

На правах рукописи



ГАЛУЦКИЙ Валерий Викторович

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА НОВЫХ
ГРАДИЕНТНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ
НИОБАТА ЛИТИЯ И НИОБАТА КАЛИЯ**

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Краснодар – 2023

Диссертация выполнена на кафедре оптоэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет».

Научный консультант: **Строганова Елена Валерьевна**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Сидоров Николай Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева - обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Кольский научный центр Российской академии наук" (ИХТРЭМС КНЦ РАН)

Шандаров Станислав Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник НОЦ «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Вербенко Илья Александрович

доктор физико-математических наук,
директор НИИ физики государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «**Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук**»

Защита состоится «б» октября 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.320.03 при ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» по адресу: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.kubsu.ru ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

Автореферат разослан « » июня 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.320.03
доктор физико-математических наук



М.В. Зарецкая

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Кристаллы ниобата лития (НЛ) относятся к изученным, получившим широкое распространение нелинейно-оптическим материалам [1–3]. Традиционной сферой применения НЛ является использование его электрооптического эффекта, например в модуляторах оптического излучения [4, 5]. Другое направление использования этих кристаллов как нелинейно-оптического материала – преобразование оптического излучения. В настоящее время для изготовления оптических преобразователей из монокристалла вырезаются оптические элементы с ориентацией кристаллографических осей, соответствующей направлению синхронизма для выбранной длины волны и поляризации лазерного излучения. Такой подход требует применения мощной импульсной накачки для увеличения эффективности преобразования оптического излучения на одной длине волны в оптическое излучение на другой длине волны. Мощный импульсный источник лазерной накачки уменьшает требования к длине нелинейно-оптического взаимодействия, при которой преобразование излучения по длине волны достигает значимых величин. Кроме того, использование ориентированной пластины НЛ под конкретную длину волны и поляризацию существенно ограничивает возможности их практического применения. В связи с бурным развитием непрерывных волоконных лазеров появились оптические элементы из НЛ, работающие в режиме квазисинхронизма, – периодически поляризованный НЛ (PPLN) [6–8]. Данный тип фотонных структур хотя и отличается меньшим нелинейно-оптическим коэффициентом по сравнению с традиционным ниобатом лития, но при этом позволяет работать в режиме «90° синхронизма» для широкого сочетания взаимодействующих длин волн с различными поляризациями. Такие типы фотонных структур существенно увеличивают длину нелинейно-оптического взаимодействия, а значит и эффективность преобразования излучения в фотонных устройствах.

В России и за рубежом к моменту начала выполнения настоящего диссертационного исследования реализован значительный объем научных работ, посвященных изучению однородных кристаллов НЛ и ниобата калия (НК). Спектроскопические свойства таких монокристаллов были исследованы достаточно интенсивно и широко, а полученные результаты обобщены в ряде обзорных статей и монографий [5, 9–14]. Значительный вклад в разработку синтеза монокристаллов НЛ и НК внесли работы, выполненные коллективами российских университетов, академических институтов и ряда научных лабораторий ближнего и дальнего зарубежья (Япония, Испания, США). На основе таких однородных монокристаллов предложен широкий класс оптических элементов, в том числе реализующих нелинейно-оптические преобразования [5, 8].

Поиск новых нелинейно-оптических материалов с градиентными свойствами обусловлен тем, что в широко используемых на сегодняшний день

кристаллах НЛ и НК градиент их состава и нелинейно-оптических свойств реализуется неуправляемым способом в соответствии с инконгруэнтным плавлением кристаллов и особенностями их фазовых диаграмм. Проблема состоит в том, что, с одной стороны, существующие технологии выращивания нацелены на получение объемных монокристаллов НЛ конгруэнтного состава или в некоторых случаях монокристаллов околостехиометрического состава, с другой стороны, использование мощных волоконных лазеров накачки вносит температурные искажения в эффективность нелинейно-оптического преобразования.

Главным преимуществом градиентных монокристаллов НЛ и НК является возможность компенсации искажений при нелинейно-оптическом преобразовании за счет неравномерного распределения температуры по длине кристалла. Возможность формирования градиента нелинейно-оптических свойств в кристаллах НЛ и НК является уникальной технологией, расширяющей возможности оптоэлектронных систем обработки и передачи информации, которые могут быть реализованы только при наличии новых функциональных материалов, моделей физических механизмов, способствующих повышению эффективности за счет создания дополнительного изменения нелинейно-оптических свойств для компенсации температурных искажений.

Таким образом, есть основания считать, что разработка оптических материалов с градиентом свойств по некоторым параметрам либо набору параметров, а также создание условий для взаимодействующих оптических сигналов, является одним из перспективных направлений развития функциональных свойств существующих фотонных устройств и конструирования новых оптических элементов.

Цель диссертационной работы состоит в разработке технологии выращивания градиентных монокристаллов НЛ и НК, исследовании свойств градиентных сегнетоэлектрических материалов НЛ и НК и выявлении перспектив создания оптических функциональных элементов на их основе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1 Разработать и научно обосновать новую технологию выращивания монокристаллов НЛ и НК с заданными оптико-физическими свойствами при условии постоянства и переменности состава по длине кристалла. Получить по новой технологии образцы градиентных монокристаллов НЛ и НК, различных по стехиометрическому составу в пределах $R = 0,94...0,99$, а также при условиях постоянства состава по K^+ или Li^+ по длине выращиваемой кристаллической були.

2 Разработать модифицированные методики исследования оптических и нелинейно-оптических свойств градиентных кристаллов НЛ и НК в спектральном диапазоне от 0,3 до 3000 мкм с целью подтверждения соответствия

получаемых оптических свойств тем, которые отвечают задаваемому распределению примесных центров.

3 Исследовать по разработанной методике закономерности влияния концентрационного градиента примесных центров K^+/Li^+ на оптические свойства монокристаллов НЛ и НК и процессы формирования в них фотонных структур.

4 Разработать физико-математическую модель градиентного нелинейно-оптического преобразователя, предназначенную для реализации дискретных математических операций, моделирования многоканальных лазерных модулей, фазочувствительного усиления оптических сигналов.

5 Исследовать с помощью разработанной модели структурные и функциональные оптические схемы построения градиентных PPLN-преобразователей.

6 Разработать новый экспериментальный преобразователь лазерного излучения на основе градиентного кристалла ниобата лития.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Предложены и реализованы новые принципы физико-технологического способа выращивания оптических градиентно-активированных монокристаллов НЛ и НК, основанные на кристаллизации с естественной скоростью при сочетании составов расплава во внешнем тигле, внутреннем тигле и геометрии системы тигля и расплава. Рост кристалла осуществлялся с сохранением задаваемого градиента концентрации по основным компонентам кристаллической матрицы (Li^+ , Nb^{5+} , K^+).

2 Предложен и разработан модифицированный метод Чохральского по выращиванию градиентных по основным компонентам (Li^+ , Nb^{5+}) кристаллов ниобата лития $Li_{f(z)}Nb_{2-f(z)}O_{5-2f(z)}$, где $0,94 < f(z) < 1$, и (K^+ , Nb^{5+}) ниобата калия $K_{g(z)}Nb_{2-g(z)}O_{5-2g(z)}$, где $0,95 < g(z) < 1$, с одновременно жидкостной и твердофазной подпиткой расплава.

3 Определены температурные коэффициенты показателя преломления градиентных кристаллов НЛ и НК в ТГц частотном диапазоне 0,3...1,1 ТГц.

4 Установлена закономерность, что активирование оптическими центрами Yb^{3+} , Er^{3+} , Cr^{3+} ниобата лития состава $Li_xNb_{2-x}O_{5-2x}$, где $0,94 < x < 1$, увеличивает температурный коэффициент показателя преломления в ТГц частотном диапазоне $\Delta n/\Delta T$ с $0,7 \cdot 10^{-3}$ до $3,5 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ по сравнению с неактивированными кристаллами такого же состава.

5 Разработан модифицированный метод исследования оптических свойств градиентных кристаллов НЛ и НК в видимом и ИК-диапазоне, основанный на температурных исследованиях спектрокинетик затухания люминесцентного времени жизни возбужденного состояния оптических центров в области 1,5 мкм и позволяющий определять оптимальную концентрацию оптических центров ионов Yb^{3+} и Er^{3+} .

6 Предложен новый оптический элемент – преобразователь длины волны оптического излучения на основе градиентного PPLN, имеющего регулярную доменную структуру с градиентом концентрации ионов лития в соответствии с формулой



где $a(x) = p \cdot F(x)$, где $0,97 < a(x) < 1$, $0,1 < p < 1$, $F(x) = -0,028(x-1)^2 + 1$;

$b(x) = 2 - a(x)$;

x – пространственная координата.

7 Предложен новый кристаллический материал для фотонного элемента на базе градиентного PPLN для преобразования излучения непрерывных лазеров во вторую гармонику на основе температурных эффектов, связанных с поглощением в преобразователе излучения на длине волны накачки, длине волны второй гармоники и с двухфотонным поглощением.

8 Разработана новая физико-математическая модель фотонного элемента, реализующего дискретные математические операции в элементе на базе НЛ с концентрационным градиентом Li в кристаллической пластине состава $\text{Li}_x\text{Nb}_{2-x}\text{O}_{5-2x}$, где $0,94 < x < 1$ (PPLN-преобразователя). Рассчитаны коэффициенты затухания сигнала на выходе А и В (Q-фактор, коэффициент экстинкции) в процессе реализации логических функций $A \cdot \bar{B}$ и $B \cdot \bar{A}$ при различных направлениях концентрационного градиента Li по составу в градиентном PPLN-преобразователе.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

1 Разработана научно-обоснованная лабораторная технология выращивания градиентных материалов НЛ и НК с концентрационными профилями основных компонентов, зависящих от координаты кристалла.

2 Предложены новые функциональные оптические элементы на основе нелинейных материалов НЛ и НК, в которых реализованы концентрационные градиенты различных видов.

3 Экспериментально доказана эффективность градиентных материалов ниобата калия и ниобата лития для температурных, концентрационных и спектрально-кинетических характеристик в оптическом (300...2000 нм) диапазоне и в ТГц-диапазоне (0,4...1,1 ТГц).

Достоверность полученных результатов. Достоверность научных результатов и выводов диссертации обеспечена корректным применением комплекса взаимодополняющих методик экспериментального и теоретического исследования, адекватных целям и задачам диссертации, привлечением обширного экспериментального материала и его количественным и качественным анализом. Достоверность выводов подтверждается сравнительным анализом результатов, полученных в ходе выполнения данной работы, и теоретических и экспериментальных данных, приведенных в публикациях других авторов, а также определяется использованием разработанных в Кубанском госуниверситете запатентованных методов выращивания градиентных

монокристаллов, применением современного оборудования: модернизированной установки для выращивания кристаллов «Кристалл 3М», терагерцового спектрографа Tera K15 Kit фирмы MenloSystems, комплекса безмасковой фотолитографии для формирования топологий фотонных структур, спектрометрическим комплексом на основе монохроматоров MSDD1000 и МДР204 с набором приемников в диапазоне 190...20 000 нм. Для возбуждения сигнала применялись когерентные источники накачки YAG:Nd и YLF:Nd лазеры, полупроводниковые непрерывные и импульсные лазеры в диапазоне мощности до 30 Вт в непрерывном режиме и длительностями импульсов накачки 90 фс, 7...15 нс. Измерения проводились на больших выборках при помощи адаптированных к задачам методов анализа.

Достоверность представленных в диссертации результатов обусловлена также их обсуждением на научных конференциях и семинарах. Работа выполнялась в рамках следующих проектов: гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-106.2009.8 «Исследования эффективности получения терагерцового излучения периодическими структурами в стехиометрическом ниобате лития»; гранта РФФИ «Спектроскопические исследования концентрационно-профилированных монокристаллов ниобата лития с хромом» № ГРНТИ 01200702285; проекта Минобрнауки РФ «Изучение оптических свойств стехиометрического ниобата лития» № ГРНТИ 01200609635; гранта РФФИ «Концентрационная релаксация расплава при выращивании монокристаллов методом Чохральского с подпиткой» № 09-08-96515; государственного задания Минобрнауки России № 1291 (14/200-т) «Создание мультифункциональных логических элементов на PPLN-градиентных кристаллах» № ГРНТИ 11501236066; проекта «Создание компонентной базы современной фотоники» в рамках реализации программы стратегического развития КубГУ (2012–2014) № ГРНТИ 01201351709; государственного задания Минобрнауки России «Исследование и разработка новых физико-технологических принципов построения оптоэлектронных, микро- и нанооптических устройств сбора, обработки и передачи информации и перспективных сред для микролазеров» № ГРНТИ 01200313972; государственного задания Минобрнауки России № 8.4958.2017/БЧ (17/28-т) «Методы повышения обнаружительной способности детектора терагерцового излучения на базе градиентного PPLN» № ГРНТИ АААА-А17-117040650102-5; государственного задания Минобрнауки России проект № 20/65т-2 «Разработка основ технологии получения функциональных электрооптических компонентов фотоники на основе нелинейных градиентно-активированных монокристаллов и градиентных слоистых структур» № ГРНТИ 223020900036-5; проекта 23/20т-2 «Перспективные вещества, материалы и современные методы исследования объектов и систем для решения задач обеспечения энергоэффективности и безопасности среды обитания» № ГРНТИ 123031300068-9.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1 Новые принципы физико-технологического способа выращивания оптических градиентных по основным компонентам монокристаллов НЛ и НК. Получены составы: $\text{Li}_{f(z)}\text{Nb}_{2-f(z)}\text{O}_{5-2f(z)}$, где $0,94 < f(z) < 1$ и $\text{K}_{g(z)}\text{Nb}_{2-g(z)}\text{O}_{5-2g(z)}$, где $0,95 < g(z) < 1$. Метод Чохральского с жидкостной и одновременно жидкостной и твердофазной подпиткой, основанный на кристаллизации с естественной скоростью при сочетании составов расплавов во внешнем тигле, внутреннем тигле, а также предложенная геометрия системы тиглей и расплава, при которой скорость вытягивания кристалла из расплава относительно первоначального положения уровня расплава минимальная и находится в диапазоне 0...1,5 мм/ч.

2 Новая методика определения соотношения основных компонентов $R = \text{Li}/\text{Nb}$ в соответствии с диаграммой состояния $\text{Li}_2\text{O}-\text{Nb}_2\text{O}_5$. Методика основана на системе регистрации температуры в условиях линейного изменения мощности программатора. Погрешность методики составляет: по температуре – не более 2 К, по массе – не более 0,5 мг, а температура фазового перехода определяется в интервале ошибок 1...4 К.

3 Объяснение корреляции между температурными коэффициентами показателя преломления в ТГц-диапазоне частот НЛ и НК и типом оптических центров. Активирование НЛ традиционными лазерными ионами Yb^{3+} , Er^{3+} существенно увеличивает температурный коэффициент показателя преломления в ТГц-диапазоне $\Delta n/\Delta T$ с $0,7 \cdot 10^{-3}$ до $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ относительно неактивированных кристаллов.

4 Результаты спектрально-кинетических исследований в температурном интервале от 300 до 473 К: установлена закономерность в увеличении интенсивности 1,5 мкм люминесценции на 15–20 % относительно интенсивности при $T = 300 \text{ K}$ в конгруэнтном кристалле

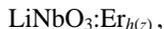


где $f(z) = 0,012...0,006$;

$g(z) = 0,0002...0,003$;

z – координата вдоль оси роста,

и снижении интенсивности люминесценции на 30 % относительно интенсивности при $T = 300 \text{ K}$ в конгруэнтном кристалле



где $h(z) = 0,041...0,025$.

5 Макет фотонного элемента на основе градиентного PPLN, позволяющий одновременно производить преобразование сигналов на нескольких длинах волн ($\lambda = 1030...1074 \text{ нм}$, $\lambda/2 = 516,3...537,5 \text{ нм}$), с градиентом концентрации ионов лития с формулой



где $a(x) = p \cdot F(x)$, где $0,97 \leq a(x) \leq 1$, $p - \text{const}$, $0,1 \leq p \leq 1$, $F(x) = -0,028(x-1)^2 + 1$;
 $b(x) = 2 - a(x)$;
 x – пространственная координата, направленная по ширине градиентного PPLN.

6 Новый оптический нелинейный элемент на основе PPLN состава



где $a(y) = p \cdot F(y)$, где $0,97 \leq a(y) \leq 1$, $p = 1$, $F(y) = -0,972 + 0,014 \cdot y$;
 $b(y) = 2 - a(y)$;
 y – пространственная координата по ширине градиентного PPLN.

7 Доказательство того, что эффективность градиентного PPLN выше, чем однородного PPLN на 20 % в интервале мощностей от 15 до 24 Вт. Градиентный PPLN сформирован из кристалла $\text{Li}_{a(x)}\text{Nb}_{2-a(x)}\text{O}_{5-2a(x)}:\text{Mg}_{b(x)}$, где $a(x) = 0,9995 \cdot (1 + \tanh(2,19 \cdot x))$; $b(x) = 0,05$.

8 Доказательство того, что при реализации логических функций $A \cdot \bar{B}$ и $B \cdot \bar{A}$ коэффициент экстинкции зависит от вида концентрационного профиля основных компонентов кристаллической матрицы у PPLN, сформированного на основе градиентных кристаллов $\text{Li}_{a(x)}\text{Nb}_{2-a(x)}\text{O}_{5-2a(x)}$, где $a(x) = 0,94 \dots 1$.

9 Обнаружение того, что величина коэффициента оптического усиления демонстрирует существенные различия (порядка 10 дБ при одинаковой мощности накачки 30 дБм) в зависимости от вида концентрационного профиля в градиентном PPLN, изготовленном из кристалла $\text{Li}_{a(x)}\text{Nb}_{2-a(x)}\text{O}_{5-2a(x)}$, где $a(x) = 0,94 \dots 1$.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования и научные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и совещаниях: International symposium “ISMTP–2009” (St. Petersburg, 2009); 14-th International conference on laser optics “LO–2010” (St. Petersburg, 2010); Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2011); Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2012); III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2014); Международный конгресс «Интерэкспо Гео-Сибирь – 2015» (Новосибирск, 2015); IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2015); XII Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо Гео-Сибирь – 2016» (Новосибирск, 2016); Международная научная конференция «СибОптика – 2016» (Новосибирск, 2016); V Международная конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2016); XXII Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2016); VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2017); VII Международная конференция по

фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2018); XXIV Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2018); IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (Москва, 2020); Международная конференция «Физика СПб», ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, 2020, 2021, 2022); 7th International conference on advances in functional materials (Daemyung Resort Jeju, South Korea, 2021).

Публикации. Основные материалы диссертации содержатся в 28 работах в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 10 патентах и свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ. Общее число работ, опубликованных автором по теме диссертации, составляет 72 наименований.

Личный вклад автора. Соискателю принадлежит постановка экспериментальных и расчетных задач, разработка новых методик роста градиентных кристаллов, новых спектроскопических методик изучения оптических элементов на основе градиентных кристаллов, анализ всех экспериментальных результатов и выводы, положенные в основу научных положений, выносимых на защиту.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 249 наименований, насчитывает 252 страници текста, включая 148 рисунков и 10 таблиц.

Во введении дается анализ проблемы, обосновывается ее актуальность, выдвигается гипотеза о связи свойств функциональных оптических элементов, которые требуется изучить, с градиентным составом нелинейно-оптических кристаллов ниобата лития и ниобата калия.

В первой главе проведен анализ методов выращивания НЛ, НК и анализ устройств на их основе, что выявило целый ряд проблем и нерешенных задач:

1 Разработка новых принципов физико-технологического способа синтеза и выращивания оптических градиентно-активированных монокристаллов НЛ и НК на основе изучения фазовых переходов и фазовых диаграмм состояния; получение лабораторных образцов НЛ и НК, различных по стехиометрическому составу, с градиентом концентрации по основным компонентам K^+ или Li^+ по длине кристаллической були; разработка на основе прогнозирования изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий новых методик по оценке их свойств в оптическом и ТГц-диапазоне. Решение этих задач позволит прогнозировать эффективность функционирования разрабатываемых градиентных материалов в устройствах преобразования информации.

2 Несмотря на наличие концепции построения устройств, моделей и макетов функциональных оптических элементов, а также оценки эффективности работы различных вариантов исполнения PPLN, для фотонных структур из градиентных сегнетоэлектриков НЛ и НК такие исследования отсутствуют.

Для создания функциональных нелинейно-оптических устройств, работающих в ТГц частотном диапазоне излучения, требуется учет градиента концентраций в условиях фазового согласования.

3 Обеспечение контролируемого изменения нелинейно-оптических свойств и методов реализации селективных свойств по эффективному нелинейно-оптическому взаимодействию в структурах на основе НЛ и НК. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств новых материалов и развитие методов реализации селективных свойств для эффективного нелинейно-оптического взаимодействия являются актуальными и определяющими в процессе поиска новых материалов для развития градиентной нелинейной фотоники.

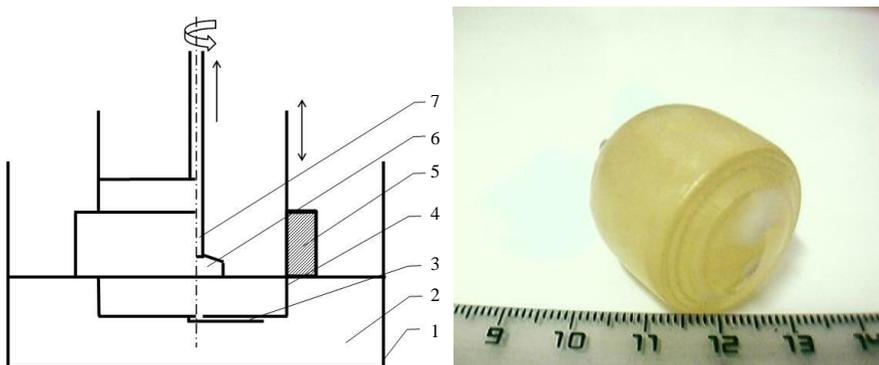
Во второй главе приведены результаты физико-технологического моделирования ростовых процессов инконгруэнтных кристаллов ниобата лития и ниобата калия, результаты синтеза градиентных кристаллов и результаты выращивания градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия с однонаправленным и двунаправленным изменением концентрации лития. В основе алгоритма создания в растущем кристалле неравномерного управляемого распределения по основным компонентам по длине кристаллической були лежит модель разделения объемов расплава на части с разной стартовой концентрацией оксида ниобия и управление скоростью перемешивания этих объемов за счет относительного перемещения внутреннего и внешнего тиглей, а также отвода части расплава с различным коэффициентом сегрегации по основным примесям за счет его кристаллизации. При этом учитывается масса мениска, масса сегмента кристалла, погруженного в расплав, и строится график теоретической кривой веса растущего кристалла в зависимости от его задаваемой геометрии и системы внутреннего и внешнего тиглей. Для выращивания градиентных кристаллов ниобата лития с однонаправленным и двунаправленным изменением концентрации лития в применяемом методе Чохральского с жидкостной подпиткой необходимо перемещение внутреннего тигля. В разработанном модернизированном методе выращивания скорость перемещения внутреннего тигля учитывает скорость падения уровня расплава во внешнем тигле и соотносится с задаваемым до роста распределением параметра подпитки расплава во внутреннем тигле. Общая формула, определяющая скорость перемещения внутреннего тигля относительно внешнего,

$$v_i = \frac{4}{\rho_L \pi D_i^2} \left((M - 1) \frac{dm_c}{dt} - \frac{dm_m}{dt} + \frac{\rho_L}{\rho_S} \frac{dm_S}{dt} \right) + \frac{4}{\rho_L \pi D_0^2} \frac{dm_t}{dt}, \quad (1)$$

где ρ_L – плотность расплава;
 D_i – диаметр внутреннего тигля;
 M – параметр подпитки;
 m_c – масса кристалла;
 m_m – масса мениска кристалла;
 m_s – масса сегмента кристалла;

ρ_S – плотность кристалла;
 m_i – рассчитанная трасса кристалла;
 D_0 – диаметр внешнего тигля.

Дальнейшей реализацией метода жидкостной подпитки стало в диссертационной работе использование наряду с жидкостной твердофазной подпитки при сохранении и внешнего тигля, и внутреннего тигля (рис. 1).



1 – внешний тигель; 2 – расплав; 3 – капилляр; 4 – внутренний тигель;
5 – керамическая обойма; 6 – кристалл; 7 – затравкодержатель

Рисунок 1 – Схема метода и фото монокристалла LiNbO_3 с градиентом Li

Преимущества данного метода заключаются в одинаковом стартовом составе внешнего и внутреннего тигля после погружения, порционной подпитке твердофазной керамикой, обедненной литием или калием. Именно эта твердофазная керамика при плавлении и повышении однородности расплава во внешнем и внутреннем тигле конвекционными потоками компенсирует избыток лития или калия на фронте кристаллизации. В отличие от жидкостной подпитки, где необходимо на протяжении всего процесса вытягивания кристалла поддерживать составы во внешнем и внутреннем тигле разными, в данном методе составы расплавов одинаковы. Этап выращивания начинался с изготовления керамической обоймы на внешней поверхности внутреннего тигля. Для этого внутренний тигель вставлялся в Pt-форму, в которую выливался расплав состава, необходимый для вытягиваемого кристалла в соответствии с фазовой диаграммой. В итоге получалась керамическая обойма толщиной 5 мм, внутренним диаметром 52 мм, закрепленная на внутреннем тигле (размеры обоймы определяются геометрией ростового узла). Состав керамической обоймы ниобата лития и ниобата калия характеризовался значением $R = 1$. После этого во внешнем тигле создавался расплав, необходимый для кристаллизации состава, соответствующего составу керамической обоймы. Для этого внутренний тигель погружался в расплав внешнего тигля до момента касания расплавом обоймы. Специфика учета

фазовой диаграммы ниобата лития и ниобата калия требует для подпитки более тугоплавкий состав, поэтому обойма находилась в динамическом равновесии с расплавом и не плавилась до момента погружения. Алгоритм вытягивания кристалла из расплава учитывал массовую скорость кристаллизации и компенсацию ее массовой скоростью плавления керамической обоймы. Управление мощностью и скоростью погружения внутреннего тигля производилось по сигналу весового датчика с прикрепленным к нему затравкодержателем. В результате ростовых процессов были получены кристаллы ниобата калия и ниобата лития с градиентом концентрации по основным компонентам, а также кристаллы с градиентом концентрации оптических примесей.

В третьей главе приводятся исследования оптических свойств полученных градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия (рис. 2). Изучение влияния состава кристалла на оптические свойства производилось на основе исследований различий между краем полосы поглощения стехиометрического образца ниобата лития и образца ниобата лития конгруэнтного состава. Помимо изучения УФ края полосы поглощения при оценке стехиометрии кристаллов ниобата лития и ниобата калия использовались калибровочные зависимости для полуволнового напряжения от концентрации основных компонентов [11–14].

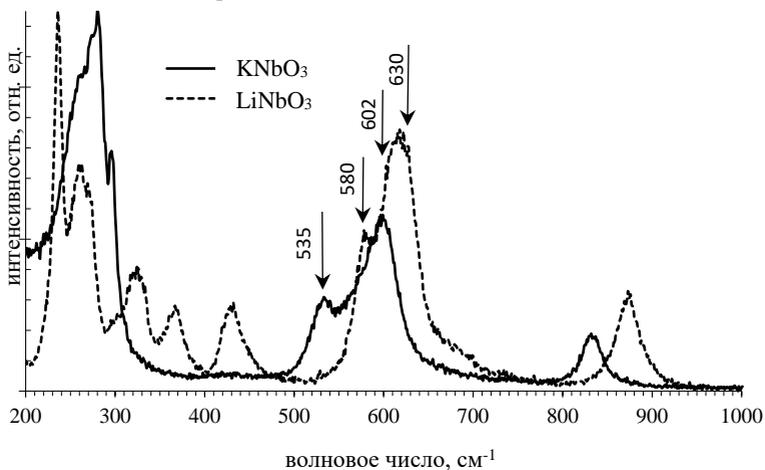


Рисунок 2 – Спектр КР монокристаллов KNbO_3 и LiNbO_3 ($T = 300 \text{ K}$)

В рамках поставленной цели проведения комплексных физико-технологических исследований по разработке новых принципов получения, изучения и создания функциональных фотонных структур и компонентов на основе градиентных сегнетоэлектрических материалов ниобата лития и ниобата калия предметом данной части работы являлось изучения температурной зависимости

спектрально-кинетических свойств градиентно-активированных кристаллов $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ и $\text{Er}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ с концентрационными профилями оптических примесей. Предложена техника и методика проведения экспериментов с детализацией спектрально-кинетических параметров исследуемых образцов, при которой для монотонно меняющегося времени затухания люминесценции по спектру не требуется температурная стабилизация исследуемого кристаллического образца. Такой подход существенно сокращает время проведения эксперимента.

Регистрация массива температурных данных происходит в двух направлениях: разогрев от комнатной температуры до температуры 473 К и охлаждение образца. Далее монохроматор перестраивается с λ_1 на λ_2 , и происходит повтор исследования. Подобный подход требует многократного нагрева и охлаждения образца, но позволяет существенно сэкономить время эксперимента. Шаг дискретизации по длине волны составил 1 нм, шаг дискретизации по времени регистрации кинетики люминесценции составил 0,5 мкс, средний шаг дискретизации по температуре составил 0,5 К. Сокращение количества циклов нагрева исследуемого образца происходит, если не стабилизировать ни один из параметров (длину волны или температуру), поскольку предполагаемое время жизни люминесценции много меньше времени разогрева или перемотки монохроматора. В разработанном методе схема регистрации базируется на трех сигнальных каналах в осциллографе: интенсивность, температура и канал, по которому передается длина волны монохроматора (рис. 3). Таким

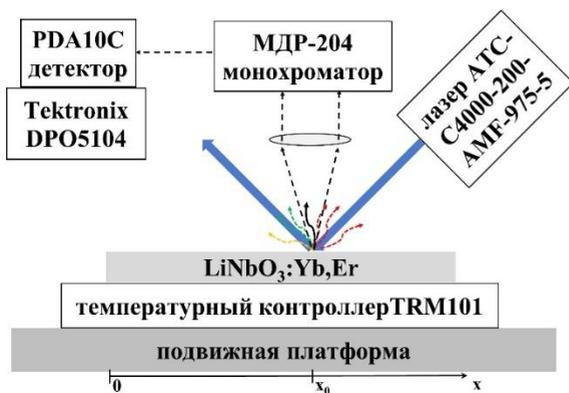


Рисунок 3 – Схема системы измерения температурных спектров кинетик люминесценции

образом происходит формирование массива данных: зависимость интенсивности люминесценции от длины волны, температуры, время развертки кинетики люминесценции. В этом случае число циклов нагрева/охлаждения образца в экспериментах составляло порядка десятка. На рисунке 4 представлен экспериментальный спектр кинетик. Анализ зависимостей для образца нио-

бата лития, содержащего доноры и акцепторы, при повышении температуры от 300 до 473 К показал увеличение интенсивности кинетик люминесценции, а для образца, активированного только ионами Er^{3+} , наблюдается снижение интенсивности люминесценции в полутаромикронном диапазоне при повыше-

нии температуры. Наличие градиента ионов-активаторов вдоль пластин позволяет формировать еще один измерительный канал за счет позиционирования по продольной координате (концентрационный профиль оптических центров как функция продольной координаты), массив температурных и концентрационных спектров кинетик. С помощью выделения необходимой 3D, 2D или 1D проекции из полученного таким образом массива температурных и концентрационных спектров кинетик определяются оптимальные температурные режимы работы и оптимальные соотношения концентраций ионов-активаторов для усиления оптического сигнала.

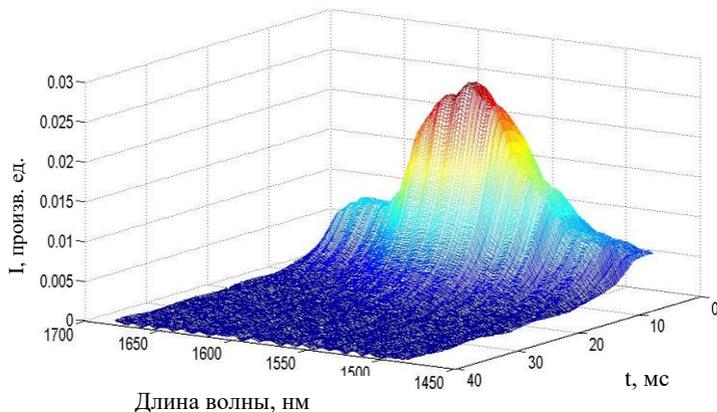


Рисунок 4 – Локальный спектр кинетик люминесценции градиентного кристалла Yb,Er:LiNbO_3 ($T = 300 \text{ K}$)

Другим важным методом косвенного контроля и изучения состава выращенных кристаллов ниобата лития и ниобата калия по основным и примесным компонентам является ТГц-спектроскопия. Развитие технологий получения нелинейно-оптических материалов открывает существенные преимущества практического использования устройств и компонентов на их основе, в частности терагерцовых устройств и технологий. При этом актуальной задачей является обеспечение фазового синхронизма или фазового квазисинхронизма в используемых нелинейных оптических материалах. В данной главе диссертации исследуются ТГц-спектры поглощения и преломления кристаллов ниобата калия и ниобата лития, полученных методом Чохральского с жидкостной подпиткой при дополнительной соактивации ионами Er^{3+} , Yb^{3+} и Sr^{3+} . Данные ионы служат индикаторами наличия скачкообразных изменений в кристаллической структуре [15] и могут управлять параметрами излучения накачки путем распределенного усиления и нелинейно-оптического преобразования, что способствует повышению эффективности генерации.

При температурных исследованиях показателя преломления в ТГц-диапазоне в интервале температур 290...390 К оказалось, что скорость увеличения значений показателя преломления с ростом температуры различна для исследуемых кристаллов. Построенные линейные тренды по диапазону изменения температуры на выбранных произвольным образом частотах имеют различный коэффициент наклона в зависимости от типа кристаллической матрицы (ниобат лития или ниобат калия), от вида кристаллографической ориентации для ниобата лития (X-срез или Z-срез), от вида примеси, точнее ее кристаллографического радиуса и степени искажения кристаллической решетки ниобата лития (ионы Cr^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+}). Полученные температурные зависимости сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Значения показателей преломления при $T = 300 \text{ K}$

	срез	n	ν , THz	$\Delta n/\Delta T, \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
LiNbO ₃	Z	6,44	0,7	0,5
	X	4,83	0,9	0,7
Yb:LiNbO ₃	Z	6,62	0,8	1,1
Yb,Er:LiNbO ₃	X	4,37	0,7	3,5
Cr:LiNbO ₃	Z	6,77	0,7	0,2
KNbO ₃	X	4,56	1	0,6

Обращает на себя внимание значение температурного коэффициента, полученное аппроксимацией температурной зависимости показателя преломления для ниобата лития с хромом. Хром по размерам сопоставим с кристаллографическими размерами ионов лития и ниобия и при некоторых концентрациях занимает обе указанные позиции кристаллической матрицы [9].

В данной работе исследовался кристалл ниобата лития с ионами хрома в позиции лития. И в случае использования ионов хрома как активатора температурный коэффициент показателя преломления существенно уменьшался (становился даже ниже аналогичного значения для неактивированного кристалла) и составлял $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Данный факт отражает различную температурную зависимость показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волны и используется при расчетах эффективности температурной подстройки условий синхронизма взаимодействующих волн (рис. 5).

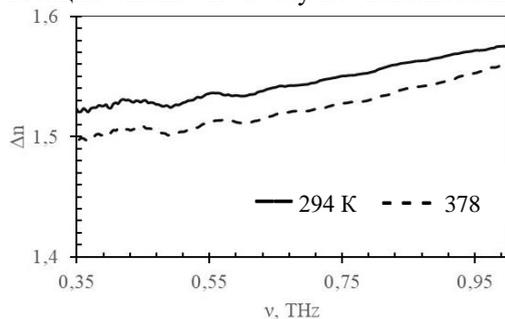


Рисунок 5 – Температурная зависимость разницы показателей преломления Z- и X-срезов LiNbO₃

В четвертой главе приводятся результаты моделирования режима работы градиентного PPLN-преобразователя и разработка методики создания периодически поляризованных структур в градиентном ниобате лития.

Разработана физико-математическая модель фотонного устройства на основе преобразователя оптического излучения, который имеет активный элемент с градиентом концентрации ионов Li^+ . Эффекты внутреннего отражения опорного излучения на границах регулярной доменной структуры менее выражены из-за ортогональности (в приближении плоских волн) регулярной доменной структуры по сравнению с преобразователем на основе ниобата лития, в котором подстройка рассогласования волнового вектора взаимодействия результирующих волн происходит за счет модуляции (изменения) периода доменов структуры нелинейного оптического кристалла [16]. С помощью предложенной структуры возможно одновременное преобразование на нескольких длинах волн или широкополосное преобразование геометрически расширенного пучка опорного сигнала. Расчет для различных профилей концентрации лития, перпендикулярных направлению ввода излучения накачки, производился с помощью уравнений, полученных на основе процесса ГВГ [17].

При реализации градиентного преобразователя для установления значений, характеризующих величину поля, необходимого для локальной переориентации сегнетоэлектрических доменов, измерялась вольтамперная характеристика полированной пластины, вырезанной из градиентного ниобата лития (Z-срез), при увеличении напряжения до нескольких киловольт за минуту (рис. 6). Напряжение, которое соответствует участку крутого роста

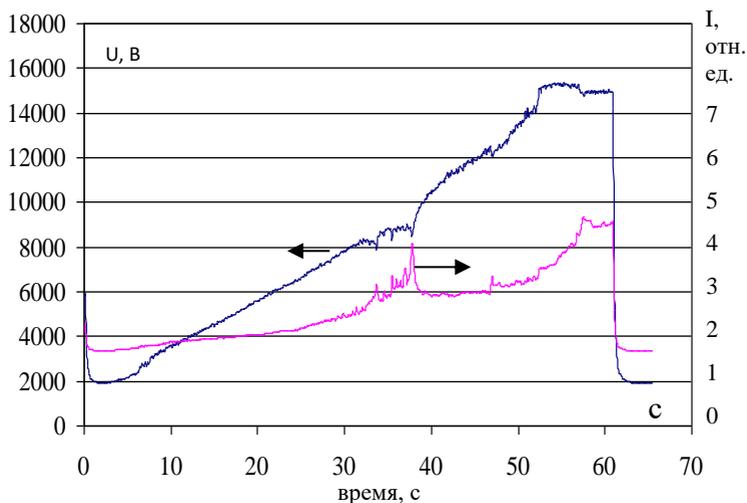


Рисунок 6 – Временные зависимости тока и напряжения

тока (с одновременным снижением падения напряжения), при учете толщины кристалла, дает напряженность коэрцитивного поля. С помощью подобного алгоритма были составлены карты величины коэрцитивного поля по поверхности пластин ниобата лития, вырезанных из градиентных кристаллов.

В пятой главе приводятся результаты моделирования функциональных фотонных структур из градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия и исследования технологических приемов создания волноводов в градиентном ниобате лития для функциональных оптических элементов.

Одним из факторов, ограничивающих эффективность преобразования, является тепловое воздействие излучения накачки. Была высказана гипотеза, что влияние состава кристалла ниобата лития или влияние градиента состава ниобата лития по длине преобразователя смещает максимум эффективности преобразования относительно мощности накачки. Определенные градиенты концентрации лития в PPLN могут способствовать как появлению ярко выраженного максимума эффективности преобразования при определенной мощности накачки, так и сглаживанию эффекта температурных воздействий излучения накачки, делая зависимость эффективности преобразования от мощности накачки более пологой. Однако градиент волновой расстройки в ниобате лития можно создать иначе. При постоянной концентрации лития вдоль PPLN изменение периода доменной структуры с некоторым градиентом так же приводит к градиенту волновой расстройки. Это реализуется и случайным, неконтролируемым образом в пластине ниобата лития при приложении коэрцитивного электрического поля: доменная структура появляется с некоторой вероятностью, в том числе локально происходит нарушение периода следования доменов, образование подрешеток и т.д. В данном случае необходимо оценить изменение эффективности преобразования излучения накачки в зависимости от мощности накачки при различных градиентах периода доменной структуры в PPLN (рис. 7).

Для моделирования влияния температуры на процесс распространения излучения вдоль PPLN использовались традиционные уравнения для процесса преобразования излучения во вторую гармонику. Разогрев происходил за счет поглощения излучения на частоте первой и второй гармоники и двухфотонного поглощения излучения второй гармоники. Температурное поле внутри PPLN учитывалось путем численного решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов. Поскольку кривая рассогласования фазовых скоростей в PPLN определяется не только температурой, но и периодом PPLN за счет зависимости его показателя преломления от длины волны излучения, температуры кристалла и концентрации лития, то в ходе проведенных исследований были проанализированы различные градиенты доменной структуры в PPLN. Для этого в уравнения вводились различные распределения периодов доменной структуры вдоль PPLN (рис. 7). На рисунке 7 по вертикальной оси отложено отклонение периода PPLN τ от

оптимального периода τ_0 при данной температуре T_0 . Для всех видов распределений средняя концентрация лития в PPLN составляла 49,9 мол.%, для нее рассчитывалось рассогласование волновых векторов взаимодействующих волн, и это рассогласование компенсировалось периодом регулярной доменной структуры $A = 2\pi / (2k_1 - k_2)$ при температуре 30 °С. Эффективность преобразователей, изготовленных из кристаллов с указанными распределениями концентрации, представлена на рисунке 8.

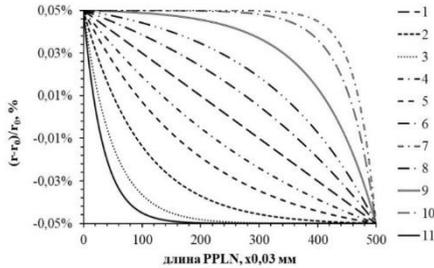


Рисунок 7 – Градиенты периодов PPLN

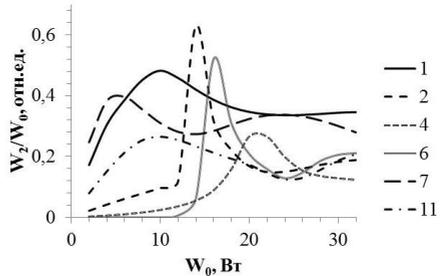
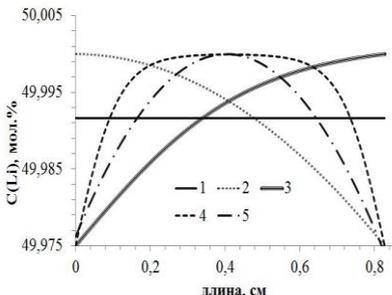


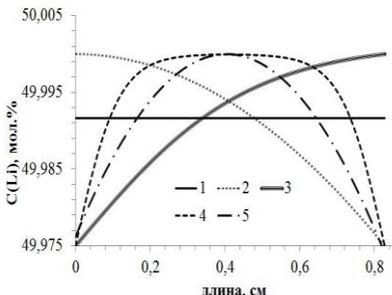
Рисунок 8 – Эффективность преобразования для градиентов периода PPLN 1, 2, 4, 6, 7, 11

Видно, что использование различного вида градиентов периода доменной структуры амплитудой до 0,1 % от оптимального значения периода при $T = 30^\circ\text{C}$ и концентрации лития 49,9 мол.% приводит к вариациям локализации максимума эффективности преобразования от 12 до 20 Вт мощности непрерывного лазера накачки. Значения эффективности преобразования меняются от 0,3 до 0,6. Наиболее пологая кривая в диапазоне мощностей непрерывной накачки получается для линейного спадающего профиля 1 с сохранением эффективности преобразования в диапазоне 0,3...0,5 W_2/W_0 . Наиболее острый максимум получается для градиента периода вида 2 при данном диапазоне мощностей накачки и геометрии PPLN. Таким образом, подбором закона распределения периода следования доменов при заданном диапазоне мощностей увеличивается эффективность преобразования излучения накачки во вторую гармонику.

При учете градиентных PPLN, в которых период следования доменов постоянный, а состав кристалла по длине преобразователя меняется, согласно рисунку 9, наблюдается аналогичная картина. Поскольку кривая рассогласования фазовых скоростей в PPLN имеет не только температурную зависимость, но и зависимость от состава кристалла PPLN, за счет зависимости $n(\lambda, T, C_{Li})$ [18], то в ходе проведенных исследований были проанализированы различные профили изменения концентрации лития (или ниобия) в кристалле. Для этого в уравнения физико-математической модели вводилось изменение состава вдоль оси PPLN (рис. 9). Для всех концентрационных профилей средняя

концентрация лития в PPLN равнялась 49,99 мол.%. Именно для этой концентрации рассчитывалось рассогласование волновых векторов взаимодействующих волн, и это рассогласование компенсировалось регулярной доменной структурой при температуре 30 °С: $\Lambda = 2\pi/(2k_1 - k_2)$.

Из рисунка 10 видно, что эффективность PPLN, изготовленного из кристалла с градиентом концентрации Li^+ в виде нарастающего гиперболического тангенса, выше, чем для кристалла с постоянной концентрацией. Причина снижения эффективности преобразования PPLN – влияние температуры. Локальный разогрев PPLN вдоль направления распространения излучения приводит к изменению условий согласования взаимодействующих волн, что эквивалентно изменению показателей преломления вдоль оси распространения электромагнитного поля, т. е. к появлению так называемой «термической линзы». Рисунок 11 иллюстрирует этот процесс при мощности накачки 18 Вт в PPLN, изготовленном из кристалла ниобата лития с концентрацией лития в нем 49,99 мол.%.




1 – постоянная концентрация лития в кристалле; 2 – спадающий параболический; 3 – нарастающий в виде гиперболического тангенса; 4 – гиперболический тангенс; 5 – параболический

Рисунок 9 – Концентрационные профили вдоль PPLN

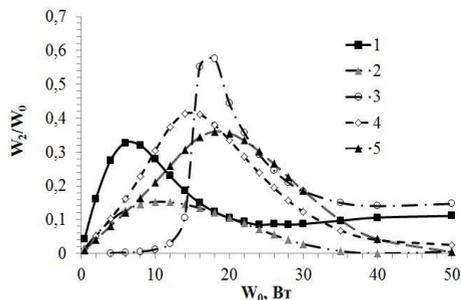
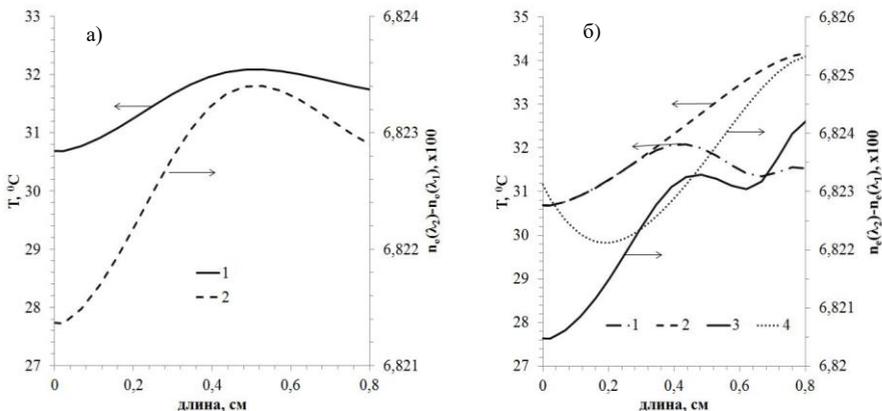


Рисунок 10 – Эффективность PPLN с различными концентрационными профилями

Из рисунка 11(б) видно, что в случае спадающего концентрационного профиля Li^+ вдоль PPLN образуется не одна область термически индуцированного изменения в разнице показателей преломления, как в случае PPLN с постоянной концентрацией лития, а два локальных искажения в разнице показателей преломления взаимодействующих волн. В тоже время для PPLN, изготовленного из кристалла, в котором концентрация лития нарастает по формуле гиперболического тангенса, эти термооптические искажения остаются, однако без соответствующих максимумов по длине PPLN. То есть в случае $C(\text{Li})$ (в виде кривой 3 на рис. 9) градиент вдоль PPLN компенсирует профиль разницы показателей преломления взаимодействующих волн (рис. 11(б)) таким

образом, что температура по длине PPLN является все время нарастающей функцией, это свидетельствует об увеличении мощности второй гармоники.



а) с постоянной концентрацией лития: 1 – температура, 2 – разность показателей преломления; б) с градиентом концентрации лития: спадающий параболический профиль: 1 – температура, 3 – разность показателей преломления; нарастающий в виде гиперболического тангенса профиль: 2 – температура, 4 – разность показателей преломления

Рисунок 11 – Сравнение температурных профилей и разницы показателей преломления необыкновенного луча вдоль PPLN при $W_0 = 18$ Вт

Также в данном разделе проведен анализ предложенной физико-математической модели PPLN-преобразователя в качестве логического элемента с учетом неоднородности дисперсии групповых скоростей по его длине для создания градиентного PPLN. При известной зависимости коэффициентов преломления от состава кристалла LiNbO_3 , определяемой уравнением Сельмера [18], проведена теоретическая оценка влияния градиента состава в PPLN-преобразователе на эффективность реализации в нем логических элементов.

В работе рассмотрены несколько градиентов концентрации вдоль PPLN основных компонентов: постоянная концентрация Li (рис. 12, черная линия), нарастающая (рис. 12, красная линия) и спадающая (рис. 12, зеленая линия) концентрация Li в виде полупараболы. На рисунке 12 по оси ординат показано отклонение концентрации Li от оптимальной для данного периода следования доменов при отсутствии градиента вдоль PPLN. Для моделирования прохождения сигналов через PPLN-структуру применялась система уравнений [19], вытекающая из уравнений Максвелла. Для расчетов использовались две независимые псевдослучайные последовательности бит, поступающие на входы каналов А и В. Единичный бит в этой последовательности соответствовал наличию импульса, логический ноль – его отсутствию. Форма импульсов – гиперболический секанс, ширина импульсов – 5 пс. Длина PPLN варьировалась

от 30 до 50 мм, эффективная апертура волновода – 50 мкм², период следования доменов – 18,8 мкм, что обеспечивало условия фазового квазисинхронизма для длины волны генерации суммарных частот 772 нм. Центральные длины волн каналов А и В соответственно 1550 и 1538 нм. Длина волны накачки – 1555 нм (третье телекоммуникационное окно прозрачности), длина холостой волны, которая генерируется процессом DFG, составляла 1533,2 нм. Пиковые значения мощности сигналов А и В и сигнала накачки – $100 \cdot \lambda_{SA}/\lambda_{SB}$ мВт и 1000 мВт соответственно.

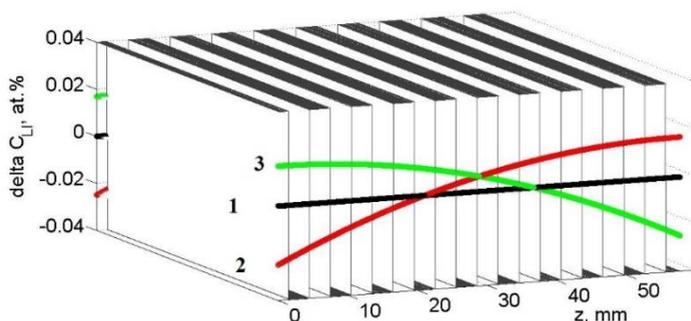
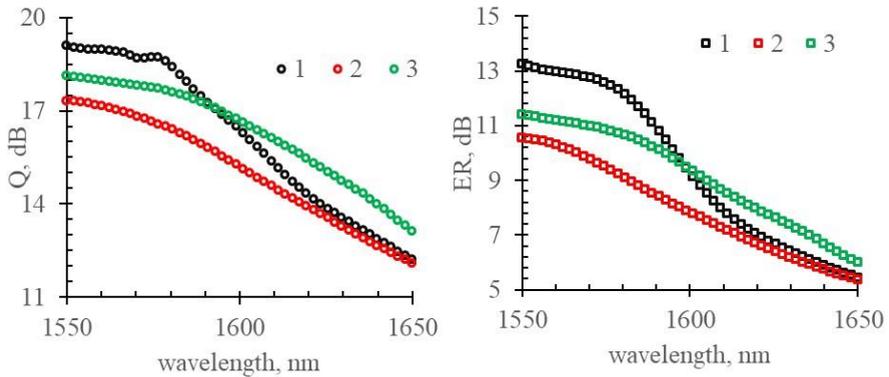


Рисунок 12 – Структурная схема градиента концентрации Li в логических элементах на основе PPLN:

- 1 (черная линия) – постоянный концентрационный профиль Li;
- 2 (красная линия) – концентрационный профиль Li в виде нарастающей полупараболы;
- 3 (зеленая линия) – концентрационный профиль Li в виде спадающей полупараболы

Результаты моделирования прохождения оптических импульсов через градиентные PPLN-структуры представлены на рисунке 13. Уменьшение амплитуды каналов А и В на выходе при совпадении импульсов на входе преобразователя является существенной величиной и позволяет задавать логические уровни сигналов. При реализации различных оптических устройств на ниобате лития рассматриваются два вида каскадных процессов: каскадная генерация второй гармоники и генерация разностной частоты (сSHG/DFG) и каскадная генерация суммарной и разностной частоты (сSFG/DFG). В данном разделе рассматривается новая схема фазочувствительного усилителя на основе сSHG/DFG процессов в градиентном PPLN волноводе и моделируются режимы работы предложенной фотонной структуры.

В модели рассматриваются три волны: накачка, сигнальная и холостая, с частотами ω_p , ω_s , ω_i . Эти три волны вводят внутрь волновода, между ними на входе волновода существует фиксированное отношение фаз. Волна накачки генерирует свою вторую гармонику ($2\omega_p$), которая взаимодействует с другими входными волнами через DFG процесс ($\omega_i = 2\omega_p - \omega_s$).



1 – для постоянного градиента Li вдоль PPLN;
 2 – для градиента Li вдоль PPLN в виде нарастающей парабола;
 3 – для градиента Li вдоль PPLN в виде спадающей парабола
Рисунок 13 – Зависимость Q-фактора и коэффициента экстинкции ER от длины волны канала A при различных градиентах Li вдоль PPLN:

В приближении медленно меняющихся амплитуд уравнения, описывающие cSHG/DFG, могут быть представлены так, как следует из [20]:

$$\frac{dE_p(z)}{z} = -\frac{\alpha_p}{2} E_p(z) + ik_{pp} \omega_p E_{SH}(z) E_p^*(z) e^{i\Delta k_{pp} z}, \quad (2)$$

$$\frac{dE_{SH}(z)}{z} = -\frac{\alpha_{SH}}{2} E_{SH}(z) + ik_{pp} \omega_p E_p^2(z) e^{-i\Delta k_{pp} z} + 2ik_{si} \omega_p E_s(z) E_i^*(z) e^{i\Delta k_{si} z}, \quad (3)$$

$$\frac{dE_s(z)}{z} = -\frac{\alpha_s}{2} E_s(z) + ik_{si} \omega_s E_{SH}(z) E_i^*(z) e^{-i\Delta k_{si} z}, \quad (4)$$

$$\frac{dE_i(z)}{z} = -\frac{\alpha_i}{2} E_i(z) + ik_{si} \omega_i E_{SH}(z) E_s^*(z) e^{-i\Delta k_{si} z}, \quad (5)$$

где E_p , E_{SH} , E_s и E_i обозначают напряженность электрического поля волны накачки, второй гармоники волны накачки, сигнальной и холостой волны соответственно. Взаимодействующие волны распространяются вдоль оси Z волновода. Коэффициенты связи для SHG (k_{pp}) и DFG (k_{si}) процессов выражаются через уравнения:

$$k_{pp} = d_{eff} \sqrt{\frac{2\mu_0}{cn_p^2 n_{SH} A_{eff}}}, \quad k_{si} = d_{eff} \sqrt{\frac{2\mu_0}{cn_{sn_i} n_{SH} A_{eff}}}, \quad (6)$$

где d_{eff} , μ_0 , c , A_{eff} и n_j представляют эффективный нелинейный коэффициент, проницаемость вакуума, скорость света, эффективную площадь моды в PPLN-волноводе, показатель преломления для каждой взаимодействующей волны соответственно. При построении модели рассматривалось взаимодействие π -0 при реализации геометрии фазового согласования (квазисинхронизма), в данном случае эффективный нелинейный коэффициент равен $2d_{33}/\pi$. Фазовое рассогласование в рассматриваемой модели составляет:

$$\Delta k_{pp} = k_{SH} - 2k_p - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad \Delta k_{si} = k_s + k_i - k_{SH} + \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (7)$$

где k – волновые векторы взаимодействующих волн;

Λ – период решетки в PPLN-волноводе.

Решение уравнений (2–5) имеет вид произведения модуля амплитуды и фазы взаимодействующих волн. Одно из важных отличий рассматриваемой модели – наличие градиента состава кристалла, из которого изготавливается PPLN с волноводом. Наличие градиента в составе PPLN неизбежно приводит к градиенту фазового рассогласования по длине из-за зависимости показателя преломления взаимодействующих волн.

При оценке коэффициента усиления градиентных фазочувствительных усилителей длина волны накачки составляла 1546,0 нм, длина сигнальной и холостой волны – 1541,4 нм и 1550,6 нм соответственно. Эффективная площадь моды составляла 52 мкм², коэффициенты потерь в волноводе считались 0,35 дБ/см для волны накачки, сигнальной и холостой и 0,7 дБ/см для второй гармоники накачки. Решение уравнений производилось методом конечных разностей.

На рисунке 14(a) представлены используемые в работе градиенты состава ниобата лития для изготовления PPLN. Рассматриваемые в данной главе градиенты состава ниобата лития по основным компонентам выбирались по принципу одинакового среднего значения концентрации ионов лития вдоль оси Z, на длине 30 или 50 мм данные волноводы в градиентных PPLN обладают одинаковым средним составом по литию 48,6 %. Исследовались как нарастающие градиенты (увеличение концентрации лития вдоль оси Z), так и убывающие по такому же закону градиенты. На рисунке 14(b)-(f) представлены выявленные результаты зависимости коэффициента усиления градиентных PPLN от начальной фазы сигнала накачки. Начальные фазы остальных сигналов фиксировались. Из рисунка 14 видно, что максимальный коэффициент усиления достигается для PPLN с однородным распределением лития, то есть без градиента. Наличие градиента уменьшает максимальное значение коэффициента усиления, сдвигая кривые усиления в разные стороны от первоначального положения относительно безградиентного PPLN. На рисунке 14(b)-(d) для нарастающего и спадающего по одному закону градиента фазовые максимумы и минимумы коэффициента усиления сдвигаются симметрично в разные стороны. На рисунке 14(e) представлен фазовый портрет кривых усиления для безградиентного PPLN и для PPLN с градиентами в виде параболы и обратной параболы. Видно, что фазовые кривые усиления для обеих парабол совпадают, кроме небольшого увеличения коэффициента усиления для градиента в виде обратной параболы. При детальном изучении фазового портрета кривых усиления видно, что, как и в случае с безградиентными, у градиентных PPLN наблюдается зависимость от фаз входных сигналов коэффициента усиления. Значит, существует возможность получения фазочувствительного усилителя оптических сигналов. Большие значения коэффициента усиления наблюдаются у градиентов спадающих, чем у нарастающих при одинаковом условии (линейный градиент, полупарабола и т.д.).

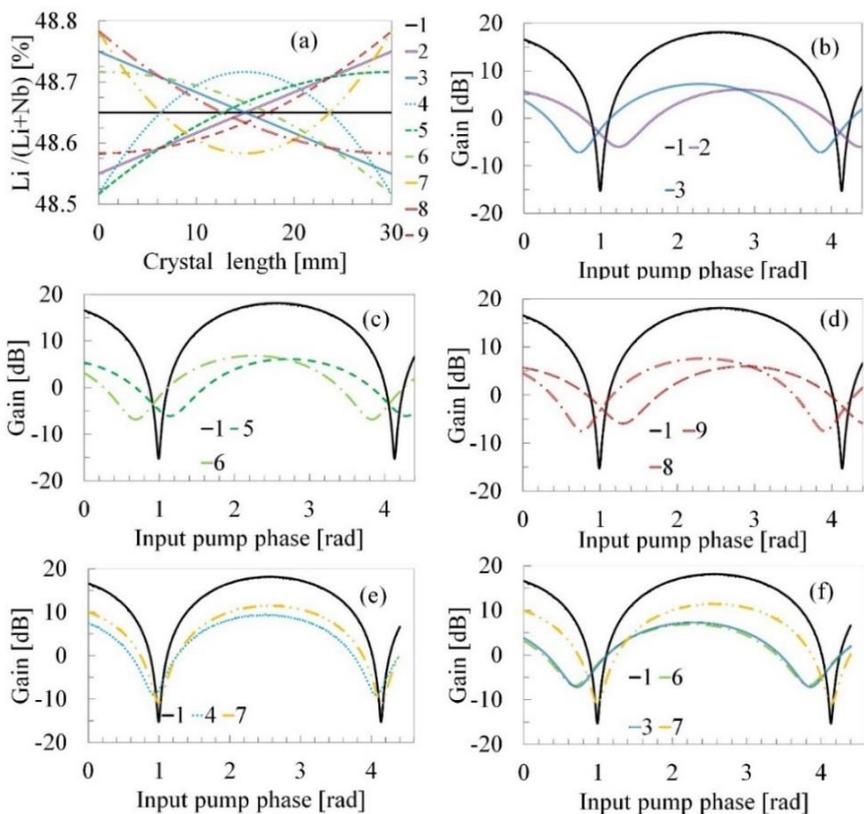


Рисунок 14 – Градиенты состава ниобата лития (а) и соответствующее им усиление сигнала как функция начальной относительной фазы накачки для кристалла длиной 30 мм и входной мощности накачки 30 дБм (b)-(f)

Анализ кривых максимума коэффициента усиления сигнала фазочувствительного усилителя как функции длины волны при постоянной длине волны накачки и мощности 30 дБм для PPLN-усилителя длиной 30 мм показал ширину перестройки по длине волны 150 нм, а при использовании в качестве фазочувствительного усилителя PPLN с градиентом концентрации в виде параболы диапазон перестройки по длине волны увеличивается на 35 %. Из рисунка 15 также следует различный диапазон перестройки по длине волны для фазочувствительного усилителя в случае спадающего градиента в виде параболы (кривая 8 рис. 14(a)) и нарастающего по тому же закону градиента (кривая 7 рис. 14(a)).

Таким образом, при использовании в качестве фазочувствительного усилителя градиентного PPLN будет важно направление распространения сигнала в волноводе: по направлению нарастания или падения концентрации лития.

Исследования технологических приемов создания волноводов в градиентном ниобате лития для функциональных оптических элементов включали в себя использование комплекса безмасковой фотолитографии для оперативного изменения топологии создаваемых канальных структур в градиентном ниобате лития. Для снижения доли экзодиффузии лития, ассоциированной с высокими температурами, характерными для Тi-диффузного метода, применялся метод протонного обмена [21].

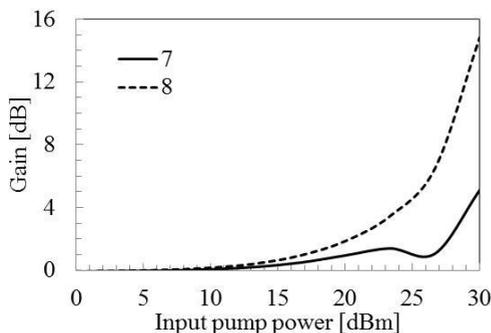


Рисунок 15 – Максимальный коэффициент усиления PSA как функция входной мощности накачки для кристалла длиной 30 мм и градиента состава 7 и 8 (рис. 14(a))

Главный акцент при моделировании и подборе технологических параметров волноводных структур в градиентных кристаллах ниобата лития состоял в обеспечении однородности геометрии формируемого волновода при сохранении градиента показателя преломления вдоль направления распространения сигнала. Сформированы: канальный волновод; X-, Y- разветвители; интерферометр Маха-Цендера. Ширина волноводных структур составила 15 мкм, при изначально формируемых полосах с помощью Al маскирующего слоя – 10 мкм. Отжиг волноводных структур, полученных методом протонного обмена, проводился при температуре от 350 °С до 400 °С в течение от 1 до 5 часов. Применительно к используемым пластинам ниобата лития, вырезанным из градиентного кристалла, при изменении показателя преломления за счет протонного обмена и последующего отжига, изменение показателя преломления составляет несколько сотых единиц. В тоже время, в соответствии с уравнением Сельмеера, изменение показателя преломления для пластины градиентного ниобата лития с изменением по процентному составу Li₂O с 45,75 до 52 составляет для необыкновенного луча с 2,1381 до 2,1369 для длины волны 1064 нм при T = 300 К. Данный масштаб при сопоставлении изменений показателя преломления при протонном обмене и изменении за счет концентрационного профиля по основным компонентам 0,0012 (при изменении состава практически в диапазоне существования фазы LiNbO₃ от конгруэнтного до стехиометрического) свидетельствует о принципиальной возможности формирования волноводов в градиентном ниобате лития и сохранении градиента в волноводном канале.

В заключении кратко сформулированы результаты диссертационного исследования.

1 На основе изучения фазовых переходов и фазовых диаграмм состояния разработаны новые принципы физико-технологического способа выращивания оптических градиентно-активированных монокристаллов ниобата лития и

ниобата калия, основанные на кристаллизации с естественной скоростью при сочетании составов расплава во внешнем тигле, внутреннем тигле и геометрии системы тигля и расплава, при которой скорость вытягивания кристалла из расплава относительно первоначального положения уровня расплава минимальна и находится в диапазоне 0...1,5 мм/ч. Рост кристалла ниобата лития осуществлялся за счет кристаллизации части объема расплава и уменьшения уровня расплава относительно первоначального с сохранением задаваемого градиента концентрации по основным компонентам.

На основе прогнозирования изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий предложена новая методика определения состава расплава, из которого был проведен процесс выращивания и/или из которого планируется выращивание монокристалла ниобата лития. Для реализации методики разработана система регистрации температуры и программатор линейного снижения/повышения мощности.

В разработанном новом методе получения градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия погрешность измерения температуры составила не более ± 2 К, массы – не более $\pm 0,5$ мг. Таким образом, при анализе петли гистерезиса температура фазового перехода определяется в коридоре ошибок 4 К. Поскольку на гистерезисной кривой наблюдается вертикальный участок, то при проведении вертикальной линии в середине коридора погрешности точность определения температуры повышается до 1 К. Дальнейшее повышение точности определения температуры фазового перехода достигается за счет повышения качества фильтрации помех при измерении ее текущего значения.

Дальнейшим развитием взятого за основу метода выращивания кристаллов ниобата лития и ниобата калия по Чохральскому с жидкостной подпиткой является использование не только жидкостной, но и твердофазной подпитки при сохранении геометрии и конструкции ростового узла. Получены кристаллы с возрастающей и спадающей концентрацией основных компонентов и с последовательным чередованием возрастания и убывания концентрации основных компонентов $n_{Li}/n_{Nb} = 0,94...0,99$ в кристалле.

Установлено, что в спектре КР выращенных кристаллов ниобата калия наблюдается только одна линия, расположенная на 834 см^{-1} и отвечающая валентным мостиковым колебаниям атомов кислорода, что свидетельствует о равноценности в структуре одноименных мостиков B_1-O и B_2-O при эквивалентном расположении подавляющего большинства соответствующих одноименных катионов внутри кислородных октаэдров.

2 Разработан новый метод исследований оптических свойств выращенных градиентных кристаллов ниобата калия и ниобата лития в видимом и ИК-диапазоне, основанный на температурных исследованиях оптимальной концентрации доноров и акцепторов (Yb^{3+} , Er^{3+}) в лазерной градиентной по основным и примесным ионам нелинейно-оптической среде ($LiNbO_3$).

Впервые в градиентно-активированных нелинейно-оптических кристаллах $Yb,Er:LiNbO_3$ обнаружено увеличение интенсивности люминесценции на 15–20 % в температурном интервале от 300 до 473 К и снижение интенсивности

полуторамикронной люминесценции на 30 % в градиентно-активированных нелинейно-оптических кристаллах $\text{Er}:\text{LiNbO}_3$ в том же температурном интервале, что связано со снижением доли обратного переноса энергии с Er на Yb .

3 Впервые установлено, что использование ниобата калия в качестве нелинейно-оптической среды для генерации излучения в ТГц-диапазоне характеризуется температурным коэффициентом показателя преломления, сопоставимым с температурным коэффициентом показателя преломления ниобата лития $\Delta n/\Delta T = (0,6 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Впервые обнаружена закономерность, что активирование ниобата лития традиционными лазерными ионами Yb^{3+} , Er^{3+} , Cr^{3+} для сочетания свойств нелинейно-оптической среды со средой для усиления оптических сигналов за счет внутриатомных переходов существенно увеличивает температурный коэффициент показателя преломления в ТГц-диапазоне $\Delta n/\Delta T$ с $0,7 \cdot 10^{-3}$ до $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Разработана методика формирования регулярной доменной структуры в градиентном ниобате лития, включающая нанесение макета решетки с различной скважностью на поверхность кристаллических пластин с помощью комплекса безмасковой фотолитографии и последующую поляризацию высоковольтными электрическими импульсами. Повторяемость методики составляет 80–90 % в зависимости от толщины пластины d (повторяемость увеличивается при $d < 0,3 \text{ мм}$).

Разработана методика для измерения градиента коэрцитивного поля кристаллов LiNbO_3 . Значения коэрцитивного поля для градиентных кристаллов LiNbO_3 околостехиометрического состава составляет от 6 до 7 кВ/см. Предложенная методика включает применение высоковольтного управляемого источника питания, генератора сигналов, высоковольтной жидкостной ячейки. С помощью разработанного устройства измерены вольтамперные характеристики выращенных кристаллов и величина коэрцитивного напряжения. Профиль изменения величины коэрцитивного поля в градиентных кристаллах LiNbO_3 совпадает с формой фронта кристаллизации монокристалла.

4 Разработана физико-математическая модель фотонного элемента для преобразования оптического излучения, в том числе с одновременной перестройкой на разных длинах волн по разным координатам по ширине активного элемента, включающая активный модуль в виде прямоугольного параллелепипеда с плоско-полированными гранями, выполненного из градиентного PPLN с периодом 15 мкм (градиент концентрации ионов лития с неоднородным распределением в соответствии с формулой: $\text{Li}_{a(y)}\text{Nb}_{b(y)}\text{O}_3$, где $a(y) = p \cdot F(y)$, $0,97 \leq a(y) \leq 1$, $p - \text{const}$, $0,1 \leq p \leq 1$, $F(y) = -0,028(y - 1)^2 + 1$; $b(y) = 2 - a(y)$; y – пространственная координата, направленная по ширине активного элемента (см) в системе отсчета, берущей начало на боковой грани активного элемента). Ориентация доменов регулярной структуры активного элемента параллельна входной грани активного элемента.

Впервые построена и исследована физико-математическая модель градиентного PPLN для преобразования излучения непрерывных лазеров во вторую гармонику, отличающаяся учетом температурных эффектов, связанных с поглощением в преобразователе излучения на частоте накачки, частоте второй гармоники и двухфотонном поглощении.

Обнаружена закономерность исследованных физико-математических моделей PPLN, изготовленных из градиентного ниобата лития с постоянным периодом доменной структуры и из однородного ниобата лития с градиентом периода, которые отличаются от известных моделей учетом температурных искажений при преобразовании излучения, приводящая к одинаковым результатам по селективности коэффициента усиления в узком интервале мощностей накачки (> 20 дБм) непрерывным лазером.

Впервые определена эффективность градиентных PPLN при преобразовании во вторую гармонику излучения мощных непрерывных лазеров (> 20 дБм), которая при градиентах в виде гиперболического тангенса при сохранении среднего значения концентрации основных компонентов выше минимум на 20 %, чем для обычных PPLN.

Полученные значения эффективности преобразования оптического излучения накачки W_2/W_1 во вторую гармонику в градиентных PPLN наблюдаются в более ограниченном интервале мощностей накачки (от 15 до 24 Вт), чем у PPLN, изготовленных из оптически однородных кристаллов ниобата лития (от 2 до 13 Вт), по причине нелинейного изменения разности фаз взаимодействующих волн.

Установлено, что для формирования селективности коэффициента усиления излучения второй гармоники по мощности непрерывных лазеров при изменении мощности накачки с 82 % до 100 % коэффициент усиления второй гармоники возрастает на 8 дБ, а при изменении мощности накачки в диапазоне от 72 % до 100 % возрастает на 13 дБ.

5 Впервые разработана и исследована физико-математическая модель оптического логического элемента, реализующего функции логического умножения сигналов на входах A и B , функции $A \cdot B$ и $B \cdot \bar{A}$, на основе волноводной периодически-поляризованной структуры в ниобате лития с концентрационным градиентом L_i по составу (PPLN-преобразователя). Рассчитаны коэффициенты затухания сигнала на выходе A и B (Q-фактор, коэффициент экстинкции) в процессе реализации логических функций $A \cdot B$ и $B \cdot \bar{A}$ при различных направлениях концентрационного градиента L_i по составу в PPLN-преобразователе. При реализации градиента L_i вдоль PPLN (градиента дисперсии групповых скоростей вдоль преобразователя) максимум Q-фактора и коэффициента экстинкции в третьем телекоммуникационном окне прозрачности становится меньше, чем при отсутствии градиента в PPLN, при этом полоса пропускания логических элементов в таком устройстве по уровню 15 дБ становится шире на 60 нм и зависит от направления распространения сигналов вдоль градиента.

6 Впервые экспериментально подобраны технологические режимы изготовления волноводов в градиентном ниобате лития. Для создания заглубленных оптических волноводов были использованы методы термического нанесения маскирующего слоя алюминия, фотолитографии, ионного обмена в бензойной кислоте. После проведения постобменного отжига полученных образцов в течение 3–4 часов при температуре 250–300 °С в кислородной атмосфере были получены образцы градиентного ниобата лития со сформированной на нем волноводной структурой шириной 15 мкм, состоящей из канальных волноводов, Y- и X-разветвителей, а также с топологией, соответствующей топологии интерферометра Маха–Цендера.

Впервые получены согласованные с физико-математической моделью значения эффективности работы градиентного PPLN при измерении мощности опорного излучения (накачки) на длине волны 1053 нм и мощности второй гармоники на длине волны 526,5 нм, интегральная эффективность преобразования в диапазоне 160...342 мВт составила 22 %. Анализ зависимости относительной эффективности ГВГ (P2/P1) от мощности накачки свидетельствует о снижении в пределах 10 % эффективности с увеличением мощности накачки, что связывается с фоторефрактивным эффектом и локальным разогревом градиентного PPLN при увеличении мощности накачки, сопровождающимся изменением условий фазового квазисинхронизма по направлению распространения сигнала.

Список работ по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

1 Polarization and temperature studies of the spectral luminescent properties of Er:LiNbO₃ ceramics on Yb substrate, Er:LiNbO₃ / **V.V. Galutskiy**, K.V. Puzanovskiy, E.V. Stroganova [et al.]. – Text : direct // Optics Communications. – 2021. – V. 501. – P. 127386. **Q2**

2 Temperature dependence of ER³⁺, YB³⁺ kinetic spectra in the gradient crystals of lithium niobate / I.D. Babenko, **V.V. Galutskiy**, E.V. Stroganova [et al.]. – Text : direct // Optical Materials. – 2020. – V. 102. – P. 109818. **Q1**

3 **Galutskiy, V.V.** Growth of lithium niobate and potassium niobate single crystals using the Czochralski method with liquid and ceramic charging / V.V. Galutskiy, S.S. Ivashko, E.V. Stroganova. – Text : direct // Solid State Sciences. – 2020. – V. 108. – P. 106355. **Q2**

4 Cr³⁺ luminescence quenching in stoichiometric lithium niobate crystals / M.G. Brik, **V.V. Galutskiy**, V.A. Lebedev [et al.]. – Text : direct // Journal of Non. – Crystalline Solids. – 2006. – V. 352. – Issue 23–25. – P. 2395–2398. **Q1**

5 **Galutskiy, V.V.** Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging / V.V. Galutskiy, E.V. Stroganova, M.I. Vatlina. – Text : direct // Journal of Crystal Growth. – 2009. – V. 311. – P. 1190–1194. **Q1**

6 Structure of the $\text{LiNbO}_3:\text{Mg,Cr}$ crystal and its properties at visible and terahertz wavelengths / **V.V. Galutskiy**, E.V. Stroganova, N.A. Yakovenko [et al.]. – Text : direct // Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal). – 2018. – V. 85. – Issue 4. – P. 193–196. **Q2**

7 Formation of channel proton-exchange waveguides in YB^{3+} , $\text{ER}^{3+}:\text{PPLN}$ / **V.V. Galutskiy**, I.G. Ponetaeva, K.V. Puzanovskiy, E.V. Stroganova. – Text : direct // Applied Nanoscience. – 2022. – V. 12. – P. 3417–3420. **Q2**

8 **Galutskiy, V.V.** A comparative analysis of ytterbium-erbium media for 1.5 μm lasers / V.V. Galutskiy, E.V. Stroganova, N.A. Yakovenko. – Text : direct // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 660. – P. 40–46.

9 Frequency conversion in compositionally graded PPLN crystals / **V.V. Galutskiy**, E.V. Stroganova, S.A. Shmargilov [et al.]. – Text : direct // Quantum Electronics. – 2014. – V. 44. – № 1. – P. 30–33. **Q2**

10 Investigation of the feature of the influence of the refractive index gradient on the transmission coefficient in the 1.5 microns range in an electro-optical converter based on lithium niobate / S.A. Shmargilov, **V.V. Galutskiy**, K.V. Puzanovskiy, E.V. Stroganova. – Text : direct // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – V. 16 (1.1). – P. 102–108.

11 Stroganova, E.V. Optical properties of $\text{Er}:\text{LiNbO}_3$ ceramics on $\text{Yb,Er}:\text{LiNbO}_3$ substrate / E.V. Stroganova, **V.V. Galutskiy**, M.V. Kuplevich. – Text : direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2131(4). – P. 042051.

12 Phase-sensitive amplification based on gradient $\text{Er}:\text{PPLN}$ / **V.V. Galutskiy**, S.A. Shmargilov, E.V. Stroganova [et al.]. – Text : direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2103. – P. 012183.

13 **Galutskiy, V.V.** Phase sensitive amplification in a periodically poled gradient lithium niobate waveguide / V.V. Galutskiy, S.S. Ivashko, E.V. Stroganova. – Text : direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1697. – P. 012164.

14 Physical and mathematical modeling and formation of the optical signal transducer on the basis of gradient lithium niobate / **V.V. Galutskiy**, V.F. Kuzora, S.A. Shmargilov [et al.]. – Text : direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1697. – P. 012144.

15 Nalbantov, N.N. Quantum efficiency of energy transfers in non-uniformly doped crystals of $\text{Er,Yb}:\text{LiNbO}_3$ / N.N. Nalbantov, E.V. Stroganova, **V.V. Galutskiy**. – Text : direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 737. – P. 012017.

16 A study of quantum efficiency multichannel relaxation in $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ crystals / E.V. Stroganova, N.N. Nalbantov, **V.V. Galutskiy** [et al.]. – Text : direct // Optics and Spectroscopy. – 2016. – V. 121. – № 6. – P. 856–861.

17 Increasing pumping efficiency by using gradient-doped laser crystals / E.V. Stroganova, **V.V. Galutskiy**, D.S. Tkachev [et al.]. – Text : direct // Optics and Spectroscopy. – 2014. – V. 117. – № 6. – P. 984–989.

18 Stroganova, E.V. Spectral separation of Cr^{3+} optical centers in stoichiometric magnesium-doped lithium niobate crystals / E.V. Stroganova, **V.V. Galutskiy**,

N.A. Yakovenko. – Text : direct // Optics and Spectroscopy. – Condensed Matter Spectroscopy. – 2011. – V. 110. – № 3. – P. 401–407.

19 Тушение люминесценции хрома в стехиометрических кристаллах $\text{Cr}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ / А.Г. Аванесов, **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова [и др.]. – Текст : непосредственный // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2005. – № 4. – С. 59–64.

20 Влияние скважности фотошаблона на формирование градиентного PPLN / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, В.Ф. Кузора [и др.]. – Текст : непосредственный // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2016. – № 3. – С. 18–22.

21 Исследование параметров формирования доменной структуры в градиентном ниобате лития / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, С.А. Шмаргилов [и др.]. – Текст : непосредственный // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2015. – № 4. – С. 37–42.

22 **Галуцкий, В.В.** Люминесцентные свойства доминирующих центров ионов хрома в кристаллах ниобата лития с магнием / В.В. Галуцкий, Е.В. Строганова. – Текст : непосредственный // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – № 3. – С. 58–62.

23 Методика изучения концентрационной релаксации расплава при выращивании монокристаллов по Чохральскому с подпиткой / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, Н.А. Яковенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука Кубани. – 2010. – № 4. – С. 4–8.

24 Методика контроля состава расплава при выращивании монокристаллов методом Чохральского с подпиткой / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, С.Г. Березный [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2009. – № 2. – С. 32–34.

25 **Галуцкий, В.В.** Температурные дисперсии показателей преломления и коэффициентов поглощения кристаллов ниобата калия и лития в терагерцовом диапазоне / В.В. Галуцкий, С.С. Ивашко. – Текст : непосредственный // Оптический журнал. – 2020. – № 1. – С. 62–68.

26 Прытков, А.Ю. Исследование градиентных периодически-поляризованных кристаллов ниобата лития на возможность генерации терагерцового излучения / А.Ю. Прытков, Н.А. Яковенко, **В.В. Галуцкий**. – Текст : непосредственный // Наука Кубани. – 2012. – № 4. – С. 4–10.

27 Определение центрального состава градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с примесью магния и хрома / Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий**, К.В. Судариков [и др.]. – Текст : непосредственный // Автометрия. – 2016. – Т. 52. – № 2. – С. 73–80.

28 Спектрально-люминесцентные характеристики градиентно-активированных кристаллов LiNbO_3 с концентрационными профилями ионов Yb^{3+} и Er^{3+} / Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий**, Н.Н. Налбантов [и др.]. – Текст : непосредственный // Автотметрия. – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 94–99.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1 Патент № 2402646 Российская Федерация, МПК С30В 15/20 (2006.01), С30В 15/02 (2006.01), С30В 15/12 (2006.01). Способ выращивания монокристаллов с заданным распределением примесей по его длине : № 2009108748/05 : заявл. 10.03.2009 : опубл. 20.09.2010 / **Галуцкий В.В.**, Строганова Е.В. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

2 Патент № 167908 U1 Российская Федерация, МПК H01S 3/06 (2006.01). Устройство преобразования оптического излучения : № 2016126905 : заявл. 04.07.2016 : опубл. 11.01.2017 / **Галуцкий В.В.**, Кузора В.Ф., Строганова Е.В., Шмаргилов С.А., Яковенко Н.А. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

3 Патент № 2591253 С1 Российская Федерация, МПК H01S 3/16 (2006.01), С30В 29/28 (2006.01). Монокристаллический материал с неоднородным распределением оптических примесей для активного лазерного элемента : № 2015116782/28 : заявл. 30.04.2015 : опубл. 20.07.2016 / Строганова Е.В., **Галуцкий В.В.**, Налбантов Н.Н., Цема А.А., Яковенко Н.А. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

4 Патент № 2591257 С1 Российская Федерация, МПК H01S 3/16 (2006.01), С30В 29/28 (2006.01). Монокристаллический материал для дискового лазера : № 2015116783/28 : заявл. 30.04.2015 : опубл. 20.07.2016 / Строганова Е.В., **Галуцкий В.В.**, Ткачев Д.С., Яковенко Н.А. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

5 Патент № 2614199 С1 Российская Федерация, МПК H01S 3/109 (2006.01). Градиентный периодически поляризованный ниобат лития : № 2015154223 : заявл. 16.12.2015 : опубл. 23.03.2017 / Строганова Е.В., **Галуцкий В.В.**, Шмаргилов С.А., Кузора В.Ф. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

6 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617063 Российская Федерация. Расчет спектрально-кинетических параметров оптических центров с сильным пересечением полос люминесценции : № 2013613636 : заявл. 30.04.2013 : опубл. 20.09.2013 / Строганова Е.В., Яковенко Н.А., **Галуцкий В.В.**, Судариков К.В., Цема А.А. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

7 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616964 Российская Федерация. Расчет пространственно-временных характеристик люминесценции в кристаллах Yb:Er:LiNbO_3 : № 2017614011 : заявл. 28.04.2017 : опубл. 21.06.2017 / Налбантов Н.Н., **Галуцкий В.В.**, Строганова Е.В. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

8 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660180 Российская Федерация. Расчет угла фазового синхронизма в градиентных двухосных нелинейно-оптических кристаллах : № 2021619010 :

заявл. 09.06.2021 : опубл. 22.06.2021 / **Галуцкий В.В.**, Пузановский К.В., Строганова Е.В. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

9 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022619761 Российская Федерация. Программа для измерений спектров поглощения и отражения на терагерцовом спектрографе : № 2022618835 : заявл. 18.05.2022 : опубл. 26.05.2022 / Репин Р.Л., Пузановский К.В., Строганова Е.В., **Галуцкий В.В.** – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

10 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618765 Российская Федерация. Интерактивный комплекс расчета тепловых и генерационных параметров в градиентных лазерных кристаллах : № 2012616623 : заявл. 03.08.2012 : опубл. 26.09.2012 / **Галуцкий В.В.**, Яковенко Н.А., Строганова Е.В., Ткачев Д.С. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

Прочие публикации:

1 Spectroscopy of $\text{Yb}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ single crystals / I.V. Voroshilov, **V.V. Galutsky**, V.A. Lebedev [et al]. – Text : direct // IV Reunión iberoamericana de óptica (RIO) y VII Encuentro latinoamericano de óptica, láseres y aplicaciones (OPTILAS) Kaufmann G.H., Guillermo H. Proceedings. Bellingham, Wash., 2001. – С. 11–12.

2 Spectroscopic properties and generation parameters of $\text{Yb}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ laser crystals / A.N. Gavrilenko, I.V. Voroshilov, **V.V. Galutskiy** [et al]. – Text : direct // XI Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare earth and transition metal ions. – Kazan : SPIE, 2001. – P. 122.

3 Выращивание лазерных монокристаллов тригонального диортобората церия-скандия $\text{Cr}:\text{CeSc}_3(\text{BO}_3)_4$ из тигля-реактора / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, В.А. Лебедев, И.В. Ворошилов, I.M. Razdobreev, A. De Baker. – Текст : непосредственный // X Национальная конференция по росту кристаллов НКРК–2002. – Москва : Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, 2002. – С. 157.

4 Выращивание кристаллов стехиометрического ниобата лития / А.Г. Аванесов, **В.В. Галуцкий**, В.А. Лебедев, А.Л. Михайленко, В.Ф. Писаренко, А.В. Саакян, Е.В. Строганова. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов X семинара-совещания «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 6–11 июня 2004 г.). – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2004. – С. 82–86.

5 Модернизация установок для вытягивания монокристаллов методом Чохральского в режиме автоматического контроля диаметра слитка / А.Г. Аванесов, **В.В. Галуцкий**, В.А. Лебедев, А.Л. Михайленко, В.Ф. Писаренко, А.В. Саакян, Е.В. Строганова [и др.]. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов X семинара-совещания «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 6–11 июня 2004 г.). – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2004. – С. 90–94.

6 Широкополосная люминесценция хрома в стехиометрических кристаллах $\text{Cr}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ ($\text{Cr}:\text{SLN}$) / А.Г. Аванесов, **В.В. Галуцкий**, Б.В. Игнатъев,

В.А. Лебедев, А.Л. Михайленко, Е.В. Строганова – Текст : непосредственный // Тезисы докладов XI семинара совещания «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 18–23 сентября 2005 г.). – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2005. – С. 73–75.

7 Properties of the $\text{LiNbO}_3:\text{Cr}^{3+}$ crystals grown by guided reactor Czochralski method / M.G. Brik, **V.V. Galutskiy**, B.V. Ignat'ev [et al.]. – Text : direct // First conference on advances in optical materials. – Tucson : Arizona, 2005. – P. 32.

8 Пороговый эффект в формировании центров Cr^{3+} в кристаллах SLN с магнием / **В.В. Галуцкий**, Б.В. Игнат'ев, В.А. Лебедев, Е.В. Строганова [и др.]. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов XI семинара-совещания «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 18–23 сентября 2005 г.). – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2005. – С. 82–83.

9 Структурные, спектроскопические и люминесцентные исследования концентрационно профилированных кристаллов стехиометрического ниобата лития / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, Б.В. Игнат'ев [и др.]. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов XII семинара-совещания «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 1–7 октября 2006 г.). – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2006. – С. 106.

10 **Галуцкий, В.В.** Широкополосная люминесценция ионов Cr^{3+} в кристаллах ниобата лития : специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Галуцкий Валерий Викторович. – Краснодар, 2006. – 27 с. – Текст : непосредственный.

11 Исследования профилированных монокристаллов, выращенных методом Чохральского с управляемым реактором / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, Б.В. Игнат'ев [и др.] – Текст : непосредственный // Тезисы докладов XIII семинара-совещания «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 30 сентября – 6 октября 2007 г.). – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2007. – С. 75–77.

12 **Галуцкий, В.В.** Использование температурного ПИД-регулятора при выращивании концентрационно-профилированных кристаллов ниобата лития / В.В. Галуцкий, Е.В. Строганова, А.Ю. Прытков. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий: I Всероссийская научно-практическая (заочная) конференция (Москва, 15–31 декабря, 2009 г.). – Москва : НИИРПП, 2009. – С. 44–46.

13 **Galutskiy, V.V.** Sensitizing laser crystals with gradient of dopants concentration / V.V. Galutskiy, E.V. Stroganova, N.A. Yakovenko. – Text : direct // 14-th International conference on laser optics “LO-2010”. – St. Petersburg, Russia, 2010. – WeW1 – P. 15.

14 Моделирование логических элементов на основе PPLN-преобразователей из градиентно-концентрированных кристаллов ниобата лития DSPA / **В.В. Галуцкий**, А.С. Васяев, А.Ю. Прытков, А.А. Фешин. – Текст : непосредственный // Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2011. – Т. 1. – № 4. – С. 258–260.

15 Лазерные кристаллы с заданным распределением оптической примеси / Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий**, В.А. Чернявский [и др.]. – Текст : непосредственный // Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике НИЯУ МИФИ : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2011. – С. 124–125.

16 Q-фактор в градиентных кристаллах / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, Н.А. Яковенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов научно-технической конференции-семинара по фотонике и информационной оптике НИЯУ МИФИ. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2011. – С. 155–156.

17 Квантовая эффективность продольной накачки в градиентных лазерных кристаллах / Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий**, Н.А. Яковенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2012. – С. 96–97.

18 Модель оптических логических элементов на основе PPLN-преобразователя из градиентного ниобата лития / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, В.Ф. Кузора [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и мир. – 2014. – Т. 1. – № 4. – Вып. 8. – С. 18–22.

19 Терагерцовые спектры коэффициента преломления градиентного ниобата лития / С.А. Харченко, **В.В. Галуцкий**, В.Ф. Кузора, Е.В. Строганова, Н.А. Яковенко. – Текст : непосредственный // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2014. – С. 123–124.

20 Сравнительный анализ эффективности преобразователя из ниобата лития с градиентом состава и с градиентом периода / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, С.А. Шмаргилов, Н.А. Яковенко. – Текст : непосредственный // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2014. – С. 255–256.

21 Строганова, Е. В. Распределение электромагнитного поля продольной накачки в градиентном лазерном кристалле с двойным легированием ионами Er^{3+} и Yb^{3+} / Е.В. Строганова, Н.Н. Налбантов, **В.В. Галуцкий**. – Текст : непосредственный // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2014. – С. 97–98.

22 Функциональные элементы на основе градиентного PPLN / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, В.Ф. Кузора [и др.]. – Текст : непосредственный // Международный конгресс «Интерэкспо Гео-Сибирь». – Новосибирск : Сибирский гос. ун-т геосистем и технологий, 2015. – Т. 1. – С. 95–100.

23 Исследование фоторефракции градиентных кристаллов LiNbO_3 на длине волны 1053 нм / К.В. Судариков, Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий** [и

др.] – Текст : непосредственный // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2015. – С. 54–55.

24 Сравнительные генерационные характеристики 1,5 мкм излучения в кристаллах Er, Yb:LiNbO_3 / В.В. Галуцкий, Е.В. Строганова, Н.Н. Налбантов [и др.]. – Текст : непосредственный // Материалы XXII Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2016. – С. 243–250.

25 Моделирование коэрцитивного поля в градиентном кристалле ниобата лития / И.Д. Бабенко, Ю.А. Барбанакова, **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, Н.А. Яковенко. – Текст : непосредственный // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2016. – С. 378–379.

26 Эффективность ГВГ в PPLN с градиентом периода / **В.В. Галуцкий**, Е.В. Строганова, С.А. Шмаргилов, Н.А. Яковенко. – Текст : непосредственный // Оптика и спектроскопия конденсированных сред : материалы XXII Международной научной конференции. – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2016. – С. 168–173.

27 Спектрально-люминесцентные характеристики градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с концентрационными профилями ионов Yb^{3+} и Er^{+3} / Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий**, Н.Н. Налбантов [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник материалов XII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО–Сибирь – 2016». – Новосибирск : Сибирский гос. ун-т геосистем и технологий, 2016. – С. 9–14.

28 Evaluation of applicability of lithium niobate crystals Z-cut with predetermined impurity distribution for manufacturing of proton-exchanged waveguides / А.В. Сосунов, Р.С. Пономарев, **В.В. Галуцкий** [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского университета. Физика. – 2017. – Т. 36. – № 2. – С. 69–73.

29 Налбантов, Н.Н. Пороговые энергетические характеристики 1,5 мкм лазерной генерации в градиентных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er, Yb}$ / Н.Н. Налбантов, Е.В. Строганова, **В.В. Галуцкий**. – Текст : непосредственный // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный ун-т «МИФИ», 2017. – С. 42–43.

30 **Галуцкий, В.В.** Использование градиентного PPLN: Er^{3+} для усиления оптических сигналов / **В.В. Галуцкий**, В.Ф. Кузора, Е.В. Строганова. – Текст : непосредственный // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2017. – С. 316–317.

31 **Галуцкий, В.В.** Моделирование градиентного PPLN: Yb^{3+} усилителя оптических сигналов / **В.В. Галуцкий**, Е.М. Гурская, Н.А. Яковенко. – Текст :

непосредственный // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2018. – С. 310–311.

32 Оптические методы изучения дефектной структуры градиентно-активированного ниобата лития / **В.В. Галуцкий**, М.Б. Куксенко, А.С. Крейзо, К.В. Судариков, Е.В. Строганова. – Текст : непосредственный // Материалы XXIV Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» / под науч. ред. В.А. Исаева, А.В. Лебедева. – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2018. – С. 232–236.

33 Исследование режима формирования оптических волноводов и доменных структур в градиентном ниобате лития / **В.В. Галуцкий**, В.А. Никитин, Е.В. Строганова, С.А. Шмаргилов. – Текст : непосредственный // Материалы XXIV Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» / под науч. ред. В.А. Исаева, А.В. Лебедева. – Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2018. – С. 350–356.

34 Изучение люминесцентно-кинетических свойств различных оптических материалов, легированных редкоземельными элементами Yb и Er / А.А. Гринёв, **В.В. Галуцкий**, В.Ф. Шульгин [и др.]. – Текст : непосредственный // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2019. – № 1. – С. 1910402.

Список цитированной литературы

1 Low-noise phase-sensitive amplifier for guard-band-less 16-channel DWDM signal using PPLN waveguides / T. Kazama, T. Umeki, M. Abe [et al.]. – Text : direct // Optical fiber communication conference OSA technical digest (online) (Optical Society of America, 2016). – Optical Society of America. – P. M3D.1.

2 Low loss ridge waveguides in lithium niobate thin films by optical grade diamond blade dicing / M.F. Volk, S. Suntsov, C.E. Rüter [et al.]. – Text : direct // Optics Express. – 2016. – V. 24. – Issue 2. – P. 1386–1391.

3 Perturbations of a dielectric tensor induced by domain walls of periodic domain structures in ferroelectric crystals: contribution to the Bragg diffraction of light waves / S.M. Shandarov, A.R. Akhmatkhanov, V.Y. Shur [et al.]. – Text : direct // Laser Physics. – 2020. – V. 30. – P. 025401.

4 Electrically controllable diffraction of light on periodic domain structures in ferroelectric crystals / S.M. Shandarov, A.R. Akhmatkhanov, V.Y. Shur [et al.]. – Text : direct // Ferroelectrics. – 2019. – V. 542. – P. 58–63.

5 Pelc, J. Sc. Frequency conversion of single photons: physics, devices, and applications : dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. – Text : direct. – The department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University. – Stanford University, 2012. – 156 p.

6 Shur, V.Y. Domain structures formation by local switching in the ion sliced lithium niobate thin films / B.N. Slautin, V.Y. Shur, H. Zhu. – Text : direct // Applied Physics Letters. – 2020. – V. 116. – P. 152904.

7 Esin, A.A. Analogy between growth of crystals and ferroelectric domains. Application of Wulff construction / A.A. Esin, A.R. Akhmatkhanov, V.Y. Shur. – Text : direct // Journal of crystal growth. – 2019. – V. 526. – P. 125236.

8 Myers, L.E. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃ / L.E. Myers, R.C. Eckardt, M.M. Fejer [et al.]. – Text : direct // Journal of the Optical Society of America B. – 1995. – V. 12. – Issue 11. – P. 2102–2116.

9 Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны / Н.В. Сидоров, Т.Р. Волк, Б.Н. Маврин [и др.]. – Москва : Наука, 2003. – 250 с. – Текст : непосредственный.

10 Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития : монография / М.Н. Палатников, Н.В. Сидоров, О.В. Макарова, И.В. Бирюкова. – Апатиты : КНЦ РАН, 2017. – 241 с.

11 Composition dependence of the ultraviolet absorption edge in lithium tantalite / Ch. Baumer, C. David, A. Tunyagi [et al.]. – Text : direct // Journal of Applied Physics. – 2003. – V. 93. – Issue 5. – P. 3102–3104.

12 Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ in the THz range / L. Pálfalvi, J. Hebling, J. Kuhl [et al.]. – Text : direct // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 97. – P. 123505.

13 Chemical and thermal conditions for the formation of stoichiometric LiNbO₃ / K. Polgar, A. Peter, L. Poppl [et al.]. – Text : direct // Journal of Crystal Growth. – 2002. – V. 237–239. – P. 682–686.

14 Scott, B.A. Determination of Stoichiometry Variations in LiNbO₃ and LiTaO₃ by Raman Powder Spectroscopy / B. A. Scott, G. Burns. – Text : direct // Journal of the American Ceramic Society. – 1972. – V. 55. – P. 225–230.

15 Исследование кластерообразования в кристаллах ниобата лития методом компьютерного моделирования / В.М. Воскресенский, О.Р. Стародуб, Н.В. Сидоров [и др.]. – Текст : непосредственный // Кристаллография. – 2017. – Т. 62. – № 2. – С. 213–217.

16 Колкер, Д.Б. Лазерные синтезаторы оптических частот на основе параметрических генераторов света : специальность 01.04.05 «Оптика» : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : / Колкер Дмитрий Борисович. – Новосибирск, 2011. – 276 с. – Текст : непосредственный.

17 Дмитриев, В.Г. Прикладная нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 512 с. – Текст : непосредственный.

18 Schlarb, U. A generalized sellmeier equation for the refractive indices of lithium niobate / U. Schlarb, K. Betzler. – Text : direct // Ferroelectrics. – 1994. – V. 156. – P. 99–104.

19 Wang, J. Single-PPLN-based simultaneous half-adder, half-subtractor, and OR logic gate: proposal and simulation / J. Wang, J. Sun, Q. Sun. – Text : direct // Optics Express. – 2007. – V. 15. – P. 1690–1699.

20 Phase sensitive amplification based on quadratic cascading in a periodically poled lithium niobate waveguide / K.J. Lee, F. Parmigiani, S. Liu [et al.]. – Text : direct // Optics Express. – 2009. – V. 17. – P. 20393–20400.

21 Characterization of α -phase soft proton-exchanged LiNbO₃ optical waveguides / Y.N. Korkishko, V. Fedorov, E.A. Baranov [et al.]. – Text : direct // Journal of the Optical Society of America A. – 2001. – V. 18. – Issue 5. – P. 1186–1191.