

На правах рукописи

Вершинин Олег Игоревич

Оптические, радиочастотные и термодинамические
свойства нелинейно-оптического кристалла трибората
лития в условиях генерации третьей гармоники
излучения волоконного иттербиевого лазера

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2017

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

Научный руководитель:

Рябушкин Олег Алексеевич, к.ф.-м. н., доцент, эксперт РАН

Официальные оппоненты:

Михайлов Виктор Алексеевич, д.т.н., ИОФ РАН

Киреев Сергей Васильевич, д.ф.-м.н., НИЯУ МИФИ

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится 7 декабря 2017 года в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.156.09 на базе Московского физико-технического института (государственного университета) по адресу: 141700, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ и на сайте

<https://mipt.ru/education/post-graduate/d212-156-09/applicants/vershinin-oleg-igorevich.php>

Автореферат разослан «___» октября 2017 года

Ученый секретарь диссертационного совета

Токунов Юрий Матвеевич, к.ф.-м.н., доцент

Общая характеристика работы

Введение

В течение прошедших 55 лет с момента появления первого лазера, источники лазерного излучения с успехом применяются во многих областях науки, медицины и техники. Появление волоконных лазеров, обладающих непревзойденными характеристиками по мощности излучения, качеству пучка, эффективности генерации и надежности работы привело к настоящему прорыву в области промышленного применения лазеров. Многие технологические операции, в первую очередь резка, сварка и гравировка металлов, стали выполняться на порядок быстрее и качественнее с использованием излучения волоконных лазеров. Волоконные лазеры на активных кварцевых волокнах, легированных редкоземельными ионами иттербия, эрбия и тулия, работают в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн $\lambda=1-2$ мкм и используются для решения широкого круга технологических задач. Иттербиевые волоконные лазеры, как самые эффективные, получили на сегодняшний день наиболее широкое распространение. Тем не менее, расширение спектрального диапазона излучения лазерных источников важно для развития новых применений. Благодаря большей энергии квантов, УФ излучение хорошо поглощается во многих материалах, прозрачных в видимом и инфракрасном диапазонах. По этой причине, особый интерес представляет использование ультрафиолетового (УФ) излучения в промышленных системах микрообработки стекол, пластиков, керамики.

В лазерной физике для расширения спектрального диапазона источников излучения широко используется метод нелинейно-оптического преобразования частоты. Например, использование нелинейно-оптического кристалла трибората лития (LiB_3O_5 , LBO) позволяет получать мощное излучение второй ($\lambda_2=532$ нм, $h\nu_2=2,34$ эВ), третьей ($\lambda_3=355$ нм, $h\nu_3=3,51$ эВ) и четвертой ($\lambda_4=266$ нм, $h\nu_4=4,68$ эВ) гармоник излучения волоконного иттербиевого лазера ($\lambda_1=1064$ нм, $h\nu_1=1,17$ эВ). Высокие оптические характеристики кристалла LBO, такие как широкий спектральный диапазон оптической прозрачности, высокая лучевая стойкость, маленький угол сноса излучения, широкий диапазон углового синхронизма, а также большие размеры при выращивании, делают LBO одним из лучших кристаллов для преобразования ИК излучения в видимый и УФ диапазоны.

С ростом мощности излучения, получаемого в современных волоконных иттербиевых лазерах, требования к качеству нелинейно-оптических кристаллов также

возрастают. Поглощение оптического излучения в процессе генерации гармоник приводит к неоднородному разогреву кристалла, что в свою очередь снижает эффективность преобразования за счет расстройки фазового синхронизма. Поэтому для понимания физических процессов, происходящих в кристалле LBO в процессе генерации гармоник необходимо детальное изучение спектральных особенностей коэффициента оптического поглощения. Это особенно актуально при генерации мощного ультрафиолетового излучения. Под длительным воздействием УФ излучения интенсивностью ниже величины оптического пробоя, в кристалле LBO может происходить постепенная деградация. Деградация проявляется в плавном падении мощности и плавном ухудшении качества пучка генерируемого излучения. Изучение процесса деградации кристалла LBO под действием УФ излучения и измерение характерных времен деградации в различных экспериментальных условиях является необходимой задачей для повышения мощности, надежности и ресурса работы лазерных систем УФ диапазона.

На сегодняшний день существуют различные методы измерения коэффициентов малого оптического поглощения. Метод пьезорезонансной лазерной калориметрии является развитием стандартизованного метода лазерной калориметрии с добавлением оригинального подхода к измерению температуры. Благодаря тому, что кристалл LBO, как и другие нелинейно-оптические кристаллы, обладает пьезоэлектрическими свойствами, внешним переменным электрическим полем ($f \sim 10^4 - 10^8$ Гц) в нем удается возбуждать и регистрировать пьезоэлектрические резонансы. Таким образом, при неоднородном разогреве кристалла лазерным излучением может быть измерена так называемая эквивалентная температура кристалла по регистрации сдвига частоты термочувствительного пьезорезонанса. В результате, измерение эквивалентной температуры кристалла и ее кинетики при разогреве позволяет исследовать процесс взаимодействия с лазерным излучением, в том числе, в условиях нелинейно-оптической генерации гармоник.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось создание источника мощного лазерного УФ излучения на основе нелинейно-оптического преобразования частоты излучения иттербиевого волоконного лазера в кристалле LBO

В ходе исследований для достижения цели решались следующие задачи:

1. Генерация мощного, узкополосного, линейно-поляризованного излучения в волоконном иттербиевом лазере

2. Генерация третьей гармоники излучения волоконного иттербиевого лазера в кристалле LBO
3. Разработка метода бесконтактного радиочастотного тестирования кристалла LBO в условиях нелинейно-оптического преобразования частоты лазерного излучения
4. Измерение спектральных коэффициентов оптического поглощения в кристалле LBO в широком диапазоне лазерного излучения
5. Исследование экспериментальных особенностей деградации кристалла LBO под действием УФ излучения на длине волны 355 нм

Научная новизна работы

1. Оптически активный кристалл кварца использован для совмещения плоскостей поляризаций первой и второй гармоник излучения иттербиевого волоконного лазера для нелинейно-оптического сложения в кристалле LBO по I типу фазового синхронизма
2. Пьезорезонансная лазерная калориметрия позволила измерить в кристалле LBO коэффициенты поглощения на длинах волн $\lambda_1=1064$ нм, $\lambda_2=532$ нм, $\lambda_3=355$ нм, $\lambda_4=1908$ нм
3. Пьезорезонансная лазерная калориметрия кристалла LBO открыла возможность исследовать нелинейную зависимость коэффициента поглощения от интенсивности излучения на длине волны 355 нм. Обнаружена зависимость коэффициентов нелинейного поглощения от направления распространения излучения ($\lambda=355$ нм) и его поляризации
4. Исследована деградация кристалла LBO под действием интенсивного (более 100 МВт/см²) УФ излучения ($\lambda=355$ нм). Обнаружена зависимость времени деградации кристалла от направления распространения излучения и его поляризации. Обнаружено увеличение времени деградации кристалла с повышением температуры от 25 до 150 °С

Практическая значимость работы

Деградация нелинейно-оптического кристалла LBO в условиях генерации третьей гармоники излучения волоконного иттербиевого лазера является основным ограничением широкого применения подобных лазерных систем в промышленности. Практическая значимость данной работы связана с задачами измерения коэффициентов оптического поглощения в кристалле LBO, и изучения деградации кристалла LBO под действием интенсивного УФ излучения. Развитие используемого метода РЧ спектроскопии

востребовано для оценки качества, и совершенствования технологии роста кристаллов LBO.

Положения, выносимые на защиту

1. РЧ спектроскопия позволяет с высокой точностью измерять эквивалентную температуру кристалла LBO при воздействии мощного лазерного излучения, в том числе, в условиях генерации третьей гармоники излучения иттербиевого волоконного лазера
2. Коэффициенты оптического поглощения кристалла LBO на длинах волн $\lambda_1=1064$ нм, $\lambda_2=532$ нм, $\lambda_3=355$ нм, $\lambda_4=1908$ нм могут быть определены по измерению кинетики эквивалентной температуры кристалла при разогреве лазерным излучением
3. Деградация кристалла LBO происходит более чем на порядок быстрее под действием излучения ($\lambda=355$ нм), расплывающегося в направлении азимутального угла φ от 35 до 75°, полярного угла $\theta=90^\circ$, поляризованного в плоскости XY, в отличие от других направлений распространения и поляризаций, лежащих в плоскостях XY, XZ и YZ

Апробация результатов работы

По теме диссертации опубликованы 5 научных статей в рецензируемых журналах, 1 международный патент, 3 статьи и 10 тезисов в трудах международных конференций, 7 тезисов в трудах российских конференций (включая 6 в трудах конференции МФТИ). Общее количество публикаций 26.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка всех публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 135 страниц. Список цитируемой литературы содержит 80 наименований.

Личный вклад автора

Все использованные экспериментальные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его участии. Материалы, представленные в работе, получены в результате экспериментальных исследований, выполненных автором

в НТО ИРЭ-Полус, базовой организации кафедры фотоники Московского физико-технического института (государственного университета).

Краткое содержание работы

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

В **Главе 1** представлен краткий обзор развития волоконных лазеров. Приведено описание особенностей иттербиевых волоконных лазеров с узкополосным линейно-поляризованным излучением.

Проанализированы физические механизмы генерации гармоник излучения в нелинейно-оптических кристаллах. Описаны условия, необходимые для получения эффективного преобразования, включая понятия фазового синхронизма и эффективного нелинейного коэффициента.

Приведен краткий обзор нелинейно-оптических кристаллов, используемых для генерации излучения видимого и УФ диапазонов. Описаны оптические, радиочастотные и механические характеристики кристалла LBO.

Приведен краткий обзор работ по изучению точечных дефектов в кристалле LBO методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Описаны методы измерения малых коэффициентов оптического поглощения: лазерная калориметрия, фотоакустический и фототермический методы. Приведены результаты работ по измерению коэффициентов нелинейного поглощения в боратных кристаллах.

Приведены результаты работ по измерению порогов лучевой стойкости в кристалле LBO на длинах волн излучения 1064, 532 и 355 нм.

Приведено краткое описание методов импедансной спектроскопии и радиочастотной ультразвуковой спектроскопии.

В **Главе 2** приведены результаты генерации третьей гармоники излучения иттербиевого волоконного лазера. Для эффективного преобразования в гармоники требуется линейно-поляризованное излучение с высокой пиковой мощностью и узкой спектральной линией. Выбранная оптическая схема волоконного иттербиевого лазера приведена на рисунке. Линейно-поляризованное импульсное излучение полупроводникового одночастотного лазерного диода последовательно усиливается в трех волоконных усилителях. Весь оптический тракт собран на волокнах,

поддерживающих состояние поляризации, что позволяет получить линейно-поляризованное излучение на выходе.

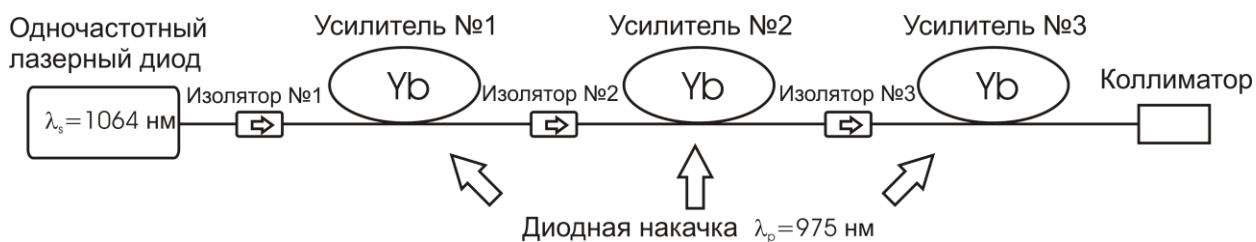


Рис. 1. Схема экспериментального иттербиевого волоконного лазера

В результате оптимизации параметров оптической схемы, пиковая мощность излучения осталась ограниченной порогом вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), средняя мощность – порогом модовой нестабильности. Подавление четырех волнового смещения (ЧВС) достигалось за счет настройки одностороннего режима задающего полупроводникового диода, использование наносекундных импульсов позволило повысить порог вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ). В результате получено излучение средней мощностью $P_{cp} = 25$ Вт, на частоте повторения импульсов $PRR = 1$ МГц, с длительностью импульсов $\tau_{имп} = 1,4$ нс, на длине волны $\lambda = 1064$ нм, с шириной линии $\Delta\lambda \sim 0,03$ нм, с поляризационной экстинкцией 20 дБ, с качеством пучка $M^2 = 1,1$.

Полученное излучение волоконного иттербиевого лазера преобразуется во вторую ($\lambda_2 = 532$ нм) и третью ($\lambda_3 = 355$ нм) гармоники в двух последовательных кристаллах LBO. Оптическая схема приведена на рисунке. Линейно-поляризованное излучение волоконного иттербиевого лазера ($\lambda_1 = 1064$ нм) сначала фокусируется в кристалл LBO #1 ($3 \times 3 \times 15$ мм, $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$) для генерации излучения второй гармоники ($\lambda_2 = 532$ нм). На выходе из кристалла суммарное излучение фокусируется в кристалл LBO #2 для нелинейно-оптического суммирования частот первой и второй гармоник в третью ($\lambda_3 = 355$ нм). Далее, полученное УФ излучение фильтруется с помощью дихроичных зеркал.

Эксперименты по генерации излучения третьей гармоники были проведены с кристаллами LBO #2 I и II типов синхронизмов в одинаковых условиях. Кристалл I типа ($o+o \rightarrow e$) вырезан в направлении $\varphi = 37^\circ$, $\theta = 90^\circ$, кристалл II типа ($o+e \rightarrow o$) в направлении $\varphi = 90^\circ$, $\theta = 47^\circ$. Оба кристалла размерами $3 \times 3 \times 15$ мм с просветлением (1064/532 нм) на входной грани и без просветления на выходной грани. В нашей экспериментальной установке для совмещения плоскостей поляризаций первой и второй гармоник впервые использовался оптический ротатор из оптически активного кристалла кварца. Что позволило использовать кристалл LBO #2 с фазовым синхронизмом I типа.

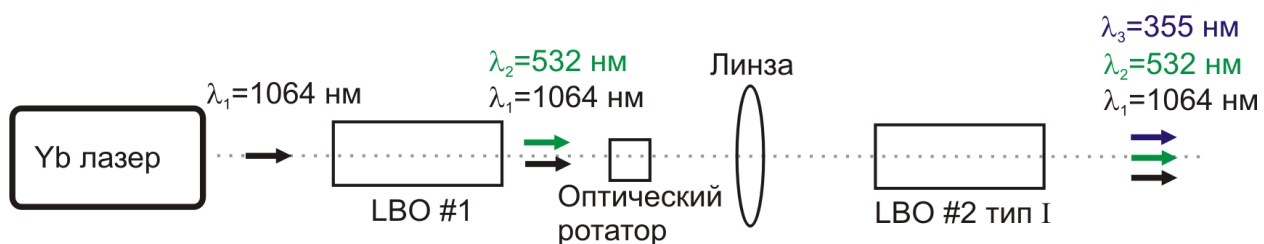


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для генерации излучения третьей гармоники (355 нм) в кристалле LBO синхронизма I-типа (с добавлением оптического ротатора) и II-типа (без ротатора)

Полученная эффективность генерации при использовании I-типа синхронизма оказалась в 1,6 раз выше, чем при использовании II-типа синхронизма. При использовании кристалла LBO #2 I типа длиной 27 мм получено УФ излучение средней мощностью 8 Вт с высокой эффективностью преобразования ~40%.

В Главе 3 представлены результаты измерения коэффициентов поглощения оптического излучения на длинах волн 1908, 1064, 532 и 355 нм в кристалле LBO методом пьезоэлектрической импедансной спектроскопии. В основе температурных измерений метода лежит понятие эквивалентной температуры кристалла, неоднородно разогретого в условиях взаимодействия с лазерным излучением [Ryabushkin O., Myasnikov D., Konyashkin A., Tyrtysnyy V “Equivalent temperature of nonlinearoptical crystals interacting with laser radiation” Jour. of the Europ. Opt. Soc.-Rapid public. V. 6, p. 11032(1-8), 2011]. Эквивалентная температура подразумевает измерение внутренней температуры кристалла по откалиброванному сдвигу частоты пьезоэлектрического резонанса. Такое измерение допустимо при изучении взаимодействия нелинейно-оптического кристалла с лазерным излучением в значительном диапазоне мощности лазерного излучения. Благодаря высокой добротности собственных акустических мод кристалла, сдвиг частоты пьезорезонанса регистрируется с высокой точностью.

В случае однородного разогрева кристалла, сдвиг резонансной частоты (Rf_i), соответствующий i -ой акустической моде, линейно зависит от изменения температуры кристалла (T_{cr}) с коэффициентом пропорциональности K^{prt} (пьезорезонансный термический коэффициент):

$$Rf_i(T_{cr}) = Rf_i(T_0) + K_i^{prt}(T_{cr} - T_0) \quad (1)$$

При неоднородном разогреве кристалла лазерным излучением, по сдвигу частоты пьезорезонанса можно вычислить эквивалентную температуру кристалла:

$$T_{eq}(P) = T_{cr}(0) + \Delta T_{eq}(P) \quad (2)$$

Таким образом, в определенном диапазоне мощности лазерного излучения, изменение резонансной частоты пропорционально пьезорезонансному оптическому коэффициенту (K^{pro}):

$$Rf_i(P) = Rf_i(0) + K_i^{pro} P \quad (3)$$

В результате получаем величину изменения эквивалентной температуры используя пьезорезонансный термо-оптический коэффициент (β) [К/Вт].

$$\Delta T_{eq}(P) = \frac{K_i^{pro}}{K_i^{prt}} P = \beta P \quad (4)$$

Для измерения коэффициентов оптического поглощения может быть использован метод пьезорезонансной лазерной калориметрии. В основе метода лежит измерение кинетики эквивалентной температуры кристалла при разогреве лазерным излучением. Измеренная зависимость резонансной частоты от времени интерполируется функцией:

$$Rf(t) = [Rf(0) - Rf(\infty)] \exp(-t/\tau) + Rf(\infty) \quad (5)$$

Вычисление постоянной времени τ позволяет получить коэффициенты теплообмена (h^T) и оптического поглощения (α):

$$h^T S = \frac{mc}{\tau} \quad (6)$$

$$\alpha(\lambda)L = h^T S \beta \quad (7)$$

где S – суммарная площадь боковых поверхностей образца, m – масса образца, c – удельная теплоемкость образца, L – длина образца, β – пьезорезонансный термо-оптический коэффициент.

Схема экспериментальной установки пьезорезонансной лазерной калориметрии представлена на рисунке. Методом синхронного детектирования измеряются фаза φ и амплитуда $|U_R|$ сигнала на резисторе $R=50$ Ом в зависимости от частоты приложенного электрического поля f . По форме спектра измеренных сигналов определяются резонансные частоты Rf_i . Лазерное излучение направляется на исследуемый образец (кристалл LBO). Результат взаимодействия образца с излучением регистрируется по изменению в спектре пьезоэлектрических резонансов.

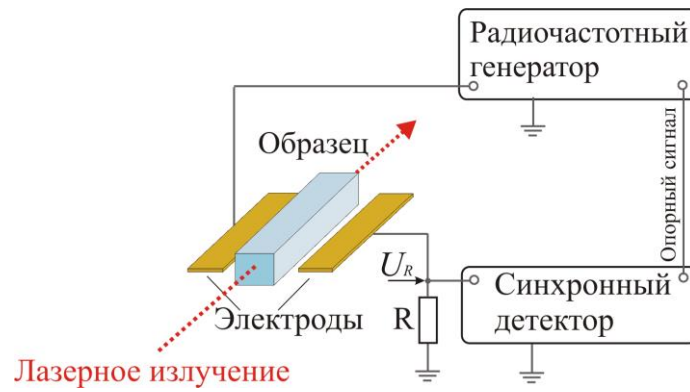


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Зависимость фазы φ и амплитуды $|U_R|$ от частоты вблизи резонанса и температурная зависимость резонансной частоты представлены на рисунке.

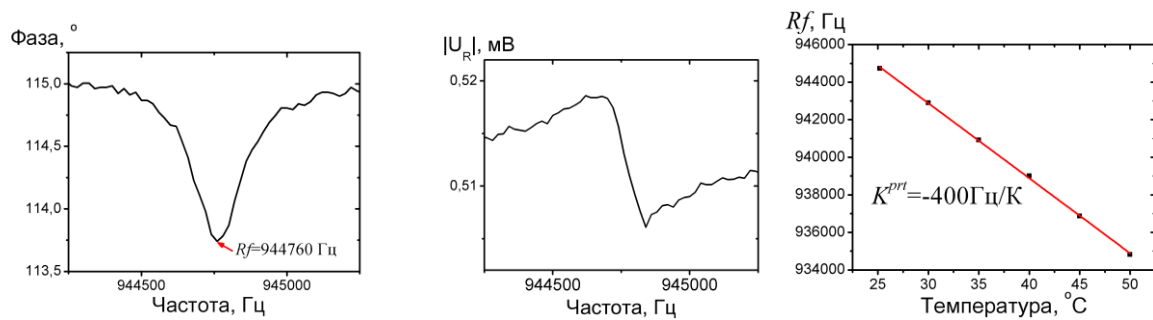


Рис. 4. Зависимость фазы φ и амплитуды $|U_R|$ от частоты вблизи резонанса и зависимость резонансной частоты от температуры кристалла

Измерения коэффициентов поглощения были проведены на длинах волн излучения 355, 532, 1064, 1908 нм. Результаты измерения показывают хорошее соответствие с литературными данными, полученными фотоакустическим методом в работе [Waasem N., Fieberg S., Hauser J, et al. "Photoacoustic absorption spectrometr for highly transparent dielectrics with parts-per- million sensativity" Rev. Sci. Instrum. V. 84, p. 023109, 2013]

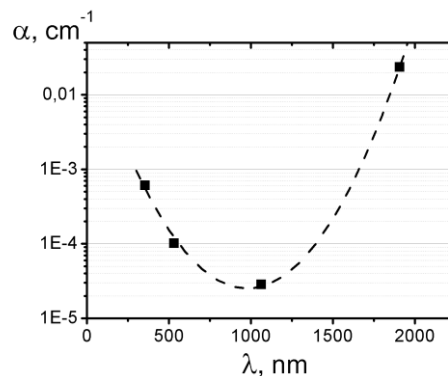


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения кристалла LBO от длины волны излучения

Экспериментальные значения коэффициента поглощения интерполированы функциональной зависимостью:

$$\lg \alpha = a + b\lambda + c\lambda^2 \quad (8)$$

где $a=-1,31$, $b=0,00673$, $c=3,44 \cdot 10^{-6}$, a в $[\text{см}^{-1}]$, λ в $[\text{нм}]$. Коэффициенты a , b и c зависят не только от мощности излучения, но и от его поляризации и направления распространения. В условиях деградации кристалла, коэффициенты a , b и c меняются, что может быть использовано в качестве критерия деградации.

В **Главе 4** представлены результаты исследования деградации кристалла LBO под действием УФ излучения.

В условиях генерации излучения третьей гармоники ($\lambda=355$ нм) были проведены многочасовые ресурсные испытания с использованием различных кристаллов в различных условиях генерации (температура кристалла, размер перетяжки пучка и т.д.).

Также в условиях генерации излучения третьей гармоники ($\lambda=355$ нм) были проведены измерения эквивалентной температуры кристалла.

Для подробного исследования деградации кристалла LBO под действием УФ излучения была проведена серия следующих экспериментов. Излучение на длине волны 355 нм фокусируется линзой ($f=108,2$ мм) в перетяжку $2\Omega_x \times 2\Omega_y=15,6 \text{ мкм} \times 12,6 \text{ мкм}$. В перетяжке достигается плотность энергии в импульсе $5,2 \text{ Дж/см}^2$ (при энергии в импульсе $8,1 \text{ мДж}$ на частоте 100 кГц), что соответствует пиковой интенсивности $5,2 \text{ ГВт/см}^2$ (длительность импульса $\tau_{\text{имп}} \sim 1 \text{ нс}$). Образец кристалла LBO помещается в перетяжку пучка. В процессе облучения в кристалле происходит деградация, наблюдаемая на люминесцирующем экране по ухудшению качества пучка проходящего УФ излучения.

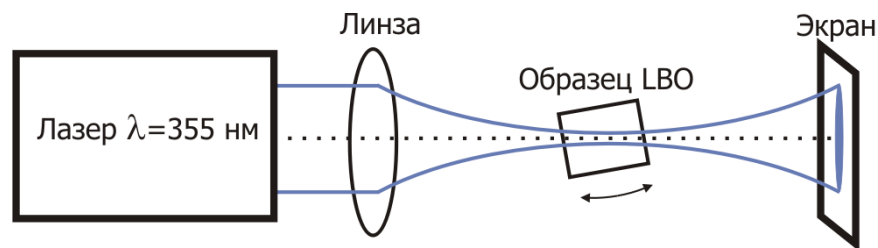
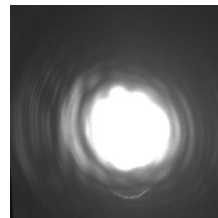


Рис. 6. Экспериментальная установка для визуализации деградации кристалла



до деградации кристалла



после деградации кристалла

Рис. 7. Форма пучка излучения, наблюдаемая на люминесцирующем экране

Для измерения времени деградации кристалла в пучок излучения помещалась диафрагма. Размер диафрагмы подбирался для пропускания 86% мощности излучения. Таким образом, измерение падения мощности излучения после диафрагмы позволяет наблюдать ухудшение качества пучка излучения, проходящего сквозь кристалл, и

измерять время деградации. Время деградации измерялось по падению измеренной мощности излучения после диафрагмы на 10%.

Была проведена серия экспериментов для установления влияния на время деградации направления распространения излучения и его поляризации. Измерения были проведены для направлений распространения и поляризаций, лежащих в главных плоскостях XY, XZ и YZ. Время отдельного эксперимента для каждого конкретного направления распространения излучения не превышало 15 минут, при этом деградация кристалла наблюдалась только в плоскости XY при поляризации, лежащей в XY.

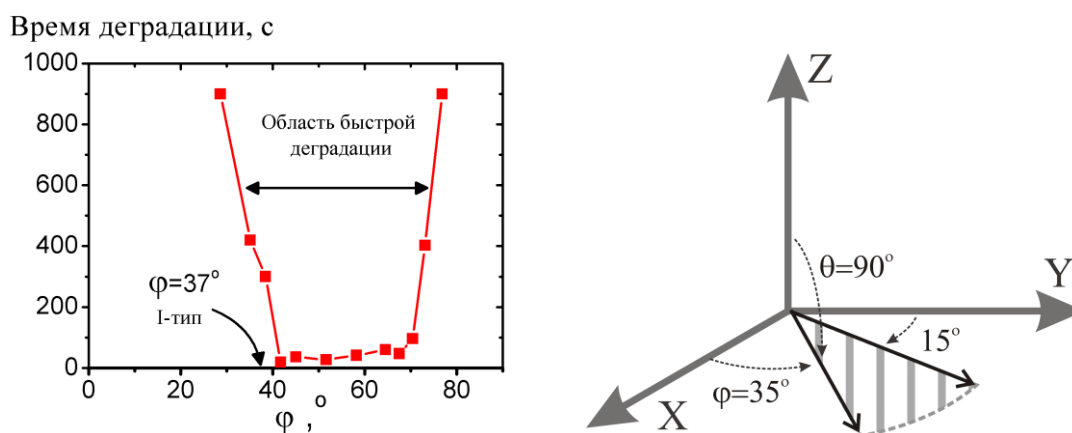


Рис. 8. Зависимость времени деградации кристалла от угла φ направления распространения излучения, при $\theta=90^\circ$. Поляризация в плоскости XY

Т.е. в условиях нашего эксперимента наблюдается область быстрой деградации кристалла LBO под действием УФ излучения в направлении φ от 35 до 75°, $\theta=90^\circ$, поляризованного в плоскости XY ($E \perp z$). При этом, под действием излучения ортогональной поляризации ($E \parallel z$) такого эффекта не наблюдается. Отметим, что данная зависимость времени деградации от направления распространения излучения для кристалла LBO была измерена впервые.

Также необходимо отметить, что при использовании фазового синхронизма I типа ($\varphi = 37^\circ$, $\theta = 90^\circ$) происходит генерация излучения с поляризацией как раз в плоскости XY, что может приводить к быстрой деградации кристалла LBO.

Сильная зависимость времени деградации кристалла LBO от направления распространения излучения и его поляризации может быть объяснена влиянием нелинейно-оптических эффектов. Таким эффектом может служить генерация излучения шестой гармоники на длине волны 177 нм (удвоение частоты излучения третьей гармоники). Фазовый синхронизм на такое n-о преобразование отсутствует, т.е. эффективной генерации по всей длине кристалла не происходит. Тем не менее, низкоэффективная генерация излучения происходит на коротких длинах, сравнимых с длиной когерентности взаимодействующих гармоник. При этом, генерируемой мощности

излучения на длине волны 177 нм может быть достаточно для влияния на процесс деградации кристалла.

Исследована зависимость времени деградации кристалла от интенсивности излучения ($\lambda=355$ нм). По результатам измерений проведены оценки коэффициентов нелинейного поглощения.

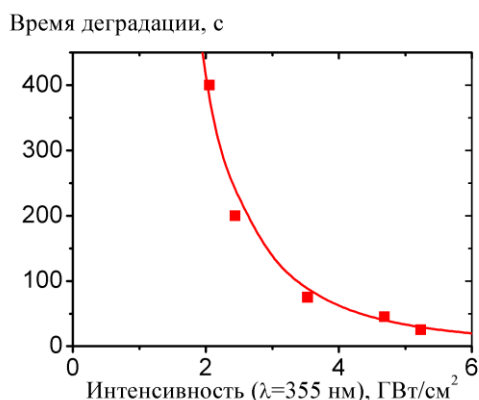


Рис. 9. Зависимость времени деградации кристалла от интенсивности излучения $\lambda=355$ нм

Исследована зависимость времени деградации кристалла от температуры. Обнаружено значительное увеличение времени деградации с повышением температуры кристалла с 25 до 150°C.

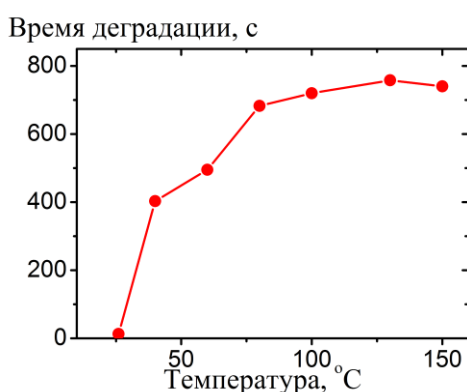


Рис. 10. Зависимость времени деградации от температуры кристалла LBO

Аналогично измерениям времени деградации кристалла LBO под действием высокоинтенсивного УФ излучения ($\lambda=355$ нм), ожидалось наблюдение анизотропии коэффициента поглощения $\alpha(\lambda=355$ нм).

На рисунке представлены кинетики разогрева и охлаждения кристалла LBO при фокусировке излучения в направлении синхронизма I типа. В процессе облучения наблюдалась постепенная деградация кристалла (в перетяжке пучка), сопровождаемая увеличением коэффициента поглощения, что можно наблюдать по отклонению кинетики разогрева от одноэкспоненциального вида. По кинетике охлаждения можно оценить коэффициент наведенного поглощения.

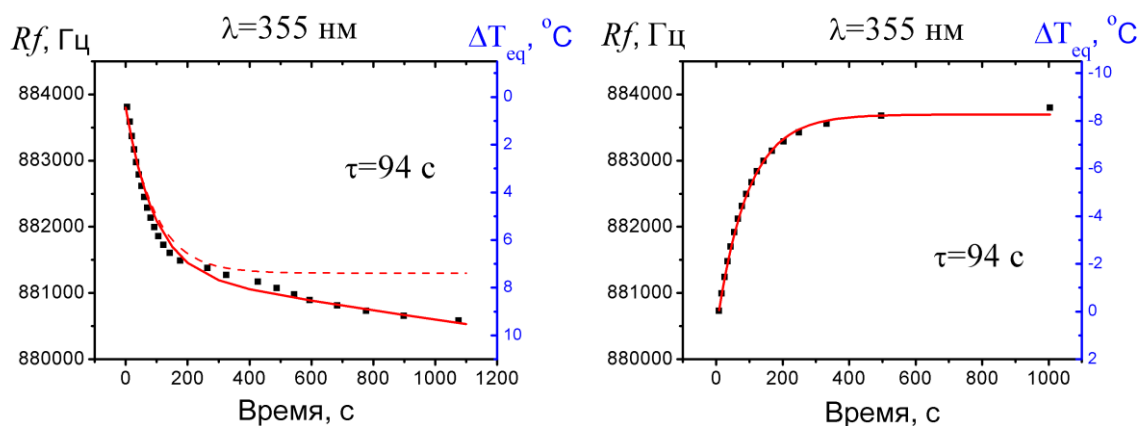


Рис. 11. Кинетика разогрева кристалла в процессе деградации под действием УФ излучения ($\lambda=355$ нм) и кинетика последующего охлаждения

Результаты измерения для различных ориентаций кристалла представлены на рисунке. В условиях эксперимента во всех ориентациях кристаллов, коэффициент поглощения нелинейно возрастает с увеличением пиковой интенсивности излучения. В проведенных экспериментах деградация кристалла, наблюдаемая по искажению проходящего пучка излучения, наблюдалась только в направлении синхронизма I типа ($\varphi=38^\circ$, $\theta=90^\circ$, $E \perp z$). В этом же направлении измерен наибольший коэффициент поглощения. При направлении излучения ортогональной поляризации ($\varphi=38^\circ$, $\theta=90^\circ$, $E \parallel z$), коэффициенты поглощения совпадают в пределах погрешности с измерениями в направлении II типа ($\varphi=90^\circ$, $\theta=47^\circ$, $E \parallel x$).

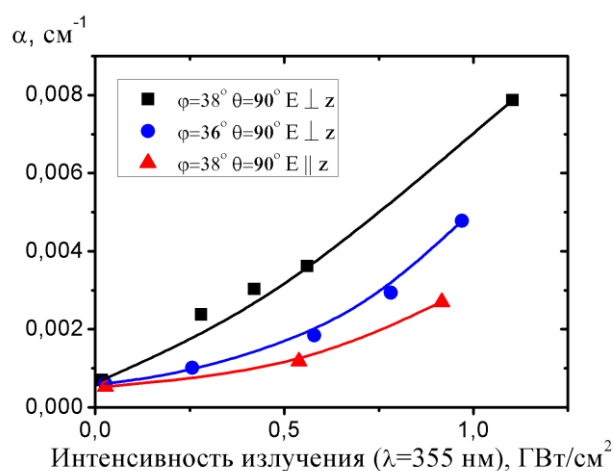


Рис. 12. Коэффициент поглощения (интегральный) от пиковой интенсивности излучения различных ориентациях кристалла (точки), аппроксимированный расчетами (линии)

Результаты измерения зависимости коэффициента поглощения от интенсивности УФ излучения качественно согласуются с наблюдаемой анизотропией деградации кристалла: наибольший коэффициент поглощения измерен в направлении быстрой деградации.

По известному распределению интенсивности излучения внутри кристалла и измеренной зависимости интегрального коэффициента поглощения на всем кристалле от пиковой интенсивности излучения, оценены коэффициенты нелинейного поглощения.

Основные результаты диссертации

1. В волоконном иттербиевом лазере получено импульсное линейно-поляризованное излучение на длине волны $\lambda=1064$ нм средней мощностью 25 Вт. Частота повторения импульсов $PRR=1$ МГц, длительность импульсов $\tau_{имп}=1,4$ нс, ширина спектральной линии $\Delta\lambda\sim 0,03$ нм, поляризационная экстинкция 20 дБ, качество пучка $M^2=1,1$. Средняя мощность излучения ограничена величиной порога модовой нестабильности
2. В кристалле LBO получено излучение третьей гармоники ($\lambda=355$ нм) средней мощностью 8 Вт, с эффективностью преобразования 40% от излучения волоконного иттербиевого лазера
3. Методом пьезорезонансной лазерной калориметрии измерены коэффициенты поглощения в кристалле LBO на длинах волн 1908, 1064, 532 и 355 нм: $\alpha(1908 \text{ нм})\sim 2,3\cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, $\alpha(1064 \text{ нм})\sim 3\cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$, $\alpha(532 \text{ нм})\sim 1\cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $\alpha(355 \text{ нм})\sim 2,6\cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$
4. Измерена эквивалентная температура кристалла LBO в условиях генерации излучения третьей гармоники, а также в условиях деградации кристалла под действием УФ излучения ($\lambda=355$ нм)
5. Обнаружена сильная зависимость времени деградации кристалла LBO от направления распространения излучения ($\lambda=355$ нм) и его поляризации: обнаружена область быстрой деградации под действием излучения в направлении φ от 35 до 75°, $\theta=90^\circ$, поляризованного в плоскости XY
6. Обнаружено увеличение времени деградации кристалла LBO с повышением температуры от 25 до 150 °С
7. Обнаружено, что коэффициент поглощения $\alpha(355 \text{ нм})$ нелинейно растет с повышением интенсивности излучения более 100 МВт/см². Нелинейный рост коэффициента поглощения зависит от направления распространения излучения и его поляризации. Коэффициент поглощения максимален в направлении быстрой деградации кристалла.
8. Проведена оценка коэффициентов нелинейного поглощения на длине волны 355 нм: $\alpha_1(355 \text{ нм})\sim 1,20\cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{Вт}$, $\alpha_2(355 \text{ нм})\sim 2,4\cdot 10^{-20} \text{ см}^3/\text{Вт}^2$

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Gapontsev V., Tyrtysnyy V., **Vershinin O.**, Davydov B., Oulianov D. “Third harmonic frequency generation by Type-I critically phase-matched LiB3O5 crystal by means of optically active quartz crystal” *Optics Express*, V. 21, N. 3, p. 3715–3720, **2013**
2. Ryabushkin O., Konyashkin A., Myasnikov D., Tyrtysnyy V., **Vershinin O.**, Baranov A. “Acousto-resonance spectroscopy of nonlinear-optical crystals in process of laser frequency conversion” *Journal of Modern Physics*, V.4, p. 23-28, **2013**
3. Рябушкин О., Коняшкин А., Баранов А., **Вершинин О.** «Эквивалентная температура нелинейно-оптического кристалла в процессе преобразования частоты лазерного излучения», *Успехи Современной Радиоэлектроники*, № 9, с. 67-80, **2014**
4. Kuznetsov M., **Vershinin O.**, Tyrtysnyy V., Antipov O. “Low-threshold mode instability in Yb3+-doped few-mode fiber amplifiers” *Optics Express*, V. 22, N. 24, p. 29714-29725, **2014**
5. Nikitin D., Byalkovskiy O., **Vershinin O.**, Puyu P., Tyrtysnyy V. “Sum frequency generation of UV laser radiation at 266 nm in LBO crystal” *Optics letters*. – **2016**. – Т. 41. – №. 7. – С. 1660-1663.

Международный патент:

6. Gapontsev V., Tyrtysnyy V., **Vershinin O.**, Oulianov D., Davydov B. “Method of sum-frequency conversion and frequency convertor with optical active rotator” US 9036249 B2 (WO2013110091 A1, US20130188242), **2013**

Статьи в трудах международных конференций:

7. Ryabushkin O., Myasnikov D., Konyashkin A., Tyrtysnyy V., **Vershinin O.**, Nikitin D., Surin A. “Impedance spectroscopy in laser calorimetry of nonlinear-optical crystals” // 2013 IUS Proceedings (2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 21-25 July **2013**, Prague Czech Republic), p. 496-499
8. Ryabushkin O., Konyashkin A., Myasnikov D., Tyrtysnyy V., **Vershinin O.** “Piezoelectric resonance calorimetry of nonlinear-optical crystals under laser irradiation” // Proc. of SPIE 8847, Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications VII (San Diego California USA, 25 August 2013), 88470Q, **2013**
9. Antipov O., Kuznetsov M., Tyrtysnyy V., Alekseev D., **Vershinin O.** Low-threshold mode instability in Yb3+-doped few-mode fiber amplifiers: influence of a backward reflection //SPIE LASE. – International Society for Optics and Photonics, **2016**. – С. 97280A-97280A-10.

Тезисы в трудах международных конференций:

10. Tyrtysnyy V., **Vershinin O.**, Larin S. “Influence of the radiation spectral parameters on the nonlinear interaction of modes in active fiber” Intern. Symp. High-Power Fiber Lasers and Their Applications, SPb., Russia, TuSy, p.04, **2010**
11. Tyrtysnyy V., **Vershinin O.**, Davydov B., Oulianov D. “355 nm Generation by Type I Critically Phase-Matched LiB3O5 Crystal by Means of Optically Active Quartz Crystal” Intern. Symp. High-Power Fiber Lasers and Their Applications, SPb., Russia, **2012**
12. **Vershinin O.**, Tyrtysnyy V. “Excitation of High Order Modes in Polarization Maintaining Fiber Amplifier” Intern. Symp. High-Power Fiber Lasers and Their Applications, SPb., Russia, **2012**

13. Ryabushkin O., Myasnikov D., Konyashkin A., **Vershinin O.** “Kinetics of Equivalent Temperature of Nonlinear-Optical Crystals“, Conference on Lasers and Electro-Optics – International Quantum Electronics Conference CLEO/EUROPE-IQEC 2013, Munich Germany, 12-16 May **2013**, Conference digest, CE-P.18 TUE.
14. Ryabushkin O., Myasnikov D., Konyashkin A., Tyrtysny V., **Vershinin O.**, Nikitin D. “Impedance Spectroscopy in Laser Calorimetry of Nonlinear-Optical Crystals” // Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 21-25 July **2013**, Prague Czech Republic, IUS3-PA2-3
15. Ryabushkin O., Konyashkin A., Myasnikov D., **Vershinin O.**, Tyrtysnyy V. “Piezoelectric resonant laser calorimetry of nonlinear-optical crystals” // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO)Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT), 18 – 22 June **2013**, Moscow Russia, LFH10.
16. **Vershinin O.**, Byalkovskiy O., Tyrtysnyy V., Nikitin D. “Anisotropy of UV-induced degradation of LBO crystal” Intern. Symp. High-Power Fiber Lasers and Their Applications, SPb., Russia, **2014**
17. **Vershinin O.**, Kuznetsov M., Tyrtysnyy V., Antipov O. “Mode instability in Yb³⁺-doped fiber amplifiers of continuous and pulsed signal” Intern. Symp. High-Power Fiber Lasers and Their Applications, SPb., Russia, **2014**
18. Nikitin D., Byalkovskiy O., **Vershinin O.**, Tyrtysnyy V., Davydov B. “Sum frequency generation of UV laser radiation at 266 nm in LBO crystal” Intern. Symp. High-Power Fiber Lasers and Their Applications, SPb., Russia, **2014**
19. Nikitin D., **Vershinin O.**, Tyrtysnyy V., Byalkovskiy O. “Anisotropy of Bulk Degradation of LBO Crystal Induced by DUV Laser Radiation at 266 nm” Advanced Solid State Lasers. – Optical Society of America, **2015**. – С. AM5A. 8.

Тезисы в трудах конференции МФТИ:

20. **Вершинин О.**, Тыртышный В. «Исследование возбуждения высших мод активного волокна при усилении узкополосного линейно-поляризованного излучения» 54-ая научная конференция МФТИ, **2011**
21. **Вершинин О.**, Тыртышный В., Ульянов Д. «Генерация третьей гармоники излучения волоконного иттербиевого лазера» 55-ая научная конференция МФТИ, **2012**
22. **Вершинин О.**, Тыртышный В., Бялковский О., Никитин Д. «Образование дефектов в объеме кристалла LBO под действием мощного ультрафиолетового излучения на длине волны 355 нм» 56-ая научная конференция МФТИ, **2013**
23. Никитин Д., Бялковский О., **Вершинин О.**, Тыртышный В. «Генерация ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм в нелинейно-оптическом кристалле LBO» 56-ая научная конференция МФТИ, **2013**
24. **Вершинин О.**, Никитин Д., Тыртышный В., Бялковский О.А. Анизотропия образования дефектов в объеме кристалла LBO под действием мощного ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм, 57-ая научная конференция МФТИ, **2014**
25. **Вершинин О.**, Коняшкин А., Рябушкин О. Исследование спектральных особенностей коэффициента оптического поглощения в кристалле LBO, 57-ая научная конференция МФТИ, **2014**

Тезисы на российских конференциях:

26. Никитин Д., Бялковский О., **Вершинин О.**, Тыртышный В., Давыдов Б. «Генерация ультрафиолетового излучения на длине волны 266 нм в кристалле LBO» Материалы 6-го Российского семинара по волоконным лазерам, с. 80, **2014**