

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Никитин Дмитрий Геннадьевич

Генерация поляризованного излучения 4-й гармоники  
иттербиевого волоконного лазера в кристаллах трибората  
ЛИТИЯ

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2020

Работа выполнена в Научно-техническом объединении «ИРЭ-Полюс», базовой организации кафедры фотоники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель:

**Рябушкин Олег Алексеевич**, к.ф.-м. н., доцент, эксперт РАН, в.н.с., Фрязинский филиал ФГБОУ института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Официальные оппоненты:

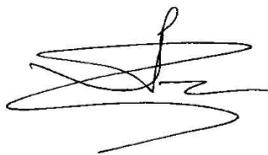
1. **Сигов Александр Сергеевич**, д.ф.-м.н., Академик РАН, Президент МИРЭА - Российский технологический университет (ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА»).
2. **Каблуков Сергей Иванович**, д.ф.-м.н., профессор РАН, г.н.с, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН).
3. **Уланов Александр Евгеньевич**, к.ф.-м.н., с.н.с., Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий (ООО "МЦКТ").

Защита состоится « 24 » ноября 2021 года в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «    » октября 2021 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета МИФИ.01.04,  
кандидат физико-математических наук



/Степаненко А.А./

## Общая характеристика работы

### Введение

Ультрафиолетовое (УФ) излучение в диапазоне длин волн 200-400 нм было открыто И. Риттером и У. Волластоном в 1801 году. Со временем УФ излучение нашло широкое применение в науке, медицине, промышленности. Оно используется в оптической спектроскопии, микрообработке (маркировка, сверление, резка) стекол, пластиков, керамик, пищевой промышленности, полиграфии, литографии, для изготовления волоконных брэгговских решеток. Особенностью УФ излучения, по сравнению с излучением видимого и инфракрасного (ИК) диапазона, является относительно высокая энергия квантов ( $\hbar\omega > 3$  эВ). Кроме того, УФ излучение может эффективно возбуждать фотолюминесценцию различных веществ, способствовать ускоренному протеканию химических реакций, оказывать бактерицидное действие.

Существуют различные типы источников лазерного УФ излучения, такие как эксимерные, твердотельные и полупроводниковые лазеры. Твердотельные лазеры, в том числе и волоконные ИК лазеры с нелинейно-оптическим (н-о) преобразователем частоты излучения, обладают рядом преимуществ по сравнению с другими УФ источниками: большие средние и пиковые мощности, высокая эффективность, относительно узкая спектральная линия, превосходное качество пучка, хорошая временная стабильность, высокий временной ресурс, компактность.

Одним из способов получения УФ излучения является использование н-о преобразования частоты излучения мощных лазеров ближнего ИК диапазона: иттербиевые или неодимовые лазеры с  $\lambda_1 = 1064$  нм. Как правило, генерацию четвертой гармоники (ГЧГ) с  $\lambda_4 = 266$  нм получают удвоением второй гармоники (ГВГ) с  $\lambda_2 = 532$  нм. Чаще всего для этого используют н-о кристаллы: ВВО ( $\beta$ -BaV<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), CLBO (CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>), LB4 (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), DKDP (KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>).

Основной проблемой получения УФ излучения высокой мощности (266 нм) является деградация оптических элементов. Ведется поиск кристаллов, одновременно обладающих как приемлемой эффективностью преобразования и высоким порогом лучевой стойкости, так и долговременной стойкостью к воздействию мощного УФ излучения. Активно исследуются относительно новые кристаллы для ГЧГ, такие как YAB (YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>) и CBF (Ca<sub>5</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>F).

Кристалл трибората лития – LBO (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) обладает широкой областью прозрачности (ширина запрещенной зоны  $E_g = 7,75$  эВ, что соответствует энергии кванта света с длиной волны  $\lambda = 160$  нм), высоким порогом оптического разрушения, малыми коэффициентами поглощения оптического излучения ( $\alpha_{1064}$  и  $\alpha_{532} < 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>) и углами сноса лазерных пучков, относительно большими н-о коэффициентами и полуширинами синхронизмов, хорошими механическими свойствами и химической стабильностью. LBO может быть выращен в больших количествах по хорошо отработанной технологии, а его размеры в поперечном сечении могут превышать 50×50 мм<sup>2</sup>. Благодаря этим свойствам, LBO успешно используется для генерации

второй ( $\lambda_2 = 532$  нм) и третьей ( $\lambda_3 = 355$  нм) гармоник и именно в нем получены рекордные мощности на данных длинах волн. К недостаткам кристалла LBO можно отнести значительную величину ионной проводимости, обладающую, в виду структурных особенностей кристалла, яркой анизотропией, и отсутствие фазового синхронизма для прямого удвоения частоты излучения на длине волны 532 нм. Однако данный кристалл позволяет получать излучение на длине волны четвертой гармоники ( $\lambda_4 = 266$  нм) за счет генерации суммарной частоты при н-о взаимодействии волн фундаментального излучения ( $\lambda_1 = 1064$  нм) и его третьей гармоники ( $\lambda_3 = 355$  нм) в условиях фазового синхронизма первого типа ( $\infty \rightarrow e$ ,  $\varphi = 61^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ,  $T = 50$  °C), правда, это требует дополнительной ступени преобразования.

Волоконные лазеры имеют пиковую мощность на порядки ниже твердотельных лазеров, поэтому для осуществления н-о преобразования их излучения с высокой эффективностью необходимо фокусировать пучок в перетяжки малых размеров ( $2w_0 \sim 100$  мкм). В совокупности с ростом коэффициентов оптического поглощения в LBO на длинах волн 355 и 266 нм по сравнению с  $\alpha_{1064} \approx \alpha_{532}$  в 10-100 и 100-1000 раз соответственно это приводит к значительному температурному градиенту внутри кристалла. С ростом мощности оптического излучения температурный градиент усиливается, условия фазового синхронизма нарушаются, эффективность преобразования снижается. Кроме того, градиент температур приводит к градиенту концентрации свободных носителей (ионов лития), что вызывает их движение. Как следствие, происходит перераспределение электрических полей в области лазерного пучка, к чему пьезоэлектрические кристаллы крайне чувствительны. Все это приводит к образованию областей с неоднородным показателем преломления и повышенными коэффициентами оптического поглощения, соответственно расфазировка и градиент температур становятся еще значительнее. В результате наблюдается катастрофическое снижение эффективности преобразования и искажение профиля пучка, то есть деградация н-о кристалла.

Процесс генерации излучения мультиваттного уровня на длине волны 266 нм в н-о кристалле LBO не был изучен, поэтому данная диссертационная работа посвящена исследованию особенностей процесса генерации четвертой гармоники в н-о кристаллах трибората лития, изучению вопроса стабильности средней мощности излучения четвертой гармоники и факторов, влияющих на скорость деградации кристаллов. Проведены исследования процессов деградации кристаллов LBO при генерации излучения на длине волны 266 нм. Исследована анизотропия деградации кристаллов LBO под действием сфокусированного излучения ( $\lambda_4 = 266$  нм) отдельного источника (без н-о преобразования).

Для сравнения различных образцов LBO и определения их качества был применен оригинальный бесконтактный метод исследования – пьезоэлектрическая резонансная спектроскопия с концепцией эквивалентной температуры кристалла, который позволяет с высокой точностью измерять абсолютные значения малых коэффициентов оптического поглощения и теплообмена исследуемых кристаллов. Кроме того, данный метод был успешно

применен для исследования ионной проводимости (ИП) кристаллов LBO, влияние которой на оптические свойства кристаллов имеет ключевое значение для процессов эффективного н-о преобразования лазерного излучения высокой мощности.

## **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы являлось исследование возможности создания источника лазерного УФ излучения мультиваттного уровня мощности на длине волны 266 нм, используя н-о преобразование частоты излучения импульсного иттербиевого волоконного лазера в н-о кристалле трибората лития ( $1064+355 \rightarrow 266$ ).

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Исследование особенностей процесса генерации суммарной частоты излучения волоконного иттербиевого лазера ( $1064+355 \rightarrow 266$ ) в кристалле LBO.
2. Исследование особенностей деградации кристаллов LBO под действием УФ излучения на длине волны 266 нм.
3. Разработка бесконтактного метода радиочастотного (РЧ) тестирования качества кристаллов LBO, позволяющего проводить сравнение и отбор н-о кристаллов, измеряя их коэффициенты оптического поглощения и теплообмена и величину ионной проводимости. Разработка модели, связывающей ИП н-о кристалла LBO и температурную зависимость спектральной формы линии РЧ адмиттанса вблизи частот пьезоэлектрических резонансов (ПР).

## **Научная новизна работы**

1. Впервые в кристалле LBO получено излучение средней мощностью свыше 3.3 Вт на длине волны 266 нм в процессе нелинейно-оптического сложения частот первой и третьей гармоник иттербиевого волоконного лазера и экспериментально определены направления фазового синхронизма для данного процесса в температурном диапазоне 30-180 °С.
2. Впервые проведенные исследования деградации объема кристалла LBO под действием ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм позволили установить зависимость скорости деградации LBO от температуры кристалла, направления распространения излучения, его поляризации и интенсивности.
3. Предложена и математически разработана эмпирическая модель температурного уширения формы линии пьезоэлектрического резонанса, связывающая температурную зависимость спектральной формы линии РЧ адмиттанса вблизи частоты пьезоэлектрического резонанса с величиной ионной проводимости кристалла LBO.

## **Практическая значимость работы**

Деградация н-о кристаллов под действием УФ излучения является одним из основных факторов, ограничивающих мощностные характеристики и сроки службы лазерных источников. В результате данной работы были получены новые знания о LBO кристаллах, используемых для

создания лазерных источников мультиваттного уровня мощности на длинах волн среднего УФ диапазона, в том числе и на длине волны 266 нм. Изучение деградации кристаллов под действием сфокусированного УФ излучения высокой мощности позволило сформулировать рекомендации к режимам использования оптических элементов из LBO для увеличения срока их службы. Развиваемый в данной работе метод пьезоэлектрической резонансной спектроскопии позволяет проводить оценки качества кристаллов бесконтактным неразрушающим способом и является востребованным для селективного отбора оптических элементов при изготовлении лазерных источников и отработке технологических процессов выращивания кристаллов. В работе показано, что данный метод позволяет не только измерять коэффициенты оптического поглощения и теплообмена, но и получать информацию о ИП и энергии активации кристаллов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Нелинейно-оптическое сложение частот излучения первой и третьей гармоник иттербиевого волоконного лазера в кристалле LBO позволяет получать генерацию ультрафиолетового излучения мультиваттного уровня мощности на длине волны 266 нм (более 3,3 Вт средней мощности с эффективностью преобразования свыше 14 %).
2. Зависимость направления фазового синхронизма (угол  $\varphi_{\text{синх}}$  при неизменном полярном угле  $\theta = 90^\circ$ ) для нелинейно-оптического сложения частот излучения первой и третьей гармоник иттербиевого лазера от температуры кристалла LBO в диапазоне 30-180°C является линейной с угловым коэффициентом  $(265 \pm 4) \times 10^{-3}$  мрад/°C.
3. Время деградации кристалла LBO под действием лазерного излучения на длине волны 266 нм нелинейно возрастает при изменении направления его распространения по азимутальному углу  $\varphi$  от 60° до 65° при неизменном полярном угле  $\theta = 90^\circ$ .
4. Время деградации кристалла LBO под действием лазерного излучения на длине волны 266 нм в направлениях  $\varphi = 36^\circ, \theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 61^\circ, \theta = 90^\circ$  нелинейно возрастает с ростом температуры кристалла от 30 до 120°C.
5. Пьезоэлектрическая резонансная спектроскопия позволяет бесконтактно исследовать ионную проводимость кристаллов LBO. Температурная зависимость спектральной формы линий амплитуды и фазы адмиттанса вблизи частоты пьезоэлектрического резонанса связана с величиной ионной проводимости кристалла LBO и позволяет определять энергию активации ионов  $\text{Li}^+$ .

### **Апробация результатов работы**

Общее количество научных публикаций по теме диссертации 19. В рецензируемых изданиях опубликовано 5 статей, 2 из которых в журналах с квартилем Q1. Всего в WoS проиндексировано 7 печатных работ, в Scopus – 9 работ. По теме диссертации сделано 10

докладов на 8 международных конференциях и 7 докладов на российских конференциях, 6 из которых на конференциях МФТИ.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 141 страницу, 89 рисунков и 22 таблицы, список цитируемой литературы содержит 100 наименований.

## Личный вклад автора

Все использованные экспериментальные и теоретические результаты, представленные в данной диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии. Математическая модель влияния ИП на форму линии ПР разработана совместно с А.В. Пигаревым (ООО НТО «ИРЭ-Полюс»). Все материалы, представленные в данной работе, получены в результате экспериментальных исследований, выполненных автором в ООО НТО «ИРЭ-Полюс», базовой организации кафедры фотоники МФТИ.

## Краткое содержание диссертации

Во **Введении** диссертационной работы обоснованы актуальность выбранной темы, определены основные цели и задачи работы, сформулированы научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

В **Главе 1** представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены основные физические проблемы и критерии эффективности н-о преобразований лазерного излучения. Проанализировано многообразие н-о кристаллов и условий фазовых синхронизмов, которые могут быть использованы для генерации излучения на длине волны четвертой гармоники ( $\lambda_4=266$  нм) от иттербиевых или неодимовых лазеров ( $\lambda_1=1064$  нм). Основное внимание было уделено следующим кристаллам:  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO),  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_2$  (BBO),  $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$  (CLBO),  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (YAB),  $\text{Ca}_5(\text{BO}_3)_3\text{F}$  (CBF),  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (LB4),  $\text{K}(\text{D}_x\text{H}_{1-x})_2\text{PO}_4$  (DKDP),  $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$  (KABO),  $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$  (KBBF),  $\text{NaSr}_3\text{Be}_3\text{V}_3\text{O}_9\text{F}_4$  (NSBBF). В Таблице 1 представлены обобщенные результаты по генерации УФ излучения на длинах волн в диапазоне 255-266 нм, полученные за счет генерации суммарной частоты при н-о взаимодействии волн в процессе преобразования лазерного излучения.

Работам по генерации УФ излучения на длине волны 266 нм в кристалле LBO уделено особое внимание. Рекордные средние мощности ГВГ составляют 700 и 820 Вт на длинах волн  $\lambda_2 \sim 515\text{-}535$  нм и генерации третьей гармоники (ГТГ) – 160 и 234 Вт на  $\lambda_3 \sim 340\text{-}360$  нм [2,3]. К 2015 году величина средней оптической мощности лазерного излучения на длине волны

$\lambda_4=266$  нм, полученная в кристалле LBO, достигла 1 Вт с эффективностью преобразования до 23% и качеством пучка  $M^2 < 1,2$  [4].

Значительная часть обзора посвящена рассмотрению основных свойств кристаллов LBO и технологическим особенностям их выращивания. В обзоре проведен анализ работ по определению порога лучевой прочности (LIDT – Laser Induced Damage Threshold), и исследованию характерного времени медленной деградации кристалла LBO под действием УФ излучения высокой мощности в режиме н-о преобразования. Рассмотрены работы по исследованию скорости деградации кристаллов CLBO и BBO под воздействием сфокусированного излучения внешнего источника на длине волны  $\lambda_4 = 266$  нм.

**Таблица 1.** Сводная таблица результатов, полученных до 2018 года разными исследователями, по генерации УФ излучения на длине волны четвертой гармоники (257-266 нм) [1].

Длина волны (нм)	Кристалл ГЧГ	Мощность/ Энергия	Частота следования импульсов	Эффективность преобразования, %*	$M^2$ (266)
266	BBO	14.8 W	100 kHz (~ns)	~10	>1.5
257	BBO	3.2 W	30 kHz (~ns)	14.5	>1.1
257.7	BBO	2.74 mJ	1 kHz (~ps)	9.7	<3
257	BBO	1.1 W	14.5 kHz (~ns)	~31	
258	BBO	4.6 W	796 kHz (~fs)	~5.8	$1.3 \times 1.6$
266	CLBO	40 W	7 kHz (~ns)	<10	>10
266	CLBO	20.5 W	10 kHz (~ns)	14	>10
266	CLBO	28.4 W	10 kHz (~ns)	<22	>6.24
257.5	CLBO	6 W	100 kHz (~ps)	10	>1.5
258	CLBO	3 W	6 kHz (~ns)	35	<1.5
258	CLBO	10.5 W	10 kHz (~ns)	31	<1.5
266	KBBF	7.86 W	10 kHz (~ns)	<10	>2
266	YAB	5.05 W	65 kHz (~ns)	6.3	
266	LBO(SFG)	3.3 W	1 MHz (~ns)	14	
266	NSBBF	280 $\mu$ J	10 Hz (~ps)	36	

\* От лазерного излучения на длине волны 1028-1064 нм

Проведен подробный анализ импедансной спектроскопии, как одного из наиболее информативных методов исследования свойств н-о кристаллов. Приведен характерный вид спектральной зависимости формы линий модуля  $|Y|$  и фазы  $\varphi$  адмиттанса вблизи частоты ПР кристалла и введено понятие эквивалентной температуры кристалла.

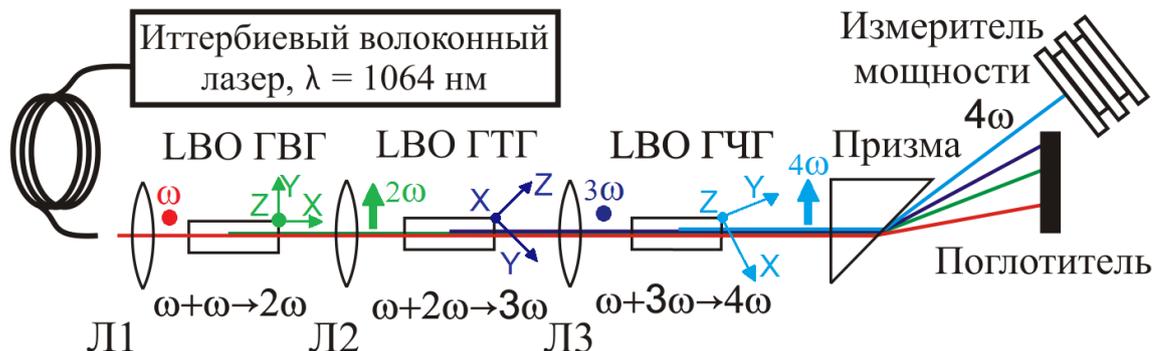
Важной особенностью кристалла LBO является наличие ярко выраженной анизотропной ионной проводимости, что напрямую связано со структурными особенностями орторомбической кристаллической решетки (точечная группа симметрии  $mm2$ ). Максимальное значение ионная проводимость в кристалле LBO достигает вдоль кристаллографической оси **c**. Именно ионная проводимость может оказывать ключевое влияние на величину порога лучевой стойкости или стойкость кристалла к медленной деградации под действием высокоинтенсивного УФ излучения, чему в обзоре уделено особое внимание. Кроме того, рассмотрены методы исследования ИП кристаллов и определения величины энергии активации подвижных ионов  $Li^+$ . Температурная

зависимость ионной проводимости ( $\sigma$ ) выводится из соотношения Нернста-Эйнштейна [5] и чаще всего описывается законом Аррениуса:

$$\sigma(T) = \frac{A}{T} \exp\left(\frac{-E_a}{k_b * T}\right) \quad (1)$$

Где  $T$  – температура в Кельвинах;  $k_b$  – постоянная Больцмана;  $E_a$  – энергия активации ионов, участвующих в проводимости;  $A$  - предэкспоненциальный множитель, который не зависит от  $T$ .

В **Главе 2** представлены оригинальные результаты исследования процесса генерации лазерного излучения на длине волны ГЧГ иттербиевого волоконного лазера (266 нм) в кристалле LBO. Блок-схема экспериментальной установки представлена на **рис. 1**. В качестве оптической накачки использовалось импульсное линейно-поляризованное излучение иттербиевого волоконного лазера, основные параметры которого представлены в **таблице 2**. Данное излучение было последовательно преобразовано в излучение на длине волны 266 нм в трех кристаллах LBO. Пространственное разделение лазерных пучков с разными  $\lambda$  осуществлено с помощью призмы. В **таблице 3** представлены основные параметры используемых кристаллов. Кристаллы помещены в термостаты с возможностью контроля температуры.



**Рисунок 1.** Блок-схема оптической части экспериментальной установки для генерации излучения четвертой гармоники от волоконного иттербиевого лазера ( $\lambda_1 = 1064$  нм). XYZ – кристаллооптические оси, показывающие ориентацию кристаллов LBO.

**Таблица 2.** Основные характеристики иттербиевого волоконного лазера.

Характеристики иттербиевого волоконного лазера	Значения характеристик иттербиевого волоконного лазера
Длина волны ( $\lambda_1$ )	1064 нм
Ширина спектральной линии ( $\Delta\lambda$ )	0,1 нм
Максимальная средняя мощность (P)	24,5 Вт
Длительность импульсов ( $\tau$ )	1,5 нс
Частота повторения импульсов (f)	от 10 кГц до 1 МГц
Пиковая мощность ( $P_{\text{пик}}$ )	16 кВт
Параметр качества пучка $M^2$	менее 1,2

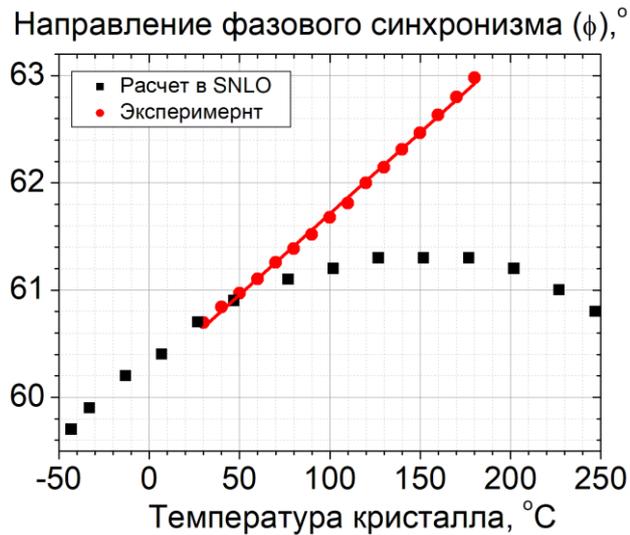
**Таблица 3.** Параметры н-о кристаллов, используемых для преобразования излучения, где AR обозначает наличие просветляющего покрытия,  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\nu$  – частота кванта света, о и е – обыкновенная и необыкновенная волны соответственно, S1 – грань кристалла, расположенная ближе к волоконному выходу иттербиевого лазера.

Название кристалла	Тип синхронизма	Размеры и просветляющие покрытия	Температура синхронизма
ЛВО ГВГ	Некритичный синхронизм, Тип I, $\omega(o)+\omega(o)\rightarrow 2\omega(e)$ $\theta=90^0, \varphi=0^0$	3x3x20мм <sup>3</sup> , S1 AR 1064/532 нм, S2 AR 1064/532 нм	148,5 °С
ЛВО ГТГ	Тип II, $\omega(o)+2\omega(e)\rightarrow 3\omega(o)$ $\theta=47^0, \varphi=90^0$	3x3x15мм <sup>3</sup> , S1 AR 1064/532 нм, S2 – без покрытий	60 °С
ЛВО ГЧГ	Тип I, $\omega(o)+3\omega(o)\rightarrow 4\omega(e)$ $\theta=90^0, \varphi=62.4^0$	3x3.3x20мм <sup>3</sup> , без покрытий	140 °С

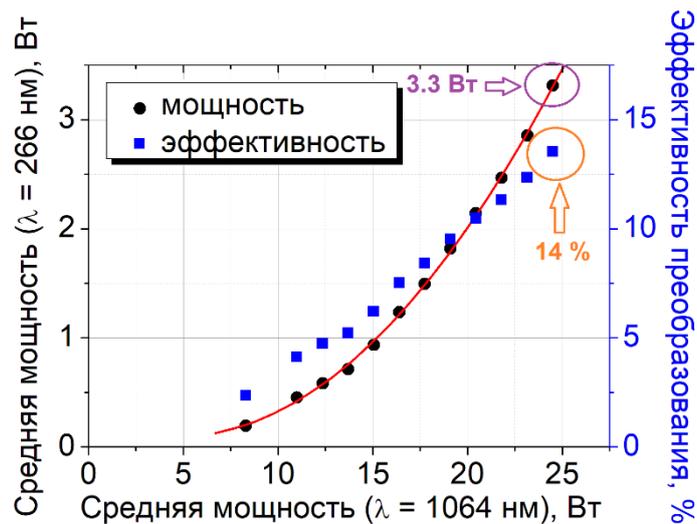
В работе были измерены характерные параметры фазового синхронизма для генерации суммарной частоты лазерного излучения (1064+355→266), в частности, были определены полуширины температурного и угловых синхронизмов в кристалле ЛВО ГЧГ. Ширина температурного синхронизма ( $\Delta T$ ) по полувысоте составила  $\approx 6$  °С×см, ширина углового синхронизма ( $\Delta\varphi$ ) по полувысоте –  $\approx 1,5$  мрад×см. Данные измерения проводились для кристалла ЛВО длиной 20 мм при диаметре перетяжки лазерного излучения ( $2w_0$ ) на длине волны 1064 нм  $\approx 500$  мкм (длина Рэлея  $R_3 = \frac{\pi}{\lambda} w_0^2 = 185$  мм). Также была измерена зависимость угла синхронизма ( $\varphi_{\text{синх}}$ ) от температуры кристалла **рис. 2**, изменения составили  $(265\pm 4)\times 10^{-3}$  мрад на 1 °С. Проведено сравнение с расчетными данными, полученными в программном обеспечении **SNLO** [6]. Различие теоретических и экспериментальных результатов связано с неточностью температурных производных главных значений показателей преломления, используемых при расчетах. Эти значения были уточнены в работе К. Kato [7] в 2018 г., в том числе, благодаря экспериментальным данным данной диссертационной работы.

Для достижения максимальной эффективности н-о преобразования излучения иттербиевого лазера в излучение на длине волны 4-ой гармоники была проведена оптимизация параметров экспериментальной установки: размер перетяжки излучения (1064 нм) в кристалле ЛВО ГЧГ, соотношение оптических мощностей на длинах волн первой, второй и третьей гармоник, компенсация сноса пучков в кристаллах ЛВО. Оптимизация оптической схемы позволила достичь 14 % эффективности преобразования и 3,3 Вт средней мощности лазерного излучения на длине волны 266 нм из 24,5 Вт мощности фундаментального излучения (1064 нм) – **рис. 3**. На текущий момент 3.3 Вт ( $\lambda_4=266\text{нм}$ ) является рекордным значением, полученным в результате н-о

преобразования в кристалле LBO. Полученные средние мощности и эффективности преобразования относительно мощности фундаментального излучения ( $\lambda = 1064$  нм) при максимальной эффективности ГЧГ представлены в **таблице 4**.



**Рисунок 2.** Зависимость угла синхронизма ( $\phi_{\text{синх}}$ ) от температуры кристалла LBO ГЧГ ( $\theta=90^\circ$ ).



**Рисунок 3.** Зависимость средней мощности лазерного излучения с  $\lambda=266$  нм и эффективности преобразования от мощности накачки при ГЧГ ( $1064 + 355 \rightarrow 266$ ) в кристалле LBO.

**Таблица 4.** Средние мощности и эффективности процессов н-о преобразования относительно мощности фундаментального излучения ( $\lambda = 1064$  нм) при максимальной эффективности генерации излучения на длине волны 266 нм.

Тип преобразования	Средняя мощность, Вт	Эффективность преобразования, %
1064+1064→532	12 (532 нм)	49
1064+532→355	6 (355 нм)	25
1064+355→266	3,3 (266 нм)	14

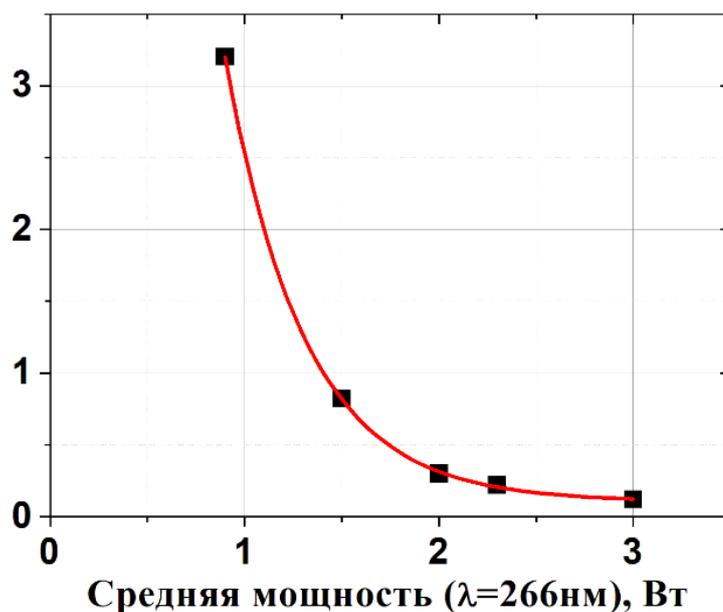
Одним из важных параметров н-о кристаллов, используемых для н-о преобразования частоты лазерного излучения, является их надежность (ресурс): сохранение уровня средней мощности генерируемого излучения без потери качества пучка (профиль и  $M^2$ ). На длине волны 266 нм энергия кванта составляет 4,7 эВ, влияние двухфотонных процессов становится значительным (ширина запрещенной зоны LBO составляет 7,8 эВ) и начинают проявляться дополнительные механизмы поглощения оптического излучения в кристалле трибората лития.

В **Главе 2** также была исследована долговременная эффективность генерации излучения на длине волны четвертой гармоники в кристалле LBO. Были проведены прогонные испытания для оценки времени деградации кристалла LBO. В данной серии экспериментов исследовалось 10 кристаллов LBO ( $3 \times 3,3 \times 20$  мм<sup>3</sup>), изготовленных из одной заготовки (були) по единой технологии. Для большинства образцов при одинаковых условиях проведения испытаний время деградации практически не отличалось.

Проведены исследования скорости деградации кристалла LBO ГЧГ при его температурах 30, 140 и 270 °С. Отличие в измеренных временах деградации составило до 50%, максимальный ресурс был получен при температуре кристалл 140 °С.

Проведены измерения скорости деградации кристалла LBO ГЧГ при различных мощностях излучения на длине волны четвертой гармоники (**рис. 4**). Ресурс кристалла возрастает нелинейно при снижении средней мощности излучения на длине волны четвертой гармоники (266 нм). Зависимость ресурса кристалла от плотности мощности излучения является аналогичной, так как диаметр перетяжки не изменялся во время эксперимента.

**Ресурс LBO ГЧГ (Время падения мощности на 20%), ч**



**Рисунок. 4.** Зависимость времени деградации кристалла LBO ГЧГ по падению мощности на 20% от мощности генерируемого УФ излучения (266 нм).

Применив целый комплекс мер, обобщающих знания, полученные в данной работе, включая результаты исследований, представленные в **Главах 3 и 4**, удалось достичь около 1 Вт средней мощности излучения на длине волны 266 нм и увеличения ресурса кристалла в ~10 раз (с ~10 до ~100-200 ч). Прежде всего, был увеличен диаметр перетяжки лазерного излучения в кристалле LBO ГЧГ (**рис. 1**) до 500 мкм (измерялся для излучения с  $\lambda = 1064$  нм), выбрана оптимальная температура кристалла (~140°C) и отобран кристалл с наилучшими характеристиками (имеющий наименьший коэффициент оптического поглощения).

Увеличение срока эксплуатации кристалла в промышленных лазерах также обеспечивается его смещением в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного излучения. Учитывая, что размеры кристалла LBO в поперечном сечении могут быть более 50×50 мм<sup>2</sup>, то количество рабочих точек может быть более 500 шт., что обеспечит общий ресурс лазера, по выбранному нами критерию, более 10 000 часов.

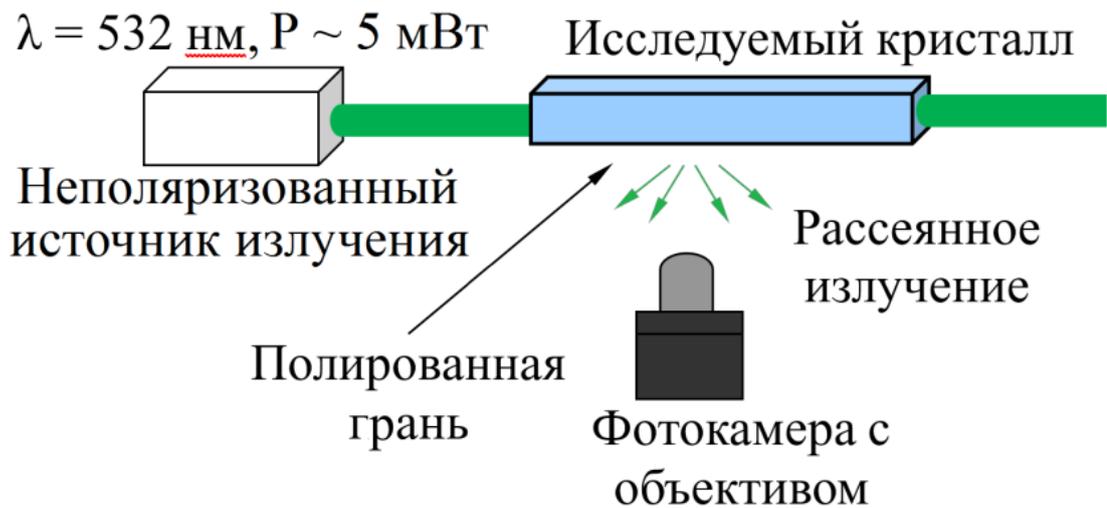
Чтобы добиться такого результата было необходимо исследовать особенности н-о преобразования и стойкости кристалла LBO к УФ излучению. Соответственно, одной из задач стала локализация поврежденной области.

В процессе деградации н-о кристалла при ГЧГ происходит снижение преобразованной мощности и искажение профиля лазерного пучка. Следовательно, происходит изменение показателя преломления, что позволяет визуализировать образовавшиеся изменения в кристалле (область деградации). В работе представлены результаты по визуализации областей кристалла LBO, подвергнутых разрушению под действием УФ излучения на длине волны 266 нм в режиме н-о преобразования. Визуализация осуществлялась двумя способами: по искажениям волнового фронта проходящего пучка и по рассеянному излучению методом темного поля (**рис. 5**).

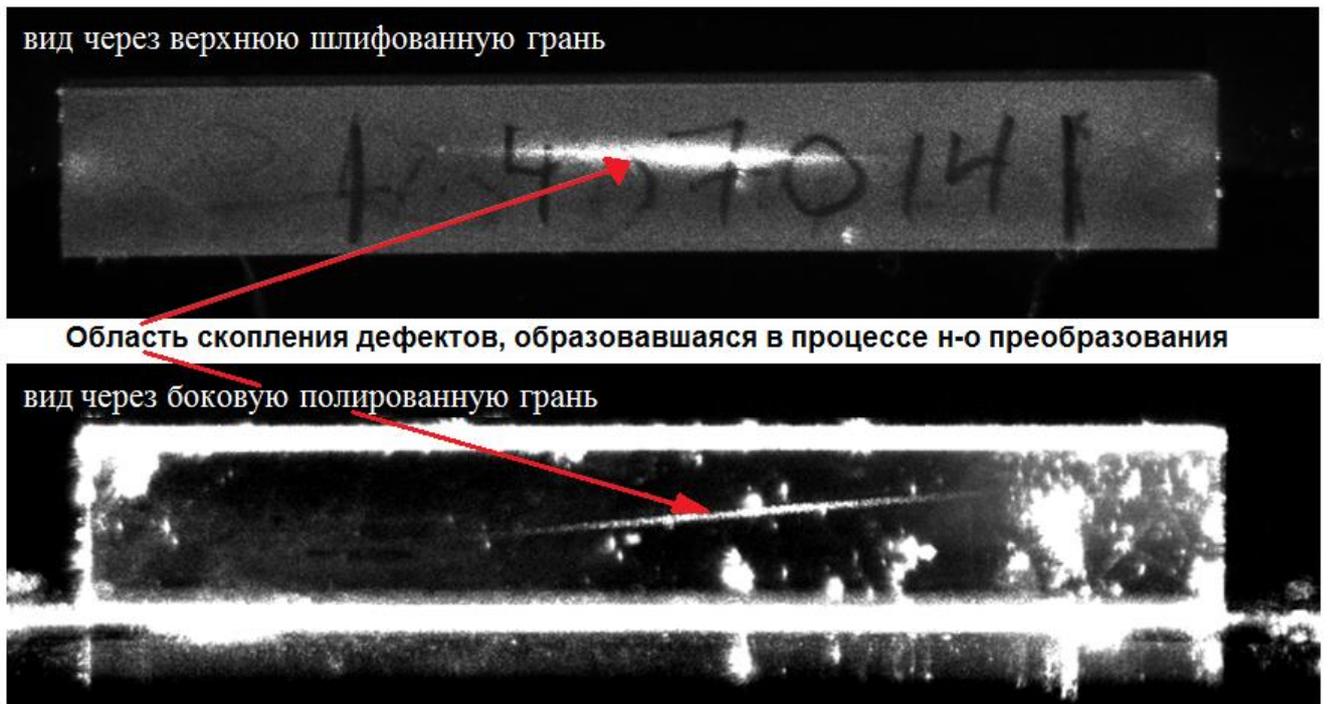
В кристаллах создавалось определенное количество областей деградации с известным расстоянием между ними (в поперечном сечении) и проводилась их визуализация. Полученные расстояния между искажениями на изображениях соответствуют сдвигам лазерного пучка между экспериментами по н-о преобразованию. Также было замечено, что искажения можно обнаружить только при наблюдении под определенным углом к граням кристалла, что связано с образованием деградирующей области в определенном направлении (направлении синхронизма). При отклонении от данного направления по углу искажения проходящего пучка излучения становятся практически незаметными. Это позволяет отличать разрушения на поверхности кристалла от протяженных дефектных областей в объеме.

Благодаря рассеянию света на неоднородностях показателя преломления в объеме кристалла, поврежденную в процессе н-о преобразования область кристалла удастся наблюдать через боковую грань с помощью CMOS камеры с объективом **рис. 5**. Дефектная область хорошо визуализируется и выглядит, как контрастная линия. Она располагается в объеме кристалла, что

видно при наблюдении с разных сторон (**рис. 6**). Эта же область наблюдалась под микроскопом, ее структура представляется в виде большого количества отдельных параллельных треков, различающихся по длине и яркости (интенсивности рассеяния). Треки также являются неоднородными и состоят из множества отдельных светящихся точек. Поперечный размер области деградации составил около 100 мкм. Таким образом, дефектные области наблюдаются не только на поверхности кристалла, но и в его объеме. Следует отметить, что изменения происходят при плотности мощности гораздо меньшей, чем величина лучевой стойкости (LIDT) кристалла LBO.



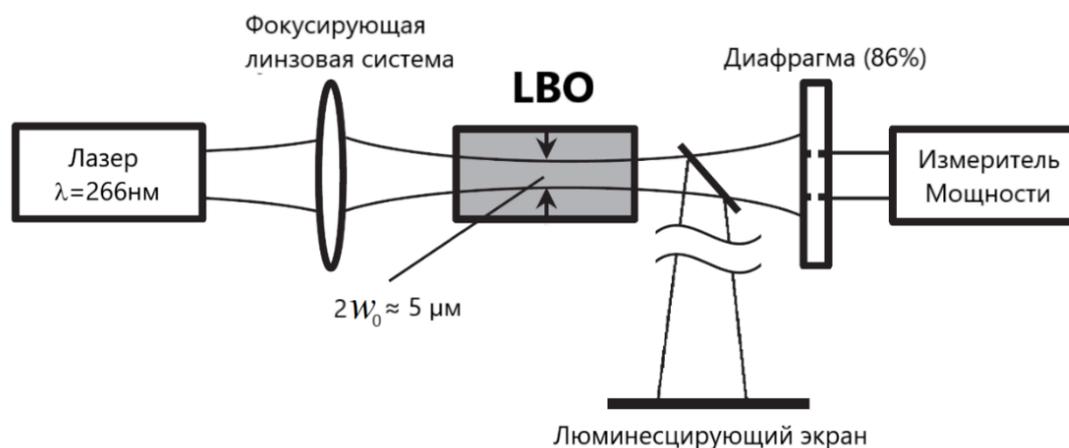
**Рисунок 5.** Блок-схема оптической части экспериментальной установки по визуализации области деградации кристалла LBO.



**Рисунок 6.** Фотография кристалла LBO ГЧГ ( $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=62.4^\circ$ ) с областью скопления дефектов.

В главе 3 представлены результаты исследований быстрой деградации кристалла LBO в объеме под действием сфокусированного в малую перетяжку УФ излучения (рис.7). При таком подходе значительно возрастает интенсивность излучения и сокращается эффективная область воздействия, то есть удается ее локализовать. Как результат, время проведения эксперимента сокращается от десятков-сотен и даже тысяч часов, характерных для “классических” прогонных испытаний, до нескольких минут и даже секунд. Кроме того, такой подход убирает проблему определения деградирующего элемента, так как в сложных системах кроме н-о кристалла присутствуют и другие оптические элементы, например, зеркала, линзы, которые также подвержены изменениям под действием высокоинтенсивного УФ излучения.

Излучение на длине волны 266 нм фокусируется в объем кристалла (перетяжка  $2W_0 \approx 5$  мкм). Расчетное значение плотности энергии в импульсе достигает  $6$  Дж/см<sup>2</sup> (пиковая плотность мощности  $6$  ГВт/см<sup>2</sup>), при этом энергия импульса составляет  $1,2$  мкДж, частота следования импульсов  $100$  кГц, длительность импульсов  $\sim 1$  нс. В процессе воздействия УФ излучения проявляется деградация кристалла, которая приводит к искажению профиля проходящего пучка и, как следствие, ухудшению параметра его качества  $M^2$ . Пучок лазерного излучения попадает на люминесцирующий экран, а появление искажений в его изображении отслеживается цифровой камерой с объективом. Для контроля изменения оптической мощности, вызванного искажением пучка, используется измеритель мощности и диафрагма. Размер диафрагмы настраивается по пропусканию  $86\%$  мощности излучения неискаженного пучка. В экспериментах измеряется время падения мощности (после диафрагмы) на  $10\%$  или время появления первых искажений профиля пучка. Измеренное таким образом значение времени будет называться далее временем быстрой деградации кристалла.

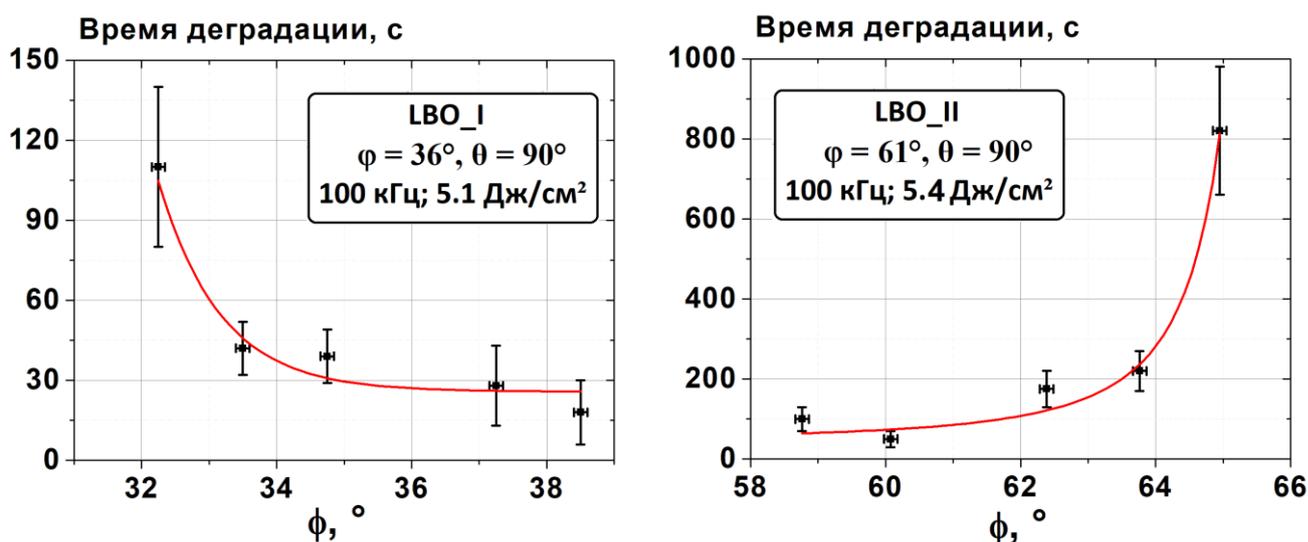


**Рисунок 7.** Блок-схема оптической части экспериментальной установки по исследованию быстрой деградации кристаллов LBO под действием УФ излучения ( $\lambda_4=266$  нм) высокой интенсивности, где  $2W_0$  – это диаметр перетяжки лазерного излучения.

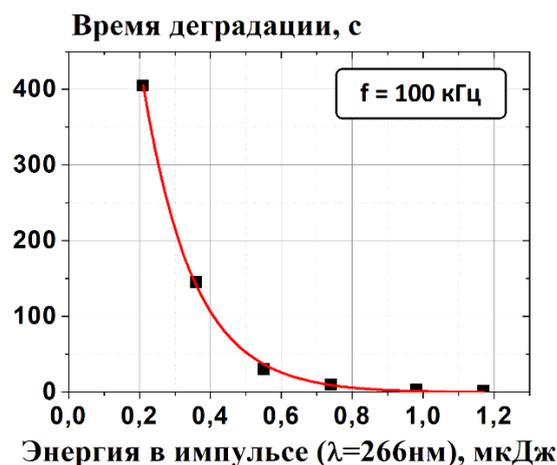
Зависимость времени быстрой деградации под воздействием излучения на длине волны 266 нм (направление поляризации в плоскости XY) от направлениях распространения лазерного излучения представлена на **рис. 8**. Выбранные диапазоны углов соответствуют направлениям фазовых синхронизмов для ГТГ 1064+532→355 (Тип I) и ГЧГ 1064+355→266 (Тип I). Геометрические размеры образцов  $\sim 3 \times 3 \times 20$  мм<sup>3</sup>, поэтому диапазон углов был ограничен. При использовании излучения с поляризацией ортогональной плоскости XY деградации кристаллов обнаружено не было. Стоит отметить, что при использовании таких синхронизмов для н-о преобразования происходит генерация излучения 355 и 266 нм с поляризацией, принадлежащей плоскости XY.

Полученная в ходе эксперимента нелинейная зависимость времени быстрой деградации от энергии в импульсе (при неизменных частоте следования импульсов и диаметре перетяжки излучения) представлена на **рис. 9**. Излучение распространялось в направлении ( $\varphi=36^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ), поляризация в плоскости XY. С уменьшением энергии наблюдается нелинейное возрастание времени деградации.

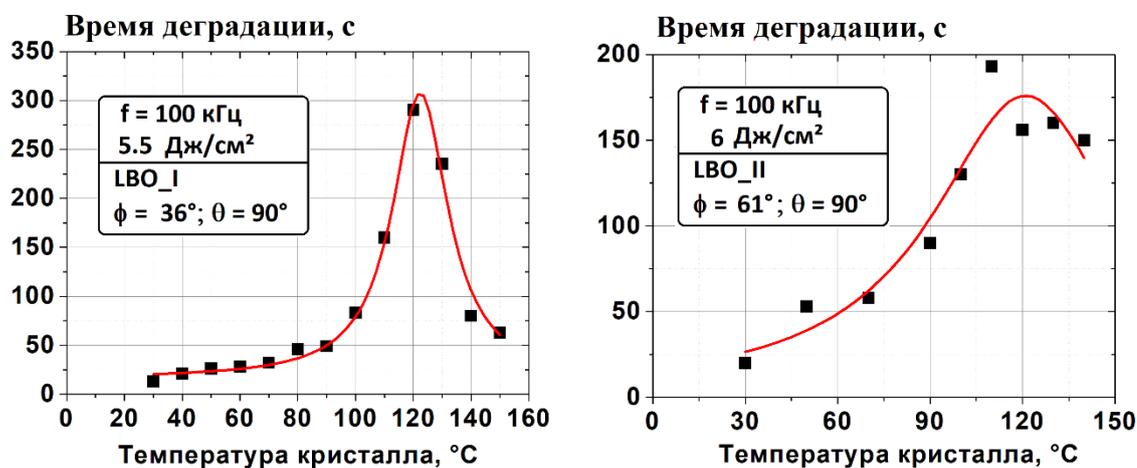
На **рис. 10** представлены зависимости времени быстрой деградации от температуры для двух кристаллов: LBO\_I ( $\varphi = 36^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ) и LBO\_II ( $\varphi = 61^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ). Поляризация излучения лежит в плоскости XY. Наблюдается рост времени быстрой деградации с увеличением температуры кристалла до  $T \sim 120^\circ\text{C}$  как для кристалла LBO\_I с  $\varphi = 36^\circ$ , так и для LBO\_II с  $\varphi = 61^\circ$ , при дальнейшем увеличении температуры наблюдается снижение времени быстрой деградации.



**Рисунок 8.** Зависимость времени быстрой деградации кристалла от угла  $\varphi$  для образцов LBO\_I ( $\varphi = 36^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ) и LBO\_II ( $\varphi = 61^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ). Направление излучения ( $\lambda_4=266$  нм) и поляризации в плоскости XY. XYZ – оси кристаллооптической системы координат ( $n_x < n_y < n_z$ ).



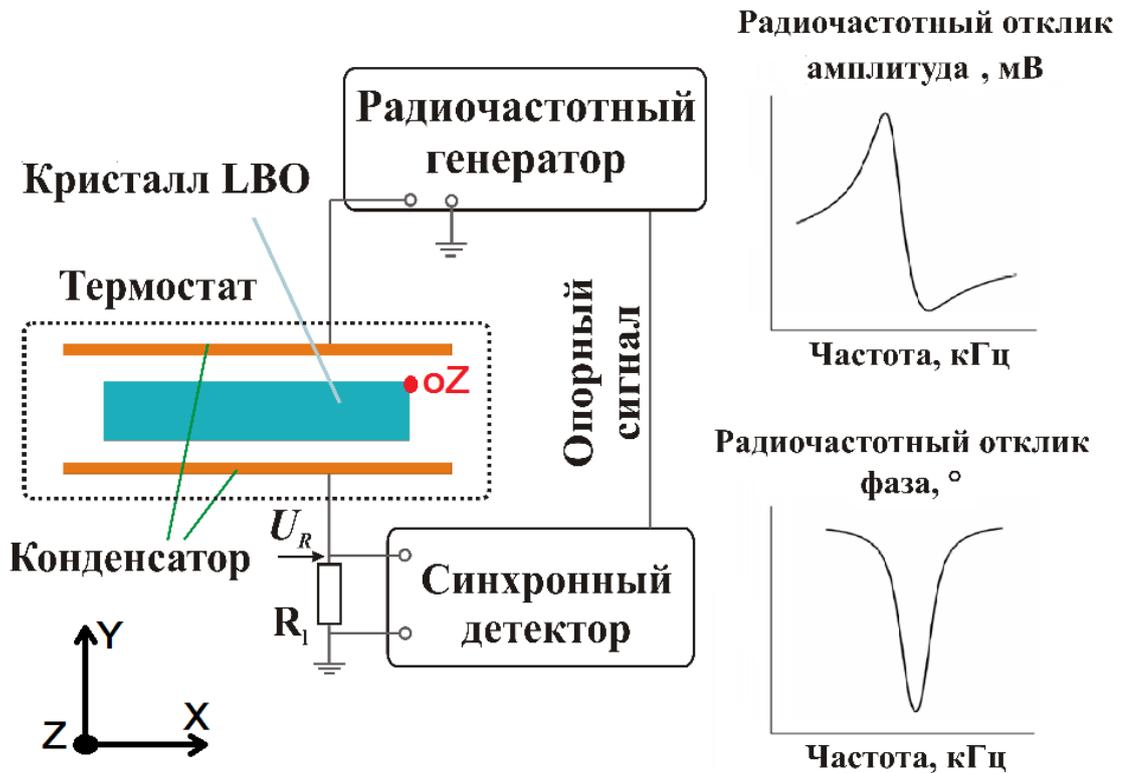
**Рисунок 9.** Зависимость времени быстрой деградации кристалла LBO\_I от энергии в импульсе ( $\lambda=266$  нм). Направление излучения  $\phi=36^\circ, \theta=90^\circ$ ; излучение поляризовано в плоскости XY.



**Рисунок 10.** Зависимость времени быстрой деградации от температуры кристаллов LBO. Направление излучения  $\phi=36^\circ, \theta=90^\circ$  для LBO\_I и  $\phi=61^\circ, \theta=90^\circ$  для LBO\_II; излучение ( $\lambda=266$  нм) поляризовано в плоскости XY.

В **Главе 4** представлены результаты исследований кристаллов LBO методом РЧ спектроскопии, которые использовались для селекции оптических элементов при изготовлении лазерных источников и отработке технологических процессов выращивания кристаллов. Блок-схема экспериментальной установки приведена на **рис. 11**. Отклик кристалла, размещенного между двумя электродами, образующими конденсатор, на приложенное электрическое напряжение от РЧ генератора при различной частоте  $f$  анализируется на нагрузочном сопротивлении  $R_l$  синхронным детектором. При совпадении частоты внешнего электрического поля с частотой какой-либо собственной акустической моды образца возбуждается пьезоэлектрический резонанс, что проявляется в резком немонотонном изменении амплитуды и фазы электрического импеданса образца в очень узком спектральном диапазоне. В термостате осуществляется однородный разогрев кристалла и контроль его температуры. Методом

пьезорезонансной лазерной калориметрии на основе концепции эквивалентной температуры кристалла для ряда образцов LBO были измерены коэффициенты оптического поглощения лазерного излучения на длине волны 1064 нм.

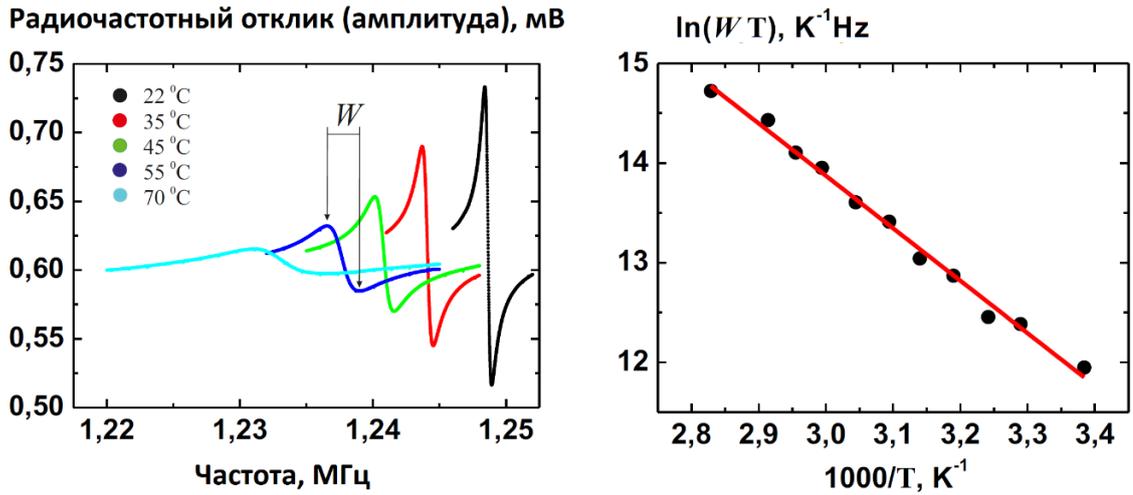


**Рисунок 11.** Блок-схема РЧ части экспериментальной установки исследования кристаллов LBO методом пьезоэлектрической резонансной спектроскопии (слева). Характерный вид спектральной зависимости формы линии амплитуды и фазы адмиттанса вблизи ПР (справа).

Основное внимание уделяется спектральной зависимости формы линии пьезоэлектрического резонанса, которая чрезвычайно чувствительна к изменению температуры (рис. 12). Такое поведение свойственно большинству исследованных нами кристаллов LBO. В данной работе установлено, что изменение добротности (ширины) линии ПР с температурой обусловлено ионной проводимостью кристаллов. В основе создания эмпирической модели, описывающей изменения формы линии ПР, использовалась температурная зависимость  $\sigma(T)$  для ионных и суперионных проводников (формула Аррениуса – (1)). Уширение линии ПР для кристалла LBO представлено на рис. 12 и хорошо описывается введенной нами формулой:

$$W(T) = W_0 + B \cdot \sigma(T), \quad (2)$$

где  $W_0$  – фундаментальная ширина линии ПР (ширина линии ПР при температуре ниже 100 К),  $B$  – константа. Используя данную модель, по наклону прямой, построенной в координатах Аррениуса (рис. 12), можно вычислить энергию активации кристалла ( $E_a$ ).

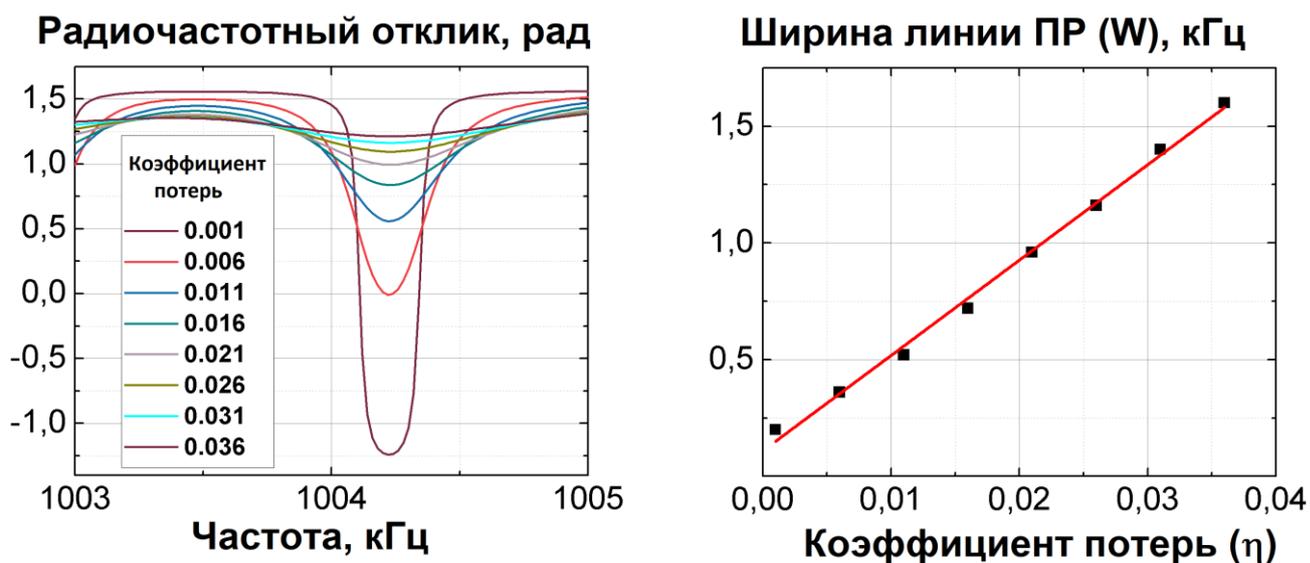


**Рисунок 12.** Температурная зависимость формы линии (амплитуды напряжения на нагрузочном сопротивлении) для одного из ПР кристалла LBO (слева). Зависимость ширины линии данного ПР от температуры, построенная в координатах Аррениуса (справа).

Для подтверждения правомерности предложенной нами эмпирической модели была составлена система уравнений, описывающая влияние ИП на форму линии пьезоэлектрических резонансов. В основе этой системы лежат базовые общепризнанные уравнения распространения акустической волны в проводящей пьезоэлектрической среде: уравнения Максвелла и пьезоэффекта с мнимой частью диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon = \varepsilon' + i \times \varepsilon''$ ) пропорциональной ионной проводимости кристалла ( $\sigma$ ):  $|\varepsilon''| = \eta \varepsilon' \sim \sigma / \omega$ , где  $\eta$  – коэффициент диэлектрических потерь,  $\omega$  – частота радиочастотного поля. Используя методы математического моделирования (метод конечных элементов), была решена система уравнений (3). Было показано, что ширина линии ПР линейно зависит от коэффициента диэлектрических потерь (мнимой части диэлектрической проницаемости, линейно пропорциональной ИП) – **рис. 13**.

$$\begin{aligned}
 T_{ij} &= c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k & \rho \ddot{u}_i &= T_{ij,j} \\
 D_i &= e_{ijk} S_{jk} + \varepsilon_{ij}^S E_j & \operatorname{div} \vec{D} &= \tilde{\rho}
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

где  $T_{ij}$  – тензор напряжений,  $c_{ijkl}^E$  – упругие константы,  $S_{kl}$  – тензор деформаций,  $e_{kij}$  – пьезоэлектрические константы,  $D_i$  – вектор электрической индукции,  $E_j$  – вектор напряженности электрического поля,  $u_i$  – смещение,  $\rho$  – плотность кристалла,  $\tilde{\rho}$  – плотность нескомпенсированного заряда,  $\varepsilon_{ij}^S$  – тензор диэлектрической проницаемости. Верхние индексы “S” и “E” обозначают, что величины измерены при постоянной деформации и при постоянном электрическом поле соответственно.

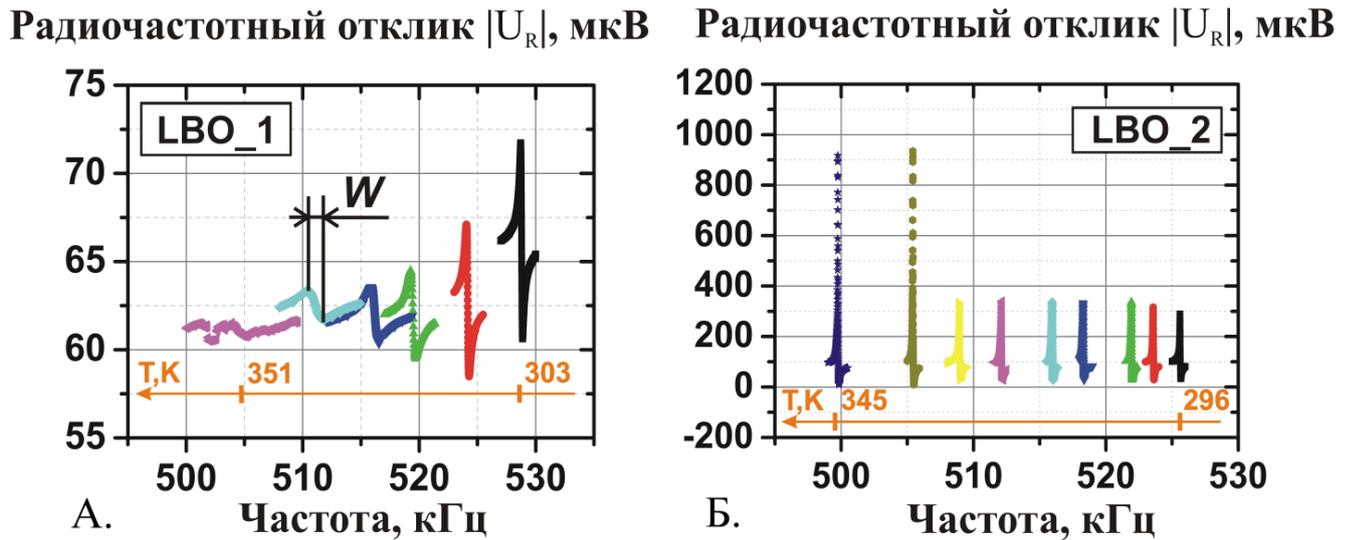


**Рисунок 13.** Зависимость спектральной формы линии вблизи частоты пьезоэлектрического резонанса от коэффициента диэлектрических потерь ( $\eta$ ) для одного из ПР кристалла LBO (слева). Зависимость ширины линии данного ПР от коэффициента диэлектрических потерь ( $\eta$ ) (справа).

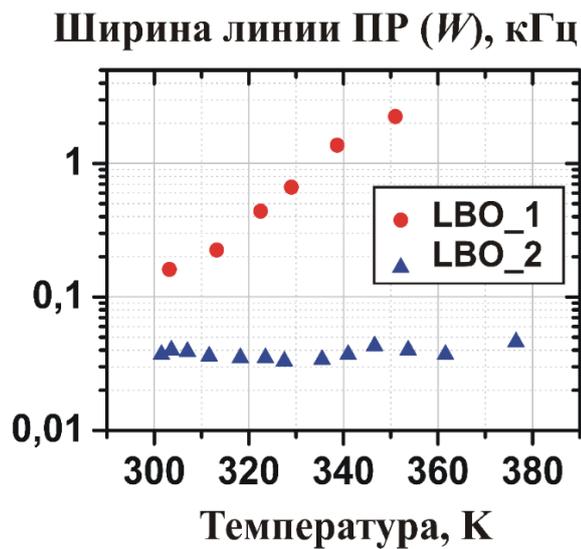
Изменения формы линии, полученные экспериментально, качественно совпадают с математическими расчетами, что подтверждает достоверность эмпирической модели (2), связывающей ширину линии ПР и величину ионной проводимости, и возможность определения радиофизических свойств LBO кристалла методом пьезоэлектрической резонансной спектроскопии.

Большая часть исследованных образцов трибората лития (LBO\_1) подчинялась описанной выше модели. Однако, были обнаружены образцы (LBO\_2), у которых ширина линии пьезоэлектрического резонанса в диапазоне температур 300–400 К практически не изменяется и соответствует типичным значениям ширины линии при температуре ниже 100 К (**рис. 14**, **рис. 15**), то есть существуют кристаллы LBO с подавленной ИП. Проведенные сторонними исследователями измерения также показали, что ионная проводимость в кристаллах LBO\_2 значительно ниже ИП кристаллов LBO\_1.

На установке по исследованию быстрой деградации кристаллов (**рис. 7**) были произведены оценки стойкости объема исследуемых кристаллов LBO к воздействию УФ излучения на длине волны 266 нм. Обнаружено, что кристаллы с ярко выраженной ионной проводимостью обладают меньшей стойкостью к воздействию лазерного УФ излучения.



**Рисунок 14.** Температурная зависимость спектральной формы линии вблизи частоты пьезоэлектрического резонанса (амплитуда напряжения на нагрузочном сопротивлении) для LBO\_1 (А; ярко выраженная ИП) и LBO\_2 (Б; подавленная ИП).



**Рисунок 15.** Температурная зависимость ширины линии ПР для кристаллов LBO\_1 (ярко выраженная ИП) и LBO\_2 (подавленная ИП).

Таким образом, в данной работе было показано, что метод пьезоэлектрической резонансной спектроскопии позволяет бесконтактно получить информацию не только об оптических (коэффициент поглощения) и термодинамических (коэффициент теплообмена) свойствах  $n$ -о кристалла, о чем было известно ранее, но и о радиофизических (ионная проводимость) его свойствах.

Разработанная методика тестирования позволила отобрать образец наивысшего качества, а полученные в результате исследований знания дали возможность выбрать оптимальный режим для  $n$ -о преобразования. В результате удалось достичь  $\sim 1$  Вт средней мощности излучения на длине волны 266 нм с ресурсом кристалла в одной точке более 100 ч.

## Основные результаты

1. Разработана, собрана и настроена экспериментальная установка для исследований генерации УФ излучения на длине волны 266 нм: формирование суммарной частоты при н-о взаимодействии волн фундаментального излучения (1064 нм) и его третьей гармоники (355 нм) в кристалле LBO. Проведена оптимизация оптической схемы. Достигнуто 3,3 Вт средней мощности излучения на длине волны 266 нм при эффективности преобразования излучения иттербиевого лазера 14%.
2. Определены температурная ( $\Delta T$ ) и угловая ( $\Delta \varphi$ ) полуширины синхронизма для LBO ГЧГ (1064+355 $\rightarrow$ 266):  $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}\times\text{см}$  и  $\Delta \varphi = 3 \text{ мрад}\times\text{см}$ . Измерена зависимость направления синхронизма (угол  $\varphi$ ) от температуры кристалла LBO:  $\Delta \varphi / \Delta T = (265 \pm 4) \times 10^{-3} \text{ мрад}/^\circ\text{C}$ .
3. Измерена зависимость времени деградации кристалла в процессе генерации четвертой гармоники от плотности мощности лазерного излучения на длине волны 266 нм и температуры кристалла. Осуществлена визуализация деградирующей области кристалла. Установлено, что присутствие в процессе н-о преобразования (1064+355 $\rightarrow$ 266) излучения второй гармоники (532 нм) не оказывает влияния на время деградации LBO.
4. Исследован процесс деградации в объеме кристалла LBO под действием сфокусированного УФ излучения на длине волны 266 нм. Обнаружена чрезвычайно сильная зависимость времени деградации от температуры кристалла, направления распространения излучения и его поляризации.
5. Методом пьезоэлектрической резонансной спектроскопии изучены радиофизические (ионная проводимость) свойства н-о кристаллов LBO, выращенных в различных технологических условиях. Идентифицировано два типа кристаллов LBO – обладающих ярко выраженной и подавленной ионной проводимостью. Экспериментально обнаружена зависимость между спектральной формой линий амплитуды и фазы адмиттанса вблизи частоты ПР и величиной ИП в кристалле LBO.
6. Предложена эмпирическая модель, позволяющая определять радиофизические свойства кристаллов (ионная проводимость) по температурной зависимости формы линии пьезоэлектрического резонанса. На основе физических принципов методами математического моделирования показана правомерность данной модели.
7. Достигнут ресурс кристалла LBO (по падению мощности на 20%) более 100 часов в процессе генерации излучения на длине волны 266 нм средней мощностью порядка 1 Вт.

## Список публикаций по теме диссертации

### Статьи в журналах и трудах международных конференций:

1. **D.G. Nikitin**, O.A. Byalkovskiy, O.I. Vershinin, P.V. Puyu, and V.A. Tyrtysnyy, *Sum frequency generation of UV laser radiation at 266 nm in LBO crystal* // **Optics Letters**. – 2016. – Vol. 41. – № 7. – pp. 1660-1663. doi: 10.1364/OL.41.001660. (WoS, Scopus, Q1)
2. **Nikitin D.G.**, Pigarev A.V., Konyashkin A.V., Ryabushkin O.A, *Ionic conductivity and its effect on the optical properties of LBO crystals* // **Optics letters**. – 2018. – Vol. 43. – №. 19. – pp. 4843-4846. dio: 10.1364/OL.43.004843. (WoS, Scopus, Q1)
3. Ю.С. Стирманов, **Д.Г. Никитин**, А.В. Коняшкин, О.А. Рябушкин, *Радиочастотная спектроскопия нелинейно-оптических кристаллов с ионной проводимостью* // Нелинейный мир. – 2018. – Т. 2. – С. 50-51. (Перечень ВАК РФ)
4. O.A. Ryabushkin, A.V. Konyashkin, D.V. Myasnikov, V.A. Tyrtysnyy, O.I. Vershinin, **D.G. Nikitin**, A.A. Surin, *Impedance Spectroscopy in Laser Calorimetry of Nonlinear-Optical Crystals* // IUS Proceedings, 2013 IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium Proceedings. – 2013. – pp. 496-499. doi:10.1109/ULTSYM.2013.0129. (WoS, Scopus)
5. Artem S. Demkin, **Dmitriy G. Nikitin**, Oleg A. Ryabushkin, *Changing of optical absorption and scattering coefficients in nonlinear-optical crystal lithium triborate before and after interaction with UV irradiation* // Nonlinear Optics and its Applications IV. - International Society for Optics and Photonics. – 2016. – Vol. 9894. – p. 98941U. doi:10.1117/12.2227789. (WoS, Scopus)

### Тезисы в трудах международных конференций:

6. **D. Nikitin**, O. Byalkovskiy, O. Vershinin, V. Tyrtysnyy, B. Davydov, *Sum frequency generation of UV laser radiation at 266 nm in LBO crystal* // Laser Optics, 2014 International Conference. – IEEE. – 2014. – p. 1. (WoS, Scopus)
7. O. Vershinin, O. Byalkovskiy, V. Tyrtysnyy, **D. Nikitin**, *Anisotropy of UV-induced degradation of LBO crystal* // Laser Optics, 2014 International Conference. – IEEE. – 2014. – p. 1. (WoS, Scopus)
8. P.V. Puyu, **D.G. Nikitin**, O.A. Byalkovskiy, O.I. Vershinin, V.A. Tyrtysnyy, *Visualization of UV-induced photorefractive damage in LBO crystals* // Laser Optics, 2014 International Conference. – IEEE. – 2014. – p. 1. (WoS, Scopus)
9. **Dmitriy Nikitin**, Oleg Vershinin, Valentin Tyrtysnyy, Oleg Byalkovskiy, *Anisotropy of Bulk Degradation of LBO Crystal Induced by DUV Laser Radiation at 266 nm* // Advanced Solid State Lasers. – Optical Society of America. – 2015. – p. AM5A.8. (Scopus)
10. A.S. Demkin, **D.G. Nikitin**, O.A. Ryabushkin, *Piezoelectric laser calorimetry for measurement of optical scattering coefficients in nonlinear-optical crystals* // Ultrasonics, 2016. – 2nd international conference on ultrasonic-based applications: from analysis to synthesis. – Proceedings book. – 2016. – pp. 298-299.
11. **Dmitrii G Nikitin**, Oleg A. Ryabushkin, *Piezoelectric Resonance Spectroscopy of Ionic Conductivity in Nonlinear-Optical LBO Crystals* // Laser Applications Conference. – Optical Society of America. – 2017. – p. JM5A.1. (Scopus)
12. **D.G. Nikitin**, A.V. Pigarev, Yu.S. Stirmanov, A.V. Konyashkin and O.A. Ryabushkin, *Piezoelectric Resonance Spectroscopy of Ionic Conductivity in Nonlinear-Optical LBO Crystals*// 8th EPS-QEOD Europhoton. – Proceedings book. – 2018. – p. TuP.26.

**Тезисы в трудах конференций МФТИ:**

13. **Никитин Д.Г.**, Коняшкин А.В., Рябушкин О.А., *Пьезорезонансная спектроскопия нелинейно-оптического кристалла трибората лития при однородном разогреве* // 55-ая научная конференция МФТИ. – 2012. – С.76-78.
14. **Д.Г. Никитин**, О.А. Бялковский, О.И. Вершинин, В.А. Тыртышный. *Генерация ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм в нелинейно-оптическом кристалле LBO* // 56-ая научная конференция МФТИ. – 2013. – С. 98-100.
15. О.И. Вершинин, В.А. Тыртышный, О.А. Бялковский, **Д.Г. Никитин**. *Образование дефектов в объеме кристалла LBO под действием мощного ультрафиолетового излучения на длине волны 355 нм* // 56-ая научная конференция МФТИ. – 2013. – С. 94-95.
16. О.И. Вершинин, **Д.Г. Никитин**, В.А. Тыртышный, О.А. Бялковский. *Анизотропия образования дефектов в объеме кристалла LBO под действием мощного ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм* // 57-ая научная конференция МФТИ. – 2014. – С. 50-51.
17. А.С. Демкин, **Д.Г. Никитин**, О.А. Рябушкин, *Изменение коэффициентов оптического поглощения и рассеяния в нелинейно-оптическом кристалле трибората лития при воздействии УФ-излучением* // 58-ая научная конференция МФТИ. – 2015. – С. 1022.
18. **Д.Г. Никитин**, О.А. Рябушкин, *Ионная проводимость нелинейно-оптических кристаллов трибората лития (LBO)* // 60-ая научная конференция МФТИ, 2017.

**Тезисы в трудах российских конференций:**

19. **Д.Г. Никитин**, О.А. Бялковский, О.И. Вершинин, В.А. Тыртышный, Б.Л. Давыдов. *Генерация ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм в кристалле LBO* // 6-й Российский семинар по волоконным лазерам. – 2014. – С. 80-81.

**Доклады на международных конференциях (без публикаций):**

- 1) Oleg Ryabushkin, Aleksey Konyashkin, Dmitriy Nikitin, *Piezoelectric Resonance Spectroscopy of Crystals Exhibiting Ionic Conductivity* // 5th international Conference on Theoretical and Applied Physics, Vienna, Austria, 02-03 July, 2018.

**Список литературы**

- [1] Xuan H. et al. *High-Power, Solid-State, Deep Ultraviolet Laser Generation* //Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8. – №. 2. – P. 233.
- [2] Avdokhin A. et al. *High average power quasi-CW single-mode green and UV fiber lasers* //Proc. SPIE. – 2015. – Vol. 9347. – P. 934704.
- [3] Negel J. P. et al. *Ultrafast thin-disk multipass laser amplifier delivering 1.4 kW (4.7 mJ, 1030 nm) average power converted to 820 W at 515 nm and 234 W at 343 nm* //Optics express. – 2015. – Vol. 23. – №. 16. – P. 21064-21077.
- [4] Roy V., Desbiens L., Taillon Y. *Hybrid Fiber/Solid-State Picosecond Pulse Burst Laser with Diffraction-Limited Beam Quality in the Deep Ultraviolet* //Advanced Solid State Lasers. – Optical Society of America, 2015. – P. ATh2A.33.
- [5] Guo R. et al. *Pyroelectric, dielectric, and piezoelectric properties of LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>* //Journal of applied physics. – 1995. – Vol. 78. – №. 12. – P. 7234-7239.
- [6] Smith A. V. SNLO nonlinear optics code (Ver. 60) //AS-Photonics, Albuquerque, USA. – 2013.
- [7] Kato K., Grechin S. G., Umemura N. *New thermo-optic dispersion formula for LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>* //Laser Physics. – 2018. – Vol. 28. – №. 9. – P. 095403.