



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
и инновациям ТУСУР,  
канд. технических наук, доцент

А.Г. Лоцилов

» \_\_\_\_\_ 2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Диссертация «Оптико-электронный комплекс для формирования и исследования характеристик пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития» выполнена в ТУСУРе на кафедре сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР).

Соискатель Безпалый Александр Дмитриевич в 2017 г. окончил магистратуру ТУСУРа по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». С 2017 по 2021 гг. обучался в очной аспирантуре ТУСУРа по направлению подготовки 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии». Справка № \_\_\_\_\_ о сдаче кандидатских экзаменов выдана 22 декабря 2022 г. ТУСУРом.

Научный руководитель – Мандель Аркадий Евсеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры СВЧиКР ТУСУРа.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Элементы локализации оптического излучения и управления световыми потоками на основе оптических материалов, такие как фазовые дифракционные решетки и волноводные структуры, являются неотъемлемой частью интегрально-оптических схем оптоэлектронных устройств и приборов фотоники. Возможности формирования волноводных структур в

оптических материалах во многом определяют развитие интегральной оптики и фотоники. В связи с этим исследование способов формирования волноводных структур маломощным лазерным излучением в поверхностно легированных областях кристалла  $\text{LiNbO}_3$  и исследование характеристик таких структур представляется задачей несомненно актуальной.

### **Оценка выполненной соискателем работы**

Диссертация Безпалого Александра Дмитриевича является научно-квалификационной работой, в которой проведено исследование условий формирования и исследование характеристик пространственно-неоднородных и волноводных структур, индуцированных лазерным излучением из видимой области спектра в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  с поверхностным легированием.

Соискателем реализован и исследован метод поточечного индуцирования лазерным излучением волноводных структур в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$   $X$ - и  $Y$ -срезов. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий формировать и исследовать пространственно-неоднородные и волноводные структуры, индуцированные в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития.

### **Личное участие автора в получении результатов**

В диссертации представлены результаты, в получении которых автору принадлежит определяющая роль. Разработка экспериментальных установок и методик экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментальных исследований проводилась автором лично или при его непосредственном участии. Постановка целей и задач исследований и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научными руководителями: д.ф.-м.н., профессором В.М. Шандаровым и д.ф.-м.н., профессором А.Е. Манделем.

## **Степень достоверности результатов работы**

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

## **Научная новизна диссертации**

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.

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Результаты работы 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 № 3.1110.2017/ПЧ на 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. В рамках подпроекта «Самовоздействие и взаимодействие световых пучков в волноводных и дифракционных периодических структурах на ниобате лития и фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой» (подпроект №8 «Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8») в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

### **Специальность, которой соответствует диссертация**

Диссертационная работа Безпалого А.Д. по своему содержанию соответствует специальности 2.2.6. «Оптические и оптикоэлектронные приборы и комплексы» по пунктам:

2. Разработка новых оптико-информационных технологий, в том числе технологий, основанных на волоконной, адаптивной, интегральной оптике и волноводной оптике.

12. Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач:

- передачи, приема, обработки и отображения информации;
- создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники.

**Полнота изложенных материалов в печатных работах, опубликованных автором**

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.

**Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. Безпальный 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.

2. Безпальный А.Д. Оптически индуцированные каналные волноводные структуры с пространственной модуляцией параметров в поверхностном слое ниобата лития /А.Д. Безпальный, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, В.И. Быков, К.М. Мамбетова //Ежемесячный научный журнал "Известия высших учебных заведений. Физика",2019. – Т. 62, № 3. – С. 3-8.

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

4. Безпальный А.Д. Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем / А.Д.Безпальный, В.М Шандаров, А.Е. Мандель // Периодический научный журнал "Доклады ТУСУР", Декабрь 2018. – Т. 21, №3. – С. 14-16.

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

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

**Публикации в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science:**

1. Bezpaly A.D., Bykov V.I., Mandel A.E. Photorefractive Changes in the Refractive Index in a LiNbO<sub>3</sub>:Cu Crystal with a Surface Doping // Instrumentation and Data Processing, 2022. – Vol. 58, No. 2. – P. 147-153.

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

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

4. Bezpaly A.D. Optical writing of channel waveguides and 1D diffraction gratings in photorefractive surface layers of lithium niobate / A.D. Bezpaly, A.O.

Verkhoturov, and V.M. Shandarov // *Ferroelectrics*. – 2017. – Vol. 515:1. – P. 34-43.

5. Bezpaly A.D. Optical formation of waveguide elements in photorefractive surfacelayer of a lithium niobate sample / A.D. Bezpaly, V.M. Shandarov // *Physics Procedia*. – 2017. – 86C. – P. 166-169.

6. Bezpaly A.D. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *Proceedings of SPIE - Photonics, Devices, and Systems VII: Prague, August 28-30, 2017*. – 2017. – Vol. 10603. – P. 1-6 (106030O).

7. Bezpaly A.D. Waveguide and Diffraction Elements Optically Generated in Surface-doped Layers of Ferroelectric Lithium Niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *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*. – 2016. – 4p.

#### **Статьи в рецензируемых журналах:**

1. Bezpaly A.D. Waveguide and Diffraction Properties of Optically Induced Elements in Photorefractive Surface Layers of Lithium Niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2016. – Vol. 83, no 6-16. – P. 193-194. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29781493> (дата обращения: 10.09.2021).

2. Bezpaly A.D. Channel Optical Waveguides with Spatial Longitudinal Modulation of Their Parameters Induced in Photorefractive Lithium Niobate Samples / A.D. Bezpaly, V.M. Shandarov // *Russian Forum of Young Scientists (RFYS): Ekaterinburg, April 27-28, 2017*. – *KnE Engineering*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 147-155.

## **Свидетельства о регистрации программного продукта для ЭВМ:**

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

**Результаты исследований диссертационной работы были представлены и обсуждены на конференциях Международного и Всероссийского уровня:**

The 8th International Conference "Photonics Prague" (Czech Republic, Prague, August 28-30, 2017); II Всероссийский молодежный научный форум "Наук 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.).

## Заключение

Диссертация Безпалого Александра Дмитриевича «Опτικο-электронный комплекс для формирования и исследования характеристик пространственно-неоднородных и волноводных структур в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.6. «Оптические и оптикоэлектронные приборы и комплексы»

Заключение принято на совместном заседании кафедр СВЧиКР и электронных приборов.

Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 6 от « 6 » 04 2023 г.

Председатель,  
д-р техн.наук, зав. каф. СВЧиКР

  
А.М.Заболоцкий

Секретарь,  
ст. преподаватель каф. СВЧиКР

  
А.В. Жечева