

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.320.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 06.10.2023 № 23/04

О присуждении Галуцкому Валерию Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Физико-технологическое моделирование, выращивание и свойства новых градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия» по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния принята к защите «21» июня 2023 г. (протокол заседания № 23/02) диссертационным советом 24.2.320.03, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149) в соответствии с приказами Минобрнауки России № 426-155 от 12.03.2010 г. (о создании) и № 561/нк от 03.06.2021 г. (об установлении полномочий).

Соискатель Галуцкий Валерий Викторович, 17 декабря 1978 года рождения. В 2001 году соискатель окончил ГОУ ВПО «Кубанский государственный университет» по специальности «Физика» с присвоением квалификации «Физик». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Широкополосная люминесценция ионов Cr^{3+} в кристаллах ниобата лития» по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния защитил в 2006 году, в диссертационном совете, созданном на базе государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кубанский государственный университет». Работает доцентом кафедры теоретической физики и компьютерных технологий в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре оптоэлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – Строганова Елена Валерьевна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры оптоэлектроники федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет».

Официальные оппоненты:

1. 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),
2. 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»,
3. Вербенко Илья Александрович, доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского института физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

– дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном Дресвянским Владимиром Петровичем, доктором физико-математических наук, доцентом, заведующим отделом лазерных и лучевых технологий, Мартыновичем Евгением Федоровичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником отдела лазерных и лучевых технологий, и утвержденным и.о. директора федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук» доктором физико-математических наук Шайхисламовым Ильдаром Фаритовичем, указала, что представленная к защите диссертационная работа соответствует пунктам 1, 5 и 6 паспорта научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Валерий Викторович Галуцкий, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Соискатель имеет 89 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 72 работы, из них 28 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. В этих работах полностью

отражены результаты диссертации и положения, выносимые на защиту. Все результаты получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях:

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 LiNbO₃: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 YB³⁺, ER³⁺: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 Er:LiNbO₃ ceramics on Yb,Er:LiNbO₃ 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 Er: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 Er,Yb:LiNbO₃ / 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 LiNbO₃: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 Cr³⁺ 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 Cr³⁺:LiNbO₃ / 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.

Березний [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 // Автометрия. – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 94–99.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

В этих и остальных работах изложены и обоснованы основные результаты диссертации Галуцкого В.В. в области физико-технологического моделирования, выращивания и исследования свойств новых градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия. Основные научные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Вклад соискателя в публикации [1,3-7,10-14,17,21,26-28.] состоит в разработке и научном обосновании новой лабораторной технологии выращивания градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия, а также в обнаружении зависимости физических свойств выращенных кристаллов с градиентом состава и кристаллических структур на их основе от вида градиента. Соискателю принадлежит формулировка идей и гипотез, выбор методов исследований. Рекомендации по анализу результатов теоретических и экспериментальных исследований обсуждались совместно с соавторами. В совместных работах [2,8-9,15-16,18-20,22-25,29-33] соискателю принадлежит разработка методов исследований, проведение экспериментальных и теоретических исследований, написание комплекса программ и интерпретация полученных результатов.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

от доктора физико-математических наук, доцента, главного научного сотрудника Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Суй А.В. – отзыв положительный. В отзыве имеются замечания:

Разработана методика формирования регулярной доменной структуры в градиентном ниобате лития. При этом нет информации о преимуществах и недостатках разработанной методики в сравнении с уже существующими. Какие технологические ограничения накладываются на данную методику? Например, какой максимальной толщины можно достичь для PPLN?

Впервые построена и исследована физико-математическая модель градиентного PPLN для преобразования излучения непрерывных лазеров во вторую гармонику, отличающаяся учетом температурных эффектов. Хотелось бы иметь сравнительные оценки, значительно ли влияет температурный эффект на эффективность преобразования излучения во вторую гармонику.

от доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Научно-исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Родина В.Г. – отзыв положительный, замечаний нет.

от доктора технических наук, заведующего кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии СГУГиТ, г. Новосибирск, Айрапетяна В.С. – отзыв положительный, замечаний нет.

от доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой высшей математики ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет

телекоммуникаций и информатики», г. Самара, Осипова О.В. – отзыв положительный, замечаний нет.

от доктора технических наук, профессора кафедры фотоники в телекоммуникациях, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск, Горлова Н.И. – отзыв положительный, замечаний нет.

В отзывах от официальных оппонентов и ведущей организации имеются следующие основные замечания:

1. Возникает естественный вопрос, а нужен ли этот градиент и действительно ли он даёт новые существенные полезные свойства оптическим элементам. В своих патентах, статьях и в самой диссертации автор приводит такие доказательства, основываясь на результатах математического исследования построенных им физических моделей изучаемых оптических элементов с учетом градиента. Например, в патенте РФ № 2 614 199 «Градиентный периодически поляризованный ниобат лития», авторы Строганова, Галуцкий и др. приводят данные по эффективности генерации второй гармоники. Градиентный кристалл показал эффективность 60 процентов, стехиометрический - 20 и конгруэнтный - 17 процентов. Мы не считаем эти данные достаточно убедительными по той причине, что это не прямой эксперимент, а лишь результат математического моделирования в определенной модели. Модель - это не реальный объект, это его упрощённая копия. Стоит в модели упустить какую-то деталь, которая на первый взгляд кажется несущественной, и результат моделирования станет уже другим. Поэтому кроме моделирования нужны результаты прямых сравнительных экспериментальных исследований. Отсутствие практической реализации предлагаемых автором элементов на основе градиентных кристаллов ниобатов лития и калия является недостатком работы. В связи с этим, доказательства, представленные в 7 и 8 защищаемых положениях, представляются не совсем убедительными (в отзыве ведущей организации).

2. Формулировка третьего результата практической значимости трудно воспринимается, она не является однозначной и требует корректировки. Не совсем ясно, что именно автор подразумевает под «эффективностью материалов ... для температурных, концентрационных и спектрально-кинетических характеристик» (в отзыве ведущей организации).

3. В диссертационном исследовании присутствуют в большом количестве некорректные и неточные формулировки, например, в защищаемом положении 7 (стр. 10). В положении 7, видимо, подразумевается «эффективность преобразования». В четвертой главе, посвященной математическому моделированию процесса генерации второй гармоники в предлагаемых

нелинейных средах, применяется терминология, отличающаяся от принятой для данной области оптики. В частности, вместо «источник излучения накачки» автор использует термин «источник опорного сигнала» (в отзыве ведущей организации).

4. На странице 99 (рис. 3.11) представлен спектр пропускания кристалла KNbO_3 , из которого видно, что кристалл прозрачен в очень широком спектральном диапазоне от 2,5 мкм (4000 см^{-1}) до 25 мкм (400 см^{-1}). При этом ИК граница диапазона прозрачности всех кислородсодержащих кристаллов обычно лежит в области 4 – 5,5 мкм для тонких элементов. Скорее всего, на оси X дана неверная шкала. Здесь же показан спектр поглощения этого кристалла, содержащий достаточно интенсивную спектральную линию 3507 см^{-1} . Почему этой линии нет на спектре пропускания? Почему не указана толщина кристалла, спектры которого измерялись? (в отзыве ведущей организации).

5. В диссертационном исследовании присутствует путаница в списке литературы. Например, рисунок 4.2 позаимствован из работы [207], при этом в подписи рисунка указана ссылка на работу [203], а в тексте [213] (в отзыве ведущей организации).

6. В последнем разделе главы 5, посвященном экспериментальному исследованию эффективности преобразования излучения накачки в излучение второй гармоники, плохо описана экспериментальная установка. В диссертации не указаны параметры нелинейного кристалла, такие как длина рабочего элемента, размер рабочей апертуры, период доменной структуры, наличие антиотражающего покрытия на торцах нелинейного элемента и, конечно же, профиль распределения концентрации ионов лития в поперечном сечении кристалла. Также не указана длительность импульсов лазера накачки. Все указанные параметры влияют на эффективность преобразования. Также в данном разделе вообще не указано, использовался ли кристалл с градиентным распределением концентрации ионов лития в поперечном сечении, или с равномерным распределением. Из данного раздела невозможно оценить действительно ли применение градиентных нелинейных элементов с РДС позволит увеличить эффективность преобразования (в отзыве ведущей организации).

7. Автор приводит в диссертации несколько фотографий экспериментальных установок и исследуемых образцов. Подобные фотографии при их надлежащем качестве могли бы украсить работу. Однако в этом случае они сделаны небрежно и свою функцию выполняют плохо. Фотографии на рис. 4.10, 4.11, 4.15 и 5.35 мелкие, тёмные или размытые, рис. 4.25 - малоинформативен. Подпись под рис. 5.2 не соответствует показанному изображению. На рис. 5.3 кривые 4 и 7 не идентифицируются (в отзыве ведущей организации).

8. На рис. 5.44 показана оптическая схема оценки эффективности преобразования градиентного PPLN. Здесь следовало бы написать не «оценки», а

«измерения», а также измерить, как уже выше было отмечено, не только градиентный образец, но безградиентные образцы для сравнения в одной и той же схеме. На данной схеме есть ошибка, которую экспериментаторы обычно не делают. Лучи λ_1 и λ_2 должны отклоняться не туда, куда показано на рисунке, а к основанию призмы. Следовательно, и детектор надо переместить на соответствующее место (в отзыве ведущей организации).

9. На следующем рисунке 5.45-а показана фотография самой экспериментальной установки. К сожалению, эта фотография мелкомасштабная, не резкая, элементы схемы на фотографии не обозначены, и неразличимы. Фотография не вполне соответствует схеме, показанной на рис. 5.44. Рис. 5.45-б имеет подпись «вид экспериментального образца в момент ГВГ (генерации второй гармоники)». На самом деле изображение образца на этом рисунке занимает лишь малую его часть. Короткая зелёная линия с неоднородным распределением яркости свечения свидетельствует о генерации второй гармоники в кристалле. Возникают вопросы: Почему эта линия столь короткая? Почему свечение неравномерно по длине этой линии? На фотографии, показанной на рис. 5.45-в, по мнению автора видна модовая структура излучения второй гармоники. Пожалуй, кроме автора никто этой структуры на данной фотографии не видит (в отзыве ведущей организации).

10. Недостатком также является отсутствие цитирования и обзора разработок одного из мировых лидеров производства многочисленных оптических элементов различного назначения на основе ниобата лития и других кристаллов, корпорации NS Photonics (в отзыве ведущей организации).

11. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что оптические характеристики кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 существенно зависят от технологии получения шихты и исходных компонентов для приготовления шихты. К сожалению, в диссертации не уделено внимание вопросам влияния особенностей шихты на физические параметры градиентных кристаллов и не указано, шихта каких производителей использовалась при получении градиентных кристаллов (в отзыве официального оппонента Сидорова Н.В.).

12. Поскольку технология получения градиентных кристаллов с воспроизводимыми характеристиками намного сложнее и дороже технологии композиционно-однородных кристаллов, следовало бы во введении к диссертации или в виде отдельного небольшого раздела кратко изложить преимущества для преобразования лазерного излучения градиентных материалов с периодически поляризованными структурами по сравнению с аналогичными материалами, полученными с использованием композиционно-однородных кристаллов (в отзыве официального оппонента Сидорова Н.В.).

13. В диссертации не затронуты вопросы формирования электронной зонной структуры в градиентных кристаллах, которые, как известно из многочисленных экспериментальных данных, существенно влияют на люминесцентные свойства и электропроводность материалов. Объяснение особенностей люминесценции с позиций электронной зонной структуры существенно бы усилило работу (в отзыве официального оппонента Сидорова Н.В.).

14. К сожалению, в диссертации не проводились тщательные рентгеноструктурные исследования изменений особенностей структуры и состояния дефектности градиентных кристаллов, полученных в диссертации, возникающие при изменении состава. Выполнен только рентгенофазовый анализ, определены параметры элементарной ячейки. Но не было выполнено методом Ритвельда исследование распределения основных (Li^+ , K^+ , Nb^{5+}) и легирующих катионов по позициям вдоль полярной оси. Такие рентгеноструктурные данные, полученные для градиентных кристаллов, существенно бы усилили информацию о состоянии дефектной структуры исследованных кристаллов. Разработка градиентных кристаллов с заданными физическими параметрами в первую очередь требует тщательного изучения особенностей их структуры, как фаз переменного состава, поскольку состав кристалла определяет особенности его структуры, которые, в свою очередь, определяют особенности физических характеристик (в отзыве официального оппонента Сидорова Н.В.).

15. Почему-то автор указывает частоты колебаний ОН-связей в тексте диссертации и рисунках (стр. 94-99) то в нанометрах (нм), то в обратных сантиметрах (см^{-1}). Это вносит серьезную путаницу в понимание материала. Общепринятым является использование обратных сантиметров (см^{-1}). Кроме того, на стр. 94-99 диссертации ошибочно сказано, что в спектре ИК кристалла ниобата лития конгруэнтного состава наблюдается одна широкая полоса с максимумом около 2874 нм. Кроме того, здесь непонятно, о спектре поглощения или спектре пропускания идет речь? При увеличении отношения R интенсивность этой полосы уменьшается, а интенсивность полосы с максимумом 2886 нм увеличивается, в предельном случае, когда $R=1$ (стехиометрический состав), в спектре присутствует только эта полоса. При этом сделаны ссылки [116; 117] на научные отчеты, выполненные с участием автора. На самом деле, согласно многочисленным литературным данным (см. напр. обзор [72] и работы [31, 169, 170]), в ИК-спектре поглощения конгруэнтного кристалла ниобата лития наблюдаются 3 полосы с максимумами при 3466, 3483, 3488 см^{-1} . При увеличении отношения R интенсивность полос с максимумами 3483 и 3486 см^{-1} уменьшается, а интенсивность полосы с максимумом при 3466 см^{-1} увеличивается и в предельном случае, когда $R = 1$ (стехиометрический состав) в спектре присутствует только очень узкая полоса (ширина = 3 см^{-1}) с максимумом при 3466 см^{-1} . необходимо также отметить и следующее. В сильно разупорядоченных кристаллах, какими являются градиентные кристаллы LiNbO_3 и KNbO_3 , линии в колебательном

спектре существенно уширены. Поэтому группа отдельных широких полос в ИК-спектре поглощения градиентного нестехиометрического кристалла рис. 3.7) может выглядеть как одна широкая полоса, характерна для спектра кристалла стехиометрического состава. в таком случае может создаться ложное впечатление, что мы имеем дело со стехиометрическим кристаллом, в котором, согласно данным работы [72], присутствуют только одна полоса с частотой 3466 см^{-1} . Существенно заметить также и то, что в ИК спектре поглощения стехиометрического кристалла линия с частотой 3466 см^{-1} очень узкая, ее ширина согласно данным работы [72], составляет всего $\approx 3\text{ см}^{-1}$, что намного меньше ширины линий в спектре конгруэнтного кристалла (в отзыве официального оппонента Сидорова Н.В.).

16. На стр. 92 диссертации недостаточно полно описана типовая схема для определения полуволнового напряжения в выращенных градиентных кристаллах ниобата лития и ниобата калия, представленная здесь же на рис.3.4. В частности, не ясна ориентация осей кристалла ниобата калия, вдоль которых прикладывалось электрическое поле и распространялся модулируемый по амплитуде лазерный пучок. Если речь идет о ниобате лития, принадлежащего к классу симметрии $3m$, то поле обычно прикладывается вдоль полярной оси Z . А для ниобата калия (класс симметрии $mm2$) какой должна быть ориентация осей, и какая электрооптическая постоянная будет для него определять полуволновое напряжение? Кроме того, в оптической схеме почему-то отсутствует четвертьволновая пластинка. Может быть, именно ее отсутствие и приводит к достаточно далеким от теоретической кривой экспериментальным точкам на рис. 3.5? (в отзыве официального оппонента Шандарова С.М.)

17. На большинстве рисунков, где показаны экспериментальные точки, доверительные интервалы отсутствуют. Исключением является лишь рис.4.23. Проводилась ли статистическая обработка результатов для других экспериментальных измерений? (в отзыве официального оппонента Шандарова С.М.)

18. Хотя диссертация написана хорошим грамотным языком, в тексте иногда встречаются опечатки. Например, на стр.50 в пояснениях к формуле (2.5) диаметр внешнего тигля обозначен как D_0^2 , вместо D_0 (в отзыве официального оппонента Шандарова С.М.).

19. В работе поверхностно представлена оценка влияния, разработанного автором метода Чохральского с жидкостной подпиткой, на температурные условия отжига кристаллов ниобата лития и ниобата калия. Насколько существенно наличие градиента состава, а, значит, и градиента физических характеристик, влияет на послеростовые условия отжига? (в отзыве официального оппонента Вербенко И.А.).

20. На начальном этапе выращивания кристаллов производилось затравление. Каков состав по ниобатам лития и ниобатам калия затравок, ориентированных вдоль разных кристаллографических осей? Очевидно, в случае использования в качестве затравки низкоплавкого состава ниобата лития или ниобата калия рост градиентного состава может быть затруднен (в отзыве официального оппонента Вербенко И.А.).

21. Процесс вытягивания из расплава кристаллов с заданной геометрией и концентрацией основных компонентов предполагает поддержание высокой стабильности условий синтеза на протяжении нескольких суток. Проводилось ли сравнение в разработанной новой лабораторной методики выращивания отклонения задаваемого градиента состава для кристаллов дюймового и двухдюймового диаметров? (в отзыве официального оппонента Вербенко И.А.).

22. При реализации оптимального режима преобразования с помощью сформированных PPLN при учете распределения интенсивности по поперечной координате необходимо отметить возможные дифракционные искажения для обеих волн, которые будут проявляться по длине кристалла (в отзыве официального оппонента Вербенко И.А.).

Соискатель ответил на вопросы и замечания по диссертации и автореферату, сделанные ведущей организацией, официальными оппонентами и специалистами в данной области, привел собственную аргументацию в интерпретации полученных результатов, а также согласился с некоторыми замечаниями.

Все отзывы положительные, в них отмечается актуальность и сложность выбранной проблемы диссертационного исследования, научная новизна и достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации основан на их авторитетности, компетентности и широкой известности достижений ученых в области науки, по которой выполнена диссертация, значительном количестве публикаций, близких к теме диссертационного исследования. Официальные оппоненты являются сотрудниками различных организаций и не имеют совместных публикаций с соискателем. Ведущая организация широко известна своими научными достижениями, проводит исследования в области лазерных и нелинейных материалов и устройств на их основе, о чем свидетельствуют многочисленные научные труды и публикации сотрудников ведущей организации. Соискатель не работает в данной организации и не является участником научно-исследовательских работ, проводимых в этой организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны

новая технология выращивания монокристаллов ниобата лития и ниобата калия с заданными оптико-физическими свойствами при условии постоянства и переменности состава по длине кристалла;

физико-математическая модель градиентного нелинейно-оптического преобразователя, предназначенного для реализации дискретных математических операций, моделирования многоканальных лазерных модулей, фазочувствительного усиления оптических сигналов;

модифицированный метод исследования оптических свойств градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия в видимом и ИК-диапазоне, основанный на температурных исследованиях спектрокинетики 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+} .

предложены

модифицированный метод Чохральского по выращиванию градиентных по основным компонентам (Li^+ , Nb^{5+}) кристаллов ниобата лития $\text{Li}_{f(z)}\text{Nb}_{2-f(z)}\text{O}_{5-2f(z)}$, где $0,94 < f(z) < 1$, и (K^+ , Nb^{5+}) ниобата калия $\text{K}_{g(z)}\text{Nb}_{2-g(z)}\text{O}_{5-2g(z)}$, где $0,95 < g(z) < 1$, с одновременно жидкостной и твердофазной подпиткой расплава;

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

$\text{Li}_{a(x)}\text{Nb}_{b(x)}\text{O}_3$, 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;

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.

доказаны

корреляция между температурными коэффициентами показателя преломления в ТГц-диапазоне частот ниобата лития и ниобата калия и типом оптических центров;

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

введены новые понятия температурных спектрокинетик градиентно-активированных кристаллов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

обоснованы 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;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс существующих базовых методов исследования, в т.ч. экспериментальных методик исследования оптических свойств градиентных кристаллов в видимом, ИК и ТГц диапазоне.

изложены идеи и положения повышения эффективности преобразования излучения PPLN структурами, изготовленными из выращенных кристаллов с градиентом состава.

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

изучены новые свойства и преимущества оптических элементов, изготовленных из градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия.

проведена модернизация существующих математических моделей нелинейно-оптического взаимодействия в кристаллах и оптических элементах путем реализуемого в них градиента состава, обеспечивающих получение новых результатов по теме диссертации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены научно-обоснованная лабораторная технология выращивания градиентных материалов ниобата лития и ниобата калия с концентрационными профилями основных компонентов, зависящих от координаты кристалла; методика регистрации температурных спектров кинетик люминесценции для градиентно-активированных кристаллов ниобата лития.

определены перспективы практического использования метода Чохральского с жидкостной и одновременно жидкостной и твердофазной подпиткой, основанного на кристаллизации с естественной скоростью при сочетании составов расплавов во внешнем тигле и внутреннем тигле.

созданы новые функциональные оптические элементы (преобразователь лазерного излучения) на основе нелинейных материалов ниобата лития, в которых реализованы концентрационные градиенты различных видов.

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию фотонных элементов на основе градиентного PPLN, позволяющего одновременно производить преобразование сигналов на нескольких длинах волн, с градиентом концентрации ионов лития.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ корректным применением комплекса взаимодополняющих методик экспериментального и теоретического исследования, адекватных целям и задачам диссертации, привлечением обширного экспериментального материала и его количественным и качественным анализом.

теория построена на основе применения строгих математических методов и современных математических пакетов прикладных программ, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

идея базируется на современных представлениях физики роста кристаллов и результатах анализа спектроскопических и генерационных характеристик нелинейных материалов.

использованы сравнения авторских экспериментальных и теоретических результатов с данными, полученными другими исследователями в рамках других моделей, а также сопоставлением с результатами их экспериментов.

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках в частных случаях.

использованы современные методы математического моделирования, современные методики получения и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в: выборе направления и постановке задач исследования, разработке аналитических методов и методик; моделировании процессов выращивания и распространения излучения в градиентных кристаллах при изменении их состава; выращивании и прогнозировании изменений физических свойств градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия в зависимости от температурных условий, анализе всех теоретических и экспериментальных результатов, выводах, положенных в основу научных положений, выносимых на защиту. В тексте диссертации степень личного участия автора в коллективно написанных работах отмечена достоверно.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

Валерий Викторович, как влияет наличие градиента состава на границы полосы поглощения в УФ диапазоне? (д.ф.-м.н. Богатов Н.М.); вы сказали, что ниобат лития с иттербием имеют повышенный температурный коэффициент изменения преломления и связали это с большим размером ионов, может следовало использовать рубидий или даже цезий? (д.ф.-м.н. Тумаев Е.Н.); вы говорили, что вам необходимо было добиться генерации второй гармоники от 1040 до 1070 нм или речь идет о расширении диапазона фазового синхронизма? (д.ф.-м.н. Тумаев Е.Н.); насколько я помню в одной японской статье приводился двойной тигель и отверстие там было во внутреннем тигле, у вас представлен капилляр, расскажите, как влияет капилляр на градиент? Как влияет длина капилляра? (д.ф.-м.н., Исаев В.А.); в автореферате и в выступлении на 44-м слайде в левой части системы находится производная? (д.ф.-м.н. Уртенев М.Х.); на слайде и автореферате название рисунка обозначено «вольт-амперная характеристика», может это потенциограмма? (д.ф.-м.н. Уртенев М.Х.); каковы перспективы использования материала ниобата калия? Как Вы видите, какие его достоинства и недостатки? (д.ф.-м.н. Шандаров С.М.); фазовые диаграммы ниобата лития и ниобата калия сильно различаются, хотя кажется, что способы получения аналогичны, можно это пояснить? (д.ф.-м.н. Лебедев К.А.); технология твердофазной и жидкофазной технологии для ниобата калия и ниобата лития в чем отличаются? (д.ф.-м.н. Лебедев К.А.).

Соискатель Галуцкий Валерий Викторович ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

– В работе рассматривалось, в большей степени, влияние градиента свойств на нелинейные параметры и на эффективность преобразования излучения во вторую гармонику. С точки зрения влияния градиента на линейные свойства, как, например, на поглощение, если излучение, которое распространяется вдоль градиентного кристалла приходится на границу полосы УФ поглощения, то какая-то часть кристалла поглощает большую или меньшую часть этого излучения, в зависимости от состава кристалла. Ширина запрещенной зоны и граница УФ края полосы поглощения меняется от состава, происходит температурное перераспределение, которое влияет на параметры сигнала, например, пучок будет расходиться за счет температурных изменений показателя преломления.

– Создана научно обоснованная методика получения градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия, рубидий и цезий не рассматривались как ионы-активаторы основной матрицы. В работе исследуются насколько рассматриваемые в работе примеси для усиления сигнала в отличных от ТГц диапазона (микронном и полутаромикронном) будут искажать свойства кристаллов в терагерцовом диапазоне при изменении температуры, поэтому иттербий и эрбий были выбраны как ионы, допускающие по литературным данным вхождение только в литиевую позицию при низких уровнях активации.

– Модель фотонного преобразователя предполагает, что по поперечной координате меняется состав кристалла, и если вводится излучение 1030 нм в точку с поперечной координатой 5 мм, то эффективность преобразования

обеспечивается, при этом точка с поперечной координатой 7 мм отвечает за эффективное преобразование на другой длине волны.

– Японская статья и патент были изначально сосредоточены на получении однородных кристаллов, и, именно для однородности, там использовался второй тигель, для того, чтобы компенсировать отсутствие на фронте кристаллизации второго компонента. Приведенный на данном слайде капилляр учитывает влияние на формирование градиента смачиваемости расплавом ниобата лития и ниобата калия платиновой оснастки, движения жидкости внутрь за счет разной температуры расплавов во внешнем и внутреннем тигле, за счет различия температур кристаллизации составов во внешнем тигле и внутреннем тигле, возможной кристаллизации расплава в капилляре. Проводились экспериментальные исследования для подтверждения модели незначительности вклада обратной диффузии между внутренним и внешним тиглями при выращивании градиентных кристаллов предложенным методом с помощью изучения: поглощения ОН-групп, распределения оптически активных примесей и другими методами. Из моделирования определено, что на реализуемый градиент в кристалле влияет не только длина капилляра внутреннего тигля, но и его форма.

– Да действительно, в знаменателе левой части системы пропущен символ «d», это техническая опечатка. В тексте диссертации и автореферате речь идет именно об дифференциале.

– На указанном слайде синим цветом обозначено изменение напряжения со временем, красная линия – соответствующее ему изменение тока. Развертка по времени напряжения и тока показана для акцента параметра изменения напряжения от нуля до значений, соответствующих регистрации величины коэрцитивного поля.

– Отсутствие широкого применения ниобата калия по сравнению с ниобатом лития – это сложности его получения. Большой объем исследований был направлен не только на формирование объемных кристаллов, но и изучение возможности создания структур путем напыления. К числу же достоинств ниобата калия относятся большие значения электрооптических коэффициентов, которые и определяют его практическую значимость.

– Отличие фазовых диаграмм ниобата лития и ниобата калия, например, в существовании конгруэнтного плавления или диапазонах концентраций ниобия при которых кристаллизуются эти соединения. Для предложенного и научно обоснованного метода из-за различной скорости вхождения лития и калия в кристаллическую решетку, требуется поддерживать требуемый избыток калия или лития на фронте кристаллизации.

– Отличия твердофазной подпитки от жидкофазной подпитки состоит в разности плотности керамики ниобата лития и ниобата калия разных составов от плотности соответствующих расплавов. Учет плотности твердофазной подпитки в движении внутреннего тигля с керамической обоймой обеспечивает требуемые соотношения по фазовой диаграмме при формировании градиентного состава кристалла.

На заседании «Об» октября 2023 года диссертационный совет принял решение

за решение важной научной задачи разработки технологии выращивания градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия, исследования оптических свойств выращенных кристаллов в зависимости от состава и физико-математического моделирования свойств нелинейно-оптических элементов различного назначения на их основе, что в совокупности можно квалифицировать как научное достижение, которое вносит значительный вклад в развитие актуальных научных направлений физики конденсированного состояния, связанных с синтезом градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия и созданием перспективных элементов на их основе, а также за разработанные теоретические и экспериментальные методы и методики, внедренные в учебный процесс подготовки бакалавров, магистров и аспирантов по направлениям: 03.03.02 Физика, 03.03.03 Радиофизика (профили «Фундаментальная физика», «Квантовые устройства и радиофотоника»), 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (профиль бакалавриата «Оптические системы и сети связи», профиль магистратуры «Оптические системы локации, связи и обработки информации»), 1.3 – Физические науки (1.3.8 «Физика конденсированного состояния»), что вносит значительный вклад в развитие страны, присудить Галуцкому Валерию Викторовичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени 16 (шестнадцать), против присуждения учёной степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного
совета 24.2.320.03,
академик РАН, д.ф.-м.н., проф.



Бабешко
Владимир Андреевич

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.320.03
д.ф.-м.н., доцент



Зарецкая
Марина Валерьевна

06.10.2023 г.