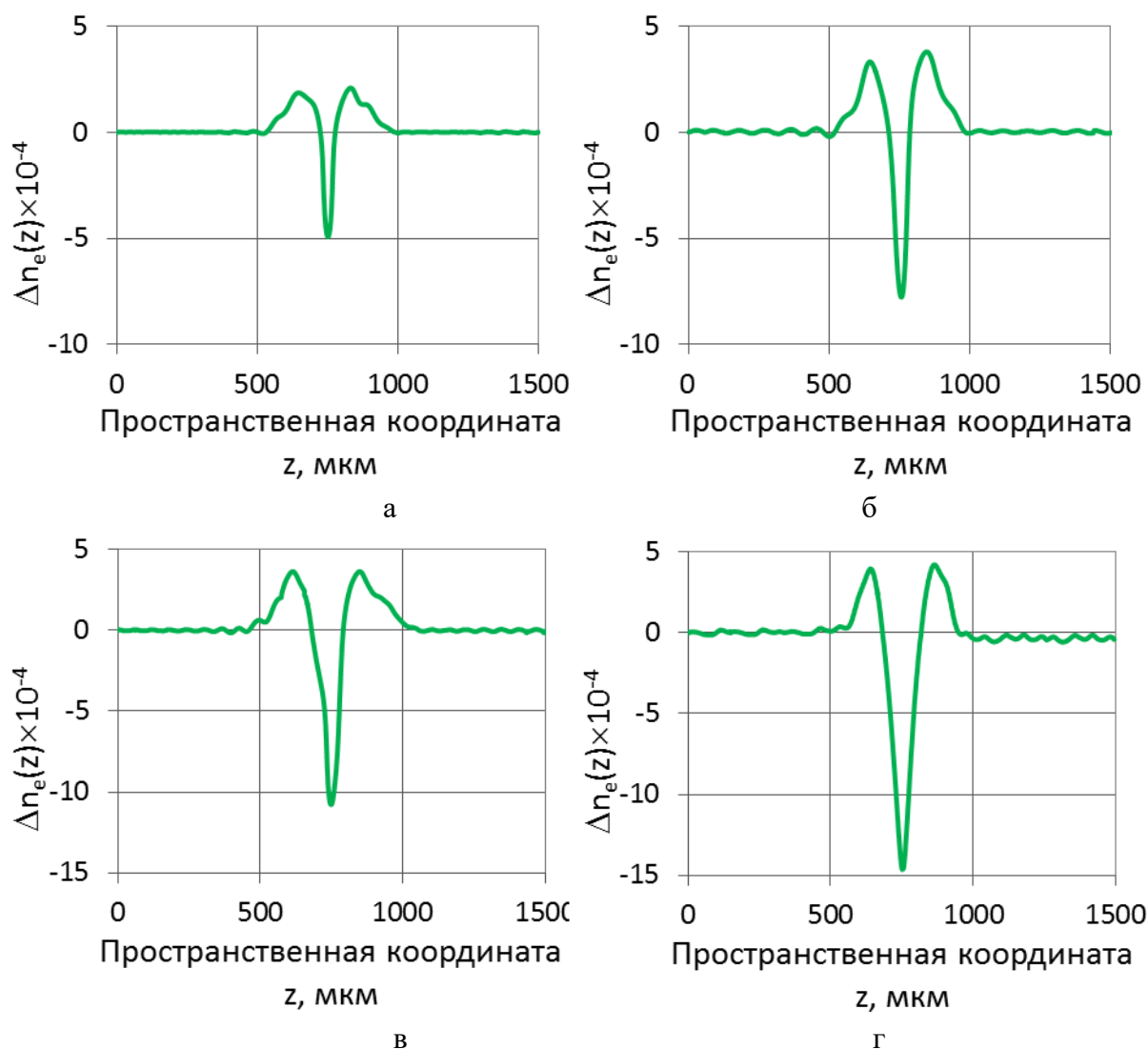


Рисунок 13 – Индуцированные изменения показателя преломления вдоль оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при разном времени экспонирования одним пятном: а – 2 секунды; б – 5 секунд; в – 10 секунд; г – 60 секунд

Из представленных графиков видно, что изменения показателя преломления вдоль оптической оси кристалла имеет следующий характер: в центре освещенной области образуется провал с отрицательной величиной изменений показателя преломления, а на краях – возвышенности с положительно измененной величиной показателя преломления. Зависимость максимальных индуцированных изменений показателя преломления от времени экспонирования в центре освещенной области приведена на рисунке 14.

Как видно из графиков рисунка 14, в экспериментах при поточечном экспонировании кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ значения отрицательных изменений показателя преломления достигают уровня насыщения $\Delta n_e \approx -15 \times 10^{-4}$ в течение 40 секунд. При увеличении времени освещения до 60 секунд уровень изменений показателя преломления практически не меняется.

Экспонирование поверхностно легированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ фокусированным лазерным излучением приводит к существенным изменениям показателя преломления в освещенной области внутри поверхностного

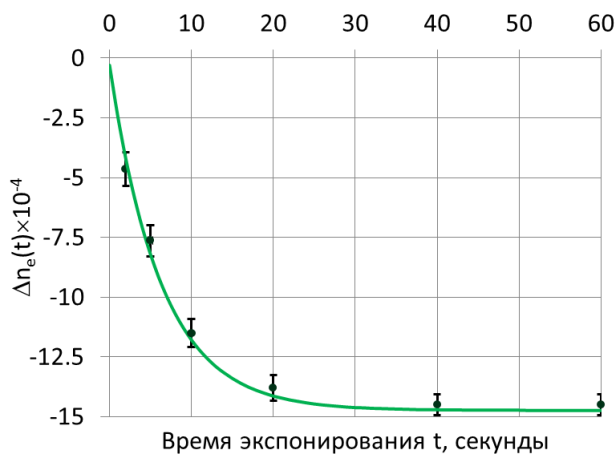


Рисунок 14 – Зависимость изменений необыкновенного показателя преломления $\Delta n_e(t)$ от времени экспонирования кристалла лазерным излучением с $\lambda = 532$ нм

Четвертая глава

В четвертой главе диссертационной работы приведено описание разработанного оптико-электронного комплекса, позволяющего формировать и исследовать пространственно-неоднородные и волноводные структуры, индуцированные в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития.

Детальное исследование характеристик индуцированных волноводных структур требует решения нескольких задач:

- изменение условий экспонирования экспериментальных образцов;
- формирование волноводных структур с различными характеристиками;
- исследование формируемых структур методом оптического зондирования, а также при помощи интерферометрического метода;
- исследование формируемых структур на наличие волноводного эффекта.

Разработанный оптико-электронный аппаратно-программный комплекс, который состоит из трех блоков (рисунок 15).

Блок 1 содержит непрерывно работающие твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер и He-Ne лазер. Твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер является источником излучения для формирования пространственно-неоднородных и волноводных структур, He-Ne лазер является источником для формирования интерференционных изображений.

Блок 2 включает в себя автоматизированный позиционер с синхронно работающим механическим затвором, микрообъектив и поворотную платформу, необходимые для управления положением экспериментального образца и подачи излучения твердотельного YAG:Nd³⁺ лазера; коллиматор, увеличивающий диаметр светового пучка в 20 раз, интерферометр Маха-Цендера, изображающую линзу и анализатор лазерных пучков, которые позволяют получать интерферограммы в области сформированных структур (аппаратная часть комплекса).

слоя. Поскольку плотность мощности в наших экспериментах не превышала 500 Вт/см², вкладом температурных эффектов в изменение показателя преломления можно пренебречь. Основной вклад в наведенные изменения Δn исследуемого образца обусловлен фоторефрактивным эффектом.

Расчет поля пространственного заряда по экспериментально полученным значениям индуцированных изменений Δn_e варьируется в пределах от 10^4 до 10^5 В/см.

Блок 3 состоит из персонального компьютера (ноутбука), программы для управления позиционером и затвором, а также программы для анализа и обработки интерферограмм «Визуализатор волнового фронта» которые позволяют задавать и исследовать характеристики сформированных структур (блок 3 – программная часть комплекса).

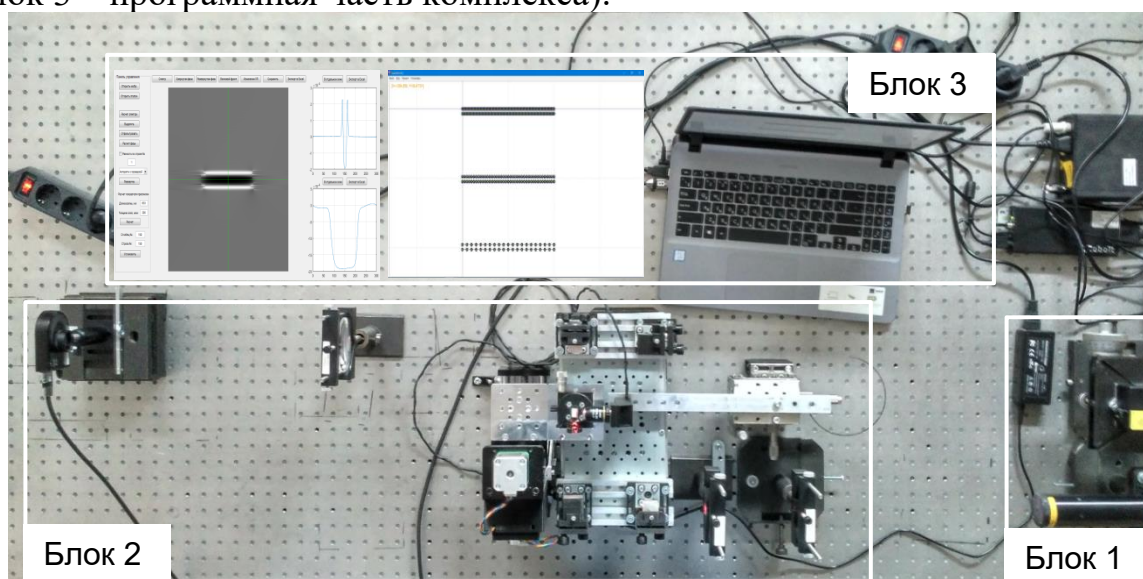


Рисунок 15 – Оптико-электронный комплекс для формирования и исследования пространственно-неоднородных и волноводных структур в кристаллах ниобата лития: блок 1 – источники излучения; блок 2 – аппаратная часть комплекса; блок 3 – программная часть комплекса

В качестве источника излучения для формирования волноводных структур использовался YAG:Nd³⁺ лазер с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм), работающий в непрерывном режиме. Излучение на поверхность кристалла фокусировалось микрообъективом с 10-кратным увеличением. Экспериментальный образец размещался на двухкоординатном автоматизированном позиционере с поворотной платформой, которая позволяла изменять положение кристалла на разных этапах эксперимента. Режим передвижения платформы задавался специальной программой и синхронизировался с работой затвора. Затвор в данной схеме устанавливал длительность экспонирования кристалла.

На рисунке 16 изображена схема экспериментальной установки для исследования характеристик наведенных волноводных структур. Для визуализации индуцированных изменений показателя преломления в разработанном комплексе использовался интерферометр Маха-Цендера. Исследуемый кристалл размещался в одном из плеч интерферометра. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер. Поляризация излучения соответствовала необыкновенной волне в кристалле.

Механический затвор перекрывал подачу излучения He-Ne лазера на этапе формирования волноводных структур. Изображения исследуемых областей передавались на анализатор лазерных пучков сферической линзой, расположенной на двойном фокусном расстоянии ($2F$) от выходной грани экспериментального образца.

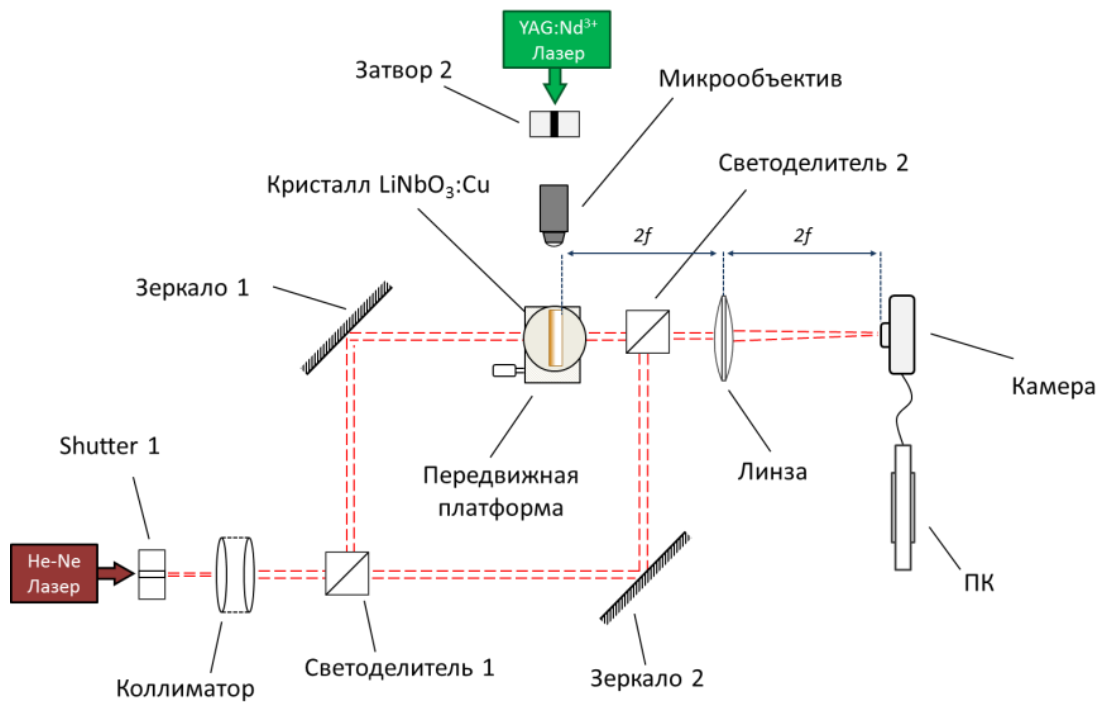


Рисунок 16 – Схема экспериментальной установки для исследования характеристик наведенных волноводных структур

Разработанный оптико-электронный комплекс позволяет индуцировать волноводные структуры различных размеров в автоматизированном режиме, а также исследовать их характеристики. Специальная программа управления позиционером позволяет задавать топологию формируемой структуры, время поточечного экспонирования образца, варьировать расстояние между точками экспонирования, контролировать и изменять параметры записи в процессе индуцирования.

Пример структур с различными поперечными размерами, сформированных на данной экспериментальной установке, представлен на рисунке 17.

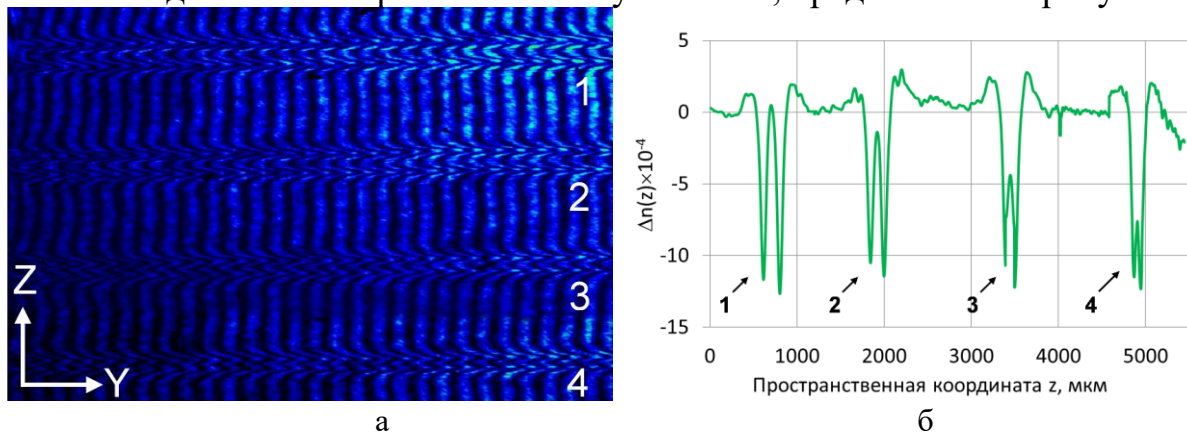


Рисунок 17 – Интерферограмма в области волноводных структур: а – после индуцирования структур с различным расстоянием между центрами экспонированных полос (1 – 200 мкм, 2 – 150 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 80 мкм); б – профиль показателя преломления вдоль оптической оси Z кристалла

Индуцированные волноводные структуры формировались по всей ширине экспериментального образца. Длина сформированных структур составила ~ 10 мм. Расстояние между центрами экспонированных полос первой

структуры составило 200 мкм, второй структуры – 150 мкм, третьей – 100 мкм, четвертой – 80 мкм. Время экспонирования одной точки в формируемых структурах составило 10 секунд.

Из рисунка 17 видно, что профиль изменений показателя преломления в сформированных структурах имеет градиентный характер. Центральную область условно можно считать сердцевинной, а прилегающие области – оболочкой сформированной волноводной структуры. В экспериментах разница показателей преломления между центральной и прилегающими областями в 1-й волноводной структуре составила $\Delta n \approx 12 \times 10^{-4}$, во 2-й – $\Delta n \approx 9 \times 10^{-4}$, в 3-й – $\Delta n \approx 7 \times 10^{-4}$, в 4-й – $\Delta n \approx 5 \times 10^{-4}$.

Важной характеристикой волноводной структуры является угол ввода излучения, связанный с числовой апертурой (NA). Для первой сформированной структуры (рисунок 19) числовая апертура составила величину порядка $NA = 0,053$, для второй – $NA = 0,047$, для третьей – $NA = 0,038$, для четвертой – $NA = 0,033$.

Для исследования волноводного эффекта в сформированных волноводных структурах использовался торцевой ввод излучения He-Ne лазера. Диаметр сфокусированного пучка на входной грани образца составлял ~50 мкм

Изображение светового пятна на выходном торце исследуемого образца передавалось фокусирующей линзой на анализатор лазерных пучков. Картина светового поля на выходном торце сформированной структуры представлена на рисунке 18. Из рисунка 18 видно, что форма светового пучка на выходе канала зависит от поперечных характеристик сформированных волноводных структур.

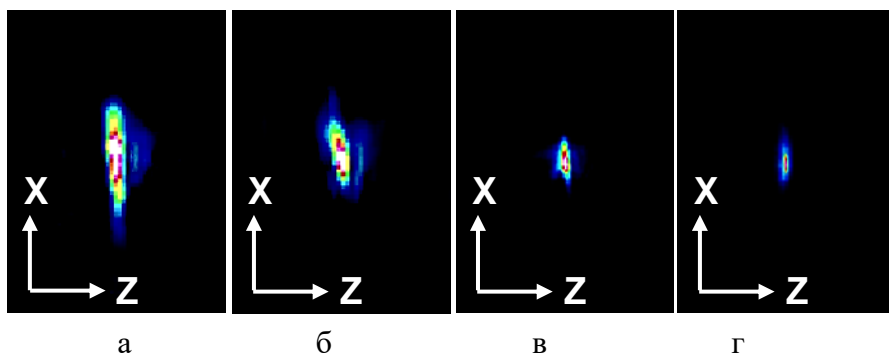


Рисунок 18 – Изображения световых полей на выходном торце индуцированных структур с шириной: а – 200 мкм, б – 150 мкм; в – 100 мкм; г – 80 мкм

Световая мощность излучения измерялась прибором Thorlabs PM100D. На входе сформированных волноводных структур измеренная мощность излучения составила 79 ± 2 мкВт. На выходе из волноводных структур

изменялась в пределах от 34 ± 2 мкВт до 36 ± 2 мкВт. По измеренным данным значение потерь для волноводной структуры с шириной 80 мкм составило $3,2 \pm 0,1$ дБ/см, для структуры с шириной 200 мкм – $3,5 \pm 0,2$ дБ/см.

Приведенные выше экспериментальные результаты показывают, что изменение ширины сформированных структур не приводит к существенному изменению потерь в волноводных структурах.

Расчет числа мод в сформированных волноводных структурах по аппроксимированным профилям проводился на основе дисперсионного урав-

нения в ВКБ-приближении (Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна) по формуле:

$$k \int_{-z_m}^{z_m} \left(n(z) - n_{eff_m} \right)^{\frac{1}{2}} dz = \pi m + \varphi_1 + \varphi_2, \quad (4)$$

где k – волновое число; $n(z)$ – функция распределения показателя преломления вдоль оси Z кристалла; n_{eff_m} – эффективный показатель преломления волноводной моды с номером m ; z_m – координата точки поворота моды с номером m ; $\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ – предельный фазовый сдвиг, который приобретает волна в точке поворота z_m .

Расчитанное по выражению (4) максимальное целое число мод в волноводной структуре с шириной 200 мкм $m = 32$, с шириной 150 мкм $m = 22$, с шириной 100 мкм $m = 9$, с шириной 80 мкм $m = 3$.

В наших экспериментах в наведенных структурах подавляются волноводные моды высших порядков. В структурах с шириной 200 мкм и 150 мкм наблюдались две моды, а в структурах с шириной 100 мкм и 80 мкм – одна мода. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что эффективная область сформированных волноводных структур существенно меньше расстояния между центрами экспонированных полос. Это может быть связано с рядом факторов:

- геометрическое сечение сформированных структур имеет сложную форму и распределение показателя преломления по глубине кристалла в плоскости XZ не является однородным;

- сформированные границы волноводов имеют неоднородное распределение изменений показателя преломления в продольном направлении (вдоль оси Y кристалла).

Заключение

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. Метод поточечного индуцирование позволяет:
 - изменять показатель преломления в локально освещенных областях в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$;
 - формировать волноводные структуры в различных направлениях относительно оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$;
 - задавать топологии индуцированных волноводных структур в процессе формирования;
 - варьировать и контролировать пространственные размеры волноводных структур в процессе их индуцирования.
2. Метод поточечного индуцирования позволяет изменять показатель преломления в локально освещенных областях в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.
3. Освоен метод визуализация индуцированных светом изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.
4. Подтверждено, что пространственный профиль индуцированных из-

менений Δn вдоль оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ имеет знакопеременный характер: в центре освещенной области – отрицательная величина, на краях – положительная.

5. При экспонировании кристалла непрерывным излучением с $\lambda = 532$ нм и необыкновенной поляризацией максимальный уровень отрицательных изменений достигал величины $\Delta n_e \approx -15 \cdot 10^{-4}$ при сдвиге фаз интерференционных полос $\Delta\varphi \approx 3\pi$. Показано, что величину индуцированных изменений показателя преломления Δn можно регулировать до 10^{-3} , изменяя длительность экспонирования кристалла.

6. Разработан оптико-электронный комплекс, который включает в себя непрерывно работающие источники излучения, автоматизированный позиционер с синхронно работающим механическим затвором, интерферометр Маха-Цендера, анализатор лазерных пучков, программу для управления позиционером и затвором.

7. Разработана программа для анализа и обработки интерферограмм «Визуализатор волнового фронта».

8. Профиль показателя преломления индуцированных структур вдоль оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ является градиентным и зависит от условий экспонирования кристалла. Разница показателей преломления между сердцевинной и оболочкой формируемых структур варьируется в пределах от $\sim 5 \times 10^{-4}$ до $\sim 10 \times 10^{-4}$.

9. Числовая апертура для волноводной структуры с шириной 200 мкм составила величину порядка $\text{NA} = 0,053$, с шириной 150 мкм – $\text{NA} = 0,047$, с шириной 100 мкм – $\text{NA} = 0,038$, с шириной 80 мкм – $\text{NA} = 0,033$.

10. Значение измеренных потерь в сформированных волноводных структурах составило величину от $3,2 \pm 0,1$ дБ/см до $3,5 \pm 0,2$ дБ/см.

11. В наших экспериментах в наведенных структурах подавляются волноводные моды высших порядков. В структурах с шириной 200 мкм и 150 мкм наблюдались две моды, а в структурах с шириной 100 мкм и 80 мкм – одна мода.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Безпальный А.Д., Верхотуров А.О., Шандаров В.М. Волноводные и дифракционные элементы устройств и приборов фотоники, оптически индуцированные в подложках ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем // Доклады ТУСУРа. 2015. №4 (38). С. 86-90.

2. Безпальный А.Д., Верхотуров А.О., Шандаров В.М. Оптическое формирование канальных волноводов и планарных дифракционных решеток в фоторефрактивном приповерхностном слое ниобаталития // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2016. № 5. С. 1-4 (165308).

3. Безпальный А.Д., Шандаров В.М., Мандель А.Е. Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристалле ниобата лития с фо-

торерефрактивным поверхностным слоем // Доклады ТУСУР, 2018. Т. 21, №3. С. 14-16.

4. Безпалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е., Краковский В.А. Изменения показателя преломления, индуцированные в поверхностном слое кристалла ниобата лития при формировании канальных волноводных структур для устройств оптоэлектроники // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, №4. С. 33-36.

5. Безпалый А.Д., Шандаров В.М., Мандель А.Е., Быков В.И., Мамбетова К.М. Оптически индуцированные канальные волноводные структуры с пространственной модуляцией параметров в поверхностном слое ниобата лития // Изв. вузов. Физика, 2019. Т. 62, № 3. С. 3-8.

6. Безпалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Фоторефрактивные изменения показателя преломления в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с поверхностным легированием // Автометрия, 2022. – Т. 58, № 2. – С. 46-53.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Свид. 2021661646 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Визуализатор волнового фронта» [Электронный ресурс]/ А.Д.Безпалый, В.В. Капустин, А.Е. Мандель. – №2021660493/69; Заяв. 07.07.2021;Опубл. 14.07.2021. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных «Scopus»

1. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., and Shandarov V.M. Optical writing of channel waveguides and 1D diffraction gratings in photorefractive surface layers of lithium niobate // *Ferroelectrics*. 2017. Vol. 515:1. P. 34-43.

2. Bezpaly A.D., Shandarov V.M., Mandel A.E., Bykov V.I., Mambetova K.M. Optically Induced Channel Waveguide Structures with Spatial Modulation of Parameters in the Surface Layer of Lithium Niobate // *Rus. Phys. J.*, 2019. Vol. 62, No 3. P. 387-392.

3. Bezpaly A.D., Bykov V.I., Mandel A.E. Photorefractive Changes in the Refractive Index in a $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ Crystal with a Surface Doping // *Instr. and Data Proc.*, 2022. Vol. 58, No. 2. P. 147-153.

Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science

1. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Waveguide and Diffraction Elements Optically Generated in Surface-doped Layers of Ferroelectric Lithium Niobate // *Joint IEEE Int. Symp. on the Appl. of Fer., Eur. Conf. on Appl. of Pol. Dielect., and Piezoelect. Force Microscopy Workshop, ISAF/ECAPD/PFM: Darmstadt, 2016. 4p.*

2. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate // *Proc. of SPIE - Photonics, Devices, and Systems VII: Prague, 2017. Vol. 10603. P. 1-6 (1060300).*

3. Bezpaly A.D., Shandarov V.M. Optical formation of waveguide elements in photorefractive surfacelayer of a lithium niobate sample // *Phys. Proc.* 2017.

86С. P. 166-169.

4. Bezpaly A.D., Perin A.S., Shandarov V.M. Spatially Modulated Channel Waveguide Elements Optically Written in Photorefractive Lithium Niobate // J. of Phys.:Conf. Series. 2018. Vol. 1124. P. 1-4 (051022).

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в РИНЦ

1. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Waveguide and Diffraction Properties of Optically Induced Elements in Photorefractive Surface Layers of Lithium Niobate // J. of Appl. Spectr. 2016. Vol. 83, No 6-16. P. 193-194.

2. Bezpaly A.D., Shandarov V.M. Channel Optical Waveguides with Spatial Longitudinal Modulation of Their Parameters Induced in Photorefractive Lithium Niobate Samples // KnE Engineering. 2018. Vol. 2018. P. 147-155.

Публикации в трудах Международных и Всероссийских конференций

1. Безпалый А.Д., Шандаров В.М. Продольная пространственная модуляция параметров канальных оптических волноводов при их поточечном оптическом индуцировании в образцах ниобата лития с фоторефрактивной поверхностью / 7-я Междунар. науч.-практ. конф. «Акт. пробл. радиофизики» (АПР-2017): сборник трудов. Томск: STT, 2017. С. 253-256.

2. Безпалый А.Д., Шандаров В.М. Влияние поточечного индуцирования на продольную однородность волноводных структур в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем // XXX Междунар. шк.-симп. по гологр., когерент. опт. и фотон.: материалы шк.-симп. / под ред. канд. физ.-мат. наук И. В. Алексеенко. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2017. С. 136-138.

3. Bezpaly A.D., Perin A.S., Shandarov V.M. Channel Waveguides and Their Systems Optically Induced in Photorefractive Surface Area of Lithium Niobate // 5th Int. School and Conf. Saint-Petersburg OPEN 2018: St. Petersburg, April 2-5, 2018. Acad. Univers. Publ. 2018. Vol. 5. P. 303-304.

4. Bezpaly A.D., Perin A.S., Shandarov V.M. Optical Formation of Channel Waveguide Structures with Different Spatial Parameters in Surface-doped Ferroelectric Lithium Niobate // Europ. Conf. on Appl. of Polar Dielectrics ECAPD-2018: Moscow, 25 – 28 June, 2018. MIREA. – 2018. – Vol. 2018. – P. 68.

5. Безпалый А.Д., Шандаров В.М., Мандель А.Е. Пространственная модуляция параметров канальных волноводных структур, оптически индуцированных в фоторефрактивном кристалле ниобата лития // X Междунар. конф. «Фунд. пробл. опт.» ФПО-2018: сборник трудов / под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф.С.А. Козлова. СПб: Университет ИТМО, 2018. С. 347-349.

6. Безпалый А.Д. Оптически индуцированные изменения показателя преломления в поверхностном слое ниобата лития при поточечном формировании канальных волноводных структур // XXXI междунар. Шк.-симп. по голограф., когерент. опт. и фотон.: материалы шк.-симп. / под ред. д.т.н. А.П. Владимирова; УрФУ им. Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2019. С. 132.

7. Безпалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптическое индуцирова-

ние канальных волноводов с модуляцией показателя преломления в поверхностном слое кристалла ниобата лития / Акт. пробл. радиофиз.: VIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Томск, 1–4 октября 2019 г. Сборник трудов. Томск: ТГУ, 2019. С. 393-395.

8. Безпальный А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Воздействие лазерного излучения на изменения показателя преломления в кристалле ниобата лития при формировании канальных волноводных структур // Материалы докладов XV Межд. науч.-практ. конф. «Электрон. сред. и сист. управл.» (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. Ч. 12. Томск: В-Спектр, 2019. С. 134-135.

9. Безпальный А.Д. Пространственное распределение изменений показателя преломления, индуцированных при формировании канальных волноводов в поверхностно легированном кристалле ниобата лития / А.Д. Безпальный // Персп. разв. фонд. наук: сборник трудов XVII Междун. Конф. студент., аспирант. и мол. уч. (Томск, 21–24 апреля 2020 г.): в 7 томах. Т.7. IT-технологии и электроника / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. С. 26-28.

10. Bezpaluy A.D. Spatial profile of refractive index change induced during the waveguide formation in the surface-doped lithium niobate // Научн. сес. ТУСУР–2020: материалы Междун. науч.-технич. конф. студент., аспирант. и мол. уч., Томск, 25–27 мая 2020 г.: в 3 частях. Томск: В-Спектр, 2020. Ч. 3. С. 239-242.

11. Безпальный А.Д. Исследование профиля показателя преломления, измененного при индуцировании канальных волноводных структур в поверхностном слое кристалла ниобата лития // Сбор. избр. стат. науч. сес. ТУСУР, Томск, 25–27 мая 2020 г.: в 2 ч. Т.: В-Спектр, 2020. Ч. 1. С. 205-208.

12. Безпальный А.Д., Мандель А.Е., Быков В.И. Визуализация изменений показателя преломления, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития // Электрон. сред. и сист. управл.: материалы докладов XVII Межд. науч.-практ. конф. (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. Томск: В-Спектр, 2021. Ч. 1. С. 177-179.

13. Безпальный А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптические волноводные структуры, индуцированные в кристалле ниобата лития с поверхностным легированием // XXXII Межд. шк.-симп. по гол., когерент. опт. и фотон.: материалы шк.-симп. / под ред. д.ф.-м.н. Петров Н.В. СПб: Универ. ИТМО, 2022. С. 68-69.

14. Безпальный А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Волноводные структуры, индуцированные лазерным излучением в поверхностно легированном кристалле ниобата лития // XXIII Всерос. шк.-сем. «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022»), под общ. ред. канд. физ.-мат. наук А.Н. Калиша. М, 2022. Ч. 2., С. 14-15.

15. Безпальный А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптические волноводные структуры оптоэлектронных устройств, индуцированные в поверхностном слое кристалла ниобата лития // Физика.СПб: тез. доклад. междунар. конф., С-Пб. 17-21 октября 2022. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 319-321.