

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
Мандель Аркадий Евсеевич

Томск 2023

Содержание

Введение.....	4
1 РЕАЛИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В СОВРЕМЕННЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ.....	14
1.1 Виды и характеристики волноводных структур на основе оптических материалов	14
1.2 Современные оптоэлектронные устройства и приборы на основе волноводных структур.....	17
1.3 Способы формирования и реализации волноводных структур в электрооптических кристаллах.....	22
1.4 Выводы по разделу	27
2 ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ МЕТОДОМ ПОТОЧЕЧНОГО ИНДУЦИРОВАНИЯ	30
2.1 Формирование волноводных структур гауссовыми световыми пучками при различных условиях экспонирования кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$...	31
2.2 Поточечно индуцированные волноводные структуры с различными характеристиками и конфигурацией.....	36
2.3 Выводы по разделу	46
3 ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПРОФИЛЬ И ВЕЛИЧИНА ПОТОЧЕЧНО ИНДУЦИРОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$	48
3.1 Характеристики кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с поверхностным легированным слоем	48
3.2 Методы исследований индуцированных изменений показателя преломления в электрооптических кристаллах	51

3.3	Исследование индуцированных изменений показателя преломления интерферометрическим методом на основе схемы интерферометра Жамена	55
3.4	Визуализация индуцированных светом изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$	58
3.5	Выводы по разделу	66
4	ПОТОЧЕЧНО ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$	68
4.1	Исследование характеристик волноводных структур, индуцированных при различных условиях экспонирования кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$	71
4.2	Разработка оптико-электронного комплекса для формирования и исследования поточечно индуцированных волноводных структур в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$	76
4.3	Выводы по разделу	89
	Заключение	91
	Список литературы	95
	Приложение А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	118
	Приложение Б. Акт внедрения в учебный процесс кафедры СВЧиКР	119
	Приложение В. Акт внедрения в научный процесс кафедры СВЧиКР	120

Введение

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 оптоэлектронных устройств и приборов фотоники [1-5]. Различные способы формирования волноводных структур в оптических материалах во многом определяют развитие лазерной техники, интегральной оптики и фотоники [6-9]. В качестве сред для генерации и управления характеристиками оптического излучения (преобразования частоты, фазы, интенсивности и поляризации) используются электрооптические кристаллы в связи с их сильной оптической нелинейностью [1, 5, 10, 11]. Одним из таких широко применяемых на практике материалов является кристалл ниобата лития (LiNbO_3), обладающий уникальным набором электрооптических, физических, акустических, химических и механических свойств [5, 7, 10-13]. Значительный интерес представляют его фоторефрактивные свойства, заключающиеся в изменении показателя преломления при воздействии света [5, 11-14]. Благодаря эффекту фоторефракции, в ниобате лития, как и в некоторых других кристаллических материалах, возможно оптическое индуцирование дифракционных и волноводных элементов со сложной топологией [5, 7, 11, 15-19].

В настоящее время волноводные структуры широко используются в оптических системах передачи, приема и обработки информации, в интегрально-оптических схемах, элементах и приборах лазерной техники, нелинейной оптики и нанофотоники [1-7]. Время хранения оптически индуцированных элементов в фоторефрактивном LiNbO_3 может составлять от долей секунды до нескольких лет, в зависимости от условий хранения. В широких пределах оно может варьироваться при изменении параметров

технологических процессов легирования материала, что является перспективным для разработки и реализации полностью оптических элементов, устройств и приборов [5, 7-9, 11, 16-19].

Оптическое индуцирование волноводных структур в стеклообразных и кристаллических материалах осуществляется различными способами, в том числе путем воздействия на материал высокоинтенсивного излучения фемтосекундных лазеров [7, 16-19]. 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 [7, 11, 16-21].

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 легированных 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:

1. НИР «Преобразования Гауссовых и бездифракционных световых пучков в оптически индуцированных фотонных волноводных и дифракционных структурах в кристаллических средах с управляемой величиной и изменяемым знаком нелинейно-оптического отклика», выполняемой в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки России, проект № 3.1110.2017/ПЧ (2017-2019 гг.).

2. НИОКР «Исследование фотонных волноводных структур, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития», выполняемой в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (2021 г.).

3. НИР «Самовоздействие и взаимодействие световых пучков в волноводных и дифракционных периодических структурах на ниобате лития и фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой», выполняемой в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», подпроект №8 «Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8» (2021-2022 гг.).

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 конференции "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 основные научные положения. Определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложены структура и содержание диссертации.

Первая глава

В первой главе, которая является обзорной, 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.

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 размерами.

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. Описаны различные методы и обоснован выбор исследований Δn . Показано, что экспонирование поверхности образца при различной длительности позволяет управлять индуцированными изменениями показателя преломления и влиять на их величину в пределах от 10^{-4} до 10^{-3} .

Четвертая глава

В четвертой главе диссертационной работы описана разработка оптико-электронного комплекса, позволяющего формировать и исследовать пространственно-неоднородные и волноводные структуры, индуцированные в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития. Результаты исследований демонстрируют возможность реализовывать различные топологии и управлять модуляцией параметров волноводных структур для полностью оптических и гибридных оптоэлектронных устройств и приборов фотоники.

Заключение

Заключение содержит подведенные итоги и основные результаты диссертационной работы

Приложения

В приложениях содержатся документы о зарегистрированной интеллектуальной собственности, а также об использовании и внедрении материалов диссертации (Приложения А, Б и В).

1 РЕАЛИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В СОВРЕМЕННЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

1.1 Виды и характеристики волноводных структур на основе оптических материалов

Появление лазерных источников излучения дало существенный прорыв в развитии таких направлений науки и техники, как оптоэлектроника, интегральная и волоконная оптика и фотоника [3, 4, 6, 22-24]. В связи с этим стали появляться различные устройства на основе интегрально-оптических схем для осуществления операций приема, передачи и обработки информации [2, 3, 6]. Важной особенностью интегрально-оптических и фотонных устройств и приборов является наличие в их конструкции волноводных и дифракционных структур, которые способны производить пространственное преобразование световых полей и изменять такие их характеристики, как амплитуда, частота, фаза и поляризация [4, 6, 22-25].

Оптическая волноводные каналы представляет собой направляющую свет структуру на основе полупроводниковых или диэлектрических материалов. Основным требованием для волноводных структур является наличие полного внутреннего отражения при распространении световой волны внутри канала. Условие полного внутреннего отражения для волноводной структуры соблюдается при наличии показателя преломления центрального слоя (сердцевина) выше, чем у прилегающих слоев (оболочка) [25-27].

Оптические волноводные структуры разделяют по пространственно-геометрическим признакам и по профилю показателя преломления в поперечном и продольном направлениях. По пространственно-геометрическим характеристикам волноводные каналы можно разделить на регулярные и нерегулярные группы [25, 27, 28].

Регулярными называются волноводы, которые имеют неизменную геометрию в продольном направлении, т. е. однородную и гладкую границу

между центральным слоем (сердцевиной) и прилегающими слоями (окружающей средой) (рисунок 1.1). В то же время, широкое применение в интегральной оптике находят нерегулярные волноводы, имеющие пространственно-периодическую модуляцию геометрических параметров или показателя преломления [27, 28].

К регулярным оптическим волноводным структурам относятся планарные и каналные (полосковые) волноводы (рисунок 1.1). Планарный волновод представляет собой трехслойную структуру с центральным слоем, одномерно ограниченным в поперечном направлении (рисунок 1.1а). Канальные волноводы имеют поперечные ограничения центрального слоя (сердцевины) по двум пространственным координатам (рисунок 1.1б) [26-28].

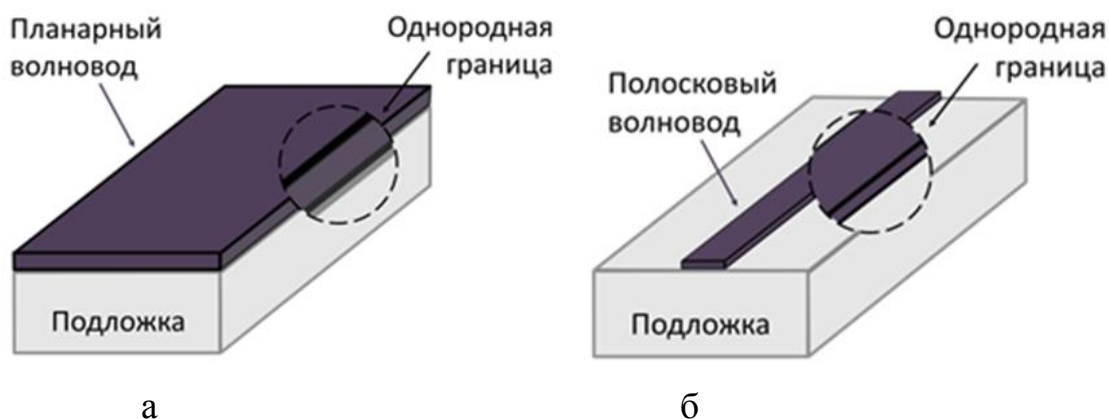


Рисунок 1.1 – Регулярные оптические волноводы:

а – планарный; б – полосковый (канальный)

Оба типа таких волноводов (планарные и каналные) применяются в интегрально-оптических устройствах передачи, обработки, управления и приема оптических сигналов таких, как электрооптический модулятор, переключатель, коммутатор или разветвитель световых импульсов [3, 26, 27].

Группа нерегулярных оптических волноводных структур включает в себя гофрированные, брэгговские, либо фотонно-кристаллические волноводы. Гофрированные и брэгговские волноводные каналы имеют периодическую модуляцию показателя преломления в продольном

направлении (рисунок 1.2). Однако отличие их состоит в том, что у гофрированных волноводов показатель преломления периодически модулирован вдоль границы между центральным и прилегающими слоями (рисунок 1.2а), у брэгговских же, наоборот, периодически продольная модуляция показателя преломления осуществляется в сердцевине канала (рисунок 1.2б). Фотонно-кристаллический волновод представляет собой канал, у которого оболочка имеет структуру двумерного фотонного кристалла (рисунок 1.2в), т. е. твердотельную структуру с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью либо неоднородностью, период которой сравним с длиной волны света. Волноводы, относящиеся к данной группе, используются в качестве фильтров, оптических переключателей, а также в волноводных лазерах для создания положительной обратной связи [27, 28].

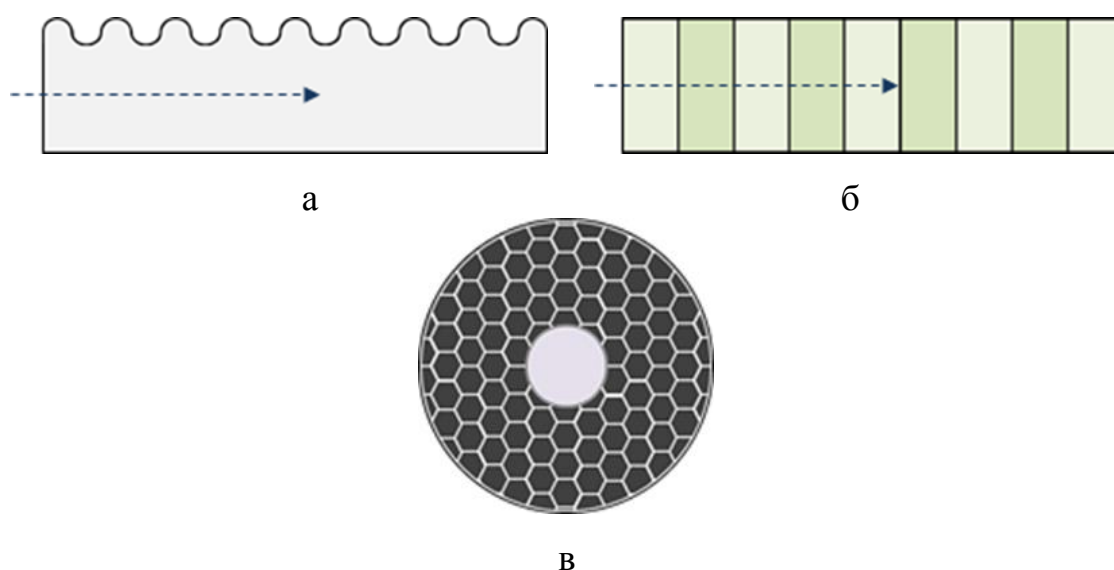


Рисунок 1.2 – Нерегулярные волноводные структуры:

а – гофрированный; б – брэгговский; в – фотоннокристаллический

Волноводные структуры по профилю пространственного распределения показателя преломления (ПП) в поперечном сечении разделяют на каналы, имеющие ступенчатый или градиентный профиль (рисунок 1.3) [27].

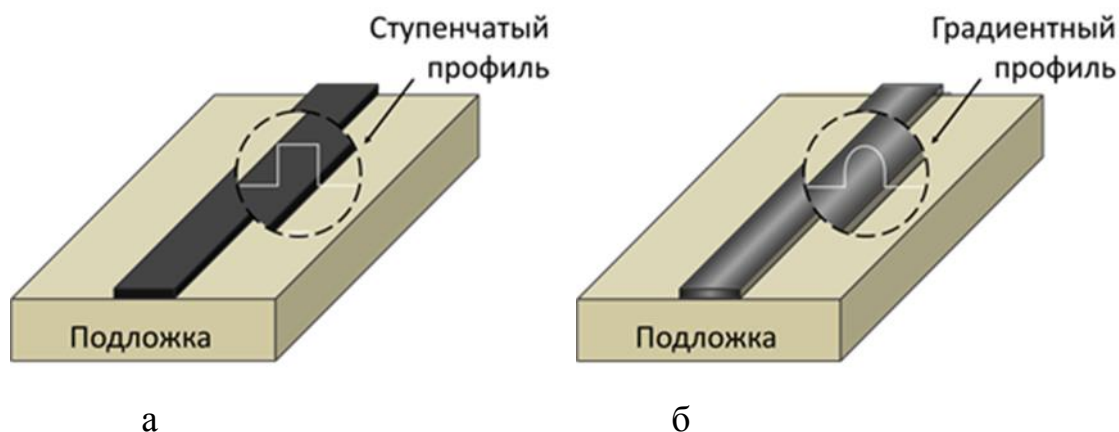


Рисунок 1.3 – Волноводные структуры с различным профилем показателя преломления: а – ступенчатый; б – градиентный

Ступенчатый профиль показателя преломления представляет собой резкое изменение показателя преломления на границе между центральным и прилегающими слоями. В волноводах с градиентным профилем показатель преломления плавно изменяется от центра волновода к его границе по определенному закону. Наиболее часто используются волноводы с параболическим профилем. В некоторых случаях используются волноводы с многослойным тонкопленочным покрытием. Такие волноводы представляют собой промежуточную группу между волноводами со ступенчатым профилем и волноводами с градиентным профилем [27, 28].

Для изготовления устройств управления оптическими сигналами в интегральной оптике используются материалы с управляемым показателем преломления. В основе модуляции показателя преломления под действием внешнего управляющего сигнала наиболее часто используются электрооптический, акустооптический, термооптический, магнитооптический и нелинейно-оптический эффекты [5, 10, 29].

1.2 Современные оптоэлектронные устройства и приборы на основе волноводных структур

Оптоэлектронные устройства по режиму работы разделяют на активные и пассивные. К активному типу относятся устройства, требующие

для работы внешний источник питания. Это квантовые генераторы (лазеры), модуляторы, а также переключатели оптических сигналов. Пассивный тип устройств включает в себя делители (разветвители), фильтры, соединители или преобразователи частоты [22, 27, 28]. Материалы, на основе которых формируются волноводные структуры, могут обладать усилением. Волноводные каналы с усиливающей средой применимы в лазерах и усилителях волоконных или волноводных типов [3, 28].

Лазеры или квантовые генераторы – это устройства, которые являются источником генерации оптического излучения. По принципу построения и виду активной среды в резонаторе лазеры бывают газовыми, твердотельными или полупроводниковыми. Полупроводниковые лазеры получили популярность применения в различных областях науки, техники и промышленности благодаря высокому КПД, малой инерционности, простоте конструкции, компактности и недорогой стоимости [22, 26]. Однако полупроводниковые лазеры при своих достоинствах и высоком уровне КПД по сравнению с газовыми и твердотельными лазерами не всегда применимы в некоторых областях науки, поскольку заметно уступают им по таким параметрам, как длина когерентности и симметричность пространственных распределений световых пучков [29].

Обычно лазеры работают в импульсном или непрерывном режиме. Для осуществления передачи информационного сигнала через оптические системы и линии связи необходимо управлять преобразованием характеристик излучения, таких как амплитуда, частота, фаза и поляризация. Если оптическое излучение преобразуется необходимым образом в процессе его генерирования в самом источнике, модуляцию называют внутренней (прямой). В случае светодиодов или полупроводниковых лазеров модуляцию интенсивности излучения можно осуществить за счет изменения возбуждающего тока. Это простой и удобный способ, применяемый на практике. Однако очень часто возникает необходимость производить

модуляцию уже вышедшего из источника излучения (внешнюю модуляцию) [29].

Устройства, осуществляющие внешнюю модуляцию светового сигнала, называются оптическими модуляторами. Они необходимы для ввода информации в световую волну, путем изменения во времени одного из ее параметров — амплитуды (интенсивности), частоты, фазы или состояния поляризации. Устройства внешней модуляции оптических сигналов могут работать на более высоких частотах по сравнению с частотами, достижимыми при внутренней модуляции. При этом нельзя рассчитывать на использование движущихся шторок, экранов, зеркал, призм, дисков с отверстиями или других механических устройств, т. к. их быстродействие определяется частотой переключения, не превышающей величину ~ 10 кГц. К тому же, модуляторы могут исполнять роль оптических переключателей путем перераспределения оптической мощности между волноводами. Это связано с тем, что зачастую рабочие функции модуляторов и переключателей основаны на одних и тех же физических принципах, протекающих при прохождении света в модулирующей среде под действием внешних факторов [29].

По принципу действия оптические модуляторы обычно разделяют на три класса: электрооптические (ЭО) модуляторы на эффекте Поккельса; акустооптические (АО) модуляторы, в которых параметры световой волны изменяются в результате дифракции света на ультразвуковых волнах; магнитооптические (МО) модуляторы, основанные на эффекте Фарадея. Кроме того, известны модуляторы света на эффектах Керра, Франца-Келдыша, пьезоэлектрическом эффекте и т. п. [3, 10, 29, 31].

Большинство названных устройств может быть выполнено в любом исполнении: объемном, планарном или волоконном; исключения составляют модуляторы на основе монокристаллических сред, их волоконное исполнение представляется достаточно проблематичным, так как требует выращивания монокристаллов в виде волокон. Широкое развитие получили

модуляторы в планарном (интегрально-оптическом) исполнении, это связано с рядом их значительных преимуществ перед объемными устройствами. Планарные и полосковые модуляторы незаменимы в устройствах обработки информации и управления оптическими сигналами [3, 31].

Известно большое число различных конфигураций электрооптических модуляторов света. Основой данного модулятора является интерферометр Маха–Цендера на канальной волноводной структуре в ниобате лития с реализацией фазовой модуляции света поперечным электрическим полем в одном из плеч интерферометра [29]. Применение такого типа модулятора в волоконно-оптической линии связи представлено на рисунке 1.4.

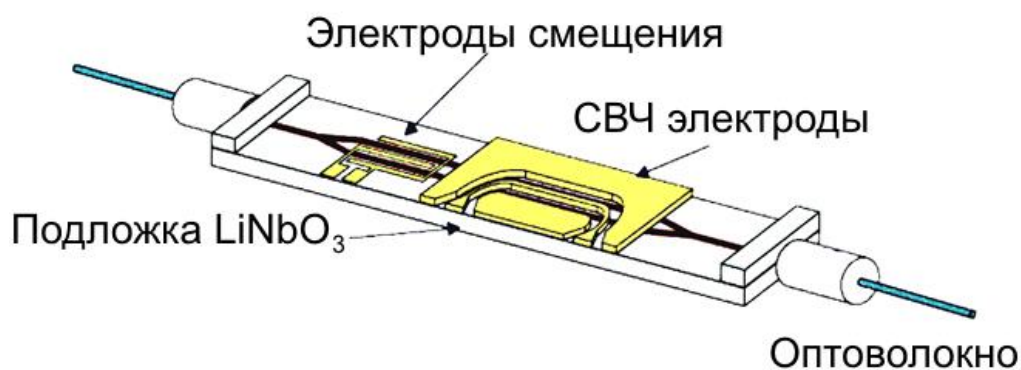


Рисунок 1.4 – Электрооптический модулятор для волоконно-оптического канала связи [32, 33]

В представленной на рисунке 1.4 конструкции модулятора свет распространяется по одиночному каналу, который затем разделяется на два световых потока и протекает внутри каждого плеча интерферометра. Волноводный канал в одном из плеч проходит в зазоре между электродами, к которым прикладывается электрическое управляющее напряжение. За счет этого изменяется показатель преломления данного канала. В итоге, световое излучение в плечах распространяется с разными скоростями и приобретает разность фаз. Таким образом, происходит модуляция фазы светового поля в плече с управляющим напряжением. После объединения световых потоков во втором Y -разветвителе (соединителе), модуляция фазы преобразуется в модуляцию интенсивности света [29, 32]. Это позволяет передавать световые

информационные потоки в виде последовательности импульсов двоичного кода.

Устройства пассивного типа на основе волноводных структур, такие как Y-разветвители применяются для разделения световых потоков на отдельные каналы связи [34]. Деление световых потоков по мощности может осуществляться с разными коэффициентами, в зависимости от требуемой реализации, например, в соотношении 50/50, 60/40, 80/20 и т.д. Обратную операцию, т. е. объединение различных световых потоков в один канал, выполняет соединитель [25, 26]. Как было упомянуто выше, подобные пассивные устройства используются для реализации конструкции модулятора, изображенного на рисунке 1.4.

В пассивную группу также входят устройства на основе нерегулярных волноводных структур. Это брэгговские волноводы с периодической модуляцией показателя преломления в сердцевине канала и гофрированные волноводы, в которых показатель преломления периодически модулирован на границе между центральным и прилегающими слоями. Брэгговские волноводы применимы в качестве фильтров оптических сигналов, а также полезны для реализации компактных линий задержки в оптических системах обработки информации [27, 28, 35].

В связи с постоянно растущими требованиями к скорости и качеству информации, передаваемой, обрабатываемой, управляемой и принимаемой в оптическом диапазоне, в последние годы набирает обороты спрос на компактность и многофункциональность оптоэлектронных устройств. Поэтому в настоящее время все больше исследуются возможности и предлагаются различные варианты реализации многофункциональных интегрально-оптических устройств [35-44]. Пример такой реализации изображен на рисунке 1.5.

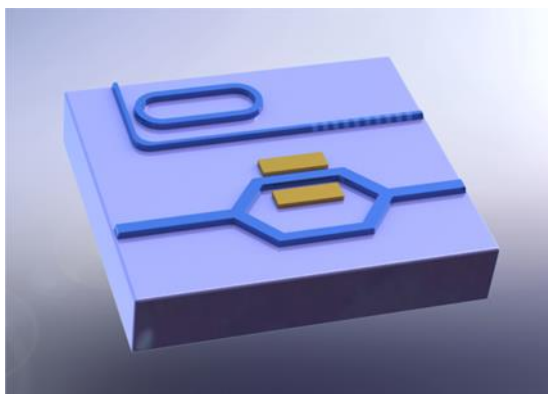


Рисунок 1.5 – Интегрально-оптическая схема оптоэлектронного устройства, содержащая модулятор и кольцевой резонатор на подложке кристалла ниобата лития [39]

Различные элементы оптоэлектронных устройств на основе волноводных структур, такие как резонаторы, модуляторы, разветвители, соединители, фильтры и многие другие, могут быть интегрированы в один чип для достижения различных многофункциональных систем и приложений [39-44]. Возможности реализации в интегрально-оптическом исполнении многофункциональных оптоэлектронных устройств передачи, управления, обработки и приема информации зависят от способов и технологий формирования волноводных структур, являющихся базовыми элементами в их конструкции [7, 8, 16, 18]. Подробное описание о методах формирования волноводных каналов изложено в подразделе 1.3.

1.3 Способы формирования и реализации волноводных структур в электрооптических кристаллах

Материалы, на основе которых можно создавать волноводные структуры, должны обладать широким спектром физических свойств и характеристик [45-50]. Такими материалами являются электрооптические кристаллы, в группу которых входит ниобат лития (LiNbO_3). Наличие уникального набора физических, электрооптических и нелинейно-оптических свойств вызывает большой интерес к LiNbO_3 для применения на

практике [5, 12, 13, 45]. В настоящее время кристаллы ниобата лития широко используются в качестве подложки для различных устройств оптоэлектроники, таких как электрооптический модулятор, оптический переключатель, делитель световых сигналов или преобразователь частоты [39-45]. Важным свойством данного кристалла является фоторефрактивный эффект (ФЭ), благодаря которому появляется возможность изменять показатель преломления материала под воздействием света [5, 11, 12]. Для усиления данного эффекта в кристалл ниобата лития вводятся различные примеси, такие как медь (Cu), железо (Fe), марганец (Mn) и др. [5, 51-54]. Данные примеси вводятся в материал в процессе роста, а также путем поверхностного легирования, используя методы ионной имплантации, либо процессы диффузии. Стоит отметить, что легирование поверхности вносит большую концентрацию примесей в подложку без повышения чувствительности материала к механическим воздействиям по сравнению с легированием по объему [55, 56].

На сегодняшний день известно несколько способов создания волноводных структур как в ниобате лития, так и в других кристаллических материалах – это методы диффузии различных примесей (рисунок 1.6), ионная имплантация или метод протонного замещения (рисунок 1.7), фотолитография (рисунок 1.8), вырезание механическими способами (рисунок 1.9) и т. д. [7, 8, 18, 21, 57].

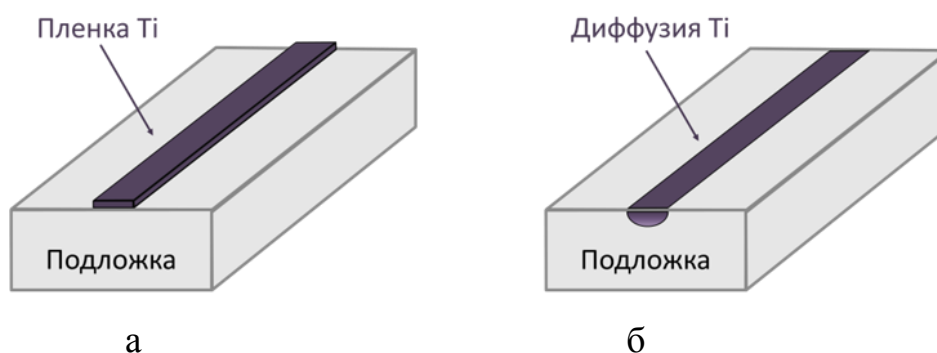


Рисунок 1.6 – Схема реализации волноводного канала методом диффузии титана: а – напыление пленки из титана (Ti); б – внедрение примеси в структуру подложки

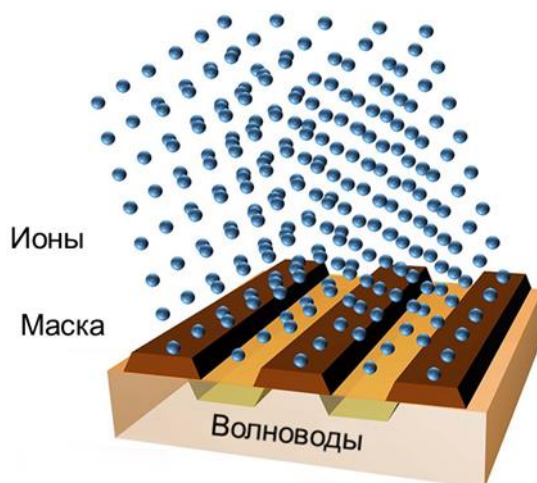


Рисунок 1.7 – Формирование системы волноводных каналов методом ионной имплантации [16]

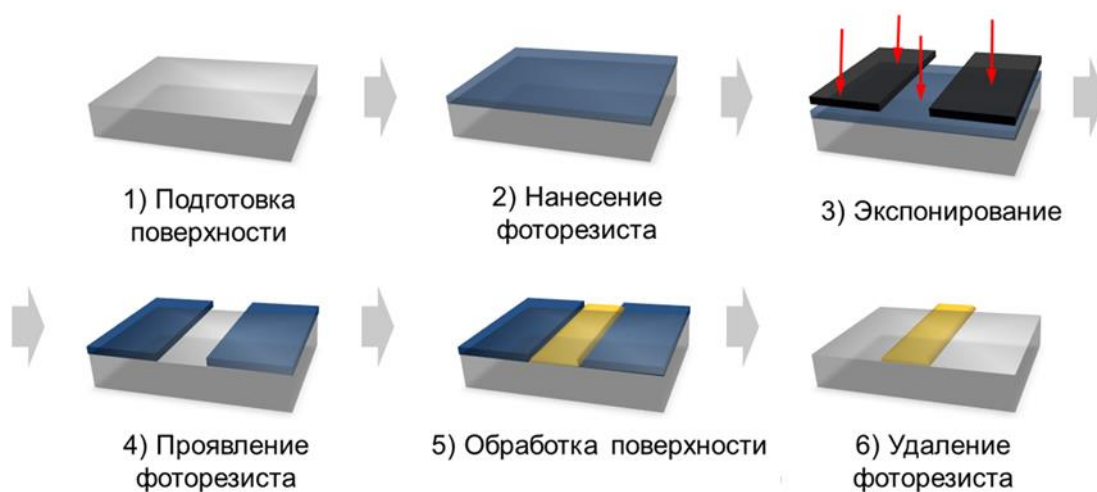


Рисунок 1.8 – Фотолитографический метод формирования волноводных каналов [58]

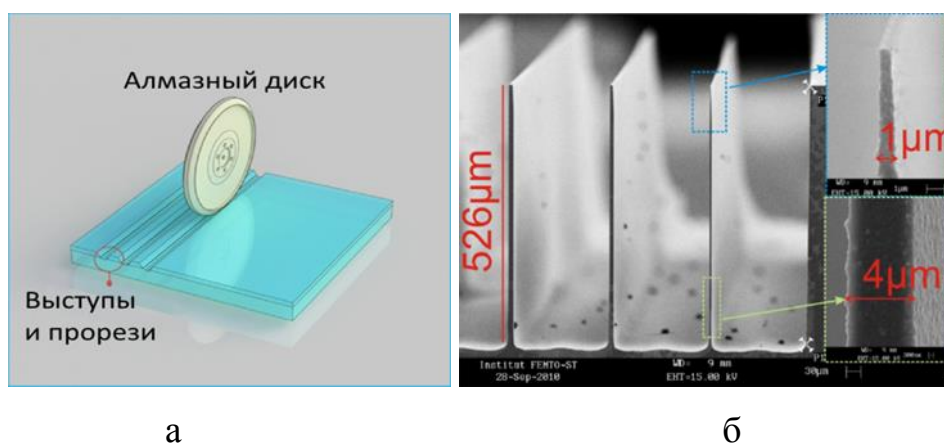


Рисунок 1.9 – Формирование волноводных каналов механическим методом: а – схема изготовления; б – изображение под микроскопом [59, 60]

Перечисленные выше методы формирования позволяют создавать только стационарные каналные волноводные структуры с ограниченным набором параметров. Однако стремительное развитие современной техники и технологий требует реализовать такие способы формирования волноводных структур, которые бы позволили осуществлять реконфигурацию их параметров. В связи с этим в последние десятилетия в LiNbO_3 активно исследуются процессы формирования реконфигурируемых волноводных и дифракционных структур при помощи направленной лазерной записи [7, 16-21, 41] как в объеме, так и на поверхности кристалла (рисунки 1.10 и 1.11).

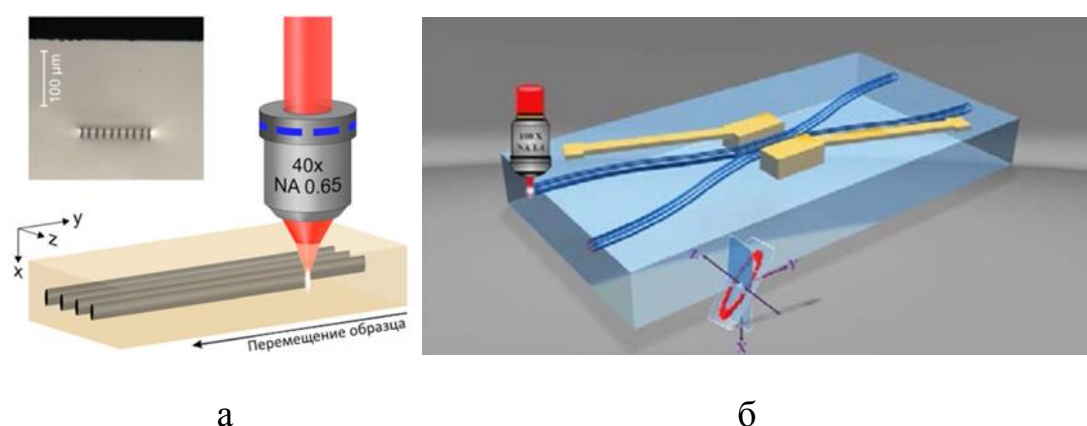


Рисунок 1.10 – Лазерное индуцирование оптических волноводных структур в кристаллических материалах[61, 62]

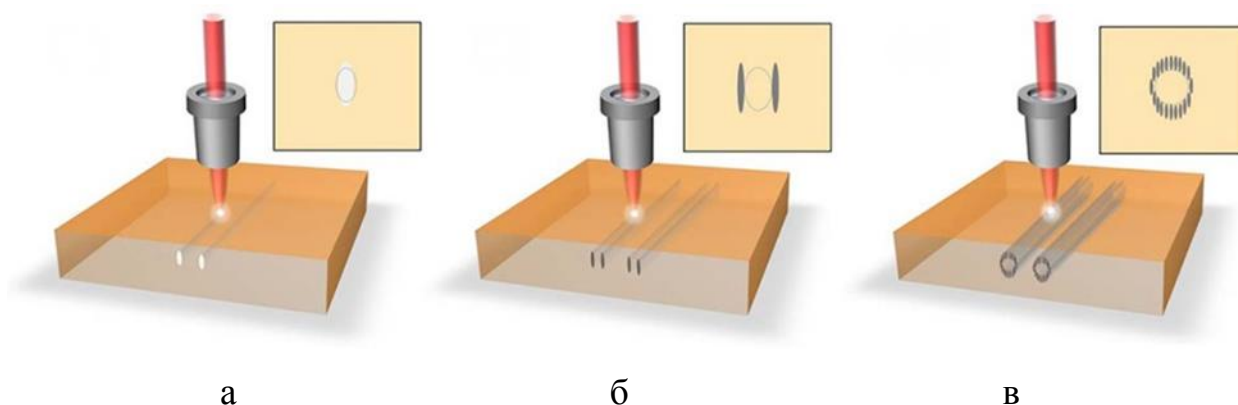


Рисунок 1.11 – Лазерное индуцирование оптических волноводных структур с различными характеристиками и топологиями в кристаллических материалах[18]

Отличительной чертой лазерного индуцирования относительно других методов является возможность формирования волноводных и дифракционных элементов с различными характеристиками и топологиями любой сложности без необходимости создания специальных условий [7, 16-21, 41, 61, 62]. Топологии и характеристики волноводных и дифракционных структур определяются типом схемы оптического индуцирования, например, при помощи амплитудной маски, фокусировки лазерного излучения цилиндрической линзой или последовательным экспонированием, фокусируя световой пучок на поверхность кристалла сферической линзой [7, 16-21, 41, 61-63].

Создание реконфигурируемых волноводных и дифракционных структур в кристаллах ниобата лития при помощи лазерного излучения может быть основано на механизмах фоторефрактивного эффекта. Как уже отмечалось выше, ФЭ заключается в изменении показателя преломления Δn материала под воздействием светового поля [11]. Изменения показателя преломления Δn для разных механизмов транспорта носителей заряда при фоторефрактивном эффекте определяются следующими соотношениями [5, 11, 64].

Для фотовольтаического механизма:

$$\Delta n^{(phv)} = A I_d^{-1} \frac{I(x, z)/I_d}{1 + I(x, z)/I_d}, \quad (1.1)$$

где A – константа, зависящая от физических характеристик и электрооптических коэффициентов материала; $I(x, z)$ – функция распределения интенсивности светового излучения по оси распространения Z и поперечной координате X ; I_d – темновая интенсивность, определяемая условием $\sigma_d = \sigma_{ph} I_d$, т.е. интенсивность света, при которой величина фотопроводимости материала равна его темновой проводимости.

Для дрейфового механизма:

$$\Delta n^{(drift)} = B \frac{I_{bg}}{I_{bg} + I(x, z)} E_{ext}, \quad (1.2)$$

где I_{bg} – интенсивность фоновой подсветки материала; E_{ext} – напряженность внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу; B – постоянная, зависящая от физических характеристик и электрооптических коэффициентов материала.

Для диффузионного механизма:

$$\Delta n^{(dif)} = -\frac{1}{2} n_l^3 r E_D(x) = -\frac{1}{2} n_l^3 r \frac{k_B T}{e} \frac{1}{n_e(x)} \frac{dn_e(x)}{dx}, \quad (1.3)$$

где n_l – показатель преломления материала; r – электрооптический коэффициент; $E_D(x)$ – напряженность поля; k_B – постоянная Больцмана; T – температурный коэффициент; e – заряд электрона; $n_e(x)$ – распределение концентрации электронов в зоне проводимости по координате x ; $\frac{dn_e(x)}{dx}$ – градиент концентрации.

Перечисленные выше варианты формирования волноводных и дифракционных элементов лазерным излучением позволяют реализовать в кристаллах ниобата лития структуры различных топологий и характеристик.

1.4 Выводы по разделу

В данной главе проведен обзор работ, посвященный состоянию проблемы реализации оптических волноводных структур и их значимости в современных оптоэлектронных устройствах. 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.

Исходя из вышеприведенных выводов, была поставлена цель, которая заключается в формировании и исследовании характеристик пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития. Поскольку поверхностный слой уже имеет определенную толщину, для создания волноводных структур полоскового типа должна отсутствовать необходимость в ограничении по двум поперечным координатам.

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 $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

2 ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ МЕТОДОМ ПОТОЧЕЧНОГО ИНДУЦИРОВАНИЯ

Монокристаллы ниобата лития (LiNbO_3) благодаря уникальному набору физических свойств широко используются при создании различных элементов и приборов интегральной и нелинейной оптики, оптоэлектроники, фотоники и лазерной техники [5, 7-9, 24]. Обычно чистые сегнетоэлектрические кристаллы такие, как ниобат лития, не обладают высокой чувствительностью к свету, что позволяет использовать их в электрооптике для модуляции лазерного излучения. Однако, легирование переходными металлами, нарушение стехиометрии, отжиг в восстановительной атмосфере, облучение γ -лучами и приложение электрического поля позволяют значительно увеличить их светочувствительность [52].

Легирование ниобата лития ионами переходных металлов, такими как железо (Fe), медь (Cu), марганец (Mn) и др., которые могут находиться в кристалле в нескольких зарядовых состояниях, значительно увеличивает его чувствительность к свету и фоторефрактивный отклик [52]. Более подробное описание влияния легирования кристаллов LiNbO_3 на чувствительность к свету изложено в работах [65, 66]. Легирующие примеси могут вводиться в шихту как в процессе роста кристаллов, так и внедряться через оптически полированную поверхность образцов, с использованием методов диффузии, ионного обмена и ионной имплантации [8, 66, 68]. Изменение физических свойств материала вблизи поверхности может обеспечивать в этой области волноводно-оптические свойства [8, 66, 68], а также модифицировать его акустические и оптические параметры [8, 69]. Поверхностное легирование позволяет получить более высокую концентрацию примесей, в сравнении с их введением в процессе выращивания кристаллов. При этом возможно и

легирование необходимых областей поверхности образца разными примесями или их комбинациями для изменения их функционального назначения [20, 70].

Фоторефрактивный эффект, заключающийся в изменении показателя преломления под действием света, в образцах LiNbO_3 , легированных Fe, Cu, Mn и др., обусловлен фотовольтаическим механизмом транспорта носителей заряда и не требует приложения внешнего электрического поля, обеспечивающего дрейф этих носителей. В кристаллах LiNbO_3 с фотовольтаическим типом нелинейного отклика изменения оптических свойств наблюдаются и при низких интенсивностях света, составляющих 0.1 Вт/см^2 и менее. С использованием излучения маломощных непрерывных лазеров в них могут формироваться фазовые дифракционные решетки и более сложные голографические структуры [5, 71, 72]. Реализация волноводных и дифракционных структур с индивидуальными характеристиками, а также реализация сложных топологий интегрально-оптических схем открывают перспективы для создания гибридных оптоэлектронных и полностью оптических приборов фотоники [7, 8, 45, 68].

Основные результаты данного раздела приведены в работах [70, 73-95].

2.1 Формирование волноводных структур гауссовыми световыми пучками при различных условиях экспонирования кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Возможности формирования оптических волноводов за счет фоторефрактивного эффекта исследовались в работах с образцами Y- и X-срезов с размерами $30 \times 3 \times 15 \text{ мм}^3$ и $1,25 \times 14 \times 10 \text{ мм}^3$ по осям X, Y и Z, соответственно. Схема экспериментальной установки представлена на рисунках 2.1а и 2.1б. В первом эксперименте световой пучок с гауссовым распределением интенсивности фокусировался на поверхность YZ

экспериментального образца цилиндрической линзой с фокусным расстоянием $F = 30$ мм. Источником излучения послужил твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер с удвоением частоты ($\lambda=532$ нм) и выходной мощностью не превышающей 10 мВт. На рисунках 2.1в и 2.2г представлена ориентация фокусированного цилиндрического пучка относительно оптической оси Z кристалла LiNbO₃:Cu в разных экспериментах.

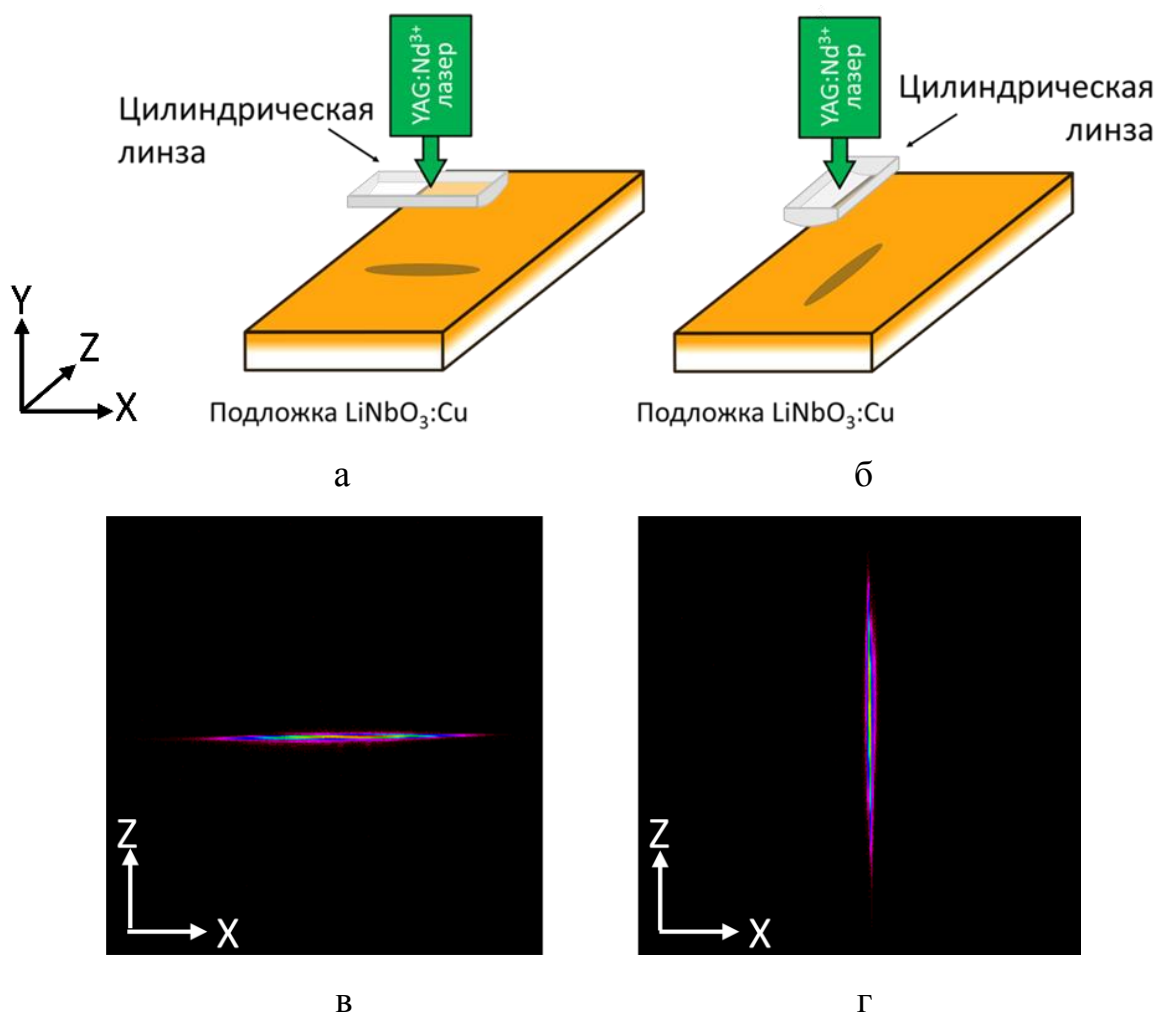


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки для исследования возможности оптического индуцирования волноводных структур в поверхностном слое кристалла LiNbO₃:Cu цилиндрической линзой (а, б) и соответствующие экспериментам изображения ориентации светового пучка на входном торце кристалла относительно его оптической оси (в, г)

Распределение интенсивности и плотность мощности излучения регистрировались при помощи анализатора лазерных пучков (АЛП) BS-FW-

FX33. Размер перетяжки фокусированного цилиндрической линзой пучка по уровню $1/e^2$ составил ~ 20 мкм, а длина пучка составила ~ 800 мкм. Пиковая плотность мощности не превышала 150 Вт/см^2 [80, 93]. Поляризация светового пучка в обоих случаях соответствовала необыкновенной волне кристалла. Экспонирование поверхности образца фокусированным лазерным пучком в каждом эксперименте длилось в течение 400 с.

Во втором эксперименте световой пучок от источника излучения (YAG:Nd³⁺ лазер) фокусировался микрообъективом с увеличением $10\times$ на поверхность YZ образца LiNbO₃:Cu, установленного на подвижном столике (рисунок 2.2).

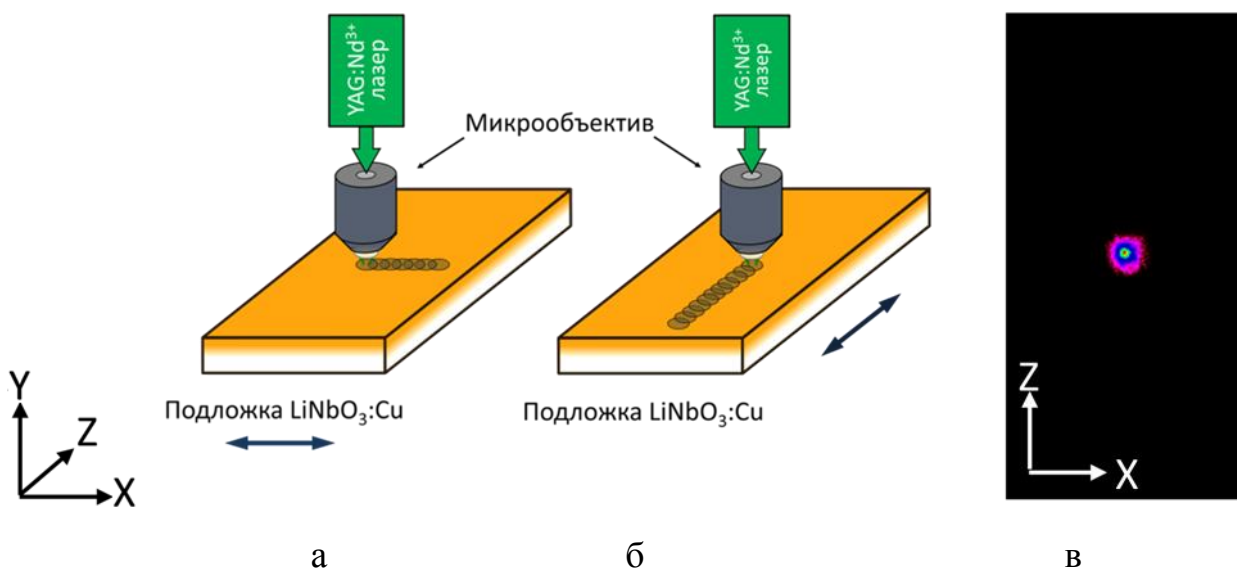


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки для исследования возможности индуцирования волноводных структур в поверхностном слое кристалла LiNbO₃:Cu поточечным методом: а – ориентация траектории последовательного поточечного экспонирования перпендикулярна оптической оси кристалла; б – ориентация траектории параллельна оптической оси кристалла; в – распределение фокусированного светового поля на входном торце кристалла

Подвижный столик представлял собой микрометрический позиционер, позволяющий перемещать образец относительно экспонирующего пучка с

точностью 5 мкм. Экспонирование поверхности экспериментального образца проводилось путем последовательного поточечного экспонирования. Облучение одним световым пучком длилось 10 с. Для прерывания процесса экспонирования кристалла излучение лазера перекрывалось механическим затвором. Затем образец перемещался на расстояние 25 мкм, после чего экспозиция его поверхности возобновлялась. Путем засветки кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ одним световым пятном в течение нескольких секунд при последовательном перемещении с шагом 25 мкм создавалась структура с измененным показателем преломления в форме прямой полосы. Изображения траектории индуцирования структур относительно оптической оси кристалла в разных экспериментах представлено на рисунках 2.2а и 2.2б. Распределение интенсивности фокусированного светового пятна на поверхности образца регистрировалось АЛП BS-FW-FX33, сопряженным с персональным компьютером (рисунке 2.2в). Диаметр фокусированного пучка в области перетяжки по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности составлял ~ 50 мкм. Поляризация излучения в разных экспериментах соответствовала необыкновенной волне кристалла. Плотность мощности фокусированного на поверхности образца излучения регистрировалась АЛП BS-FW-FX33 и не превышала 500 Вт/см^2 [70, 73-95].

Исследование неоднородностей, индуцированных цилиндрическим пучком и поточечным экспонированием экспериментального образца, проводилось методом оптического зондирования. Схема экспериментальной установки для зондирования индуцированных неоднородностей представлена на рисунке 2.3. Для этого световой пучок He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 633$ нм и мощностью ~ 1 мВт расширялся коллиматором. Диаметр зондирующего пучка по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности на выходе коллиматора составлял ~ 2 мм. Поляризация световой волны соответствовала необыкновенной волне кристалла. Области с индуцированными неоднородностями освещались расширенным

коллимированным пучком и регистрировались на выходной поверхности экспериментального образца АЛП BS-FW-FX33 [70, 73-95].

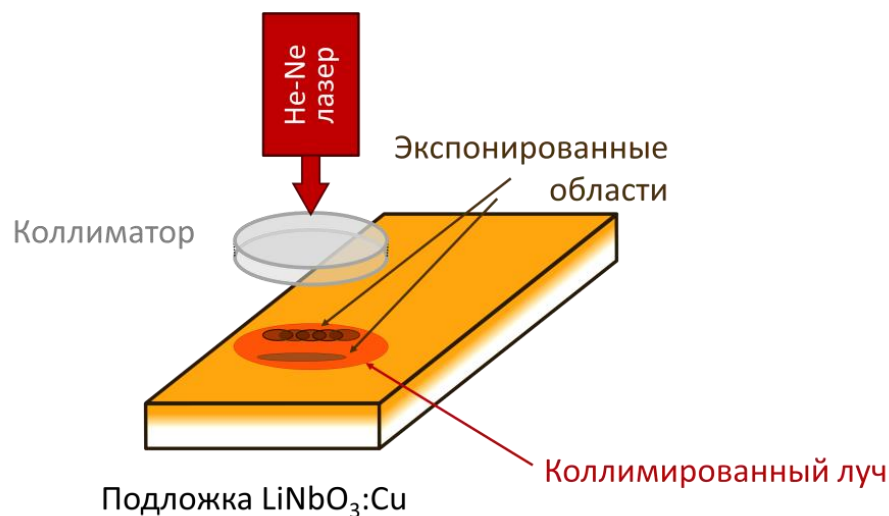


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки для зондирования экспонированных областей коллимированным световым пучком

Результаты зондирования оптических неоднородностей, индуцированных перпендикулярно и параллельно оптической оси кристалла, изображены на рисунках 2.4а и 2.4б, соответственно.

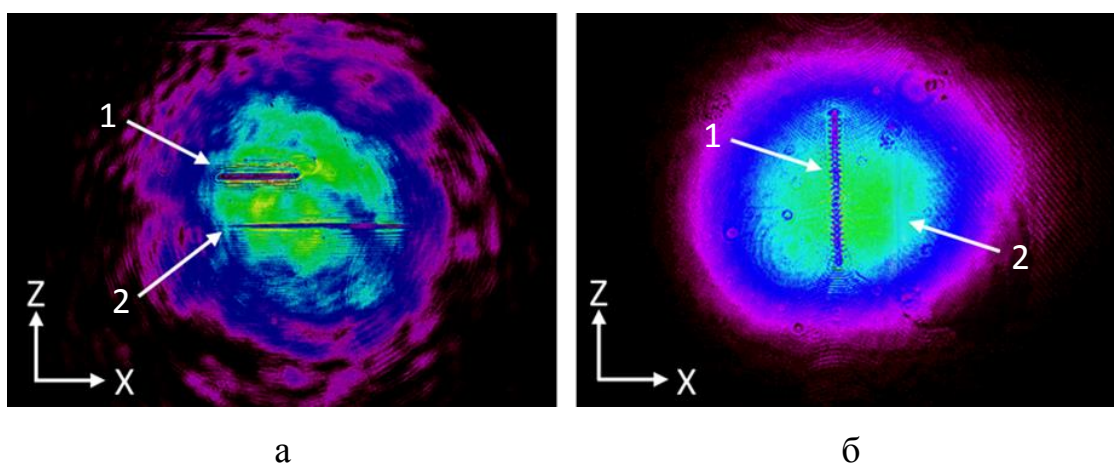


Рисунок 2.4 – Результат зондирования областей с индуцированными неоднородностями, ориентированными: а – перпендикулярно оптической оси Z кристалла; б – параллельно оптической оси Z кристалла; 1 – структура, индуцированная последовательным поточечным экспонированием; 2 – структура, индуцированная цилиндрическим пучком

При ориентации экспонированной полоски вдоль оптической оси кристалла формирование фоторефрактивных элементов затруднено [8]. Это связано с тем, что поле пространственного заряда появляется только на границах освещенной области, перпендикулярной направлению оптической оси кристалла. Однако поточечное экспонирование поверхности кристалла узким световым пучком позволяет индуцировать оптическую неоднородность вдоль оси Z кристалла для дальнейшего формирования волноводных структур со сложными топологиями [70, 80, 93].

2.2 Поточечно индуцированные волноводные структуры с различными характеристиками и конфигурацией

В экспериментах облучаемые области представляли собой параллельные полоски, ориентированные в направлении оси X кристалла. Индуцированные в поверхностно легированном кристалле LiNbO_3 неоднородности зондировались коллимированным пучком He-Ne лазера ($\lambda = 633 \text{ нм}$) диаметром 1 мм (рисунок 2.5) [70, 73-95].

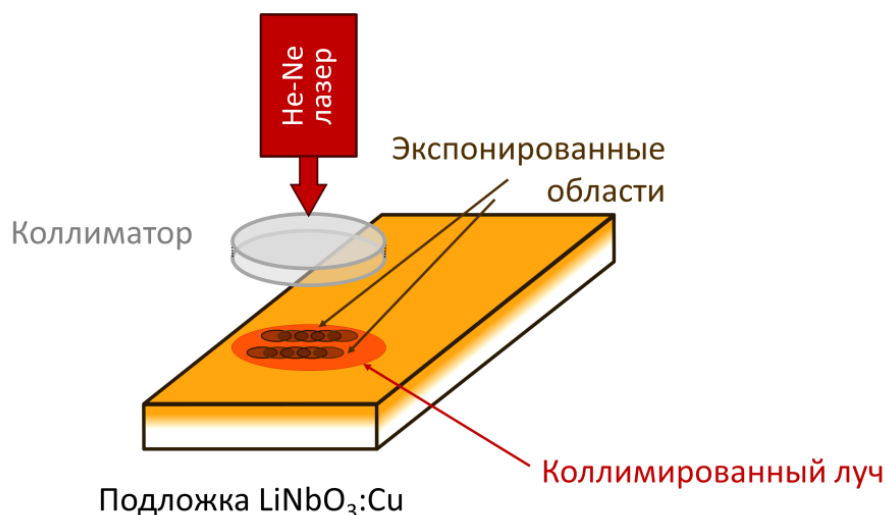


Рисунок 2.5 – Схема экспериментальной установки для зондирования экспонированных областей коллимированным световым пучком

Каждая из полосок создавалась последовательным поточечным экспонированием поверхности $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ фокусированным световым пучком и состояла из набора точек. Количество точек экспонирования и расстояния между их центрами варьировались в различных экспериментах. Расстояние между центрами полосок в различных экспериментах изменялось в пределах от 25 до 80 мкм. Время экспонирования точки в разных экспериментах изменялось от 2 до 10 секунд. Некоторые результаты зондирования образованных структур приведены на рисунке 2.6.

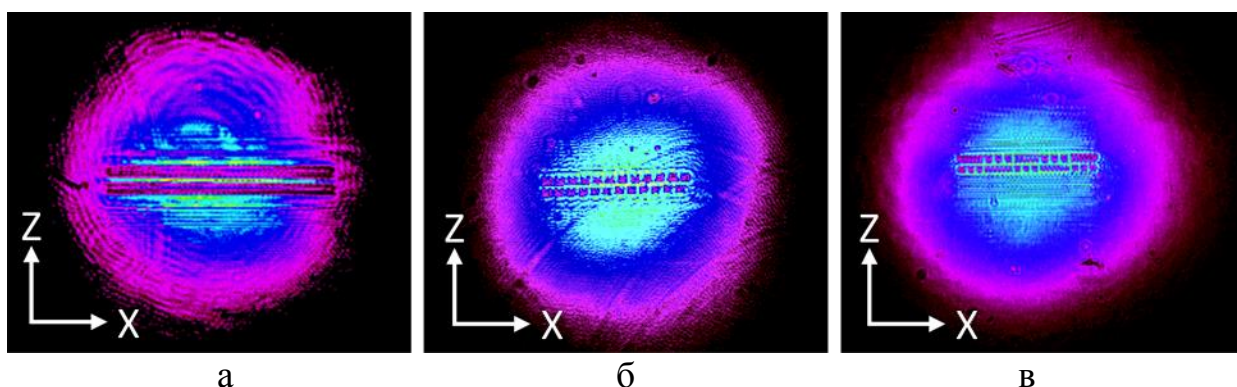


Рисунок 2.6 – Результаты оптического зондирования волноводных структур с различными параметрами и топологиями

На рисунке 2.6а показан результат зондирования волноводной структуры, однородной в продольном направлении. Две параллельные темные полосы в центральной части рисунка образованы индуцирующими пятнами, расстояние между центрами которых составляло 25 мкм. Эти полосы соответствуют областям с пониженным вследствие фоторефрактивного эффекта показателем преломления. Светлая полоса между ними – волноводная область. На рисунке 2.6б показан результат зондирования волноводной структуры, образованной индуцирующими пятнами, расстояние между центрами которых составляло 80 мкм. Этот случай соответствует волноводной структуре с периодической неоднородностью в продольном направлении. Ширина волноводной области для однородной и неоднородной структур составляет ~ 20 мкм. Пример формирования волноводной структуры с изменяющейся пространственной

модуляцией в продольном направлении приведен на рисунке 2.6в. В процессе индуцирования структуры шаг между экспонирующими пятнами варьировался от 25 мкм до 80 мкм.

Поточечное экспонирование поверхности кристалла узким световым пучком позволяет сформировать волноводные структуры и системы таких волноводов с различными поперечными размерами и продольной однородностью (рисунки 2.7а и 2.7б) [70].

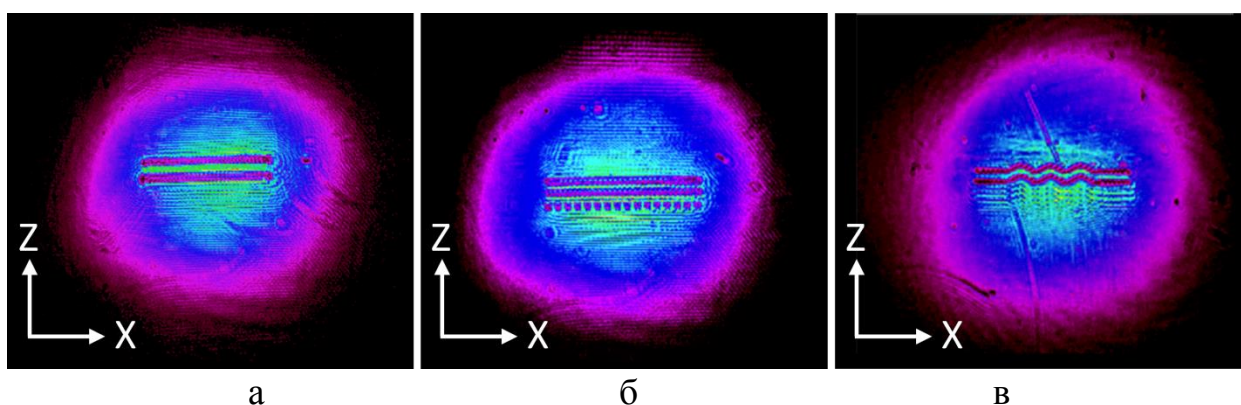


Рисунок 2.7 – Результаты оптического зондирования волноводных структур с различными параметрами и топологиями

Возможность формирования экспонированных областей вдоль оси Z кристалла позволяет индуцировать волноводные структуры сложных топологий в фоторефрактивных слоях. Типичный пример структур сложных топологий приведен на рисунке 2.7в [70]. Аналогичные результаты были получены в кристаллическом образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза.

Влияние изменения шага экспонирования на однородность сформированных волноводных структур в продольном направлении исследовалось в работах [77-79, 88]. Для этого проводился анализ дифракции светового поля на сформированных структурах в дальней зоне.

Формирование структур с различной однородностью проводилось путем экспонирования поверхности экспериментального образца с шагом от 25 до 100 мкм. Излучение He-Ne лазера фокусировалось на индуцированные

оптические неоднородности при помощи цилиндрической линзы (рисунок 2.8).

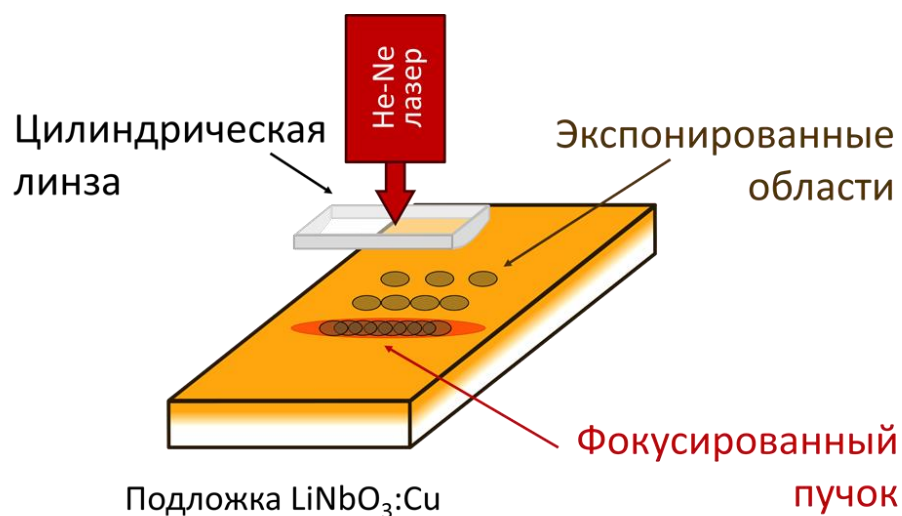


Рисунок 2.8 – Схема экспериментальной установки для исследования однородности индуцированных структур в продольном направлении

Пространственно-периодическая модуляция параметров волноводной структуры приводит к различной форме дифракционных изображений в дальней зоне. Это иллюстрируется изображениями на рисунках 2.9-2.11, которые соответствуют дифракции светового пучка ($\lambda=633$ нм) на структурах с близким к однородному (рисунок 2.9) и с неравномерным (рисунки 2.10-2.11) изменением показателя преломления вдоль направления структуры.

На рисунке 2.9а приведены результаты экспериментального исследования дифракции света на близких к однородным в продольном направлении экспонированных областях с расстоянием между центрами экспонируемых точек 25 мкм. В этом случае изменение показателя преломления вдоль экспонируемой полосы практически равномерно из-за малого расстояния между центрами экспонирующих пятен и насыщающейся оптической нелинейности в фоторефрактивном ниобате лития. Из-за этого в дальней зоне находится прошедший пучок с дифракционными максимумами низкой интенсивности ($\eta = 0,3\%$). Профиль распределения интенсивности здесь соответствует почти однородному в продольном направлении

изменению показателя преломления сформированной волноводной структуры [88].

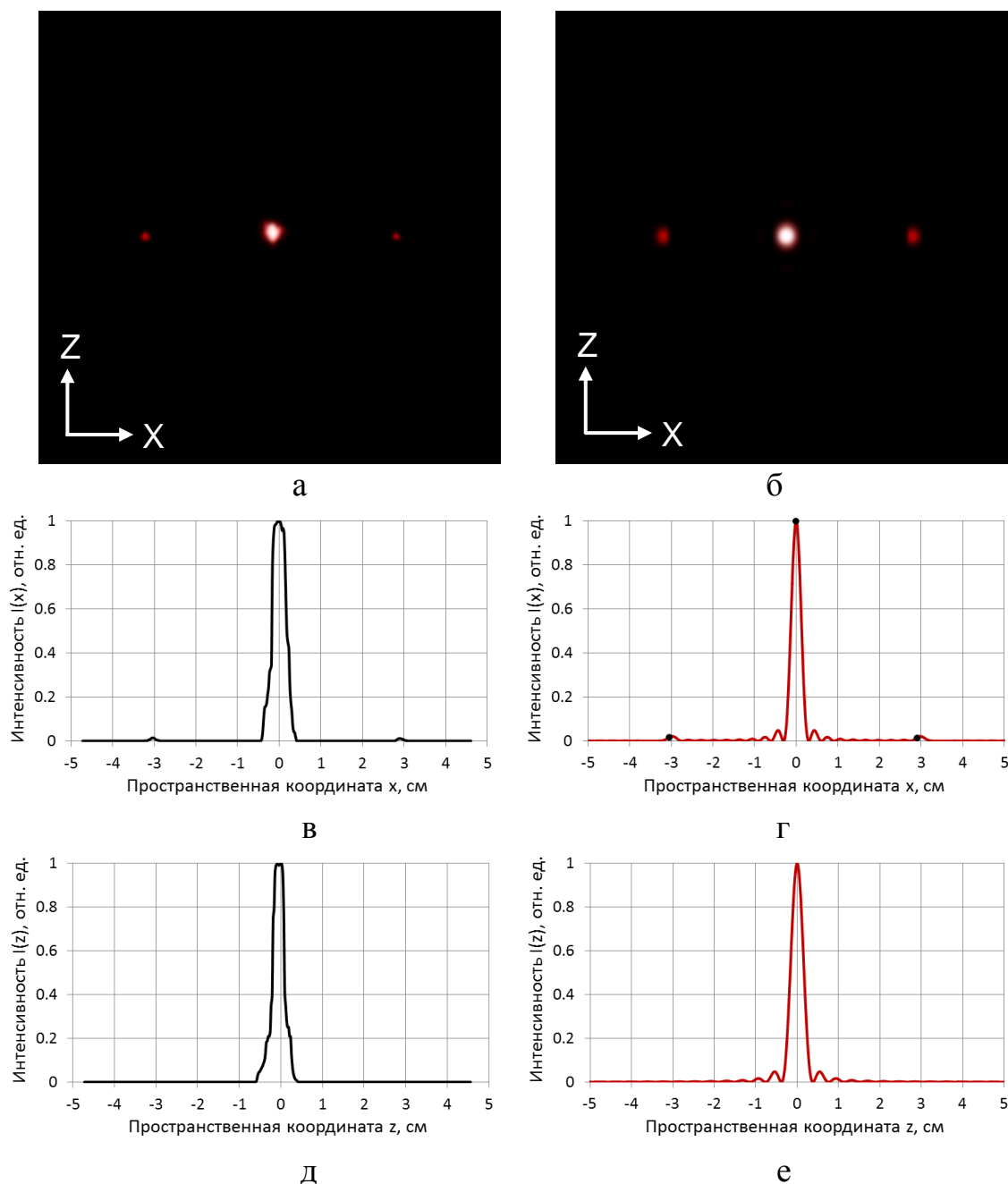


Рисунок 2.9 – Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на структуре, индуцированной с шагом 25 мкм: а – результат эксперимента; б – результат расчета; в, г – дифракционная картина вдоль оси X кристалла; д, е – дифракционная картина вдоль оси Z кристалла

На рисунках 2.10 и 2.11 показаны распределения интенсивности дифракционных полей в дальней зоне вдоль направления экспонированных полос, сформированных с расстоянием между центрами индуцированных пятен на поверхности кристалла 60 мкм и 100 мкм.

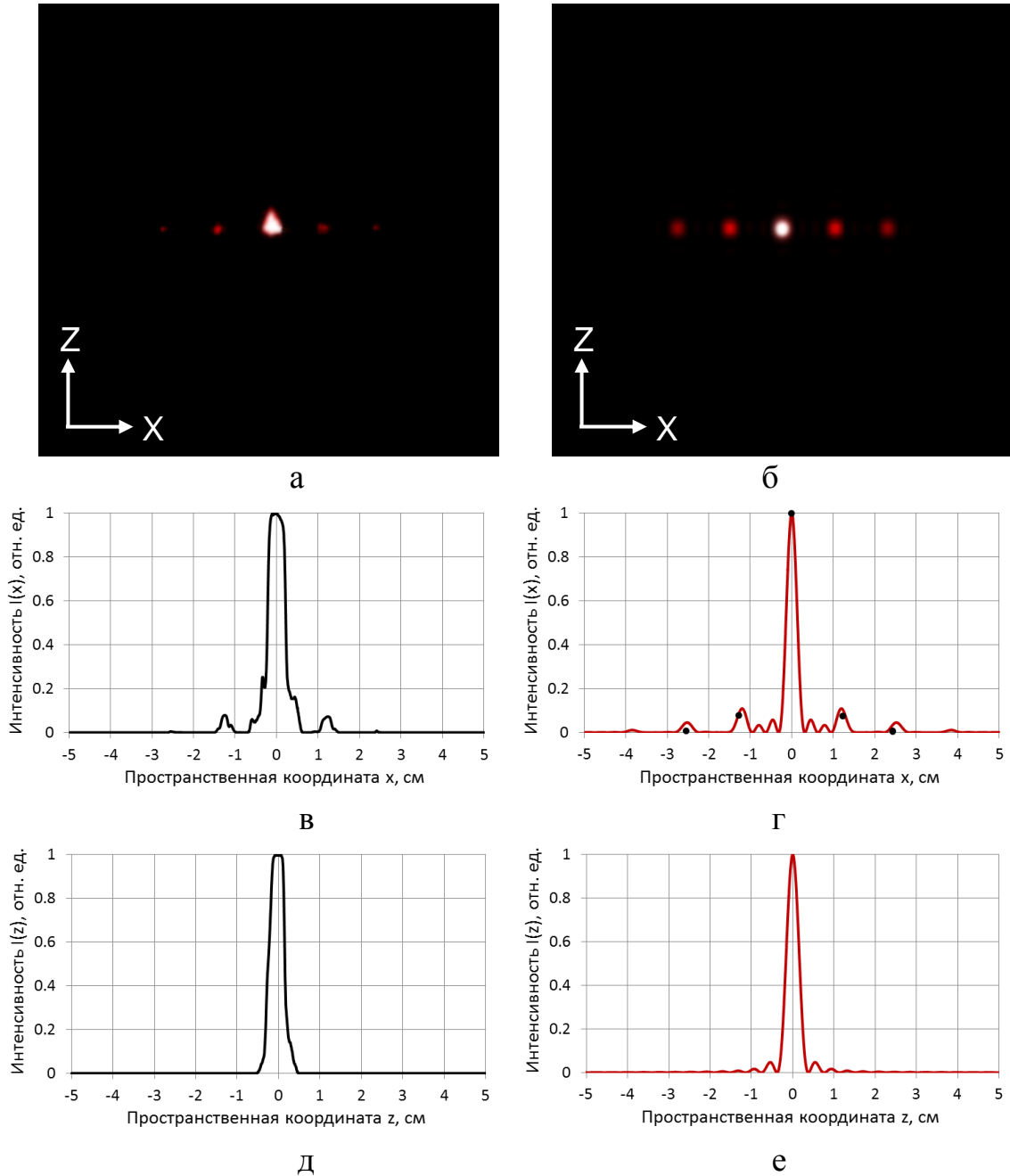


Рисунок 2.10 – Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на структуре, индуцированной с шагом 60 мкм: а – результат эксперимента; б – результат расчета; в, г – дифракционная картина вдоль оси X кристалла; д, е – дифракционная картина вдоль оси Z кристалла

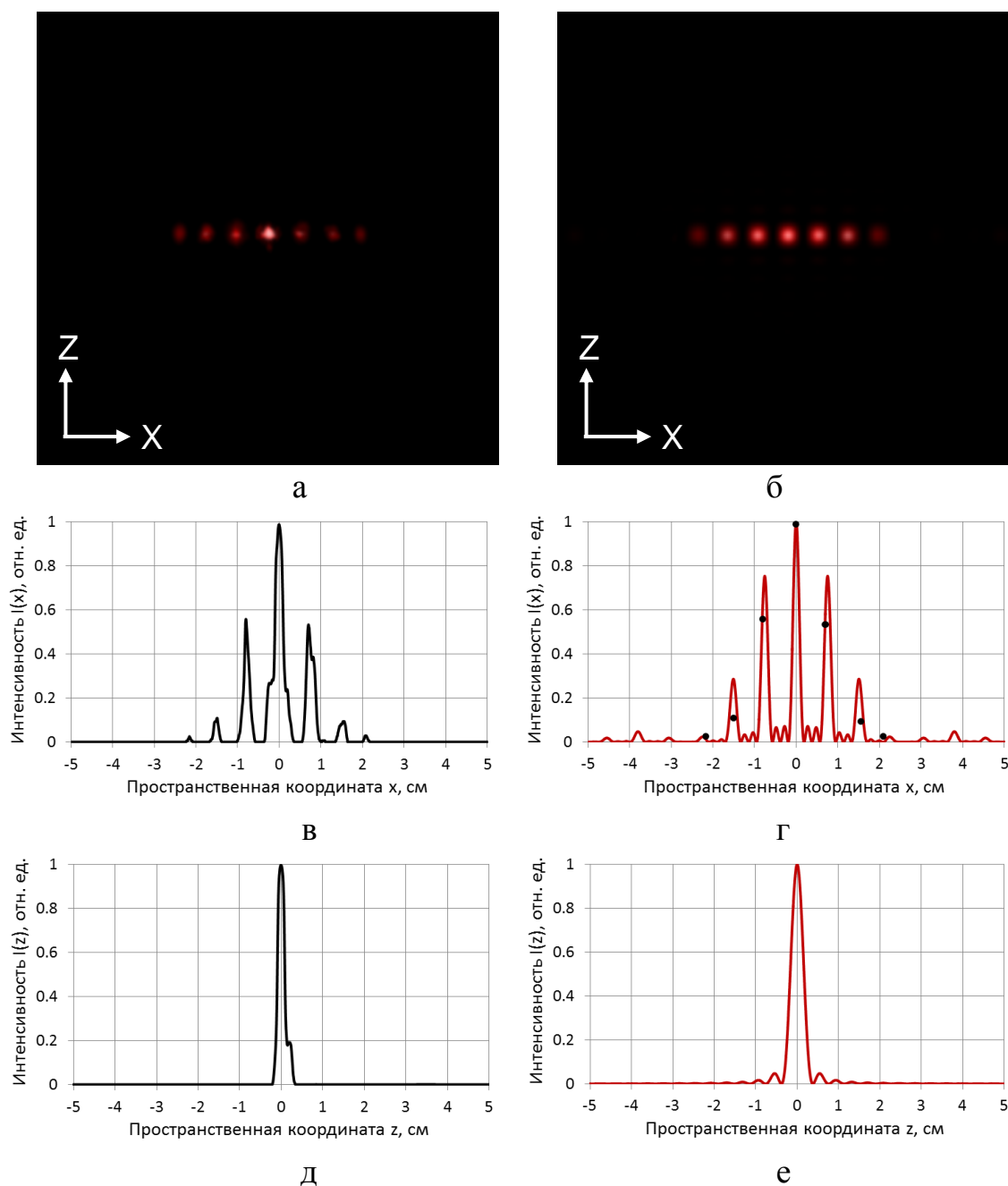


Рисунок 2.11 – Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на структуре, индуцированной с шагом 100 мкм: а – результат эксперимента; б – результат расчета; в, г – дифракционная картина вдоль оси X кристалла; д, е – дифракционная картина вдоль оси Z кристалла

Полученные дифракционные картины свидетельствуют о периодическом изменении показателя преломления кристалла вдоль экспонируемых полос (расстояние между центрами световых пятен при экспонировании поверхности кристалла составляло 60 мкм и 100 мкм). Эта

периодичность приводит к появлению дифракционных максимумов, угловое отклонение которых от направления прошедшего без дифракции луча определяется расстоянием между центрами экспонируемых точек. Распределение интенсивности света в этом случае симметрично вдоль направления волновода и в световой картине присутствуют два порядка дифракционных максимумов [88].

Эффективность дифракционных максимумов η в экспериментах определялась по формуле [11]:

$$\eta = \frac{I_{дn}}{I_{пр} + I_{д}}, \quad (2.1)$$

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

В экспериментах на структурах с шагом 25 мкм были зарегистрированы дифракционные максимумы 1-го порядка с эффективностью $\eta \approx 0,3\%$ (рисунок 2.9в). Низкая величина η связана с тем, что распределение изменений показателя в продольном направлении (вдоль оси X кристалла) близко к однородному. С увеличением шага экспонирования вдоль оси X кристалла до 60 мкм эффективность дифракционных максимумов 1-го порядка увеличивается до $\eta \approx 6,5\%$. и появляются дифракционные максимумы 2-го порядка (рисунок 2.10в). На структуре, сформированной с шагом 100 мкм вдоль оси X кристалла, эффективность дифракционных максимумов 1-го порядка увеличивается до $\eta \approx 23\%$. и появляются дифракционные максимумы 2-го и 3-го порядков (рисунок 2.11в).

Численное моделирование распределения интенсивности дифракционного поля на периодической структуре в дальней зоне проводилось с использованием соотношения [96, 97]:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(U)}{U} \right)^2 \cdot \frac{\sin^2(N\delta)}{\sin^2(\delta)}, \quad (2.2)$$

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 (2.2) результатов представлено на рисунках 2.9-2.11.

Двумерная периодическая структура формировалась в виде точек, отстоящих друг от друга на различных расстояниях вдоль осей X и Y кристалла. Для исследования дифракции на такую структуру направлялось коллимированное излучение He-Ne лазера (рисунок 2.12).

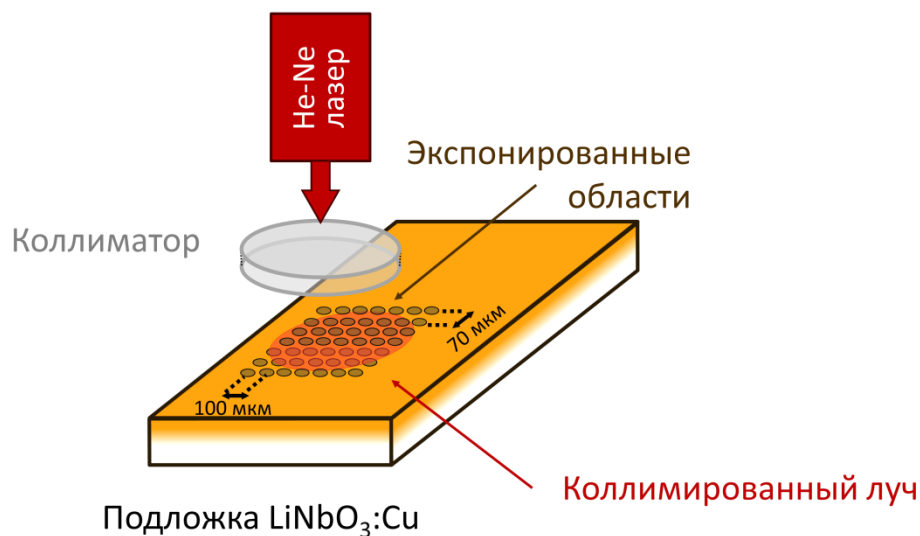


Рисунок 2.12 – Схема экспериментальной установки для исследования двумерной дифракции на структуре

Результаты исследования двумерной дифракции на периодической структуре, сформированной в виде матрицы отдельно расположенных друг от друга точек, представлены на рисунках 2.13а, 2.13в и 2.13д. Расстояние

между центрами индуцированных точек вдоль оси X кристалла составляло 100 мкм, вдоль оси Z кристалла 70 мкм.

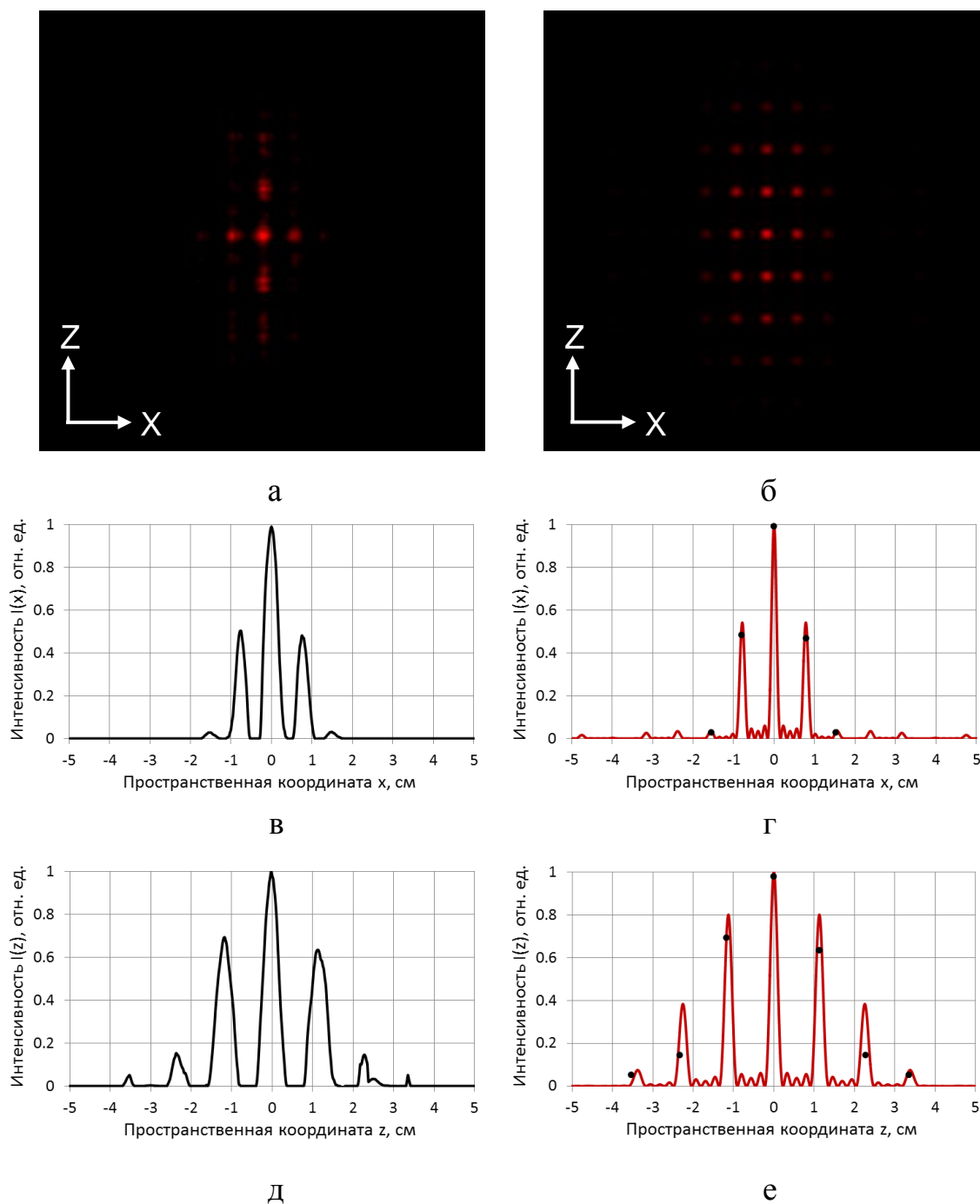


Рисунок 2.13 – Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на двумерной периодической структуре: а – результат эксперимента; б – результат расчета; в, г – дифракционная картина вдоль оси X кристалла; д, е – дифракционная картина вдоль оси Z кристалла

При описании дифракции на двумерной структуре, интенсивность света, распространяющегося в направлении, определяемом углами θ_x и θ_z , может быть определено с использованием соотношения [97]:

$$I(\theta_x, \theta_z) \sim F^2(\theta_x, \theta_z, b_x, b_z) \cdot \frac{\sin^2(N_x \delta(\theta_x))}{\sin^2(\delta(\theta_x))} \cdot \frac{\sin^2(N_z \delta(\theta_z))}{\sin^2(\delta(\theta_z))}, \quad (2.3)$$

где θ_x и θ_z – угловое расстояние между основным и дифракционными максимумами вдоль осей X и Z кристалла, соответственно; b_x и b_z – ширина «светлой» области вдоль осей X и Z кристалла; $F^2(\theta_x, \theta_z, b_x, b_z)$ – функция, определяемая формой штрихов.

Из выше приведенных результатов видно, что двумерные периодические структуры в виде отдельных точек приводят к появлению дифракции как вдоль оси X кристалла, так и вдоль оси Z . Эффективность дифракционных максимумов η рассчитывалась по формуле (2.1). При различном шаге экспонирования структуры в плоскости XZ кристалла эффективность дифракционных максимумов первого порядка η составляла 23% вдоль оси X (при расстоянии между центрами точек 100 мкм) и 27% вдоль оси Z (при расстоянии между центрами точек 70 мкм).

Полученные в наших экспериментах интенсивности дифракционных максимумов отличаются от расчетных на $\sim 10\%$. Это может быть связано с тем, что в расчетах не учитывались потери излучения на отражение и поглощение в материале, а также сложная форма штрихов.

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

2.3 Выводы по разделу

Представленные в данном разделе результаты показали, что метод поточечного индуцирования 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.

На основании полученных результатов сформулировано первое научное положение, выносимое на защиту: «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».

3 ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПРОФИЛЬ И ВЕЛИЧИНА ПОТОЧЕЧНО ИНДУЦИРОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Индукцирование изменений показателя преломления материала (Δn) напрямую связано со светочувствительностью легированных фоторефрактивными примесями кристаллов LiNbO_3 к определенным длинам волн. Так, в работе [52, 55] говорится, что оптические неоднородности в легированном ионами железа кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ начинают появляться при воздействии излучения с длиной волны $\lambda < 800$ нм, а значительное влияние оказывает экспонирующее излучение с $\lambda < 500$ нм. Поэтому легированные фоторефрактивными примесями кристаллы LiNbO_3 наиболее чувствительны к излучению из сине-зеленой области спектра. Стоит отметить, что немаловажным является и то, что кроме количественной оценки наведенных изменений необходимо знать, какой характер и размеры имеют пространственные распределения или же профиль индуцированных изменений показателя преломления в материале [52, 98-103]. Для описания таких характеристик, а именно величины и профиля индуцированных изменений Δn , необходимо применять методики, позволяющие проводить экспериментальные исследования бесконтактным способом.

Основные результаты данного раздела приведены в работах [110-124].

3.1 Характеристики кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с поверхностным легированным слоем

Экспериментальным образцом, в котором исследовались изменения показателя преломления, являлась пластина $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с размерами $1,25 \times 10 \times 14$ мм³ по осям X, Y и Z, соответственно. Ионы меди в кристалл вводились поверхностным легированием. Для этого на поверхность YZ

кристалла термическим распылением в вакууме наносилась пленка Cu толщиной ~ 200 нм. Далее, в течение 10 часов проводился процесс диффузии в воздушной атмосфере при температуре 900°C . В результате, в приповерхностной области образца LiNbO_3 формировался слой из ионов Cu. Толщина слоя определялась путем зондирования торца кристалла лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 532$ нм и выходной мощностью $P = 2$ мВт (рисунок 3.1) по методике, описанной в работе [70].

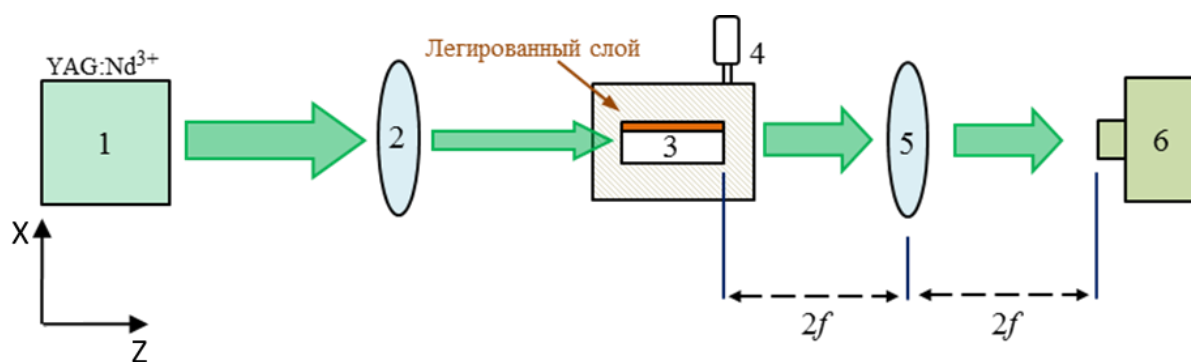


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки для измерения пропускания лазерного излучения ($\lambda = 532$ нм) в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при зондировании с торца: 1 – источник излучения; 2 – передающая линза; 3 – кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$; 4 – микрометрический позиционер; 5 – изображающая линза; 6 – фотодиод

Световой пучок твердотельного $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ лазера (1) фокусировался на торце кристалла (3) сферической линзой (2) с фокусным расстоянием $F = 25$ см. В первом эксперименте световой луч распространялся вдоль оси Z исследуемого образца, а поляризация излучения была направлена вдоль оси Y кристалла. Размер фокусированного на торец кристалла пучка составлял ~ 150 мкм. Образец размещался на линейном трансляторе (4), точность перемещения которого равна 10 мкм. Смещение образца относительно падающего на плоскость XU излучения осуществлялось с шагом 50 мкм. Интенсивность прошедшего через кристалл излучения передавалась с выходной грани образца изображающей линзой (5) на регистрируемую

поверхность фотодиода (6). По измеренным с помощью фотодиода данным рассчитан коэффициент поглощения внутри кристалла через каждые 50 мкм. Средние значения концентраций ионов легирующей примеси, исследуемые в работе [104], оценены как $C_{Cu^+} = 1.8 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $C_{Cu^{2+}} = 15 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ по экспериментально измеренным средним показателям поглощения пластины $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ на длинах волн 477 и 1040 нм соответственно.

Экспериментальная зависимость поглощения лазерного излучения внутри образца при перемещении луча вдоль оси X кристалла приведена на рисунке 3.2.

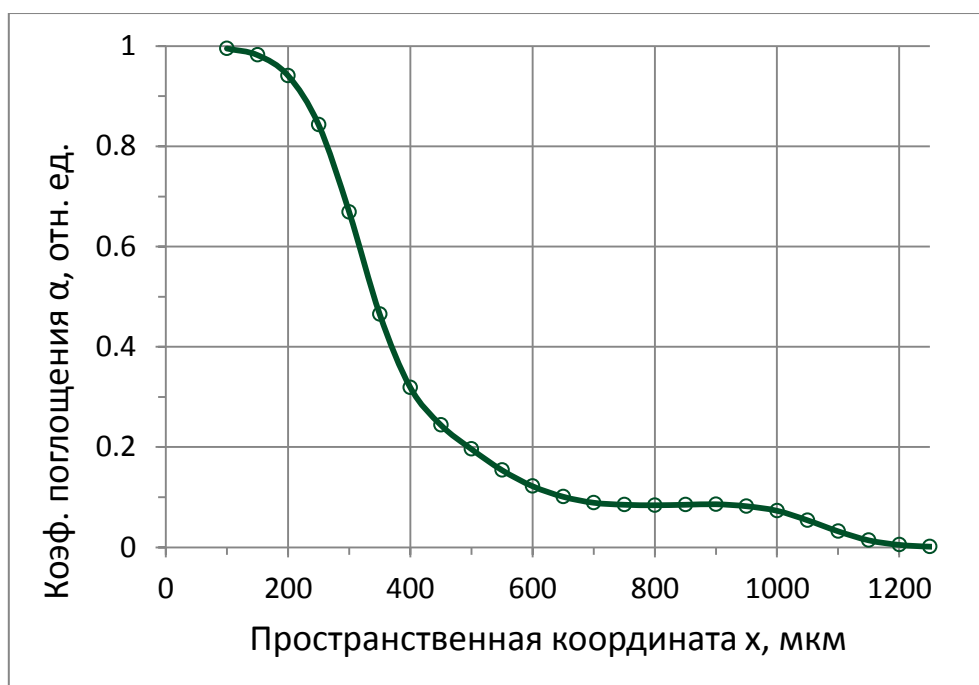


Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента поглощения света при распространении вдоль оси Z от распределения примеси по глубине кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Во втором эксперименте диаметр фокусированного пучка лазера был уменьшен до ~ 50 мкм. Зондирующее излучение проецировалось на торец образца в плоскость XZ и распространялось вдоль оси Y , а поляризация излучения была параллельна оси Z кристалла. Шаг перемещения вдоль оси X исследуемого образца составил 25 мкм. Построенная по полученным

результатам зависимость коэффициента поглощения представлена на рисунке 3.3.

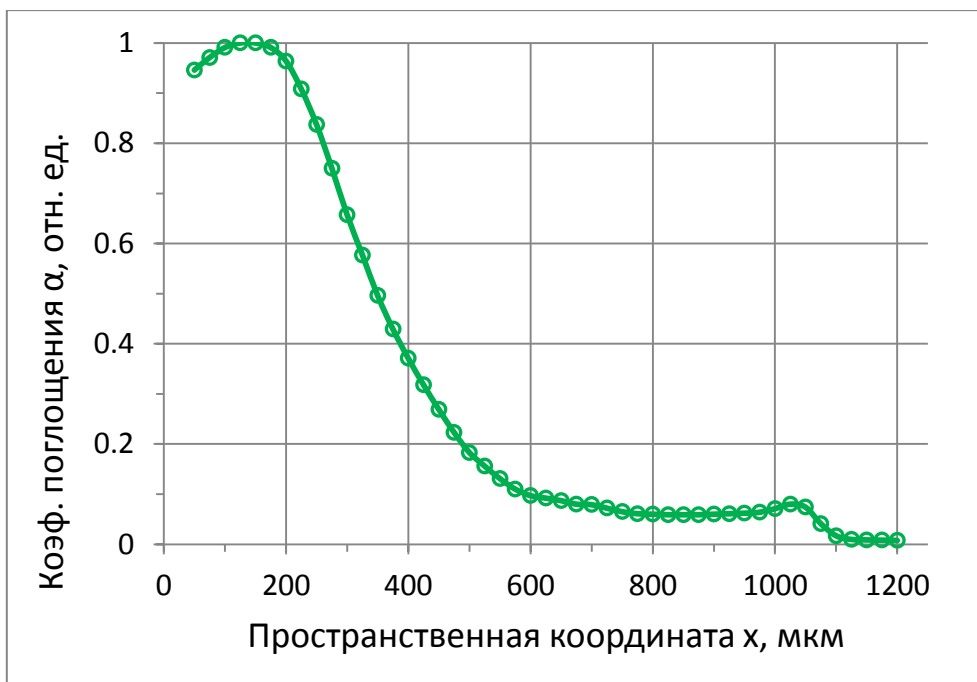


Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициента поглощения света при распространении вдоль оси Y от распределения примеси по глубине кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Из рисунков 3.2 и 3.3 видно, что ионы легирующей примеси, внедренные вглубь экспериментального образца в процессе диффузии, образовали поверхностный слой. Толщина легированного слоя оценивалась по уровню 0,1 от максимального значения коэффициента α и составляла величину $h \approx 600$ мкм.

3.2 Методы исследований индуцированных изменений показателя преломления в электрооптических кристаллах

Существуют различные способы исследований и визуализации пространственного распределения показателя преломления в оптических материалах. К таким методам относятся: z-сканирование, птихографический анализ, а также интерферометрический методы [98-103, 105-108]. Несмотря

на свою простоту метод z-сканирования может быть не точным для мелкоразмерных исследуемых областей, т. к. нелинейный отклик среды на лазерное излучение нелокален в пространстве. Индуцированный лазером нелинейный отклик в определенной точке среды определяется не только его интенсивностью в этой точке, но также зависит от интенсивности лазера в окружающих областях [107] Поэтому есть немалая вероятность, что такой метод может внести искажения в индуцированные изменения при исследовании локальных областей узкофокусированным пучком.

Птихографический анализ – это метод микроскопии, позволяющий определить индуцированные изменение показателя преломления вместе с распределением интенсивности записывающего луча за одно сканирование с восстановленным пространственным разрешением порядка 3 мкм и чувствительностью изменения показателя преломления $\Delta n = 10^{-5}$. Этот метод показывает, что изменение показателя преломления, вызванное светом, тесно связано с формой интенсивности записывающего луча [108]. Однако такой метод не всегда может подойти для исследований поточечно индуцированных изменений показателя преломления в виде сложных топологий больших размеров, поскольку может быть затратным по времени.

Одним из наиболее применяемых на практике методов экспериментальных исследований наведенных изменений Δn является интерферометрический метод [52, 98-103]. Данный метод позволяет определить величину, размеры и пространственный профиль индуцированных изменений показателя преломления даже при малых размерах индуцирующего светового пятна [109]. Еще одним немаловажным достоинством этого метода является возможность проведения исследований распределений показателя преломления как в процессе изменений Δn , так и отдельно – независимо от самого процесса индуцирования наведенных изменений Δn . К тому же интерферометрический метод позволяет бесконтактно исследовать наведенные изменения в различных

кристаллических материалах, в частности, в легированных кристаллах LiNbO_3 при малых мощностях зондирующего излучения с длинами волн, к которым светочувствительность у исследуемых образцов невелика или вовсе отсутствует.

Реализация интерферометрических измерений основывается на построении различных конструкций, таких как интерферометр Маха-Цендера, Жамена, Майкельсона и т. д. Наиболее часто используется схема интерферометра Маха-Цендера (рисунок 3.4) из-за наличия достаточного пространства и удобства размещения исследуемых объектов в такой конструкции [98, 99, 101-103, 109].

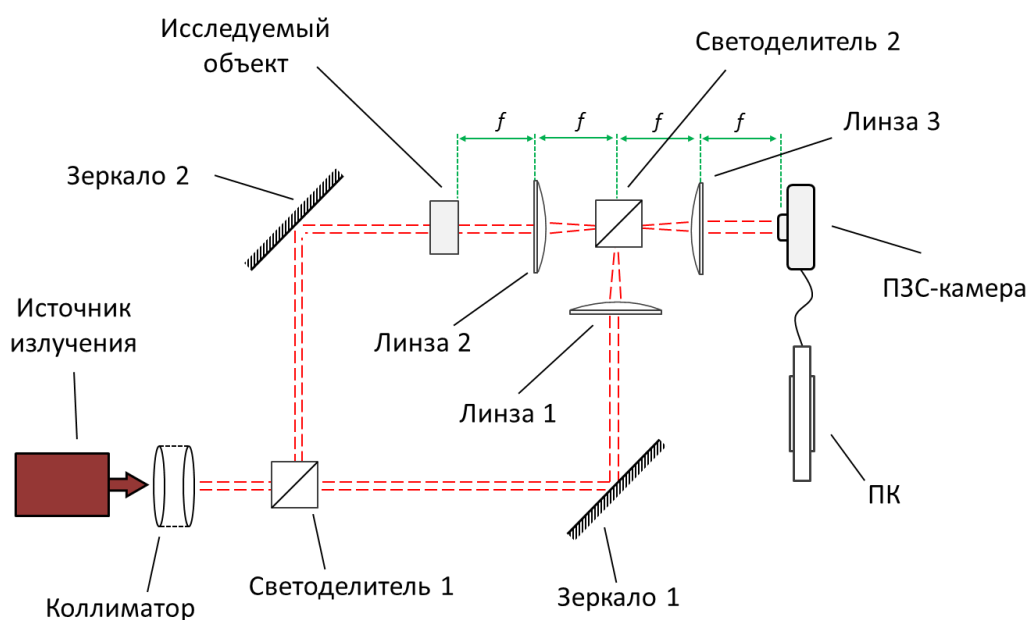


Рисунок 3.4 – Схема интерферометра Маха-Цендера для исследования показателя преломления в кристаллических средах

С одной стороны, достаточное пространство позволяет расположить светоделительные, отражательные и другие оптические элементы в интерферометре Маха-Цендера на отдельных держателях, что является хорошим преимуществом в сравнении с другими схемами. Однако в то же время это является еще и недостатком, поскольку оптические элементы интерферометра, расположенные на отдельных держателях, чувствительны к воздействию механических колебаний. Поскольку механические колебания

достигают быстрее те элементы интерферометра, которые расположены ближе к источнику вибраций, то воздействие на каждый элемент происходит с задержкой по времени. Это отражается на качестве интерференционной картины. Поэтому необходимо, чтобы платформа, на которой расположены светоделители и отражатели, могла быть устойчивой к механическим колебаниям. Для этого конструкцию интерферометра обычно размещают на поглотителе вибраций, например, в виде водяной подушки. Осуществить такую реализацию не всегда возможно, т. к. это требует специально отведенного места и существенных материальных затрат. В связи с этим появляется необходимость в реализации интерферометрических исследований на основе других конструкций, которые более устойчивы к механическим колебаниям. Примером такой конструкции является интерферометр Жамена (рисунок 3.5).

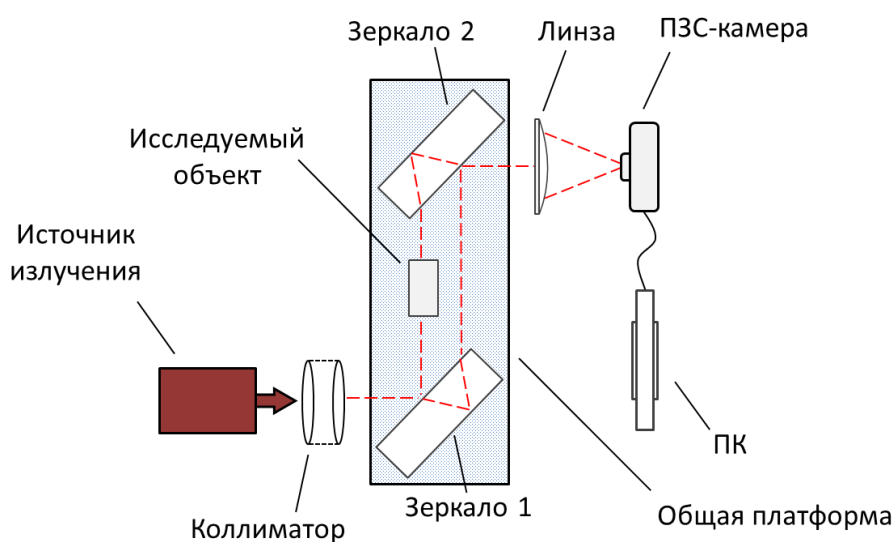


Рисунок 3.5 – Схема интерферометра Жамена для исследования показателя преломления в кристаллических средах

Преимуществом конструкции интерферометра Жамена по сравнению со схемой интерферометра Маха-Цендера является расположение двух светоделительных элементов на одной платформе. Такая конструкция позволяет реагировать зеркалам на механические колебания синхронно, что повышает устойчивость интерференционной картины к вибрациям.

3.3 Исследование индуцированных изменений показателя преломления интерферометрическим методом на основе схемы интерферометра Жамена

Индуцированные 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, как описано в главе 2. В качестве источника излучения использовался твердотельный $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ лазер, работающий в непрерывном режиме с удвоением частоты ($\lambda = 532$ 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 ~ 50 мкм по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности. Поляризация лазерного излучения соответствовала необыкновенной волне кристалла. Плотность мощности световой волны не превышала ~ 500 Вт/см². 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 3.6. Данное изображение показывает, что в верхней индуцированной структуре экспозиция одной точки внутри полоски составила 2 секунды, во второй полоске – 10 секунд, в третьей – 60 секунд. Подобным образом создавались структуры и с другими временами экспозиции [110-123122].

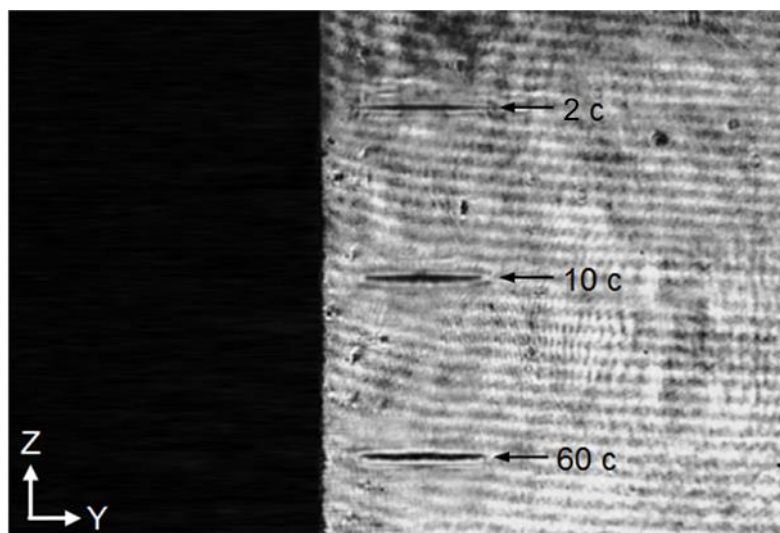


Рисунок 3.6 – Изображение выходной грани кристалла, полученное при зондировании излучением He-Ne лазера в области поточечно индуцированных структур

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 3.7). Источником излучения в интерферометре послужил He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм и мощностью $P \approx 1$ мВт. Поляризация зондирующего излучения соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Диаметр выходного пучка лазера составил ~ 1 мм по половинному уровню максимальной интенсивности излучения. Поскольку диаметр выходного лазерного пучка не позволял полностью осветить исследуемые области в образце, зондирующее излучение расширялось путем добавления коллиматора в схему экспериментальной установки. Диаметр пучка на выходе коллиматора составил ~ 15 мм по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности излучения. Формируемый коллиматором зондирующий пучок направлялся на пластину со отражающей задней гранью. Отражаясь от передней и задней граней пластины, зондирующее излучение разделялось на два луча. Исследуемый образец размещался в одном из плеч интерферометра. Для компенсации разности хода двух лучей использовалась вторая пластина. Оба зеркала

оснащены плавной регулировкой угла наклона по вертикальной и горизонтальной осям, что позволило расположить плоскости отражающих граней зеркал параллельно друг другу. На выходе второго зеркала устанавливалась диафрагма, отсекающая шумовые лучи. 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 3.8 [110-123].

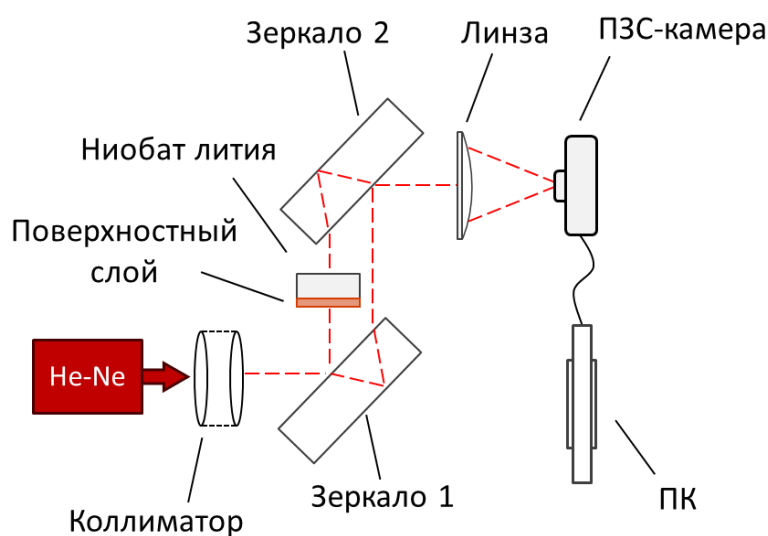


Рисунок 3.7 – Схема экспериментальной установки на основе интерферометра Жамена для исследования индуцированных изменений Δn в поверхностно легированном кристалле LiNbO_3

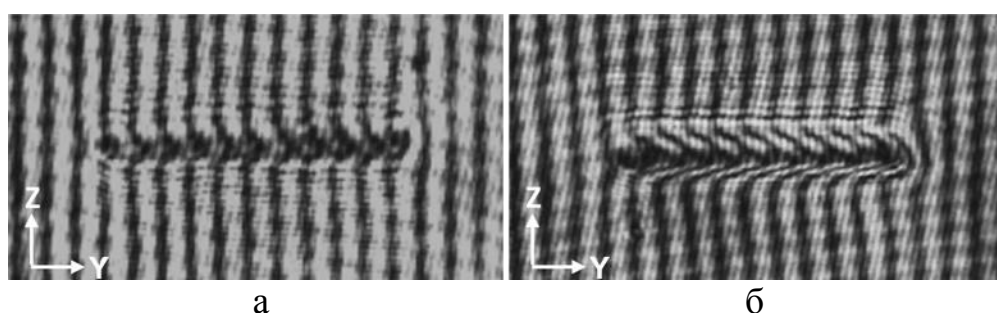


Рисунок 3.8 – Интерференционные картины в областях поточечно индуцированных структур в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$: а – время индуцирования одной точки внутри полоски 2 секунды; б – время индуцирования одной точки внутри полоски 60 секунд

Интерференционные картины на рисунке 3.8 показывают, что фазовые сдвиги $\Delta\varphi$ в области поточечно сформированных структур растут с увеличением времени экспонирования образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

3.4 Визуализация индуцированных светом изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Величина и характер индуцированных изменений показателя преломления в экспонированных областях поверхностного слоя изучались путем обработки полученных интерферограмм по методике, описанной в работах [98-101].

Обработка интерферограмм осуществлялась в программе «Визуализатор волнового фронта» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661646, Приложение А). Интерфейс программы изображен на рисунке 3.9.

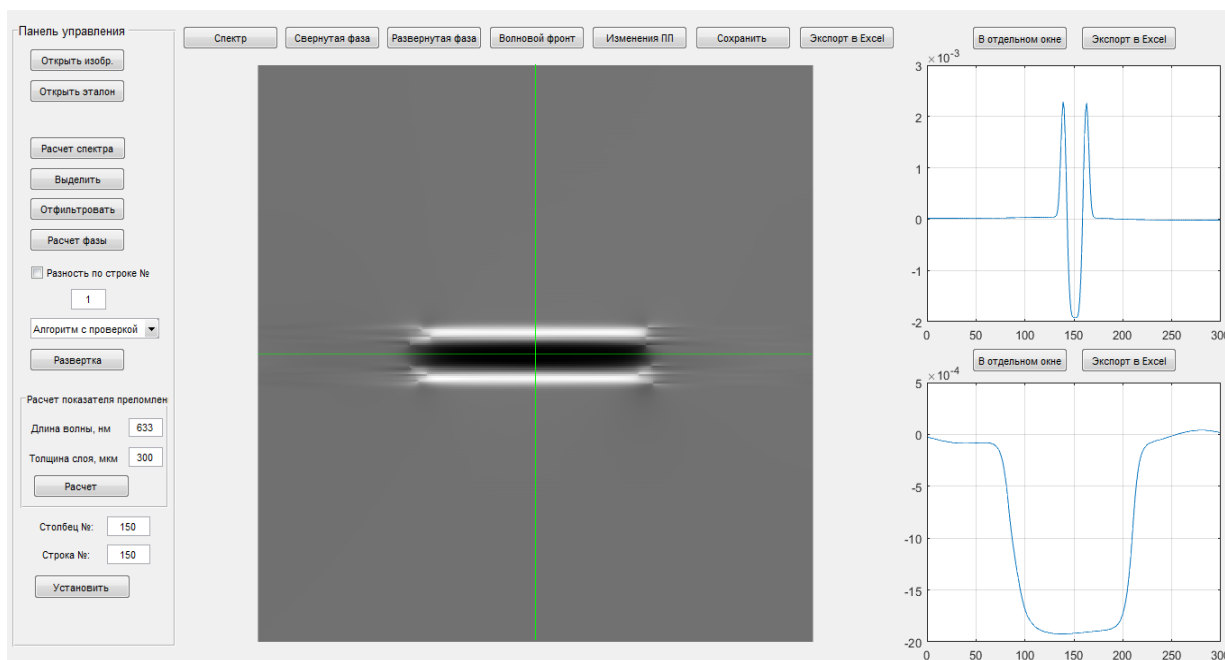


Рисунок 3.9 – Интерфейс программы «Визуализатор волнового фронта»

Программа «Визуализатор волнового фронта» позволяет [124]:

- 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.

На рисунке 3.10 приведен пример восстановления фазового фронта световой волны, прошедшей через область индуцированных изменений. Значения фазы определялись после фильтрации спектра, полученного путем преобразования Фурье исходных интерферограмм. Интерферограммы до экспонирования кристалла лазерным излучением и после экспонирования приведены на рисунках 3.10а и 3.10б. В результате обратного преобразования Фурье восстанавливается изображение свернутой фазы с удаленным фазовым компонентом несущей (рисунок 3.10в и 3.10г). Однако наличие разрывов в картинах свернутых фаз не позволяет точно восстановить волновой фронт в области индуцированных изменений (рисунок 3.10д). Устранить данные разрывы позволяет процесс разворачивания фаз. Вычитание картин с непрерывным распределением фаз до внесенных лазером изменений и после внесенных изменений позволяет восстановить фазовый фронт в области индуцированных изменений показателя преломления (рисунок 3.10е). Приведенная на рисунке 3.10б интерферограмма получена при 2-секундном экспонировании одной точки индуцированной полосы.

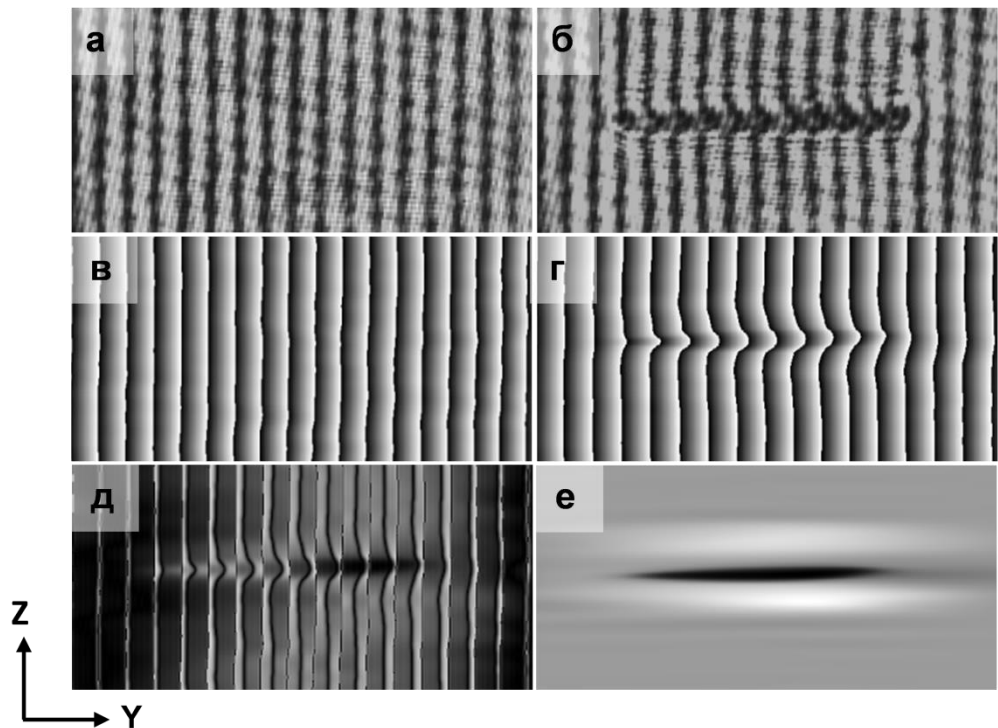


Рисунок 3.10 – Этапы исследования и визуализации индуцированных изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле

$\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ 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 при различном времени экспонирования могут быть определены по формуле [98-101]:

$$\Delta n(z) = \frac{\lambda \cdot \Delta \varphi(z)}{2\pi \cdot d_x}, \quad (3.1)$$

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 (3.1) 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 при помощи установки, схема которой приведена на рисунке 3.11 [122].

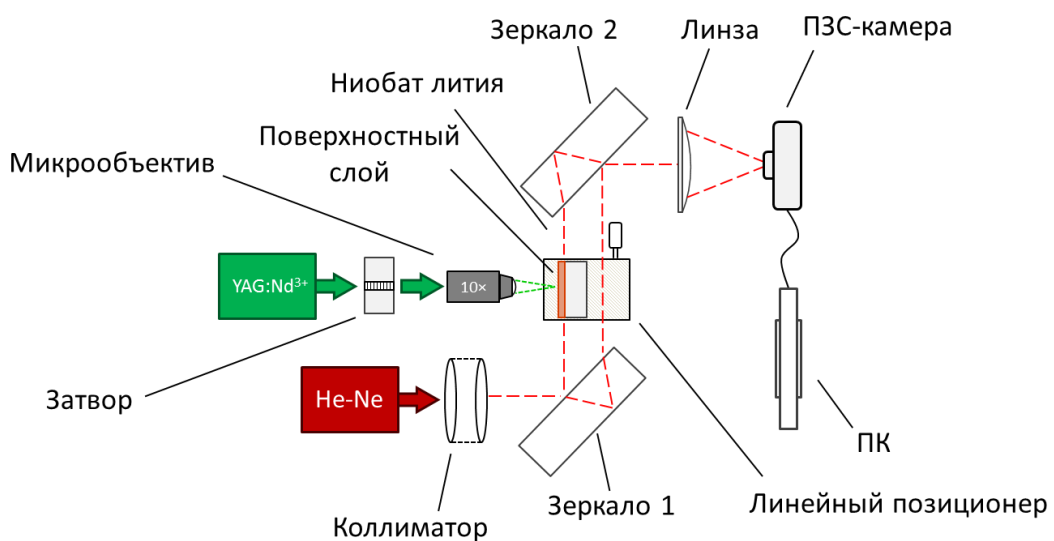


Рисунок 3.11 – Расположение экспериментального образца в схеме экспериментальной установки на основе интерферометра Жамена для исследования глубины индуцированных изменений Δn в поверхностно легированном кристалле LiNbO_3

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 3.12). Время экспонирования кристалла одним фокусированным световым пятном изменялось от 2 до 60 секунд.

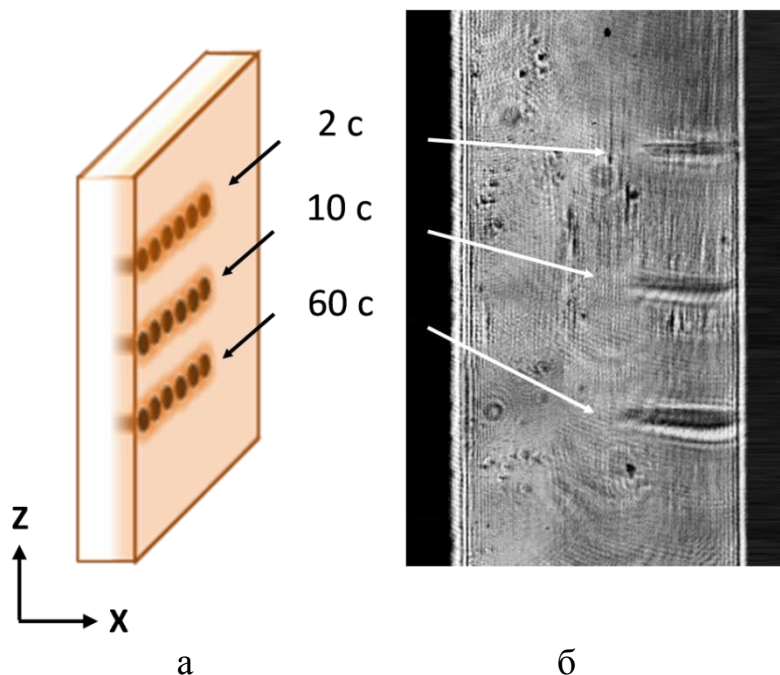


Рисунок 3.12 – Схема ориентации экспонированных областей в кристалле для исследования индуцированных изменений вдоль оси X образца (а); изображение выходного торца кристалла в области индуцированных полос (б)

Необходимость одновременного расположения экспериментального образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ в интерферометре источника экспонирующего излучения ($\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ лазер) обусловлена тем, что интерференционные картины на торцевой поверхности кристалла можно зафиксировать до момента его облучения, во время и после. Такой подход позволяет упростить обработку интерферограмм и минимизировать влияние шумов и различных дефектов при извлечении волнового фронта в индуцированных областях, полученных при различных временах экспонирования. Типичный пример интерферограмм с торцевой поверхности образца (плоскость XZ), полученных при размещении кристалла в одном из плеч интерферометра Жамена до индуцированных изменений и после индуцирования, представлен на рисунках 3.13а и 3.13б. Пример восстановленного фазового фронта приведен на рисунке 3.13в.

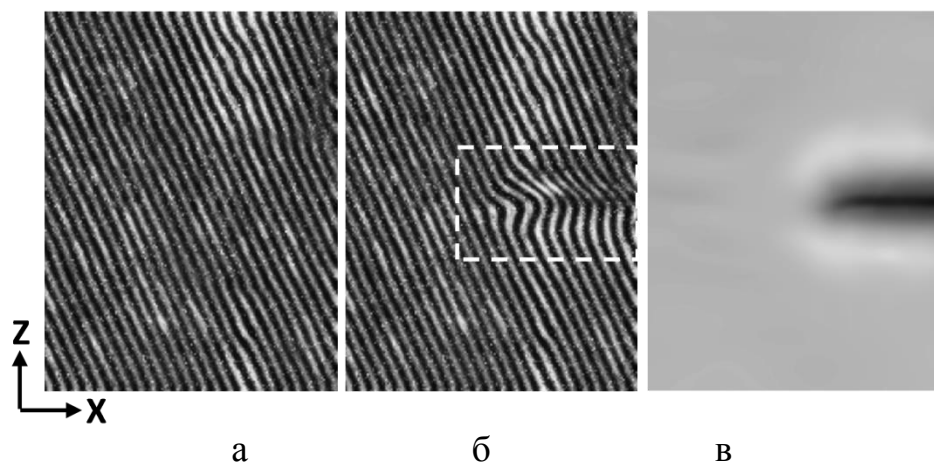


Рисунок 3.13 – Интерферограммы на выходном торце до и после экспонирования поверхности YZ кристалла (а, б); восстановленный фазовый фронт в области индуцированной полоски (в)

Профили волнового фронта в области индуцированных изменений показателя преломления по глубине экспериментального образца, приведены на рисунке 3.14. 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.

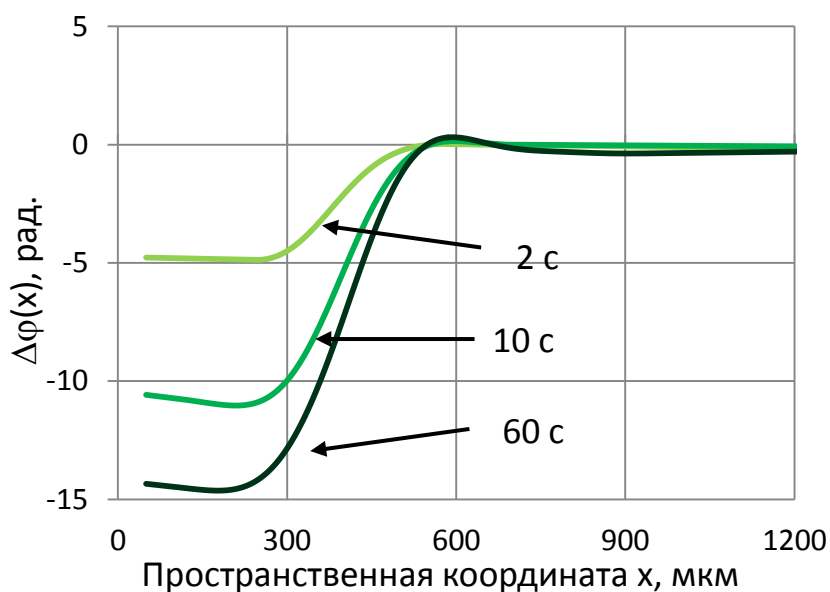


Рисунок 3.14 – Распределение $\Delta\phi$ в области индуцированных изменений показателя преломления в направлении оси X кристалла

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 пятном приведены на рисунке 3.15.

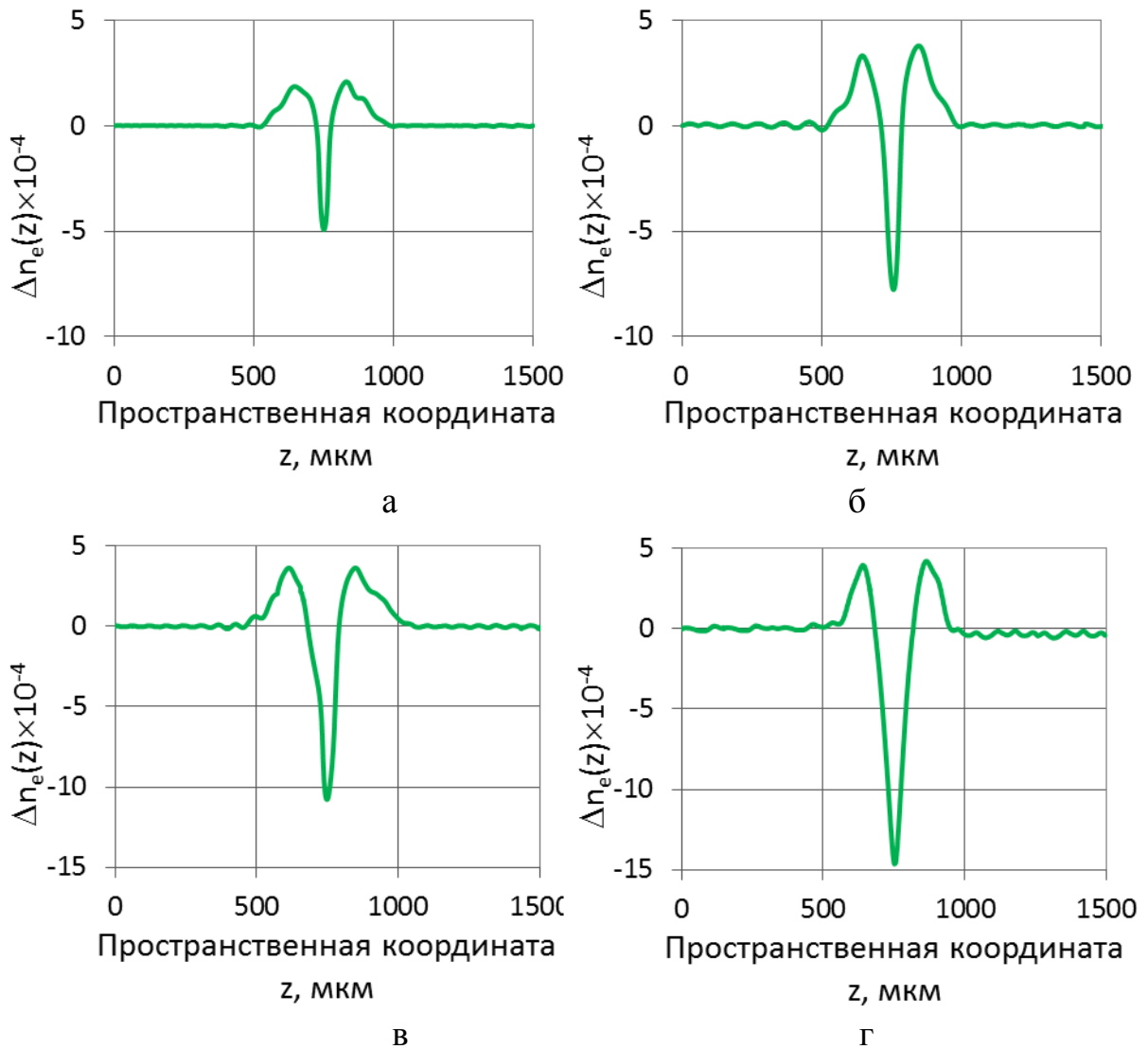


Рисунок 3.15 – Индуцированные изменения показателя преломления вдоль оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ при разном времени экспонирования одним пятном: а – 2 секунды; б– 5 секунд; в– 10 секунд; г– 60 секунд

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 3.16.

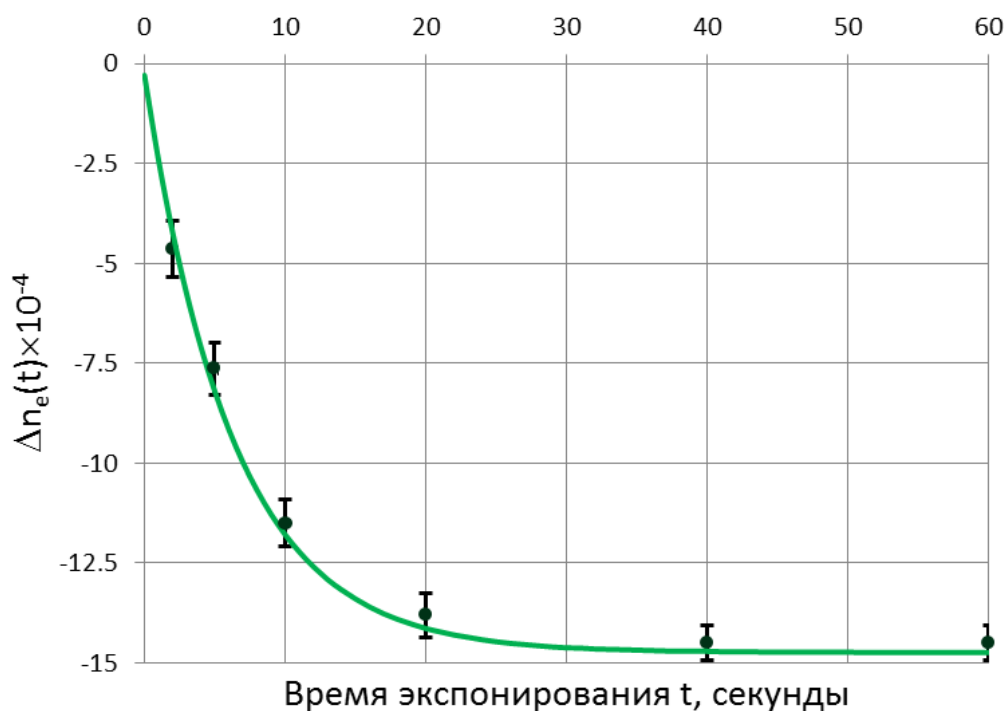


Рисунок 3.16 – Зависимость изменений необыкновенного показателя преломления $\Delta n_e(t)$ от времени экспонирования кристалла лазерным излучением с $\lambda = 532$ нм

Как видно из графиков рисунка 3.16, 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. Полученные значения Δn_e не противоречат результатам, представленным в работах [99, 108]. В работе [99] изменения необыкновенного показателя преломления в центре освещенной области объемно легированного железом

кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ достигали величины в режиме насыщения $\Delta n_e = -16 \times 10^{-4}$. В работе [108] величина изменений показателя преломления в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ составила $\Delta n_e \approx -20 \times 10^{-4}$.

Экспонирование поверхностно легированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ фокусированным лазерным излучением приводит к существенным изменениям показателя преломления в освещенной области внутри поверхностного слоя. Поскольку плотность мощности в наших экспериментах не превышала 500 Вт/см^2 , вкладом температурных эффектов в изменение показателя преломления можно пренебречь [101]. Основной вклад в наведенные изменения Δn исследуемого образца обусловлен фоторефрактивным эффектом. По экспериментально полученным значениям индуцированных изменений Δn_e проводилась оценка величины поля пространственного заряда E_{sc} . Согласно выражению для диффузионного механизма записи [5, 51]:

$$\Delta n_e = -\frac{1}{2} \cdot n_e^3 \cdot r_{33} \cdot E_{sc}, \quad (3.2)$$

где n_e – величина необыкновенного показателя преломления; r_{33} – электрооптический коэффициент; E_{sc} – поле пространственного заряда.

Расчет по выражению (3.2) показал, что величина поля E_{sc} по экспериментально полученным значениям индуцированных изменений Δn_e варьируется в пределах от 10^4 до 10^5 В/см (при разном времени экспонирования). Максимальное значение поля по расчетам, приведенным в работе [51], достигает величины порядка $\sim 10^5$ В/см. Полученная величина поля пространственного заряда E_{sc} соответствует значениям, приведенным в работе [51].

3.5 Выводы по разделу

Экспериментально исследованы индуцированные фокусированным лазерным излучением изменения показателя преломления в поверхностном

слое кристалле ниобата лития. По результатам, представленным в данной главе, сделаны следующие выводы:

1. Метод поточечного индуцирования позволяет изменять показатель преломления в локально освещенных областях в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

2. Освоен метод визуализация индуцированных светом изменений показателя преломления в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

3. Подтверждено, что пространственный профиль индуцированных изменений Δn вдоль оптической оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ имеет знакопеременный характер: в центре освещенной области – отрицательная величина, на краях – положительная.

4. 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.

На основании полученных результатов сформулировано второе научное положение, выносимое на защиту: «Индукцированные 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 $\lambda = 532$ 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».

4 ПОТОЧЕЧНО ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Информация о величине и профиле Δn необходима для описания параметров и характеристик формируемых оптических элементов. Такими элементами могут быть волноводные или дифракционные структуры, имеющие определенные пространственные размеры, работающие на определенной длине волны оптического излучения и содержащие определенный состав мод [7, 8, 16, 25]. Характер распределения и величина профиля Δn существенно влияют на распространение световых полей внутри волноводной структуры. В связи с этим, по разнице величины показателя преломления между прилегающими слоями, волноводные структуры можно разделить на два типа. Так, если в планарном волноводном канале величина показателей преломления между прилегающими слоями одинакова ($n_1 = n_2$), то такой волновод называется симметричным (рисунок 4.1а). Если же это условие изменяется, т. е. $n_1 \neq n_2$, то в таком случае волновод становится асимметричным (рисунок 4.1б) [25, 29].

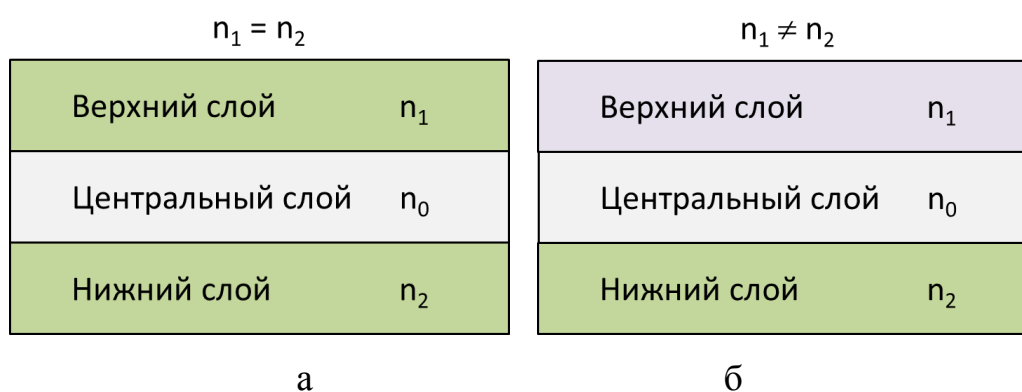


Рисунок 4.1 – Структура планарного волновода с прилегающими слоями: а – симметричный волновод; б – асимметричный

Наличие информации о симметрии показателей преломления прилегающих слоев позволяет провести анализ распространения световой волны внутри волноводной структуры с учетом граничных условий. Таким

образом, можно определить ориентацию векторов поля световой волны внутри центрального слоя (сердцевины). Еще одной важной характеристикой световых полей при распространении внутри волноводных структур является состав генерируемых мод. Известно, что на состав мод оказывают влияние такие параметры, как ширина центрального слоя h , длина волны λ и угол ввода θ распространяющегося света внутри волновода. Однако, в симметричном и асимметричном типах волноводных структур при одних и тех же параметрах, т. е. при одинаковых h , λ и θ распространяющегося излучения, происходит генерация волноводных мод разных типов и порядков [25, 29]. Типы распространяющихся в волноводах мод можно классифицировать следующим образом [25, 29, 125]:

– *Поперечные электрические моды (TE)*. В этом случае электрическое поле отсутствует в направлении распространения. Иногда их называют Н-модами, потому что магнитное поле существует вдоль направления распространения (Н - традиционный символ магнитного поля).

– *Поперечные магнитные моды (TM)*. Магнитное поле отсутствует по направлению распространения. Иногда их называют Е-модами, потому что электрическое поле присутствует в направлении распространения.

– *Поперечные электромагнитные моды (TEM)*. Электрические и магнитные поля отсутствуют в направлении распространения.

– *Гибридные режимы*. Ненулевые электрические и магнитные поля в направлении распространения.

Определить тип и состав мод возможно посредством решения волнового уравнения с учетом граничных условий [10, 11, 25]. А поскольку в асимметричных волноводах в отличие от симметричных показатели преломления прилегающих слоев отличаются, то условия распространения световой волны изменяются, поэтому состав и тип мод даже при одинаковой ширине центрального слоя будут разными. В качестве примера можно сказать, что в асимметричном волноводе с толщиной d возможно

распространение только тех мод, которые соответствуют нечетным модам симметричного волновода удвоенной толщины $2d$ [25, 29].

Помимо симметрии показателей преломления прилегающих слоев влияние на распространение световых полей в волноводной структуре оказывает пространственное распределение или же профиль показателя преломления. Как уже говорилось в подразделе 1.1, профиль показателя преломления волноводов может иметь ступенчатый или градиентный вид. Передача информационных сигналов по оптическим волноводам обычно осуществляется в виде последовательности коротких световых импульсов. Из-за того, что генерируемые моды в волноводе распространяются под разными углами, они достигают выходного торца за разные промежутки времени. В результате каждый передаваемый импульс расширяется по времени. Этот эффект известен как межмодовая дисперсия. В связи с этим, при достаточно большом расширении дальнейшая передача данных станет невозможной, т. к. соседние импульсы будут перекрываться и их невозможно будет различить на выходе из волновода. Для уменьшения межмодовой дисперсии волноводные структуры формируют с профилем показателя преломления градиентного типа. Моды высших порядков в градиентном волноводе проходят по более длинным траекториям, чем моды распространяющиеся вдоль центральной оси волноводного слоя. Если бы показатель преломления был распределен равномерно по сердцевине волновода (в виде ступеньки), моды высших порядков распространялись бы дольше, чем основные моды. Однако значительная часть мод распространяющихся под углом находится на некотором расстоянии от центра волноводного слоя, где показатель преломления ниже, чем в центре. Поэтому, скорость распространения мод высших порядков, в среднем, выше, чем у основных. Это приводит к частичному выравниванию времени распространения мод разных порядков и, как следствие, к уменьшению временной дисперсии [25].

Основные результаты данного раздела приведены в работах [126-132].

4.1 Исследование характеристик волноводных структур, индуцированных при различных условиях экспонирования кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Формирование в электрооптических кристаллах волноводных структур лазерным индуцированием позволяет реализовать элементы интегральной оптики с различными характеристиками. К таким характеристикам относятся:

- величина показателя преломления волноводного и прилегающих слоев;
- пространственный профиль показателя преломления волноводной структуры;
- пространственные размеры формируемых структур, в частности толщина волноводного слоя;
- однородность/неоднородность границ между волноводным и прилегающими слоями;
- топология и геометрическая форма реализуемых элементов.

В зависимости от описанных выше параметров можно определить наличие состава волноводных мод, генерируемых на определенной длине волны λ оптического излучения. В связи с этим при различных условиях экспозиции электрооптических кристаллов появляется возможность индуцировать волноводные структуры с индивидуальными параметрами и характеристиками, необходимых для работы гибридных или полностью оптоэлектронных устройств и приборов фотоники.

В наших экспериментах формирование волноводных структур проводилось с разной длительностью экспозиции поверхностного слоя кристаллического образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Длительность засветки фокусированным световым пятном в разных экспериментах составляла от 2 до 40 секунд [126-129]. Процесс экспонирования проводился методом поточечного индуцирования. Предварительно, перед экспонированием,

образец зондировался в экспериментальной установке, содержащей интерферометр Жамена. Для повышения точности получаемых результатов кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ размещался на поворотной платформе, которая позволяла ориентировать исследуемую плоскость до процесса экспонирования и после (рисунок 4.2).

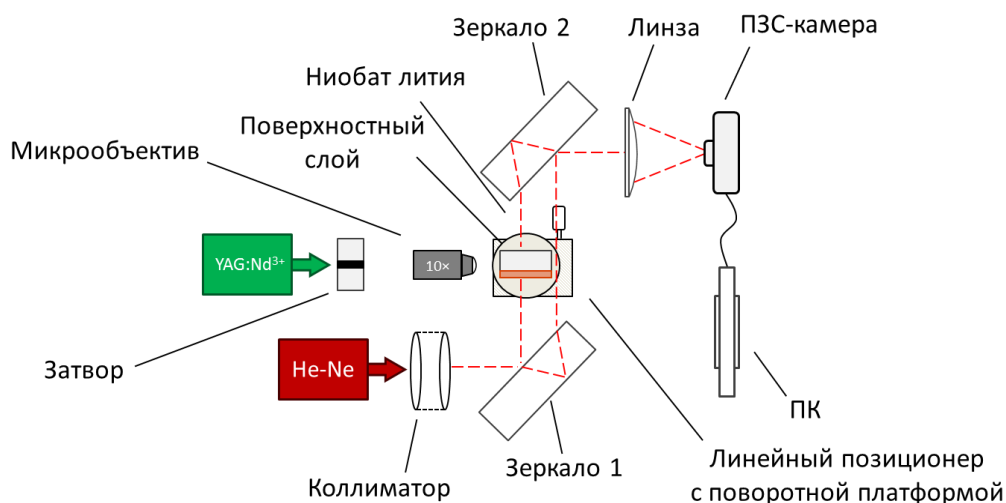


Рисунок 4.2 – Расположение экспериментального образца в экспериментальной установке, содержащей интерферометр Жамена, до после процесса формирования волноводных структур в поверхностных областях LiNbO_3

Интерферограммы, полученные до облучения экспериментального образца, приведены на рисунке 4.3.

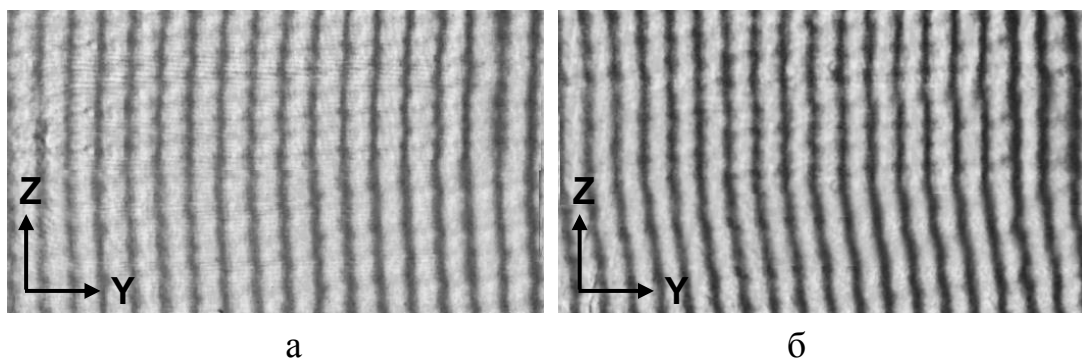


Рисунок 4.3 – Интерференционные картины на выходе интерферометра Жамена, полученные при исследовании поверхностных областей кристалла LiNbO_3 : а – до экспонирования одной точки в течение 5 секунд; б – в течение 40 секунд

Перед формированием волноводных структур экспериментальный образец поворачивался на 90 градусов относительно исходного положения. После этого открывался затвор, и излучение YAG:Nd^{3+} лазера фокусировалось на поверхность экспериментального образца. Расположение кристалла во время процесса экспонирования изображено на рисунке 4.4.

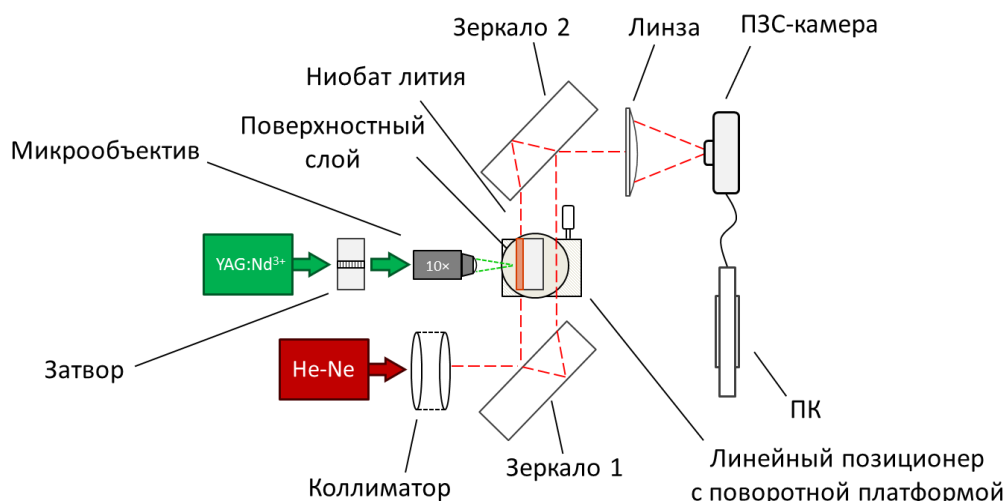


Рисунок 4.4 – Расположение экспериментального образца в экспериментальной установке, содержащей интерферометр Жамена, во время процесса формирования волноводных структур в поверхностных областях



По завершению процесса формирования экспериментальный образец возвращался в исходное положение (рисунок 4.2), затем были сняты интерферограммы в областях, экспонированных с разной длительностью. Примеры полученных интерферограмм представлены на рисунке 4.5. На рисунке 4.5а приведена интерферограмма, полученная в области сформированной структуры, состоящей из двух параллельных продольно однородных полос с пониженным показателем преломления. Время экспонирования одной точки внутри такой полосы составило 5 секунды с интервалом перемещения 25 мкм. Каждая полоса состояла из 40 индуцированных точек. Общая длина полосы составила ~1 мм. Расстояние между центрами полос составляло 125 мкм. Интерференционная картина,

приведенная на рисунке 4.5б, получена при тех же условиях, но время экспонирования одной точки в наведенной структуре составляло 40 секунд.

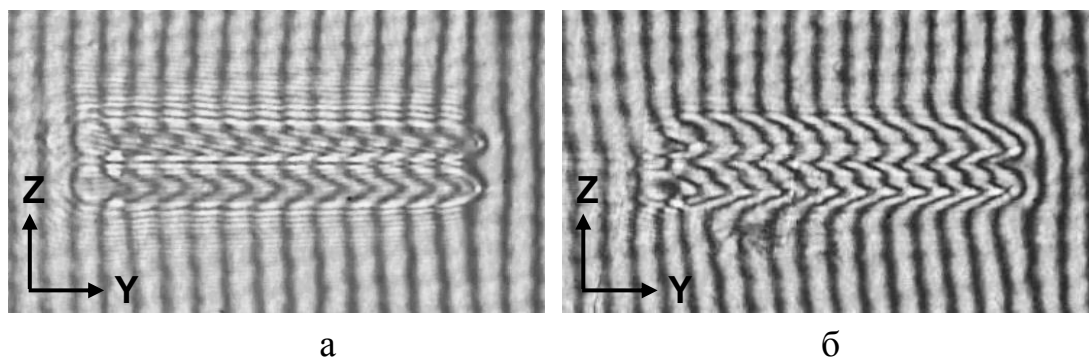


Рисунок 4.5 – Интерференционные картины на выходе интерферометра Жамена, полученные в областях сформированных структур в кристалле LiNbO_3 : а – экспонирование одной точки 10 секунд; б – 40 секунд

На рисунках 4.6–4.8 приведены результаты визуализации распределения показателя преломления в поточечно индуцированных волноводных структурах в которых время экспонирования одной точки внутри каждой полосы составило 2, 10 и 40 секунд, соответственно.

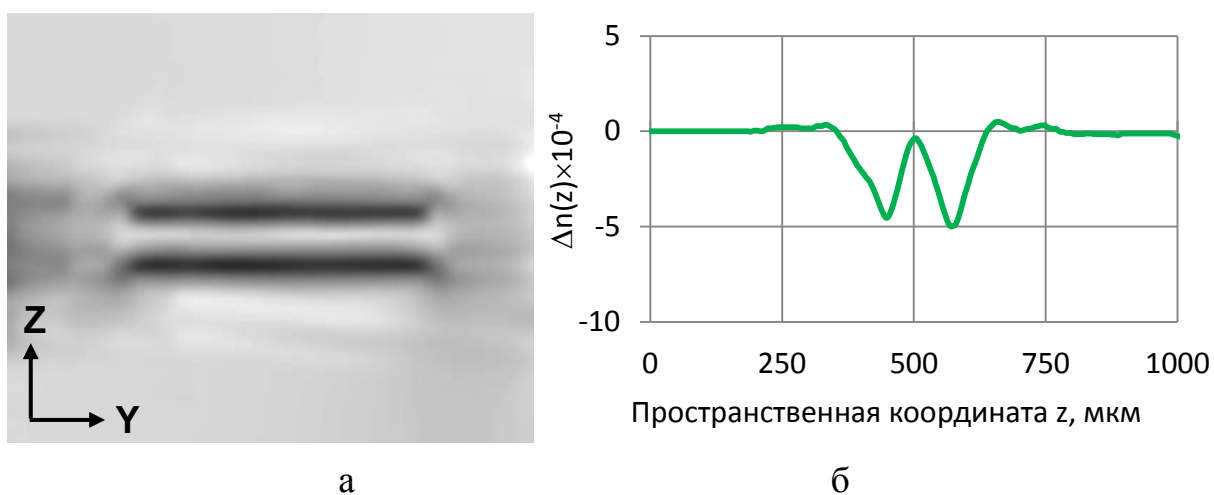
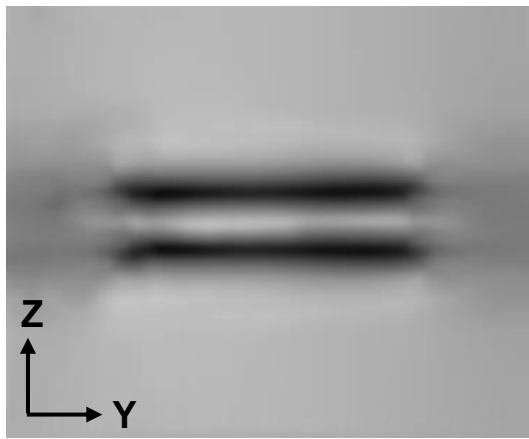
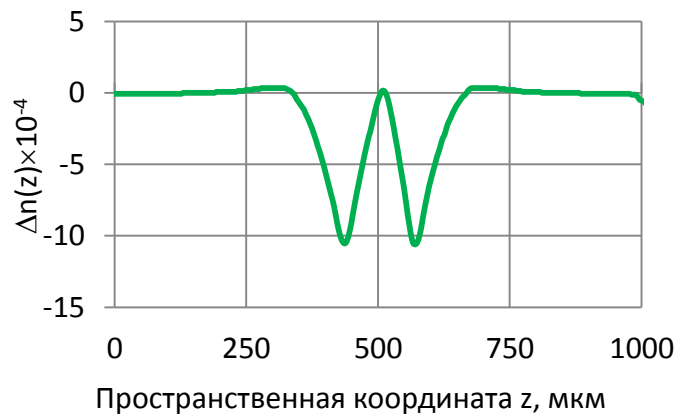


Рисунок 4.6 – Результат визуализации распределения показателя преломления в индуцированной волноводной структуре: а – при времени экспонирования 5 секунд; б – профиль показателя преломления

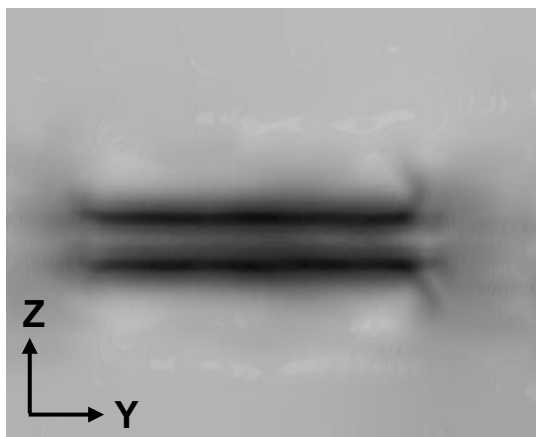


а

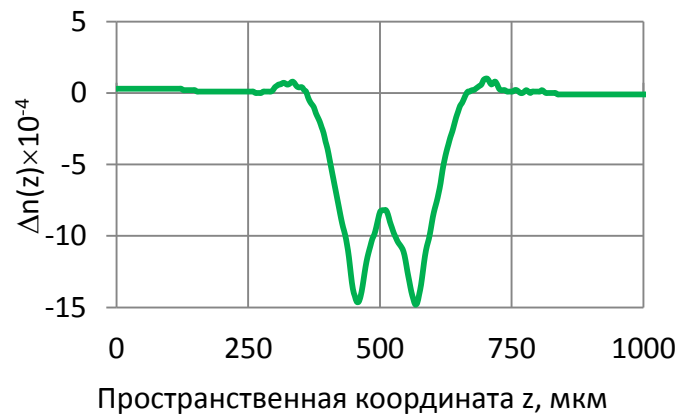


б

Рисунок 4.7 – Результат визуализации распределения показателя преломления в индуцированной волноводной структуре: а – при времени экспонирования 10 секунд; б – профиль показателя преломления



а



б

Рисунок 4.8 – Результат визуализации распределения показателя преломления в индуцированной волноводной структуре: а – при времени экспонирования 40 секунд; б – профиль показателя преломления

Необходимо отметить, что при времени экспонирования образца в течение 10 секунд разница показателей преломления между центральной и прилегающими областями достигает величины $\Delta n \approx 10 \cdot 10^{-4}$ и существенно не изменяется при более длительной экспозиции.

4.2 Разработка оптико-электронного комплекса для формирования и исследования поточечно индуцированных волноводных структур в поверхностно легированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

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.

Для решения вышеописанных задач потребовалось разработать оптико-электронный аппаратно-программный комплекс, который состоит из трех блоков (рисунок 4.9).

Блок 1 содержит непрерывно работающие твердотельный YAG:Nd^{3+} лазер и He-Ne лазер. Твердотельный YAG:Nd^{3+} 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:Nd^{3+} лазера; коллиматор, интерферометр Маха-Цендера, изображающую линзу и анализатор лазерных пучков, которые позволяют получать интерферограммы в области сформированных структур (аппаратная часть комплекса).

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).

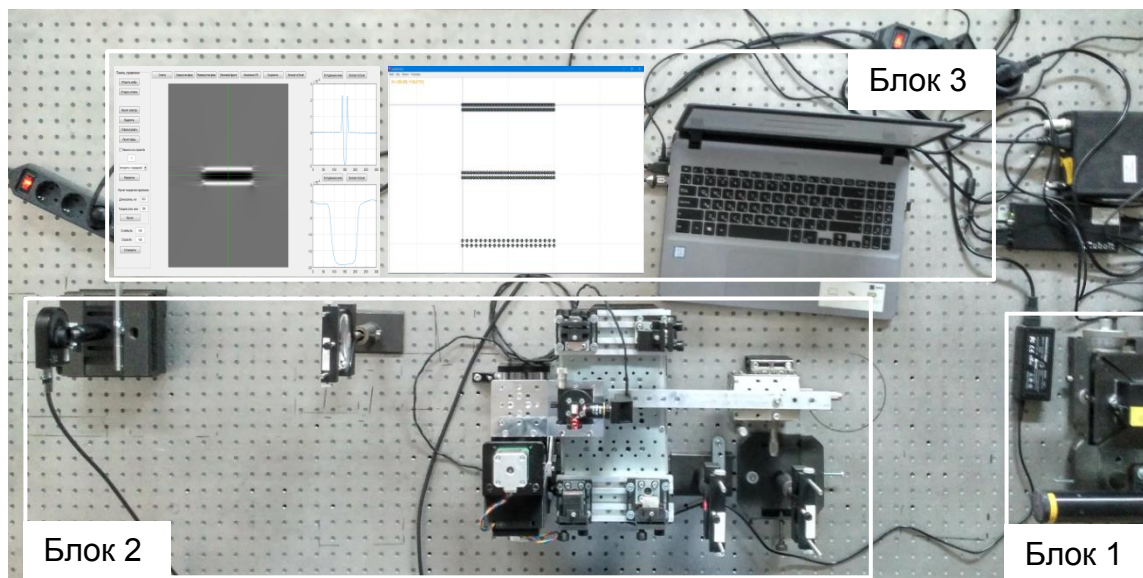


Рисунок 4.9 – Оптико-электронный комплекс для формирования и исследования пространственно-неоднородных и волноводных структур в кристаллах ниобата лития: блок 1 – источники излучения; блок 2 – аппаратная часть комплекса; блок 3 – программная часть комплекса

В таблице 4.1 приведены характеристики комплекса.

Таблица 4.1 – Характеристики оптико-электронного комплекса

Блок 1	Источники излучения	Режим работы	Длина волны, нм	Мощность излучения, мВт	Поляризация
	YAG:Nd ³⁺ лазер	Непрерывный	532	50	>100:1
	He-Ne лазер	Непрерывный	633	5	500:1
Блок 2	Линейный позиционер	Режим управления	Количество осей	Разрешение перемещения, мм	Эффективная длина перемещения, мм
		Автоматизированный	2	0.005	100
	Механический затвор	Режим управления	Тип	Питающее напряжение, В	Частота срабатывания, Гц
		Автоматизированный	Двухпозиционный	12	2

Блок 3	Микрообъектив Achro	Увеличение	Апертура	Тип оптики	Рабочее расстояние, мм
		10x	0.25	Ахромат	6.8
	Поворотная платформа Standa 7R7	Режим управления	Диапазон вращения	Разрешение (грубо)	Разрешение (точно)
		Ручной	360°	~1°	1'
	Коллиматор	Расширение пучка	Количество линз	Фокусное расстояние входной линзы, мм	Фокусное расстояние выходной линзы, мм
		20x	2	~7	~140
	Интерферометр Маха-Цендера	Количество отражающих элементов	Количество светоделительных элементов	Коэффициент деления луча	Диаметр луча, мм
		2	2	47/53	20
	Изображающая линза	Тип линзы	Фокусное расстояние, мм	Диаметр линзы, мм	Толщина линзы, мм
		Сферическая	~200	~75	~10
	Анализатор лазерных пучков Veamag-3.0	Размер матрицы, мм	Рабочий спектральный диапазон, нм	Порог повреждений, Вт	Отображение данных
		11.3x6.0	350 - 1150	1	2D, 3D, XY проекции и отслеживание положения центра пучка
	Персональный компьютер	Модель	Операционная система	Процессор	Видеокарта
		ASUS X507U	Windows 10	Intel Core i5 7200U, 2.5 ГГц	Intel® HD Graphics 620
Программа для управления	Функционал		Системные требования		
	Автоматизированное / ручное управление позиционером и затвором. Проектирование топологий формируемых структур. Ограничение воздействия лазерного излучения с длительностью ≥ 0.5 с.		Операционная система: Windows 7, Windows 8, 10, 64- и 32-битные версии. Процессор: от 2.5 ГГц. ОЗУ: 0.5 ГБ. Видеокарта: объём памяти от 512 Мб.		
Программа «Визуализатор волнового фронта»	Функционал		Системные требования		
	Программный продукт позволяет восстанавливать волновой фронт интерференционных картин. Экспорт данных осуществляется в форматах *.bmp и *.xls.		Операционная система: Windows 7, Windows 8, 10, 64- и 32-битные версии. Процессор: от 2.5 ГГц. ОЗУ: 0.5 ГБ. Видеокарта: объём памяти от 512 Мб.		

В качестве источника излучения для формирования волноводных структур использовался YAG:Nd³⁺ лазер с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм),

работающий в непрерывном режиме. Выходная мощность лазера регулируется и может достигать 60 мВт. Поляризация излучения соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Излучение на поверхность кристалла фокусировалось микрообъективом с 10-кратным увеличением. Экспериментальный образец размещался на двухкоординатном автоматизированном позиционере с поворотной платформой. Поворотная платформа 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 и устранял нежелательную засветку кристалла во время его перемещения (рисунок 4.10).

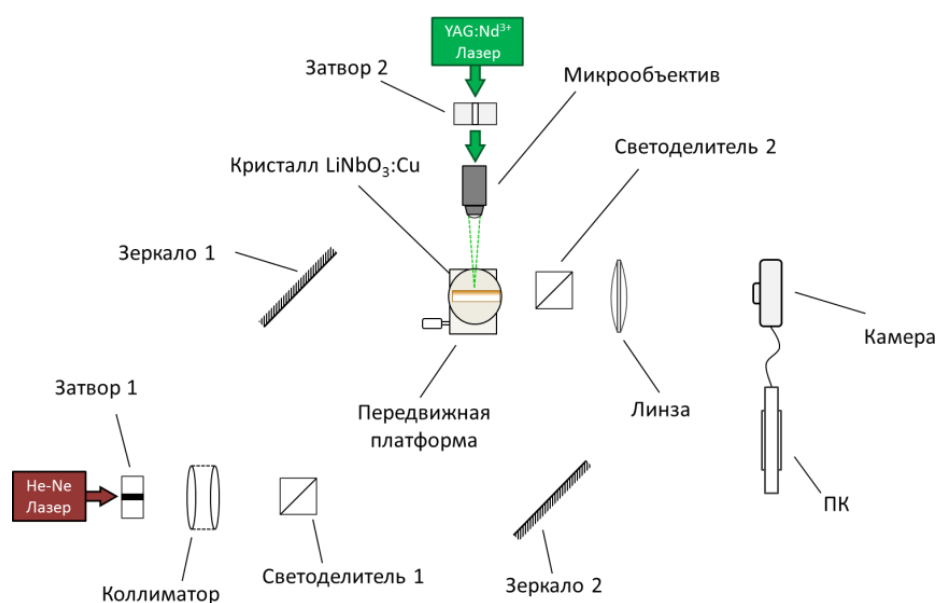


Рисунок 4.10 – Режим работы установки и расположение образца в процессе формирования наведенных структур

На рисунке 4.11 изображено положение экспериментального образца до и после процесса формирования волноводных структур. Для визуализации индуцированных изменений показателя преломления в разработанном комплексе использовался интерферометр Маха-Цендера. Интерферометр состоял из двух два светоделительных элементов и двух зеркал,

размещенных на отдельной платформе. Исследуемый кристалл размещался в одном из плеч интерферометра. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер с выходной мощностью порядка 10 мВт и диаметром светового пучка 1 мм. На выходе коллиматора размеры светового пучка увеличились в 20 раз. 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.

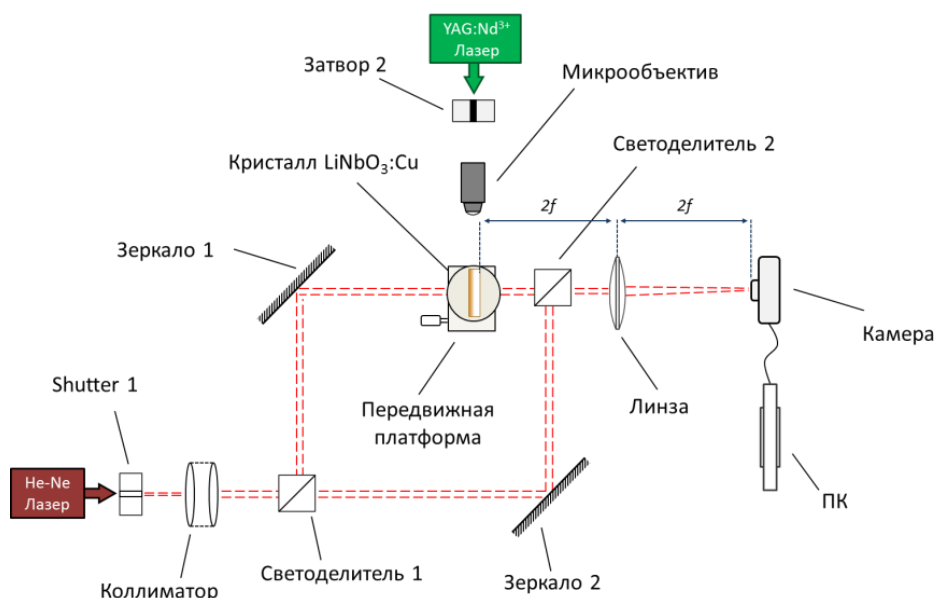


Рисунок 4.11 – Схема экспериментальной установки для исследования характеристик наведенных волноводных структур

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 4.12.

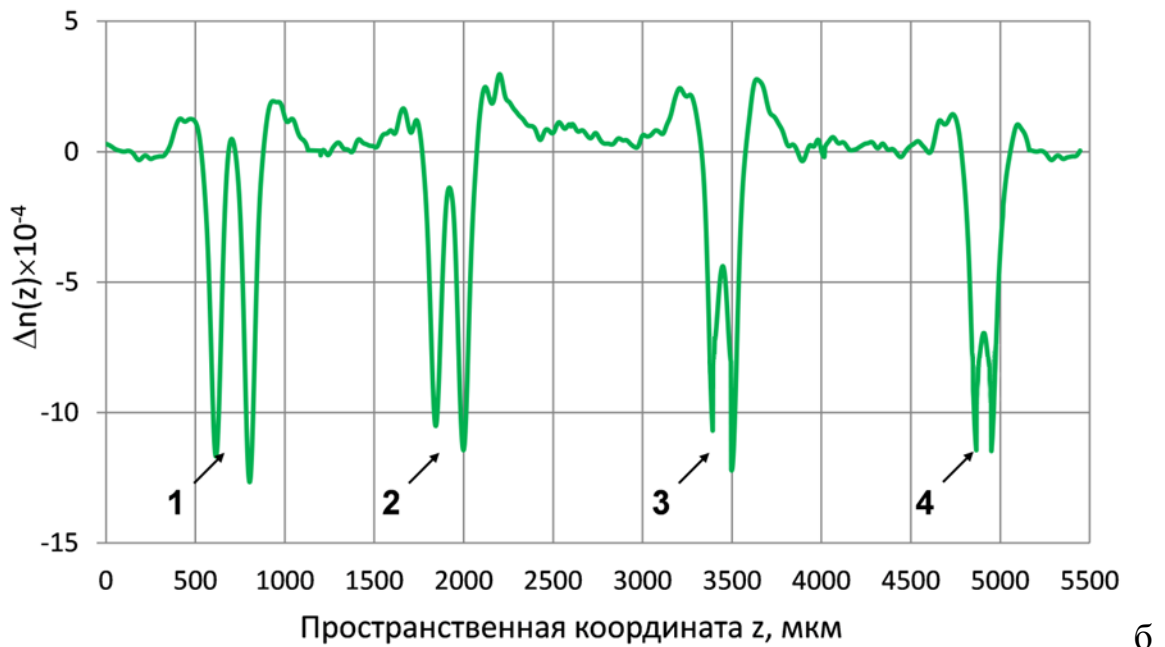
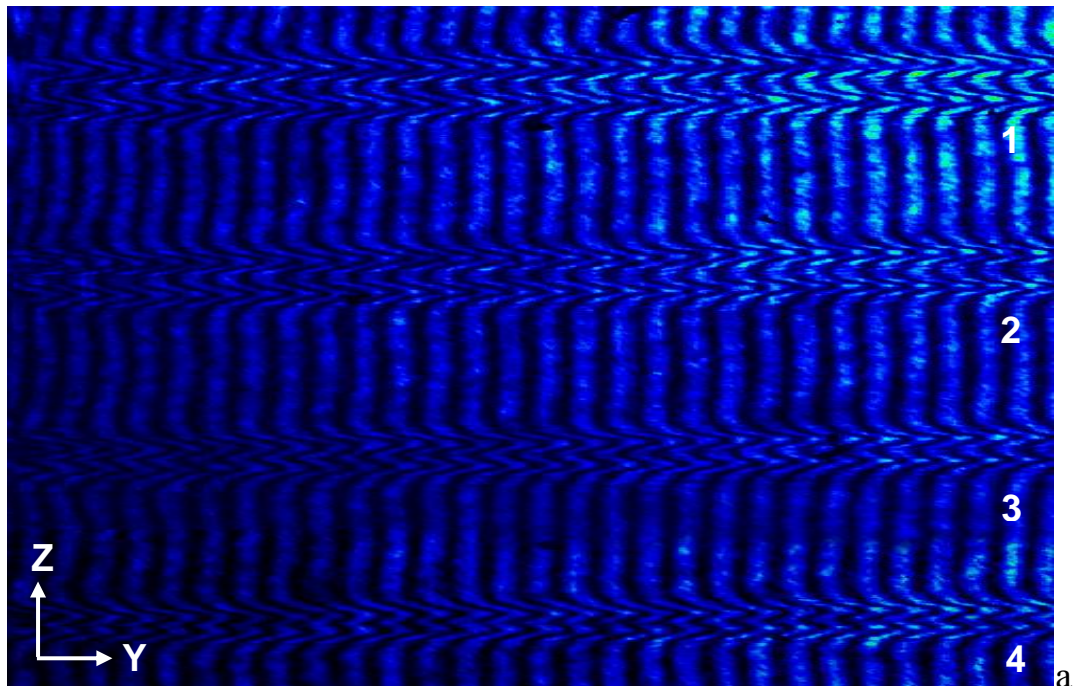


Рисунок 4.12 – Интерферограмма в области волноводных структур: а – после индуцирования структур с различным расстоянием между центрами экспонированных полос (1 – 200 мкм, 2 – 150 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 80 мкм); б – профиль показателя преломления вдоль оптической оси Z кристалла

Индукцированные 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. Перед формированием структур с заданными параметрами, была снята интерферограмма, которая необходима в качестве эталонного изображения для последующего восстановления пространственного профиля показателя преломления. Время экспонирования одной точки в формируемых структурах составило 10 секунд.

Из рисунка 4.12б видно, что профиль изменений показателя преломления в сформированных структурах имеет градиентный характер. В эксперименте 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 – $\Delta n \approx 5 \times 10^{-4}$. Центральную область условно можно считать сердцевинной, а прилегающие области – оболочкой сформированной волноводной структуры.

Как видно из результатов интерферометрических измерений (рисунок 4.12б), в сформированных волноводных структурах профили изменений показателя преломления $\Delta n(z)$ в направлении оси Z кристалла имеют градиентный характер. Полученные в результате обработки интерферограмм профили $\Delta n(z)$ можно аппроксимировать функцией супергаусса:

$$\Delta n(z) = \Delta n_e \cdot \exp\left(-\left[\frac{(z)^P}{2\sigma^2}\right]\right), \quad (4.1)$$

где Δn_e – приращение показателя преломления на оси сердцевинны; σ – коэффициент, задающий размах гауссианы; P – степень, в которую возводится аргумент экспоненты.

Выражение для распределения показателя преломления в сердцевине сформированных волноводных структур с учетом экспериментальных и аппроксимированных $\Delta n(z)$ вдоль оси Z кристалла можно представить в виде:

$$n(z) = n_1 + \Delta n(z), \quad (4.2)$$

где n_1 – показатель преломления материала в центре экспонированной области, являющейся оболочкой волноводной структуры.

При аппроксимации профиля $n(z)$ индуцированных структур с различной шириной из соотношения (4.1) подбирались параметры σ в пределах от 15×10^{-6} до 48×10^{-6} и P в пределах от 2,4 до 3,2. Результаты аппроксимированных и экспериментальных профилей $n(z)$ для структур с различной шириной приведены на рисунке 4.13. Красным цветом на графиках обозначены аппроксимированные кривые, черным – экспериментальные кривые.

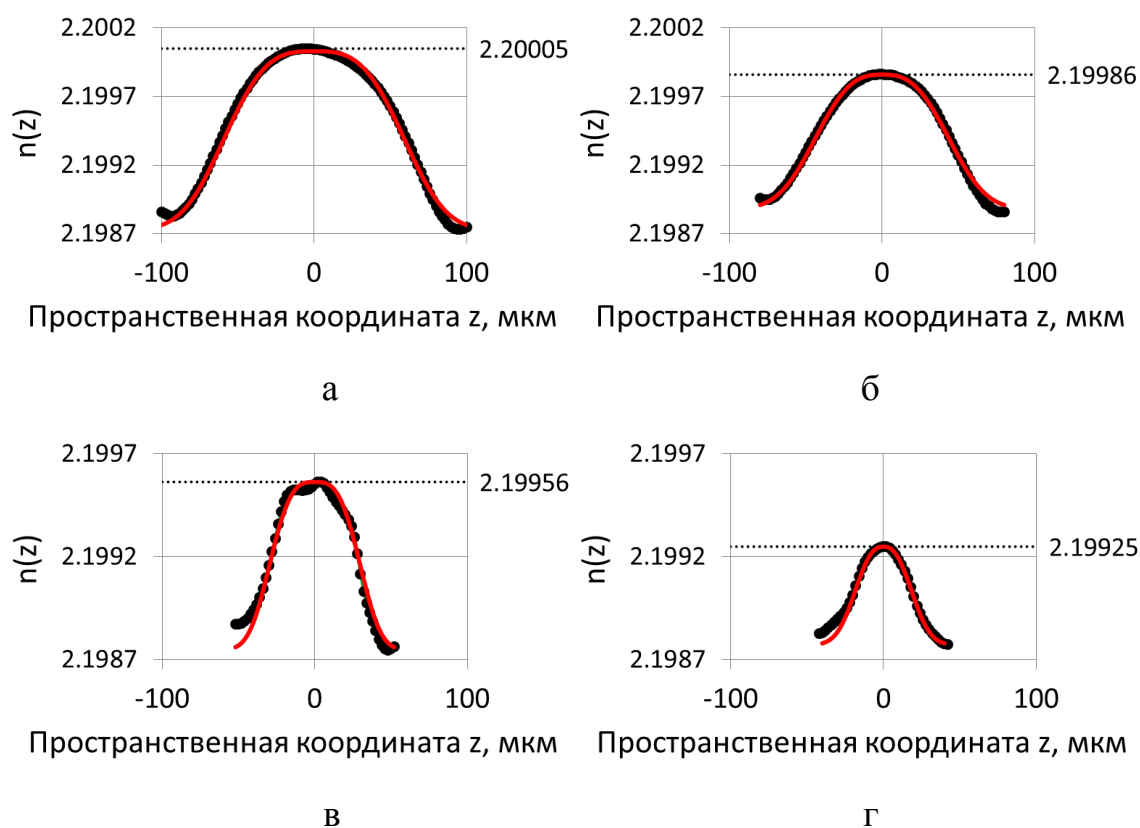


Рисунок 4.13 – Аппроксимированные и экспериментальные кривые $n(z)$ в волноводных структурах, индуцированных с различным расстоянием: а – волноводная структура с расстоянием между центрами экспонированных полос 200 мкм; б – 150 мкм; в – 100 мкм; г – 80 мкм

Локальное расположение сформированных структур исследовалось методом оптического зондирования при помощи коллимированного

светового поля. Изображения выходного торца кристалла в областях сформированных структур представлены на рисунке 4.14.

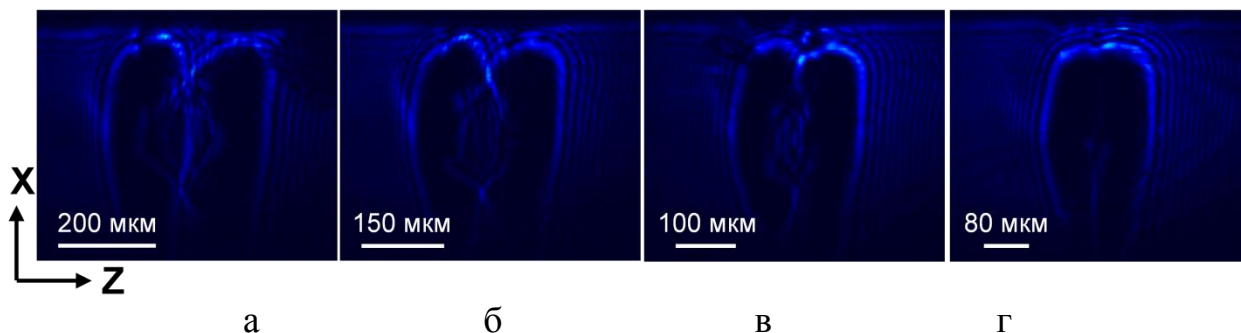


Рисунок 4.14 – Изображения выходного торца кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ в областях индуцированных волноводных структур при освещении коллимированным излучением: а – волноводная структура с расстоянием между центрами экспонированных полос 200 мкм; б – 150 мкм; в – 100 мкм; г – 80 мкм

Из рисунка 4.14 видно, что в наших экспериментах волноводные каналы в приповерхностной области формируются с различными поперечными характеристиками в зависимости от расстояния между центрами экспонированных областей.

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

Для исследования волноводного эффекта в сформированных структурах одним из способов ввода излучения является торцевой метод. В качестве источника излучения для ввода в сформированную структуру использовался He-Ne лазер с выходной мощностью 10 мВт. Мощность излучения, фокусированного на входной торец сформированной структуры, ослаблялась фильтром до 0,1 мВт. Схема установки для торцевого ввода излучения представлена на рисунке 4.15 [130-132].

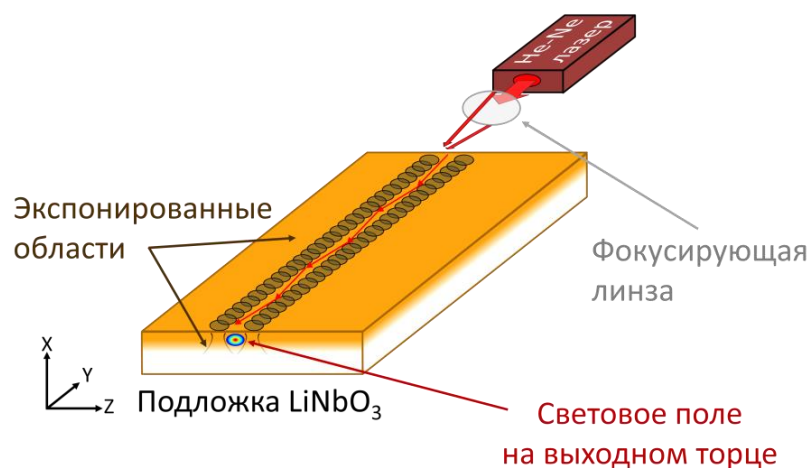


Рисунок 4.15 – Схема экспериментальной установки для торцевого ввода излучения в сформированные волноводные структуры

В экспериментах для торцевого ввода излучения диаметр фокусированного пучка на входной грани образца составлял ~ 50 мкм по уровню 0.1 максимальной интенсивности.

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 4.16. Из рисунка 4.16 видно, что форма светового пучка на выходе канала зависит от поперечных характеристик сформированных волноводных структур. Диаметр светового пучка вдоль горизонтальной оси сечения внутри первого волноводного канала составил 70 мкм, вдоль вертикальной – 192 мкм. В четвертом волноводном канале диаметр светового пучка существенно уменьшился по сравнению с первым и составил вдоль горизонтальной оси 28 мкм, вдоль вертикальной – 110 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.

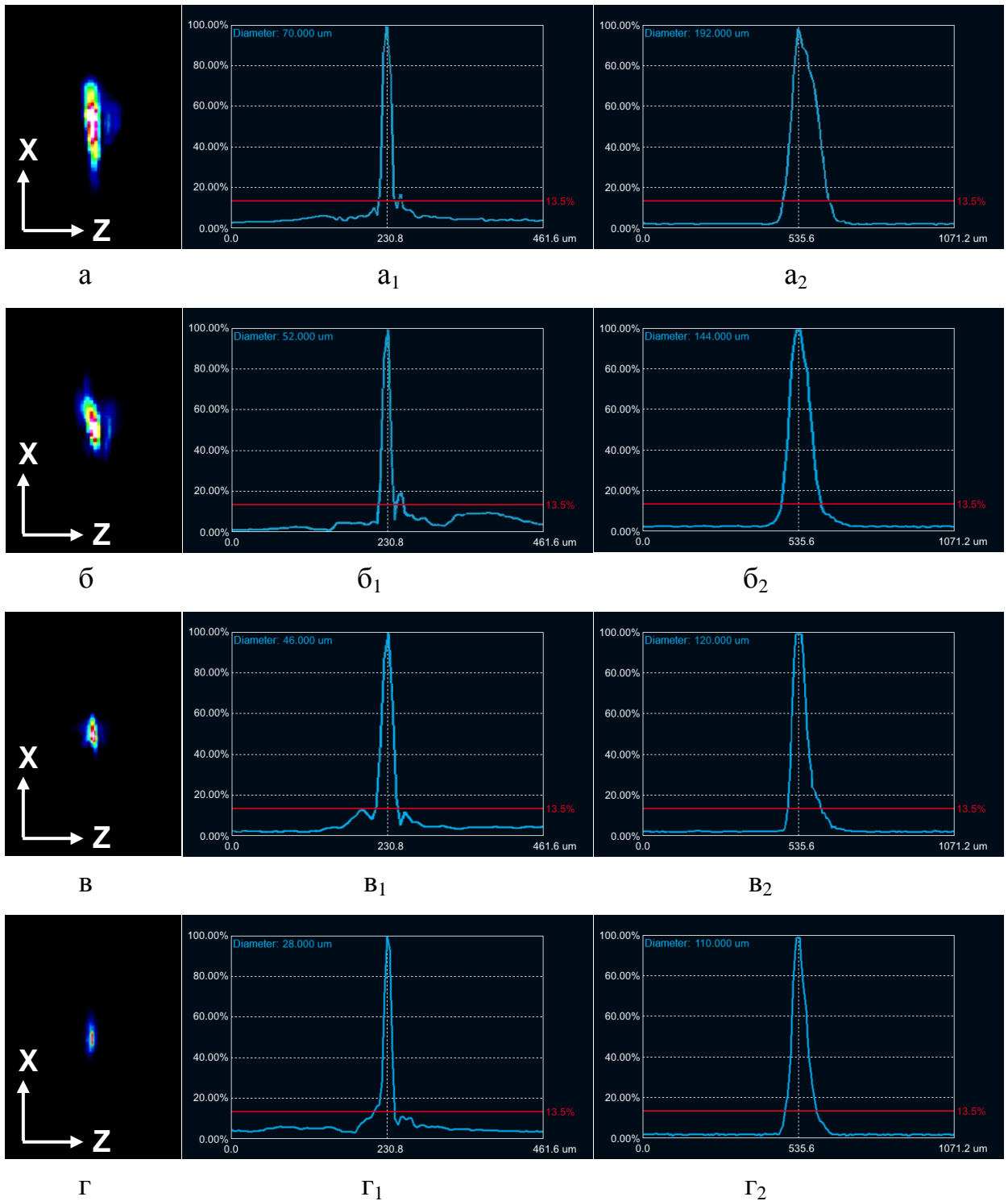


Рисунок 4.16 – Изображение светового поля на выходном торце кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ в области волноводной структуры, с расстоянием между центрами экспонированных полос: а – 200 мкм, б – 150 мкм; в – 100 мкм; г – 80 мкм; a_1 , b_1 , v_1 , Γ_1 – соответствующие им профили пучка вдоль оси Z кристалла; a_2 , b_2 , v_2 , Γ_2 – соответствующие им профили пучка вдоль оси X кристалла

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 уравнения в ВКБ-приближении (Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна) по формуле [11, 1]:

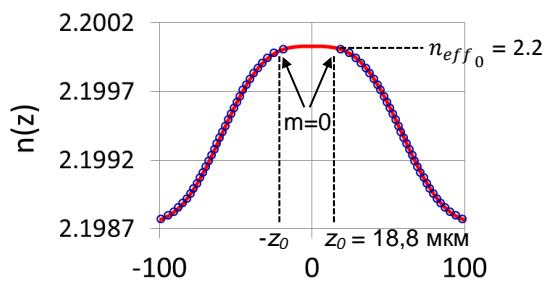
$$k \int_{-z_m}^{z_m} (n(z) - n_{eff_m})^2 dz = \pi m + \varphi_1 + \varphi_2, \quad (4.3)$$

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 .

На рисунке 4.17 темными точками отмечены волноводные моды m в структурах с разной шириной. Каждой моде соответствует своя величина эффективного показателя преломления n_{eff_m} и точка поворота z_m , в которой значения $n(z)$ и n_{eff_m} равны.

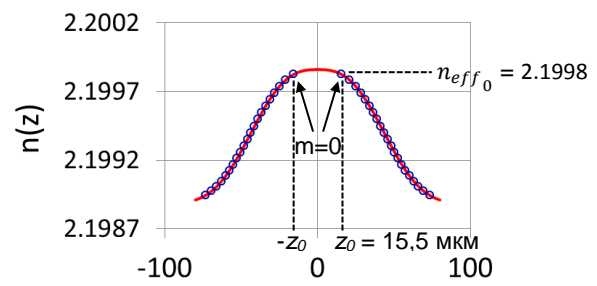
Рассчитанное по выражению (4.3) максимальное целое число мод в волноводной структуре с шириной 200 мкм $m = 32$, с шириной 150 мкм $m = 22$, с шириной 100 мкм $m = 9$, с шириной 80 мкм $m = 3$.

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 (рисунок 4.16).



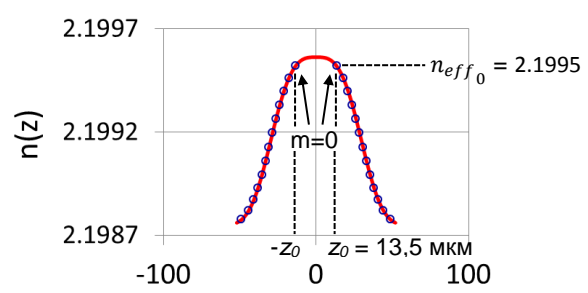
Пространственная координата z , мкм

а



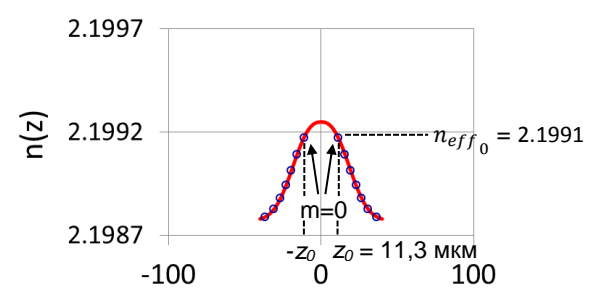
Пространственная координата z , мкм

б



Пространственная координата z , мкм

в



Пространственная координата z , мкм

г

Рисунок 4.17 –, Рассчитанные n_{eff_m} для волноводных мод m по аппроксимированным профилям $n(z)$ индуцированных с различным расстоянием волноводных структур: а – волноводная структура с расстоянием между центрами экспонированных полос 200 мкм; б – 150 мкм; в – 100 мкм; г – 80 мкм

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).

4.3 Выводы по разделу

По результатам, представленным в данной главе, сделаны следующие выводы:

1. 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.

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

3. 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 $\sim 10 \times 10^{-4}$.

4. 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 – $\text{NA} = 0,033$.

5. 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.

6. 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.

На основании полученных результатов сформулировано третье научное положение, выносимое на защиту: «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 ».

Заключение

Экспериментально исследована и продемонстрирована возможность реализации волноводных структур с различными характеристиками в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Исследовано влияние лазерного излучения на величину нелинейного оптического отклика поверхностно легированного ионами меди кристаллического образца ниобата лития X-среза при различных условиях экспонирования. Представленные результаты проведенных исследований показали, что величина и пространственный профиль индуцированных изменений в локально освещенной области имеет знакопеременный характер.

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 изменений 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 $\Delta\varphi \approx 3\lambda$. 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 сердцевиной 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.

Таким образом, формирование в поверхностно легированных кристаллах образцов ниобата лития волноводных структур может осуществляться методом поточечного индуцирования, а их исследование может проводиться различными способами при помощи одного аппаратно-программного комплекса. Это открывает перспективы для моделирования, проектирования, реализации и модификации многофункциональных интегрально-оптических схем, гибридных и полностью оптических устройств и приборов фотоники с перестраиваемыми характеристиками.

Результаты проведенных исследований были использованы при выполнении НИР на кафедре сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники:

– НИР «Преобразования Гауссовых и бездифракционных световых пучков в оптически индуцированных фотонных волноводных и дифракционных структурах в кристаллических средах с управляемой величиной и изменяемым знаком нелинейно-оптического отклика», выполняемой в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки России № 3.1110.2017/ПЧ (2017-2019 гг.) [133-135].

– НИОКР «Исследование фотонных волноводных структур, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития», выполняемой в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (2021 г.) [136].

– НИР «Самовоздействие и взаимодействие световых пучков в волноводных и дифракционных периодических структурах на ниобате лития и фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой», выполняемой в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», подпроект №8 «Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8» (2021-2022 гг.) [137, 138].

Результаты также использовались при разработке методических указаний [139, 140] и лабораторного практикума [141] для внедрения в учебный процесс кафедры СВЧиКР по образовательным программам магистратуры по дисциплине «Волноводная фотоника и нанооптика».

Список литературы

1. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М: Радио и связь, 1990. 224 с.
2. Liu Y., Yang H. High-Speed Optical Transceivers. Integrated Circuits Designs and Optical Devices Techniques / ed. by Tjan Kwang Wei. Singapore: World Scientific Publishing, 2006. 228 p.
3. Бутусов М.М. Галкин С.Л., Оробинский С.П. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987. 328 с.
4. Интегральная оптика / под ред. Т. Тамира; пер. с англ. В.А. Сычугова и К.Ф. Шипилова; под ред. Т.А. Шмаонова. М.: Мир, 1978. 344 с.
5. Петров М.П. Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 315 с.
6. Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология / пер. с англ. В.Ш. Берикашвили, А.Б. Мещерякова; под ред. В.А. Сычугова. М.: Мир, 1985. 384 с.
7. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // Appl. Phys. Rev. October 2015. Vol. 2, No 4. P. 040603-1–040603-25. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4931601> (дата обращения: 10.09.2021).
8. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // Appl. Phys. B. 1998. Vol. 67. P. 131–150. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1007/s003400050485> (дата обращения: 10.09.2021).
9. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106, No 8. P. 081101-1–081101-29. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3216517> (дата обращения: 10.09.2021).
10. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.

11. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах: монография / С.М. Шандаров [и др.]. Томск: ТУСУР, 2012. 242 с. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006756301> (дата обращения: 10.09.2021).
12. Properties of Lithium Niobate / ed. by K.K. Wong. USA: Northstar Photonics, 2002. 429 p.
13. Volk T., Wöhlecke M. Lithium Niobate: Defects, Photorefraction and Ferroelectric Switching. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 247 p.
14. Максименко В.А., Сюй А.В., Ю.М. Карпец. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. М.: Физматлит, 2008. 96 с.
15. Тренихин П.А., Шандаров В.М., Чен Ф. Исследование возможности продольной оптической модуляции одномерных фоторефрактивных фотонных решеток в ниобате лития. Доклады ТУСУР. 2011. № 2, Т. 24 (2). С. 131–134. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://journal.tusur.ru/storage/47147/131.pdf?1467613235> (дата обращения: 10.09.2021).
16. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization / A. Kanshu [et. al.] // Appl. Phys. B. 2009. Vol. 95, No 3. P. 537–543. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3465-4> (дата обращения: 10.09.2021).
17. Jia Y., Chen F. Compact solid-state waveguide lasers operating in the pulsed regime: a review // Chin. Opt. Lett. 2019. Vol. 17, No 1. P. 012302-1–012302-23. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.3788/COL201917.012302> (дата обращения: 10.09.2021).
18. Chen F., Vázquez de Aldana J. R. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining // Laser Photonics Rev. 2013. Vol. 8, No 2. P. 1–26. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201300025> (дата обращения: 10.09.2021).

19. Distributed feedback-distributed Bragg reflector coupled cavity laser with a Ti:(Fe):Er:LiNbO₃ waveguide / B.K. Das [et. al.] // Opt. Letters. 2004. Vol. 29. P. 165–167. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1364/OL.29.000165> (дата обращения: 10.09.2021).

20. Quasi-one-dimensional photonic lattices and superlattices in lithium niobate: linear and nonlinear discrete diffraction of light / S.A. Davydov [et. al.] // Phys. of Wave Phen. 2010. Vol. 18, No. 1. P. 1–6. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.3103/s1541308x10010012> (дата обращения: 10.09.2021).

21. Photorefractive direct laser writing / L. Vittadello [et. al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 125103-1–125103-9. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/12/125103> (дата обращения: 10.09.2021).

22. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 573 с.

23. Urick V.J., Williams K.J., McKinney J.D. Fundamentals of Microwave Photonics. Hoboken, NJ: Wiley, 2015. 467 p.

24. Toney J.E. Lithium niobate photonics. Boston-London: Artech House, 2015. 268 p.

25. Угнер Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы / пер с англ., под ред. В.В. Шевченко. М.: Мир, 1980. 640 с.

26. Волноводная оптоэлектроника / пер с англ., под ред. Т.Тамира. М.: Мир, 1991. 575 с.

27. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008 г. 143 с.

28. Сидоров А.И., Никоноров Н.В. Материалы и технологии интегральной оптики: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 г. 107 с.

29. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. 197 с.

30. Введение в оптоэлектронику [Электронный ресурс]: сайт Банка лекций. Учебные материалы ОКСО 210000. Электронная техника, радиотехника и связь. Лекции для преподавателей и студентов ВУЗ. URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/vvedenie-v-optoelektroniku/3-opticheskaya-obrabotka-informatsii/3-1-modulyatory-opticheskogo-izlucheniya> (дата обращения: 10.09.2021).

31. Волоконная оптика и приборостроение [Электронный ресурс]: сайт Научной библиотеки избранных естественно-научных изданий. URL: https://scask.ru/m_book_vol.php?id=46 (дата обращения: 10.09.2021).

32. Афанасьев В.М., Пономарев Р.С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха–Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4, № 4. С. 337–360. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2017.04.08> (дата обращения: 10.09.2021).

33. Шамрай А.В. Интегрально-оптический модулятор для широкополосных систем телекоммуникации и радиофотоники: соглашение 14.604.21.0055 на период 2014–2016 гг. / А.В. Шамрай [Электронный ресурс]: официальный сайт Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2021 годы». URL: https://fcpir.ru/upload/iblock/a4f/corebofs000080000kfdbuu3fc58me3c_poster.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

34. Design and implementation of an integrated optical coupler by femtosecond laser written-waveguides in LiNbO₃ / D.A. Presti [et. al.] // Opt. and Las. in Engin. 2020. Vol. 126. P. 105860-1–105860-5. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105860> (дата обращения: 10.09.2021).

35. Брэгговский волновод: антизеркальное отражение и замедление света / Г. Г. Козлов [и др.] // Опт. и Спектр. Том 110, № 3. 2011. С. 460–467.

[Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15639018> (дата обращения: 10.09.2021).

36. Physics Optics & Photonics Metamaterials and transformation optics control light on a microchip [Электронный ресурс]: сайт научно-технических новостей Phys.org. URL: <https://phys.org/news/2012-11-metamaterials-optics-microchip.html> (дата обращения: 10.09.2021).

37. Chauhan N. Visible light photonic integrated Brillouin laser / N. Chauhan [et. al.] // Nat. Commun. 2021. Vol. 12 (4685). P. 1–8. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24926-8> (дата обращения: 10.09.2021).

38. Blumenthal D.J. et al. Frequency stabilized lasers for coherent fiber interconnects in the datacenter (Invited talk) // 2019 IEEE Optical Interconnects Conference (OI) (IEEE, 2019). Santa Fe, USA: IEEE, 2019. P. 1–2. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1109/OIC.2019.8714367> (дата обращения: 10.09.2021).

39. Qi Y., Li Yang. Integrated lithium niobate photonics // Nanophotonics. 2020. Vol. 9, No 6. P. 1287–1320. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0013> (дата обращения: 10.09.2021).

40. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach–Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond / M. He [et. al.] // Nat Photonics. 2019. Vol. 13. P. 359–364. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0378-6> (дата обращения: 10.09.2021).

41. Femtosecond Laser Inscribed Novel Polarization Beam Splitters Based on Tailored Waveguide Configurations / B. Zhang [et. al.] / Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39, No. 5. P. 1438–1443. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3038438> (дата обращения: 10.09.2021).

42. 100-GBd Waveguide Bragg Grating Modulator in Thin-Film Lithium Niobate / D. Pohl [et. al.] // IEEE Photonics Technology Letters. 2021 Vol. 33,

No. 2. P. 85–88. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3044648> (дата обращения: 10.09.2021).

43. Thin Film Lithium Niobate Electro-Optic Modulator for 1064 nm Wavelength / N. Jagatpal [et. al.] // IEEE Photonics Technology Letters. 2021. Vol. 33, No. 5. P. 271–274. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3056913> (дата обращения: 10.09.2021).

44. Integrated Thermally Tuned Mach-Zehnder Interferometer in Z-Cut Lithium Niobate Thin Film / G. Chen [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. 2021. Vol. 33, No. 13. P. 664–667. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3086850> (дата обращения: 10.09.2021).

45. Saleh E. A. B., M.C. Teich. Lithium niobate photonics: 2nd edition. Toronto: Wiley-Interscience, 2007. 1200 p.

46. Fowles G. R. Introduction to Modern Optics: 2nd edition. Dover Publications, 1989. 336 p.

47. Nwajana A.O. Practical Approach to Substrate Integrated Waveguide (SIW) Diplexer: Emerging Research and Opportunities: 1st edition / ed. by K.S.K. Yeo. IGI Globa, 2020. 171 p.

48. Tong X.C. Advanced Materials for Integrated Optical Waveguides Springer, 2013. 830 p.

49. Grine F. Design of Microstrip to Substrate Integrated Waveguide Transition. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 52 p.

50. Shvartsburg A.B. Non-Linear Pulses in Integrated and Waveguide Optics: 1st edition. Clarendon Press, 1993. 240 p.

51. Стурман, Б. И., В.М. Фридкин. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления М.: Наука, 1992. 208 с.

52. Воронов В.В., Кузьминов Ю.С., Осико В.В.. Оптически индуцированное изменение показателя преломления в сегнетоэлектрических кристаллах и его использование для создания обратимой голографической памяти (Обзор) //

Квантовая электроника. 1976. Том 3, № 10. С.2101–2126.
[Электронный ресурс]: электронная версия. URL:
<http://www.mathnet.ru/links/e78ac29a182bb6fb44593e15eabf7252/qe11902.pdf>
(дата обращения: 10.09.2021).

53. Эффект фоторефракции в чистых и легированных кристаллах ниобата лития – стронция / Т.Р. Волк [и др.] // Автотметрия. 1980. Том 1. С. 46–55. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL:
https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/1980/1/46-55.pdf
(дата обращения: 10.09.2021).

54. Фотоэлектрические и фоторефрактивные свойства кристаллов ниобата бария-стронция, легированных церием / В.В. Воронов [и др.] // Квантовая электроника. 1979. Том 6, № 9. С. 1993–1999. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL:
<http://www.mathnet.ru/links/e0a3058052cc5dcf96f1b02cde057031/qe9478.pdf>
(дата обращения: 10.09.2021).

55. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития: монография / М.Н. Палатников, [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 241 с.

56. Палатников М.Н., Макарова О.В., Сидоров Н.В. Ростовые и технологические дефекты кристаллов ниобата лития различного химического состава: атлас. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2018. 89 с.

57. Lithium Niobate Optical Waveguides and Microwaveguides / Courjal N. [et. al.] // Emerging Waveguide Technology. 2018. Chapter 8. P. 153-174. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL:
<https://doi.org/10.5772/intechopen.76798> (дата обращения: 10.09.2021).

58. This is Science: 3D электронная литография в массы [Электронный ресурс]: сайт для ИТ-специалистов Habr. URL:
<https://habr.com/ru/post/236181/> (дата обращения: 10.09.2021).

59. High aspect ratio lithium niobate ridge waveguides fabricated by optical grade dicing / N. Courjal [et. al.] // J. of Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44,

№ 30. 305101-1–305101-7. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/30/305101> (дата обращения: 10.09.2021).

60. Diamond-blade diced trapezoidal ridge waveguides in YCOB crystal for second harmonic generation / C. Chen [et. al.] // Opt. and Las. Tech. 2020. Vol. 126. 106128-1–106128-6. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106128> (дата обращения: 10.09.2021).

61. Evanescent coupling in arrays of type II femtosecond laser-written waveguides in bulk X-cut lithium niobate / M. Heinrich [et. al.] // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93, No 10. 101111-1–101111-3. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2981801> (дата обращения: 10.09.2021).

62. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering / Q. Zhang [et. al.] // Photonics Research. 2019. Vol. 7, No. 5. P. 503-507. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000503> (дата обращения: 10.09.2021).

63. Tarjanyi N., Kacik D. Lithium Niobate-Based Integrated Photonics Utilizing Photorefractive Effect // Communications – Sci. Lett. of the Un. of Zilina. 2017. Vol. 19, No 3. P. 77-82.

64. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны — от волоконной оптики до фотонных кристаллов. М.: Физматлит, 2005. 648 с.

65. Staebler D. L., Phillips W. Fe-doped LiNbO₃ for Read–Write Applications // Appl. Opt. 1974. Vol. 13, No 4. P. 788–794. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1364/ao.13.000788> (дата обращения: 10.09.2021).

66. Phillips W., Amodei J.J., Staebler D.L. Optical and holographic storage properties of transition metal doped lithium niobate // RCA Rev. 1972. Vol. 33, No 3. P. 94-109.

67. Observation of dark spatial photovoltaic solitons in planar waveguides in lithium niobate / V. Shandarov [et. al.] // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2000. Vol. 2.

P. 500–503. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1088/1464-4258/2/5/325> (дата обращения: 10.09.2021).

68. Chen F. Micro- and submicrometric waveguiding structures in optical crystals produced by ion beams for photonic applications // *Las. & Ph. Rev.* 2012. Vol. 6, No 5. P. 622–640. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201100037> (дата обращения: 10.09.2021).

69. Surface-acoustic-wave properties of MgO-doped LiNbO₃ single crystals measured by line-focus-beam acoustic microscopy / J. Kushibiki [et. al.] // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85, No 11. P. 7863–7868. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1063/1.370597> (дата обращения: 10.09.2021).

70. Оптически индуцированные канальные волноводные структуры с пространственной модуляцией параметров в поверхностном слое ниобата лития / А.Д. Безпалый [и др.] / Ежемесячный научный журнал "Известия высших учебных заведений. Физика". 2019. Т. 62, № 3. С. 3-8. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.17223/00213411/62/3/3> (дата обращения: 10.09.2021).

71. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. Optical solitons: from fibers to photonic crystals. Academic Press, 2003. 540 p.

72. Шандаров, В. М. Самовоздействие световых полей в волноводных фотонных структурах на основе электрооптических кристаллов // *Изв. вузов. Физика.* 2015. Т. 58, № 10. С. 13-21.

73. Безпалый 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.* Декабрь 2015. №4 (38). С. 86-90. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25436016> (дата обращения: 10.09.2021).

74. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Waveguide and Diffraction Properties of Optically Induced Elements in Photorefractive Surface Layers of Lithium Niobate // *Journal of Applied Spectroscopy.* 2016. Vol. 83, No

6-16. Р. 193-194. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29781493> (дата обращения: 10.09.2021).

75. Безпальный А.Д., Верхотуров А.О., Шандаров В.М. Оптическое формирование канальных волноводов и планарных дифракционных решеток в фоторефрактивном приповерхностном слое ниобата лития // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2016. № 5. С. 1-4 (165308). [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/ru/abstract/2016/5/165308> (дата обращения: 10.09.2021).

76. Bezpaluy A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Waveguide and Diffraction Elements Optically Generated in Surface-doped Layers of Ferroelectric Lithium Niobate // Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop, ISAF/ECAPD/PFM. Darmstadt, August 21-25, 2016. 4 p. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://app.webofknowledge.com/author/#/record/13454976?lang=ru_RU&SID=C139RJCcibhJKIbYrKZ (дата обращения: 10.09.2021).

77. Безпальный 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 Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (АПП-2017): сборник трудов. Томск: STT, 2017. С. 253-256. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://apr.tsu.ru/apr2017archive/?lang=ru> (дата обращения: 10.09.2021).

78. Безпальный А.Д., Шандаров В.М. Влияние поточечного индуцирования на продольную однородность волноводных структур в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем // XXX Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике: материалы школы-симпозиума / под ред. канд. физ.-мат. наук И. В. Алексеенко. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2017. С. 136-138.

79. Безпальный А.Д., Шандаров В.М. Исследование формирования оптически индуцированных канальных волноводов вдоль «нефоторефрактивных» направлений кристалла ниобата лития // XIII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления»: материалы докладов. Томск: В-Спектр, 2017. С. 182-184. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://storage.tusur.ru/files/90830/2017-1.pdf> (дата обращения: 10.09.2021).

80. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate // Proceedings of SPIE - Photonics, Devices, and Systems VII. Prague, August 28-30, 2017. Vol. 10603. P. 1-6 (1060300). [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2292320> (дата обращения: 10.09.2021).

81. Bezpaly A.D., Shandarov V.M. Optical formation of waveguide elements in photorefractive surface layer of a lithium niobate sample // Physics Procedia. 2017. 86С. P. 166-169. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: [https://doi.org/10.1016/S1875-3892\(17\)30043-3](https://doi.org/10.1016/S1875-3892(17)30043-3) (дата обращения: 10.09.2021).

82. Bezpaly A.D., Perin A.S., Shandarov V.M. Channel Waveguides and Their Systems Optically Induced in Photorefractive Surface Area of Lithium Niobate // 5th International School and Conference Saint-Petersburg OPEN 2018. St. Petersburg: Academic University Publishing. 2018. Vol. 5. P. 303-304. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://ru.spbopen.spbau.com> (дата обращения: 10.09.2021).

83. Исследование формирования канальных волноводных структур с различной топологией в приповерхностной области электрооптических кристаллов / Безпальный А.Д. [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018»: сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 1. С. 79-83. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL:

http://geosib.sgugit.ru/...Sborniki/2018/Сибоптика_том_1.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

84. Безпальный А.Д. Оптическое индуцирование и исследование волноводных структур с поперечной и продольной неоднородностью параметров в приповерхностной области электрооптических кристаллов // XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 24–27 апреля 2018 г.: сборник трудов. Томск, 2018. С. 30-32. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://conf-prfn.org/PreviousMaterials.aspx> (дата обращения: 10.09.2021).

85. Безпальный А.Д. Формирование канальных волноводных структур с различной топологией в фоторефрактивном кристалле ниобата лития // Сборник избранных статей XXIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научной сессии ТУСУР», Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. Томск: В-Спектр, 2018 Ч. 2. С. 227-230. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://storage.tusur.ru/files/115522/2018_2_i.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

86. Bezpaly A.D. Channel Waveguides of Photonic Devices Optically Induced in Lithium Niobate with Surface-doped Layer // Сборник избранных статей XXIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научной сессии ТУСУР»: Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. Томск: В-Спектр, 2018 Ч. 3. С. 252-254. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://storage.tusur.ru/files/115523/2018_3_i.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

87. 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 // European Conference on Applications of Polar Dielectrics ECAPD-2018. Moscow: MIREA, 2018. Vol. 2018. P. 68.

88. 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. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/2237/4963>

(дата обращения: 10.09.2021).

89. Беспалый А.Д., Мандель А.Е., Шандаров В.М. Пространственная модуляция параметров канальных волноводных структур, оптически индуцированных в фоторефрактивном кристалле ниобата лития // X Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2018: сборник трудов / под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф.С.А. Козлова. СПб: Университет ИТМО, 2018. С. 347-349. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: http://conf-bpo.ifmo.ru/files/2018_materials.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

90. Беспалый А.Д., Перин А.С., Шандаров В.М. Исследование пространственной модуляции параметров канальных волноводных структур, оптически индуцированных в кристалле ниобата лития с фоторефрактивной поверхностью // Международная конференция «Физика.СПб»: сборник тезисов. С. Петербург, 2018. С. 152-154. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://physica.spb.ru/data/uploads/physica2018theses.html> (дата обращения: 10.09.2021).

91. Bezpaly A.D. Laser formation of channel waveguides in photorefractive lithium niobate for integrated optical circuits and photonic devices // XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления»: материалы докладов. Томск: В-Спектр, 2018. С. 280-282. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://storage.tusur.ru/files/122612/2018-2_.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

92. Беспалый А.Д., Мандель А.Е., Быков В.И. Исследование канальных волноводных структур с пространственно-модулированными параметрами, индуцированных в поверхностном слое кристалла ниобата // XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления»: материалы докладов. Томск: В-Спектр, 2018. С. 135-

136. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://storage.tusur.ru/files/122611/2018-1_.pdf (дата обращения: 10.09.2021)

93. Безпальный А.Д., Шандаров В.М., Мандель А.Е. Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем // Доклады ТУСУР. Декабрь 2018. Т. 21, №3. С. 14-16. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2018-21-3-14-16> (дата обращения: 10.09.2021).

94. Bezpalyy 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). [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1124/5/051022> (дата обращения: 10.09.2021).

95. Bezpalyy A.D., Verkhoturov A.O., 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. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1080/00150193.2017.1360106> (дата обращения: 10.09.2021).

96. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Перевод с английского. М.: Наука, 1970. 856 с.

97. Калитеевский, Н. И. Волновая оптика: учебное пособие. 5-е изд. СПб: Лань, 2008. 480 с.

98. Origin of thermal fixing in photorefractive lithium niobate crystals / K. Buse [et. al.] // Phys. Rev. B. 1997. V. 56, No 3. P. 1225-1235. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.1225> (дата обращения: 10.09.2021).

99. Visualizations of Light-induced Refractive Index Changes in Photorefractive Crystals Employing Digital Holography / J. Zhao [et. al.] // Chin. Phys. Lett. 2003. Vol. 20, No 10. P. 1748-1751. [Электронный ресурс]:

электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1088/0256-307X/20/10/327> (дата обращения: 10.09.2021).

100. A method for probing the refractive index change in photorefractive crystals / M. Fu [et. al.] // Opt. Appl. 2013. Vol. XLIII, No. 4. P. 731-737. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.5277/oa130409> (дата обращения: 10.09.2021).

101. Low-spatial-frequency refractive-index changes in iron-doped lithium niobate crystals upon illumination with a focused continuous-wave laser beam / K. Buse [et. al.] // J. Opt. Soc. Am. B. April 2000. Vol. 17, No. 4. P. 586-592. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1364/josab.17.000586> (дата обращения: 10.09.2021).

102. Tarjányi N. The Photorefractive Response of LiNbO₃:Fe:Mn Crystal depending on Electrical Properties of its Surroundings // Acta Electr. et Inform. 2013. Vol. 13, No 1. P. 37–40. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.2478/aeei-2013-0007> (дата обращения: 10.09.2021).

103. Tarjányi N., Turek I. Influence of surroundings on photorefractive effect in lithium niobate crystals // Phys. B. 2012. Vol. 407, No 21. P. 4347–4353. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.07.031> (дата обращения: 10.09.2021).

104. Formation of Dynamic Photorefractive Gratings in a LiNbO₃:Cu Surface-Doped Crystal / К.М. Мамбетова [et. al.] // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 126, No 6. P. 781-786. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1134/S0030400X1906016X> (дата обращения: 10.09.2021).

105. Qian H., Xiao Y., Liu Z. Giant Kerr response of ultrathin gold films from quantum size effect // Nature Communications. 2016. Vol. 7. P. 13153-1–13153-6. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms13153> (дата обращения: 10.09.2021).

106. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam / M. Sheik-Bahae [et. al.] // IEEE J. Quantum Electron. 1990. Vol. 26. P. 760–769. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1109/3.53394> (дата обращения: 10.09.2021).

107. Z-scan technique [Электронный ресурс]: сайт Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Z-scan_technique (дата обращения: 10.09.2021).

108. Ptychographic analysis of the photorefractive effect in LiNbO₃:Fe / C. Bernert [et. al.] // Opt. Express. Vol. 25, No 25. P. 31640–31649. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1364/oe.25.031640> (дата обращения: 10.09.2021).

109. The Photorefractive Effect in LiNbO₃ at High Light Intensity / O. Althoff [et. al.] // Physica Status Solidi (a). 1991. Vol. 128, No 1. P. K41–K46. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1002/pssa.2211280138> (дата обращения: 10.09.2021).

110. Optically Induced Channel Waveguide Structures with Spatial Modulation of Parameters in the Surface Layer of Lithium Niobate / A.D. Bezpaly [et. al.] // Rus. Phys. J. July 2019. Vol. 62, No 3. P. 387-392. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01724-w> (дата обращения: 10.09.2021).

111. Изменения показателя преломления, индуцированные в поверхностном слое кристалла ниобата лития при формировании канальных волноводных структур для устройств оптоэлектроники / А.Д. Безпалый [и др.] // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, №4. С. 33-36. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-4-33-36> (дата обращения: 10.09.2021).

112. Безпалый А.Д. Модуляция показателя преломления в поверхностном слое электрооптических кристаллов при оптическом индуцировании канальных волноводных структур // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 23–26 апреля 2019 г.: сборник

трудов. Томск, 2019. С. 35-37. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: http://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2019_vol_7.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

113. Bezpaly A.D. Investigation of complicated optical elements based on channel waveguides optically induced in photorefractive lithium niobate for integrated photonic circuits // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 частях. Томск: В-Спектр, 2019. Ч. 4. С. 80-182. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://storage.tusur.ru/files/127274/2019_4.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

114. Безпалый А.Д. Исследование модуляции показателя преломления в приповерхностном слое ниобата лития при поточечном индуцировании канальных волноводов // Сборник избранных статей XXIV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научной сессии ТУСУР», Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 2 ч. Томск: В-Спектр, 2019. Ч. 1. С. 187-189. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: https://storage.tusur.ru/files/127275/rinc2019_1.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

115. Безпалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Индуцированные изменения показателя преломления в поверхностном слое ниобата лития при оптическом формировании канальных волноводных структур // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова / под общей редакцией канд. физ.-мат. наук А.Н. Калиша. Москва, 26-31 мая 2019 г. Москва: Из-во МГУ, 2019. Ч.6. С. 17-19. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://waves.phys.msu.ru/files/docs/2019/thesis/Section6.pdf> (дата обращения: 10.09.2021).

116. Безпалый А.Д. Оптически индуцированные изменения показателя преломления в поверхностном слое ниобата лития при поточечном

формировании канальных волноводных структур // 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. 132.

117. Беспалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптическое индуцирование канальных волноводов с модуляцией показателя преломления в поверхностном слое кристалла ниобата лития // Актуальные проблемы радиофизики: VIII Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 1–4 октября 2019 г. Сборник трудов. Томск: Издательский дом ТГУ, 2019. С. 393-395. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: http://apr.tsu.ru/wp-content/uploads/2019/10/Sbornik_APR_2019.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

118. Беспалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Формирование канальных волноводных структур с модуляцией показателя преломления в поверхностном слое ниобата лития // 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. 161-163. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: http://conf-bpo.ifmo.ru/files/2019_materials.pdf (дата обращения: 10.09.2021).

119. Исследование изменений показателя преломления в поверхностном слое кристалла ниобата лития при оптическом индуцировании канальных волноводных структур / А.Д. Беспалый [и др.] // Международная конференция «Физика.СПб»: сборник тезисов. С. Петербург, 2019. С. 275-276. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://physica.spb.ru/archive/physica2019/> (дата обращения: 10.09.2021).

120. Bezpalyy A.D. Refractive index changes induced in the surface layer of lithium niobate during the channel waveguide formation // Материалы докладов XV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. Томск: В-

Спектр, 2019. Ч. 2. С. 228-230. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://storage.tusur.ru/files/131947/essu-19-part-2.pdf> (дата обращения: 10.09.2021).

121. Беспалый 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 Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. Томск: В-Спектр, 2019. Ч. 1. С. 134-135. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://storage.tusur.ru/files/131948/essu-19-part-1.pdf> (дата обращения: 10.09.2021).

122. Беспалый 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. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.15372/AUT20220206> (дата обращения 01.05.2022).

123. 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 // Optoelectron. Instrument. Proc. 2022. Vol. 58. P. 147–153. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://doi.org/10.3103/S8756699022020017> (дата обращения: 01.10.2022).

124. Визуализатор волнового фронта: свид. 2021661646 Рос. Федерация. №2021660493/69 / А.Д. Беспалый, В.В. Капустин, А.Е. Мандель; заявл. 07.07.2021; опубл. 14.07.2021. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://fips.ru/EGD/8370d7dd-4cbb-4092-85b3-a68a2cd95ab1> (дата обращения: 10.09.2021).

125. Поперечная мода - Transverse mode [Электронный ресурс]: сайт Wikipedia. URL: https://star-wiki.ru/wiki/Transverse_mode (дата обращения: 10.09.2021).

126. Безпалый А.Д. Пространственное распределение изменений показателя преломления, индуцированных при формировании канальных волноводов в поверхностно легированном кристалле ниобата лития / А.Д. Безпалый // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 21–24 апреля 2020 г.): в 7 томах. IT-технологии и электроника / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. Т. 7. С. 26-28.

127. Bezpaly A.D. Spatial profile of refractive index change induced during the waveguide formation in the surface-doped lithium niobate // Научная сессия ТУСУР–2020: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 мая 2020 г.: в 3 частях. Томск: В-Спектр, 2020. Ч. 3. С. 239-242.

128. Безпалый А.Д. Исследование профиля показателя преломления, измененного при индуцировании канальных волноводных структур в поверхностном слое кристалла ниобата лития // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 25–27 мая 2020 г.: в 2 частях. Томск: В-Спектр, 2020. Ч. 1. С. 205-208.

129. Безпалый А.Д., Мандель А.Е., Быков В.И. Визуализация изменений показателя преломления, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. Томск: В-Спектр, 2021. Ч. 1. 356 с. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://storage.tusur.ru/files/150971/ESSU-2021-chast2.pdf>

130. Безпалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптические волноводные структуры, индуцированные в кристалле ниобата лития с поверхностным легированием // XXXII Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике: материалы школы-симпозиума / под ред. д.ф.-м.н. Петров Н.В. СПб: Университет ИТМО, 2022. С. 68-69.

131. Беспалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Волноводные структуры, индуцированные лазерным излучением в поверхностно легированном кристалле ниобата лития // XXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022»), под общей редакцией канд. физ.-мат. наук А.Н. Калиша. М., 2022. Ч. 2., С. 14-15. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <http://waves.phys.msu.ru/files/docs/2022/thesis/Section2.pdf>

132. Беспалый А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптические волноводные структуры оптоэлектронных устройств, индуцированные в поверхностном слое кристалла ниобата лития // Физика.СПб: тезисы докладов международной конференции, Санкт-Петербург. 17-21 октября 2022. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 319-321.

133. Преобразования Гауссовых и бездифракционных световых пучков в оптически индуцированных фотонных волноводных и дифракционных структурах в кристаллических средах с управляемой величиной и изменяемым знаком нелинейно-оптического отклика: отчет о НИР (промежуточный, этап 1) / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; рук. Шандаров В.М. исполн.: Беспалый А.Д., [и др.]. Томск, 2018. 117 с. № ГР АААА-А17-117073110008-5. Инв. № 1.02/01-2018.

134. Преобразования Гауссовых и бездифракционных световых пучков в оптически индуцированных фотонных волноводных и дифракционных структурах в кристаллических средах с управляемой величиной и изменяемым знаком нелинейно-оптического отклика: отчет о НИР (промежуточный, этап 2) / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; рук. Шандаров С.М. исполн.: Беспалый А.Д., [и др.]. Томск, 2019. 117 с. № ГР АААА-А17-117073110008-5. Инв. № 17.04/02-2019.

135. Преобразования Гауссовых и бездифракционных световых пучков в оптически индуцированных фотонных волноводных и

дифракционных структурах в кристаллических средах с управляемой величиной и изменяемым знаком нелинейно-оптического отклика: отчет о НИР (заключительный) / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; рук. Шандаров С.М. исполн.: Беспалый А.Д., [и др.]. Томск, 2020. 117 с. № ГР АААА-А17-117073110008-5. Инв. № 1.02/03-2020.

136. Исследование фотонных волноводных структур, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития: отчет о НИР (заключительный) / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; рук. Беспалый А.Д. Томск, 2021. 28 с.

137. Самовоздействие и взаимодействие световых пучков в волноводных и дифракционных периодических структурах на ниобате лития и фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой: отчет о НИР (промежуточный, этап 1) / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; рук. Шарангович С.Н. исполн.: Беспалый А.Д., [и др.]. Томск, 2021. 111 с.

138. Самовоздействие и взаимодействие световых пучков в волноводных и дифракционных периодических структурах на ниобате лития и фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой: отчет о НИР (промежуточный, этап 2) / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; рук. Шарангович С.Н. исполн.: Беспалый А.Д., [и др.]. Томск, 2022. 119 с.

139. Шандаров В.М. Беспалый А.Д. Формирование фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле LiNbO_3 лазерным излучением: Методические указания к лабораторной работе. Томск: ТУСУР, 2017. 20 с. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/6838> (дата обращения: 10.09.2021).

140. Шандаров В.М. Беспалый А.Д. Исследование характеристик фотонных волноводных элементов, оптически индуцированных в

фоторефрактивном кристалле LiNbO_3 : Методические указания к лабораторной работе. Томск: ТУСУР, 2017. 16 с. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/6837> (дата обращения: 10.09.2021).

141. Перин А. С., Безпальный А.Д. Волноводная фотоника и нанооптика: Лабораторный практикум. Томск: ТУСУР, 2021. 26 с. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/9422> (дата обращения: 10.09.2021).

Приложение А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

(справочное)

«Визуализатор волнового фронта»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021661646

Визуализатор волнового фронта

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU)*

Авторы: *Безпалый Александр Дмитриевич (RU), Капустин Вячеслав Валериевич (RU), Мандель Аркадий Евсеевич (RU)*

Заявка № **2021660493**
Дата поступления **07 июля 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **14 июля 2021 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*


Г.П. Ивлиев

Приложение Б.

Акт внедрения в учебный процесс кафедры СВЧиКР (справочное)

Внедрение результатов научной деятельности

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе,

канд. техн. наук, доцент

Сенченко П.В.

« 6 » 09 2022 г.



АКТ

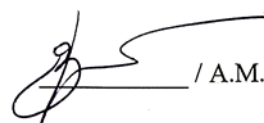
внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы

Безпалого Александра Дмитриевича

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационной работы Безпалого А.Д. в учебном процессе кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР).

Материалы диссертации используются при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Волноводная фотоника и нанооптика» магистерской программы «Оптические системы связи и обработки информации» и подготовке выпускных квалификационных работ по направлению подготовки магистрантов 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Заведующий каф. СВЧиКР

 / А.М. Заболоцкий

Приложение В.

Акт внедрения в научный процесс кафедры СВЧиКР (справочное)

Внедрение результатов научной деятельности

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по научной работе и
инновациям, канд. техн. наук, доцент
Лощилев А.Г.

« 4 » октября 2022 г.

АКТ

внедрения в научный процесс результатов диссертационной работы

Безпалого Александра Дмитриевича


Настоящий акт подтверждает использование результатов диссертационной работы Безпалого А.Д. в научном процессе кафедры СВЧиКР при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1. НИР "Самовоздействие и взаимодействие световых пучков в волноводных и дифракционных периодических структурах на ниобате лития и фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой" в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (2021 – 2022 гг.) (подпроект «Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8»).


2. НИОКР "Исследование фотонных волноводных структур, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития" в рамках поисковых научно-исследовательских работ и перспективных научно-технических проектов аспирантов и молодых ученых ТУСУРа в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (2021 г.).

3. НИР "Преобразования Гауссовых и бездифракционных световых пучков в оптически индуцированных фотонных волноводных и дифракционных структурах в кристаллических средах с управляемой величиной и изменяемым знаком нелинейно-оптического отклика" в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (2017-2019 гг.) (проект № 3.1110.2017/ПЧ).


Заведующий каф. СВЧиКР

 / А.М. Заболоцкий

Руководитель НИР Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8

 / С.Н. Шарангович

Руководитель НИР 3.1110.2017/ПЧ

 / С.М. Шандаров