

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ
УДК 53.082.73

КОНЯШКИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НЕЛИНЕЙНО-
ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С
МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2010

Работа выполнена на кафедре фотоники (базовая кафедра ООО НТО «ИРЭ-Полус») факультета физической и квантовой электроники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Рябушкин Олег Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Дмитриев Сергей Георгиевич,
ФИРЭ им В.А. Котельникова РАН, Фрязино

доктор физико-математических наук
Курков Андрей Семёнович,
ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва

Ведущая организация: ФГУП «НИИ “Полус” им. М.Ф. Стельмаха»

Защита состоится 28 декабря 2010 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.156.01 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, Московская обл. г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института.

Автореферат разослан “___” ноября 2010 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.156.01
кандидат физико-математических наук

Батурин А.С.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При распространении лазерного излучения в прозрачном диэлектрике происходит его разогрев, обусловленный слабым оптическим поглощением и неупругим рассеянием света. Современные кристаллы, используемые в нелинейной оптике для преобразования лазерного излучения, имеют чрезвычайно малые коэффициенты поглощения света. Тем не менее, даже чрезвычайно чистые и совершенные кристаллы разогреваются лазерным излучением. Один из самых важных механизмов влияния мощного лазерного излучения на нелинейно-оптическое преобразование – это неоднородный разогрев кристалла. При увеличении мощности излучения накачки в кристалле может возникнуть дополнительное нелинейное поглощение света накачки и преобразованного излучения как уже на существующих примесях и дефектах, так и на новых неоднородностях кристалла, индуцированных излучением. Более того, под действием мощного лазерного излучения может произойти необратимое разрушение нелинейно-оптического кристалла. Диагностика взаимодействия мощного лазерного излучения с нелинейно-оптическими кристаллами и определение пороговых значений плотности мощности лазерного излучения, приводящих к их разрушению, является важной как научной, так и практической задачей.

Общий метод импедансной спектроскопии широко применяется для исследования изменений объёмных и поверхностных электрических свойств диэлектриков. Эти изменения могут вызываться воздействием внешнего электромагнитного излучения на диэлектрик в широком спектральном диапазоне (от дальнего ИК до γ квантов, включая видимый и УФ свет, мягкое и жесткое рентгеновское излучение). В основе метода импедансной спектроскопии лежит измерение комплексного импеданса диэлектрика от частоты зондирующего переменного электрического поля в широком спектральном диапазоне от 10^{-4} до 10^9 Гц. Характерные спектральные особенности электрического импеданса позволяют определять физические механизмы взаимодействия излучения с исследуемыми диэлектрическими кристаллами и стёклами. Каждый образец нелинейно-оптического кристалла обладает характерным набором собственных акустических мод. Частоты собственных мод зависят от упругих свойств материала, геометрической формы и размеров образца. Собственные акустические моды чрезвычайно чувствительны к изменению внутренней температуры кристалла, которая меняет не только упругие константы, но и характерные размеры кристалла. Как следствие, воздействие лазерного излучения на кристалл также сопровождается изменением резонансных частот собственных мод. Кристаллы, используемые в нелинейной оптике для генерации гармоник и

преобразования лазерного излучения, принадлежащие к кристаллографическим группам с отсутствием центра инверсии, обладают пьезоэлектрическими свойствами. Явление обратного пьезоэлектрического эффекта даёт уникальную возможность возбуждать и регистрировать радиочастотным (РЧ) полем механические колебания кристалла в условиях воздействия лазерного излучения. Пьезоэлектрический резонанс возбуждается при совпадении частоты внешнего электрического поля с частотой какой-либо собственной колебательной моды образца и проявляется в резком немонотонном изменении амплитуды и фазы электрического импеданса образца в очень узком спектральном диапазоне.

Трудно измеряемые изменения общего электрического импеданса кристалла за счёт взаимодействия с лазерным излучением даже большой мощности возрастают на несколько порядков в условиях резонанса. Пьезоэлектрические резонансы нелинейно-оптических кристаллов, обладающих высокой прозрачностью к оптическому излучению, позволяют исследовать чрезвычайно слабое воздействие лазерного излучения на кристаллы. Более того, возбуждаемые пьезоэлектрические резонансы не нарушают условия преобразования лазерного излучения. Высокая чувствительность пьезоэлектрических резонансов кристаллов к слабому лазерному излучению позволяет исследовать разнообразные проявления в нелинейно-оптических преобразованиях мощного излучения накачки.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является разработка метода импедансной спектроскопии, позволяющего контролировать и исследовать изменения оптических и электрических свойств кристаллов при воздействии мощного лазерного излучения.

Разработка метода импедансной спектроскопии включает в себя:

- а) – разработку автоматизированного экспериментального стенда для измерения комплексного электрического импеданса кристалла в широком радиочастотном диапазоне в зависимости от мощности лазерного излучения,
- б) – разработку экспериментальных методик и программного обеспечения измерений пьезоэлектрических резонансных параметров импеданса, наиболее чувствительных к воздействию лазерного излучения в стационарных условиях и в переходных процессах,
- в) – построение физической модели взаимосвязи экспериментально измеряемых изменений электрического импеданса под действием лазерного излучения с известными параметрами кристалла.

Научная новизна работы

1. Разработан метод импедансной спектроскопии для исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с нелинейно-оптическими кристаллами.

2. Экспериментально обосновано понятие эквивалентной температуры кристалла, характеризующее неоднородный разогрев кристалла при воздействии лазерного излучения.
3. Впервые обнаружено различное влияние разогрева лазерным излучением на форму линий пьезоэлектрических резонансов кристалла KTiOPO_4 , связанное с анизотропией ионной проводимости.
4. На основе измерения формы линии пьезоэлектрических резонансов кристалла при разогреве лазерным излучением предложена методика ранней диагностики деградации и оптического разрушения нелинейно-оптических кристаллов.

Практическая значимость работы

1. Разработанный экспериментальный стенд позволяет измерять комплексный электрический импеданс лазерных материалов в РЧ диапазоне 25 кГц–30 МГц с разрешением по частоте 0.1 Гц, диапазоне температур 290–390 К. Стабилизация температуры в указанном диапазоне ± 50 мК относительно заданного значения. Чувствительность к изменению измеряемого импеданса соответствует изменению ёмкости на 10^{-15} Ф.
2. Осуществлены прецизионные измерения пьезоэлектрических резонансов нелинейно-оптических кристаллов KTiOPO_4 , KN_2PO_4 и кварца в условиях взаимодействия с мощным лазерным излучением.
3. Из зависимости параметров формы линии пьезоэлектрического резонанса от мощности лазерного излучения для нелинейно-оптического кристалла KN_2PO_4 определен порог оптического разрушения.

Положения, выносимые на защиту

1. Сдвиг частот пьезоэлектрических резонансов исследованных нелинейно-оптических кристаллов линейно зависит от средней мощности воздействующего на кристаллы лазерного излучения (длина волны 1064 нм) в диапазоне от 0 до 70 Вт.
2. Измерение частоты термо-калиброванного пьезоэлектрического резонанса позволяет описывать константой неоднородное распределение термодинамической температуры при разогреве кристалла лазерным излучением.
3. Неоднородность распределения температуры кристалла при нестационарном разогреве лазерным излучением определяет

нормированные скорости изменения частот пьезоэлектрических резонансов.

Апробация результатов работы

По теме диссертации опубликовано 6 научных статей в рецензируемых журналах, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 8 статей в трудах международных конференций; 13 тезисов докладов на международных конференциях; 7 статей в трудах конференций МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук».

Общее число публикаций по теме диссертации – 34.

Общее число докладов – 31. Из них: 23 доклада представлено на 14-ти международных конференциях, 7 докладов на 4-х конференциях МФТИ и 1 доклад на конференции молодых учёных наукограда Фрязино (Московская обл.).

Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения (основные результаты), списка всех публикаций по теме диссертации и цитируемой литературы. Объем работы составляет 133 страницы. Список цитируемой литературы содержит 195 наименований.

Личный вклад автора

Все использованные в диссертации экспериментальные результаты получены автором лично или при определяющем его участии. Материалы, представленные в работе, получены в результате экспериментальных исследований, выполненных автором на кафедре фотоники (базовая организация НТО «ИРЭ-Полус») факультета физической и квантовой электроники МФТИ.

II. 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** дан краткий обзор физических основ взаимодействия нелинейно-оптических кристаллов с лазерным излучением. Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ, которые дают представление о физических процессах, сопровождающих воздействие на кристалл лазерного излучения и радиочастотного поля, а также описаны основные методики исследования взаимодействия кристаллов с лазерным излучением и радиочастотным полем. Дается теоретическое описание нелинейно-оптического процесса генерации второй гармоники лазерного

излучения. Для получения большей интенсивности излучения второй гармоники необходимо увеличивать мощность излучения накачки и использовать более длинные образцы нелинейно-оптических кристаллов. Представлены основные свойства нелинейно-оптических кристаллов кварца (SiO_2), титанил-фосфата калия (KTiOPO_4) и дигидрофосфата калия (KH_2PO_4), используемых в диссертационной работе. Описаны наиболее распространённые методы исследования разрушения кристаллов лазерным излучением: стандартизованные “S-on-1” и “1-on-1” тесты. Дан обзор основных методов измерения и контроля температуры кристаллов, взаимодействующих с лазерным излучением, и определения их коэффициентов оптического поглощения. Для измерения малых коэффициентов оптического поглощения помимо спектрофотометрических также используют высоко чувствительные фототермические методы, включающие методы фотоакустики и стандартизованный метод лазерной калориметрии. В основе лазерной калориметрии лежит поиск соответствия экспериментально измеренной кинетики разогрева исследуемого оптического материала лазерным излучением и определения коэффициентов поглощения из решения нестационарного уравнения теплопроводности. Использование при этом внешних измерителей температуры всегда вносит дополнительную неопределённость в определяемый коэффициент поглощения.

Хорошо известно, что пьезоэлектрические резонаторы широко применяются в технике и научных исследованиях для измерения различных физических величин: давления, ускорения, деформации, массы, влажности, температуры. К примеру, изменение температуры кристалла кварца по сдвигу его пьезоэлектрического резонанса можно определять с точностью до 10^{-6} К.

Любой пьезоэлектрический кристалл имеет характерный набор пьезоэлектрических резонансов. Пьезоэлектрический резонанс наблюдается, когда частота внешнего электрического поля соответствует собственной частоте механических колебаний пьезоэлектрика. В зависимости от формы и отношения характерных размеров тела могут возбуждаться простые или сложные типы колебаний: различные сочетания продольных, изгибных, сдвиговых, крутильных и др. Частоты собственных акустических мод определяются упругими константами, плотностью материала, а также зависят от ориентации, формы и размеров образца.

Во многих нелинейно-оптических кристаллах наблюдается явление ионной проводимости, связанное с дефектами кристаллической решётки. Величина ионной проводимости зависит от температуры кристалла и частоты внешнего РЧ поля. Для определения электрических свойств кристаллических диэлектриков применяется метод импедансной спектроскопии, основанный на измерении комплексного электрического импеданса исследуемого образца в широком радиочастотном диапазоне.

Фотоакустический метод измерения коэффициентов оптического поглощения с использованием резонансных свойств исследуемого образца

для увеличения амплитуды акустической волны, возбуждаемой лазерным излучением, впервые был предложен в работе [Yu C., McKenna M.J., White J.D. and Maynard J.D., "A new resonant photoacoustic technique for measuring very low optical absorption in crystals and glasses" // J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91, No. 2, P. 868–877, (1992)]. Непрерывное лазерное излучение модулировалось на частоте акустического резонанса образца с добротностью Q , что позволило в Q раз повысить чувствительность метода. Следует отметить, что детектирование возбуждаемой лазерным излучением акустической волны осуществлялось бесконтактным способом.

В работе [Bezancon F., Mangin J., Stimer P., Maglione M., "Accurate determination of the weak optical absorption of piezoelectric crystals used as capacitive massive bolometers" // IEEE J. of Quant. Electron., Vol. 37, No 11, P. 1396–1400, (2001)] методом импедансной спектроскопии определялась внутренняя температура и малый линейный коэффициент оптического поглощения монокристалла LiNbO_3 ($\alpha(\lambda) = 0.033 \text{ см}^{-1}$), взаимодействующего с лазерным излучением максимальной мощностью 35 мВт на длине волны $\lambda = 514 \text{ нм}$. Кристалл был помещён в вакуумную камеру. Предложена и реализована идея определения изменения внутренней температуры кристалла по измерению его отклика на воздействие радиочастотного поля в условиях пьезоэлектрического резонанса. Температура кристалла при его разогреве определялась не из частоты пьезоэлектрического резонанса, а по резонансному изменению ёмкости конденсатора с образцом. Констатируется, что величина добротности пьезоэлектрического резонанса накладывает принципиальные ограничения на допустимый разогрев кристалла, а, следовательно, и на максимальные мощности лазерного излучения.

Основными существенными отличиями данной диссертационной работы от предыдущих работ является то, что исследуемый кристалл находится в естественных условиях теплообмена с окружающей средой (в воздухе); геометрия взаимного расположения кристалла и электродов, используемых для возбуждения и регистрации пьезоэлектрических резонансов, существенно уменьшает влияние электродов на измеряемые параметры кристалла. Более того, при такой постановке эксперимента удалось минимизировать влияние неоднородности электрического поля на пьезоэлектрические резонансы и провести исследования в области высоких мощностей лазерного излучения. Максимальная мощность непрерывного лазерного излучения составляла 70 Вт (диаметр пучка 1.5 мм).

В **Главе 2** подробно описывается методика исследований нелинейно-оптических кристаллов методом импедансной спектроскопии. Приводится описание основных элементов экспериментальной установки для измерения комплексного электрического импеданса кристаллов. Даются примеры характерных радиочастотных спектров, экспериментально полученных для исследуемых нелинейно-оптических кристаллов.

Помещённый между электродами конденсатора, исследуемый кристалл возбуждается РЧ полем фиксированной частоты f , а отклик анализируется синхронным детектором с использованием опорного сигнала той же самой частоты. Протекающий через кристалл ток $I(f, t) = I_m \exp(i2\pi ft + i\varphi)$ будет сдвинут по фазе на некоторую величину φ относительно напряжения $U(f, t) = U_m \exp(i2\pi ft)$, подаваемого на электроды. Импеданс $Z = \text{Re}(Z) + i\text{Im}(Z)$ конденсатора с кристаллом на частоте f вычисляется по формуле:

$$Z(f) = \frac{U(f, t)}{I(f, t)} = \frac{U_m}{I_m} \exp(-i\varphi). \quad (1)$$

Блок-схема экспериментальной установки для измерения РЧ спектров кристаллов представлена на **Рис. 1**. Напряжение $U_{\text{ген}} = U_0 e^{i2\pi ft}$, где U_0 – заданная амплитуда (0.01–10 В), с РЧ генератора подаётся в цепь, содержащую сопротивление R и конденсатор, между электродами которого расположен исследуемый кристалл. Для каждого значения частоты f РЧ поля регистрируется амплитуда $|U_R|$ и фаза φ напряжения U_R на входе синхронного детектора относительно опорного сигнала, что позволяет определять электрический ток, протекающий через кристалл ($I \cong U_R (R + R2)/(R R2)$), и вычислять комплексный адмиттанс $Y(f)$ или импеданс $Z(f) = 1/Y(f)$ конденсатора с кристаллом. Величина ёмкости конденсатора без кристалла составляет несколько пФ. В исследуемом частотном диапазоне $|Z(f)| \gg R$ Кристалл вместе с конденсатором находится в термостате. Для повышения точности измерений и получения большого объёма данных проведена автоматизация эксперимента. В автоматическом режиме по заданному алгоритму программно осуществляется последовательное изменение частоты генератора и считывание показаний синхронного детектора. Экспериментальная установка обеспечивает точность измерения абсолютного значения ёмкости: 2%. Минимальное изменение ёмкости, которое может быть зарегистрировано установкой: 10^{-15} Ф . Экспериментально исследовались нелинейно-оптические кристаллы кварца, KTiOPO_4 (КТП), KH_2PO_4 (КДР). Все кристаллы имеют форму прямоугольных параллелепипедов. Пример частотной зависимости амплитуды и фазы напряжения U_R на входе синхронного детектора в отсутствие лазерного излучения для кристалла КТП представлен на **Рис.2**. Характерные пики в частотных зависимостях амплитуды и фазы напряжения U_R соответствуют резонансам собственных колебательных мод кристалла (вкладки **Рис.2**).

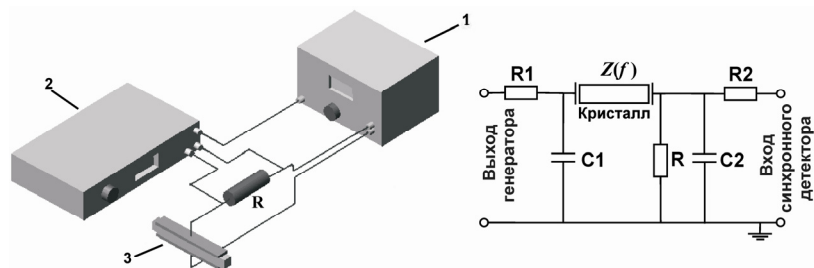


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки и электрической схемы для измерения электрического импеданса и наблюдения пьезоэлектрических резонансов в кристаллах. (1) – РЧ генератор; (2) – синхронный детектор; $R = 10 \text{ Ом}$ – сопротивление нагрузки для измерения тока, протекающего через кристалл (3); $R1 = 50 \text{ Ом}$ – внутреннее сопротивление генератора, $R2 = 50 \text{ Ом}$ – эквивалентное входное сопротивление синхронного детектора, $C1 = 11 \text{ пф}$ и $C2 = 5.5 \text{ пф}$ – ёмкости соединительных кабелей.

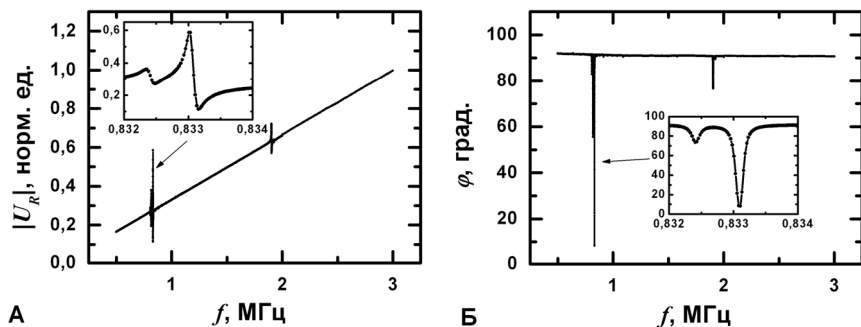


Рис. 2. Частотная зависимость амплитуды $|U_R|$ и фазы φ напряжения на входе синхронного детектора для кристалла КТР. РЧ поле направлено вдоль оси кристалла b . Температура окружающего кристалл воздуха $Ta = 298 \text{ К}$.

В **Главе 3** рассматривается влияние однородного разогрева кристаллов за счёт повышения температуры в термостате на возбуждаемые в них пьезоэлектрические резонансы. Представлены характерные температурные зависимости для пьезоэлектрических резонансов в кристаллах кварца и КТР. Разогрев кристалла сопровождается изменением частоты пьезоэлектрических резонансов. В условиях однородного разогрева в выбранном диапазоне температур (от 290 К до 390 К) частоты пьезоэлектрических резонансов Rf_n всех исследуемых кристаллов линейно зависят от температуры. Важной характеристикой пьезоэлектрического резонанса является величина пьезорезонансного термического коэффициента $K_n^{prt} = dRf_n(T)/dT$ (n –

индекс моды) изменения частоты резонансов при однородном изменении температуры кристалла. Частота пьезоэлектрического резонанса $Rf_n(T)$ при температуре кристалла T определяется из следующего соотношения:

$$Rf_n(T) = Rf_n(Ta) + K_n^{prt} (T - Ta). \quad (2)$$

Частота $Rf_n(Ta)$ в (2) соответствует начальной температуре окружающего кристалл воздуха Ta . При разогреве кристаллов сдвиг резонансов может происходить как с увеличением, так и с уменьшением частоты. Абсолютные значения коэффициентов K_n^{prt} отличаются для разных резонансов.

В **Главе 4** рассматривается поведение пьезоэлектрических резонансов нелинейно-оптических кристаллов при взаимодействии с лазерным излучением. Приводятся основные параметры используемых источников лазерного излучения. Вводится и обосновывается понятие эквивалентной температуры кристалла, характеризующее неоднородный разогрев кристалла лазерным излучением.

Схема оптической части экспериментальной установки представлена на **Рис. 3**. При воздействии на кристалл лазерного излучения фиксированной средней мощности P частота резонанса $Rf_n(P)$, измеряемая после установления теплового равновесия, линейно зависит от P с пьезорезонансным оптическим коэффициентом $K_n^{pro} = dRf_n(P)/dP$.

На основе сравнения поведения формы линий пьезоэлектрических резонансов кристаллов кварца и КТР при однородном разогреве в отсутствие лазерного излучения и при неоднородном разогреве лазерным излучением вводится понятие эквивалентной температуры кристалла, характеризующее его неоднородный разогрев лазерным излучением.

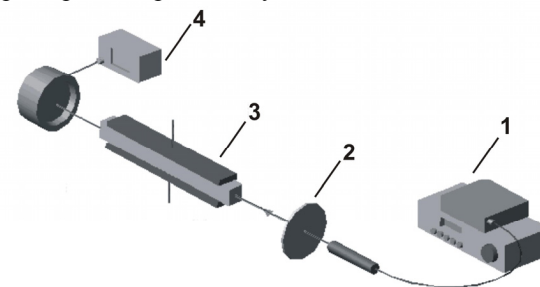


Рис. 3. Оптическая часть экспериментальной установки. (1) – лазерный источник; (2) – оптический затвор (3) – кристалл, находящийся в условиях пьезоэлектрического резонанса; (4) – измеритель мощности лазерного излучения.

Оптическое поглощение лазерного излучения приводит к неоднородному разогреву кристалла, зависящему от распределением интенсивности лазерного пучка. Коэффициент K_n^{pro} позволяет из измеряемого значения $Rf_n(P)$ определять увеличение температуры кристалла при воздействии лазерного излучения мощности P . Функциональная зависимость $Rf_n(P)$ определяется, прежде всего, величиной коэффициента оптического поглощения кристалла $\alpha(\lambda)$ (λ – длина волны излучения) и экспериментальными условиями теплообмена кристалла с воздухом. На длине волны излучения иттербиевого волоконного лазера $\lambda = 1064$ нм линейный характер зависимости $Rf_n(P)$ для исследуемых кристаллов наблюдается в силу слабого линейного поглощения кристаллами излучения и пренебрежимо малого нелинейного поглощения в данном диапазоне мощностей (до 70 Вт) лазерного излучения. На Рис. 4 представлены зависимости ширины линии Δw_1 и амплитуды A_1 , полученные из аппроксимации действительной части электрического импеданса $Re(Z(f))$ конденсатора с кристаллом КТР вблизи одной из собственных мод ($Rf_1(Ta) = 833.16$ кГц при температуре окружающего воздуха $Ta = 297$ К, пьезорезонансный термический коэффициент $K_1^{prt} = -53.5 \pm 0.1$ Гц/К, пьезорезонансный оптический коэффициент $K_1^{pro} = -15.5 \pm 0.5$ Гц/Вт) функцией Лоренца:

$$Re(Z(f)) = R_0 + \frac{2A_n}{\pi} \left(\frac{\Delta w_n}{4(f - Rf_n)^2 + \Delta w_n^2} \right). \quad (3)$$

На Рис. 4 А представлены частотные зависимости модуля электрического импеданса конденсатора с кристаллом КТР вблизи исследуемого резонанса, полученные при однородном разогреве кристалла КТР в отсутствие излучения и при неоднородном разогреве импульсным лазерным излучением средней мощностью до 19 Вт. На Рис. 5 (А, Б) представлены зависимости ширины линии Δw_1 и её амплитуды A_1 , полученные из аппроксимации действительной части электрического импеданса кристалла КТР $Re(Z(f))$ функцией Лоренца (3) при однородном разогреве в отсутствие излучения $w_1(T), A_1(T)$ и при неоднородном разогреве лазерным излучением $w_1(P), A_1(P)$. По оси абсцисс на Рис. 5 (А, Б) отложены значения резонансной частоты Rf_1 , характеризующей положение пьезоэлектрического резонанса как при однородном, так и при неоднородном разогреве. Пример аппроксимации функцией (3) при однородном разогреве кристалла КТР в отсутствие излучения показан на Рис. 4 Б.

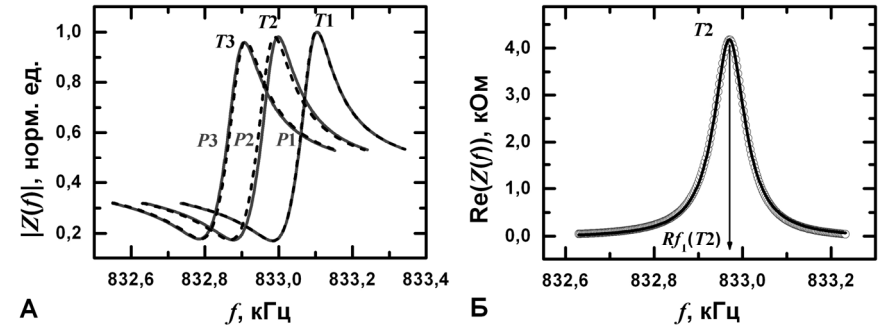


Рис. 4. А Частотные зависимости модуля электрического импеданса конденсатора с кристаллом КТР $|Z(f)|$ при однородном разогреве в отсутствие лазерного излучения (пунктир) $T1 = 299$ К, $T2 = 301.5$ К, $T3 = 303$ К и неоднородном разогреве импульсным лазерным излучением (сплошные линии) $P1 = 5$ Вт, $P2 = 13.2$ Вт, $P3 = 19$ Вт. Б Зависимость действительной части электрического импеданса КТР $Re(Z(f))$ при однородном разогреве $T2 = 301.5$ К (\circ), аппроксимация функцией (3).

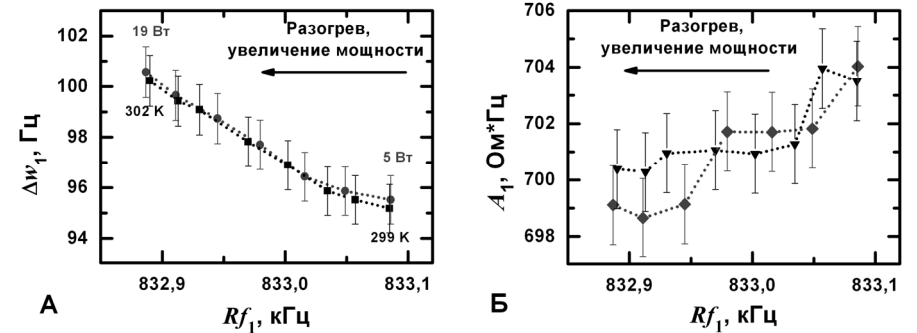


Рис. 5. А Зависимости ширины линии Δw_1 действительной части электрического импеданса конденсатора с кристаллом КТР $Re(Z(f))$ при однородном разогреве кристалла в отсутствие лазерного излучения $\Delta w_1(T)$ (\blacksquare), при неоднородном разогреве лазерным излучением $\Delta w_1(P)$ (\bullet). Б Зависимости амплитуды A_1 действительной части электрического импеданса КТР $Re(Z(f))$ при различных температурах кристалла в условиях однородного разогрева $A_1(T)$ (\blacktriangledown), при неоднородном разогреве импульсным лазерным излучением $A_1(P)$ (\blacklozenge).

Из представленных зависимостей для кристалла КТР следует, что изменение формы линии пьезоэлектрического резонанса при однородном разогреве и неоднородном разогреве в результате воздействия лазерного излучения можно описать одной и той же функциональной зависимостью. Для рассмотренных пьезоэлектрических резонансов при данной мощности излучения P существует температура T , такая что справедливо: $\Delta w_n(T) = \Delta w_n(P)$ и $A_n(T) = A_n(P)$. Это позволяет при лазерном воздействии определять температуру кристалла суммой начальной температуры кристалла $T_C(P=0) = Ta$ и эквивалентной температурой разогрева кристалла $\Theta_{eq}(P)$, зависящей от мощности излучения P . Значение $\Theta_{eq}(P)$ определяется, исходя из известных значений пьезорезонансных термического K_n^{prt} и оптического коэффициентов K_n^{pro} произвольной моды:

$$\Theta_{eq}(P) = \frac{K_n^{pro}}{K_n^{prt}} P = \frac{\Delta Rf_n(P)}{K_n^{prt}}. \quad (4)$$

Эквивалентная температура кристалла определяется следующим выражением:

$$T_C(P) = Ta + \Theta_{eq}(P). \quad (5)$$

Истинное термодинамическое пространственное распределение температуры кристалла $T_C(x, y, z, P)$ при воздействии лазерного излучения средней мощности P в данном случае определяется выражением:

$$T_C(x, y, z, P) = Ta(0) + \Theta_{eq}(P) + \Delta T(x, y, z, P). \quad (6)$$

Исходя из сравнения экспериментальных данных изменения формы линии пьезоэлектрических резонансов при различных условиях разогрева кристалла, показано, что при воздействии мощного лазерного излучения неоднородность температуры внутри кристаллов удовлетворяет условию:

$$\Delta T(x, y, z, P) \ll \Theta_{eq}(P). \quad (7)$$

Далее описываются измерения сдвига частоты пьезоэлектрических резонансов кристалла КТР при разогреве непрерывным одноимовым поляризованным излучением волоконного лазера мощностью до 14 Вт. При измерении сдвига частоты ΔRf_n n -ого резонанса частота внешнего радиочастотного поля f фиксируется в области резонанса с наибольшим значением производной модуля полного импеданса по частоте и во время каждого измерения остаётся постоянной. В момент времени $t = 0$ начинается запись значений напряжения синхронным детектором, то есть фактически измеряется зависимость импеданса конденсатора с кристаллом от времени $Z(t)$. В некоторый момент времени $t_0 > 0$ через кристалл начинает проходить лазерное излучение. Мощность лазерного излучения не меняется в

течение одного измерения. Так как изменения формы линии пьезоэлектрических резонансов кристалла происходят одинаково при однородном разогреве в отсутствие излучения и при неоднородном разогреве лазерным излучением, то из $|Z(t)|$ с учетом известной зависимости $|Z(f)|$ определяется сдвиг резонансной частоты $\Delta Rf_n(t) = Rf_n(t) - Rf_n(0)$. Из начального участка зависимости $\Delta Rf_n(t)$ при разогреве кристалла лазерным излучением мощностью P определяется изменение эквивалентной температуры кристалла со временем $\Theta_{eq}^n(t, P)$ по формуле (4). Пример зависимости $\Theta_{eq}^n(t, P)$ представлен на Рис. 6 А. Коэффициент $v_n(P)$, характеризует скорость разогрева кристалла:

$$v_n(P) = \left(\Theta_{eq}^n(t, P) / dt \right)_{t=t_0}, \quad (8)$$

где t_0 – момент начала облучения. Из Рис. 6 Б видно, что коэффициенты $v_n(P)$, полученные из измерений четырёх пьезоэлектрических резонансов кристалла КТР, зависят от мощности лазерного излучения линейно с разным коэффициентом наклона. Нами сделано предположение, что наблюдаемые расхождения обусловлены различной чувствительностью резонансных мод к неоднородности распределения температуры кристалла при лазерном разогреве.

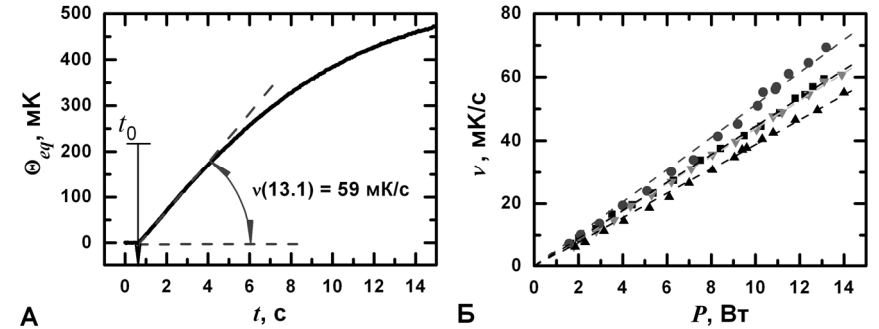


Рис. 6. А Изменение эквивалентной температуры кристалла КТР при воздействии непрерывного лазерного излучения мощностью $P = 13.1$ Вт, t_0 – момент начала воздействия. Б Скорость разогрева $v(P)$ кристалла КТР в зависимости от мощности непрерывного лазерного излучения для четырёх резонансов \blacktriangledown – $Rf_3(Ta) = 817.9$ кГц, \blacktriangle – $Rf_4(Ta) = 824.34$ кГц, \bullet – $Rf_5(Ta) = 832.21$ кГц, \blacksquare – $Rf_6(Ta) = 833.16$ кГц, частоты указаны для температуры кристалла $Ta = 297$ К.

Преобразование мощного лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах сопровождается их нелинейным разогревом. Понятие эквивалентной температуры распространяется и на нелинейный разогрев кристаллов, который будет происходить с увеличением мощности лазерного излучения. В этом случае частоты пьезоэлектрических резонансов кристалла будут нелинейно зависеть от мощности лазерного излучения с коэффициентом акусто-резонансного нелинейно-оптического взаимодействия $C_n^{arno} = d^2 Rf_n(P) / dP^2$. Эквивалентная температура разогрева кристалла при нелинейном разогреве кристалла определяется следующим выражением:

$$\Theta_{eq}(P) = \frac{K_n^{pro}}{K_n^{prt}} P + \frac{C_n^{arno}}{K_n^{prt}} P^2. \quad (9)$$

В **Главе 5** представлены исследования импедансной спектроскопии ионной проводимости нелинейно-оптических кристаллов при воздействии лазерного излучения. Произведено сравнение влияния ионной проводимости на пьезоэлектрические резонансы в кристалле КТР при однородном разогреве в отсутствие излучения и при неоднородном разогреве кристалла импульсным лазерным излучением мощностью до 12 Вт. Ионная проводимость кристалла КТР обусловлена движением по свободным вакансиям положительно заряженных ионов калия вдоль оси кристалла c . Проводимость вдоль осей a , b на несколько порядков меньше проводимости вдоль оси c . На **Рис.2**, **Рис.7** представлены характерные спектры кристалла КТР, измеренные при воздействии РЧ поля вдоль различных осей кристалла. Оказалось, что резонансы, возбуждаемые РЧ полем, направленным вдоль оси кристалла c , обладают меньшей добротностью $Q < 10^3$ (см. **Рис.7**) по сравнению с резонансами, возбуждаемыми РЧ полем, направленным вдоль оси b : $Q \approx 10^4 - 10^5$ (см. **Рис.2**). На **Рис. 7** также представлены результаты температурных зависимостей модуля $|U_R|$ и фазы φ напряжения на входе синхронного детектора (см. **Рис. 1**), полученные при однородном разогреве кристалла КТР и воздействии РЧ поля вдоль оси кристалла c . Амплитуда электрического тока $|I| = |U_R| / R$, протекающего через кристалл, зависит от величины ионной проводимости кристалла σ . С увеличением частоты внешнего РЧ поля и температуры кристалла величина ионной проводимости КТР увеличивается. Действительная часть диэлектрической проницаемости кристалла растёт с увеличением температуры и для данного частотного диапазона слабо зависит от частоты РЧ поля. Оценка значения ионной проводимости КТР вдоль оси c при комнатной температуре даёт величину $\sigma \approx 10^{-7} \div 10^{-6}$ (Ом см) $^{-1}$ на частоте РЧ поля 1 МГц. Для данной ориентации РЧ поля в отличие от направления вдоль оси кристалла b (см. **Рис. 4 А**) при разогреве кристалла наблюдается сильное уширение линий и уменьшения амплитуды регистрируемых пьезоэлектрических резонансов. Предполагается,

что такое поведение резонансов обусловлено возрастанием ионной проводимости с температурой.

В случае неоднородного разогрева кристалла КТР лазерным излучением формы линии пьезоэлектрических резонансов, возбуждаемых РЧ полем, направленным вдоль оси кристалла c , изменяются так же, как и при однородном разогреве. Результаты измерений вблизи резонанса $Rf_2(Ta) = 1.2895$ МГц при $Ta = 297$ К представлены на **Рис.8**.

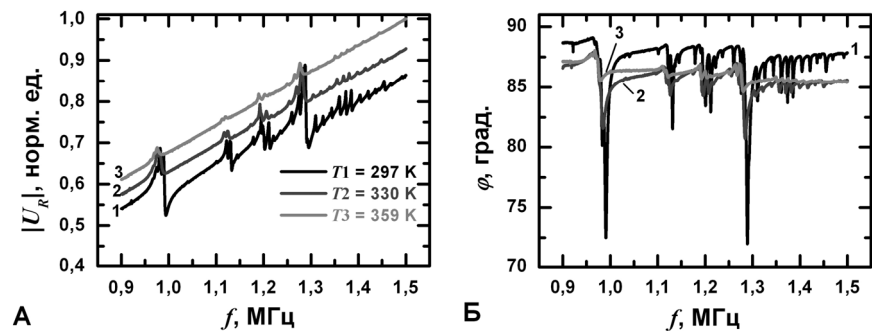


Рис. 7 Частотные зависимости амплитуды $|U_R|$ и фазы φ напряжения на входе синхронного детектора для кристалла КТР при его однородном разогреве. РЧ поле направлено вдоль оси кристалла c .

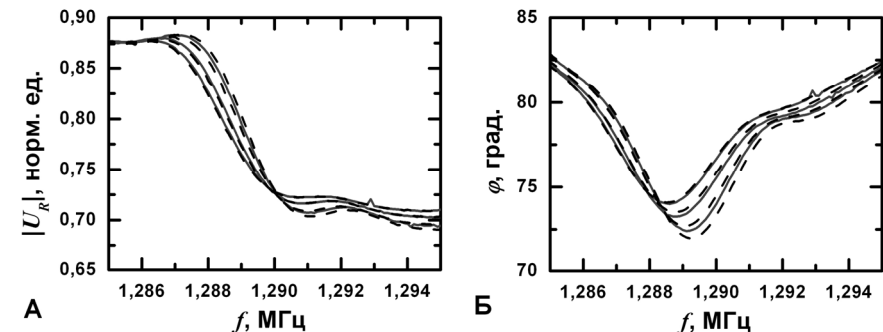


Рис. 8 Частотные зависимости амплитуды $|U_R|$ и фазы φ напряжения на входе синхронного детектора для кристалла КТР при его неоднородном разогреве лазерным излучением мощностью 2.5 Вт, 7.5 Вт и 12 Вт (сплошные линии) и при однородном разогреве в отсутствие излучения для температур 297.5 К, 299 К, 301 К и 302.5 К (пунктирные линии). РЧ поле направлено вдоль оси кристалла c .

Для данных условий естественного теплообмена кристалла с окружающим воздухом пьезорезонансный оптотермический коэффициент имеет значение $K_2^{pro}/K_2^{prt} = 0.44$ К/Вт. Тогда как для тех же условий теплообмена с окружающей средой аналогичный коэффициент, рассчитанный из измерений при воздействии РЧ поля вдоль оси кристалла b (резонанс $Rf_1(Ta) = 833.16$ кГц при температуре $Ta = 297$ К), отличается от этого значения и имеет величину $K_1^{pro}/K_1^{prt} = 0.29$ К/Вт. Предполагается, что наблюдаемое расхождение при лазерном воздействии может быть обусловлено влиянием ионов проводимости на пьезоэлектрический резонанс в кристалле КТР, возбуждаемый РЧ полем, направленным вдоль оси кристалла c . Для описания ионной проводимости кристалла в условиях разогрева лазерным излучением следует использовать предложенное понятие эквивалентной температуры кристалла, определённое в (5).

В **Главе 6**, на примере пьезоэлектрического резонанса в кристалле KDP ($Rf_3(Ta) = 228.45$ кГц при температуре окружающего кристалл воздуха $Ta = 303$ К), продемонстрирована возможность ранней диагностики деградации, оптического разрушения кристаллов и оценки порогового значения плотности мощности лазерного излучения, приводящего к оптическому разрушению кристаллов. Пьезоэлектрический резонанс характеризуется тремя параметрами (см. **Рис. 9**): резонансная частота Rf_n ; амплитуда изменения фазы ΔPh_n в резонансе; разность максимальной и минимальной амплитуд напряжения ΔU_n в резонансе. Эти величины определяются экспериментально и обладают высокой чувствительностью к лазерному излучению.

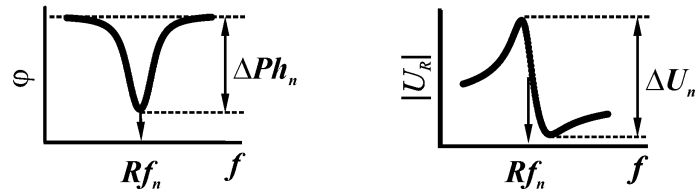


Рис. 9 Определение параметров, характеризующих пьезоэлектрический резонанс: Rf_n – резонансная частота, ΔPh_n – изменение фазы в резонансе, ΔU_n – разность максимальной и минимальной амплитуд напряжения в резонансе.

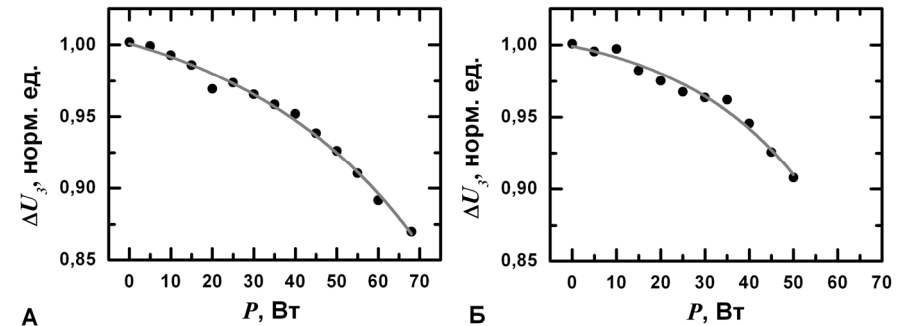


Рис. 10 Параметр ΔU_3 пьезоэлектрического резонанса кристалла KDP в зависимости от мощности лазерного излучения P при диаметре пучка $d1 = 1.5$ мм (А) и $d2 = 0.1$ мм (Б).

Измерения проводились для двух значений диаметра пучка лазерного излучения иттербиевого непрерывного одномодового поляризованного лазера до 70 Вт мощности: $d1 = 1.5$ мм и $d2 = 0.1$ мм. Резонансная частота Rf_n в обоих случаях линейно зависит от мощности лазерного излучения. Оптотермические коэффициенты имеют следующие значения: $(K_3^{pro}/K_3^{prt})|_{d1} = 2.07 \pm 0.05$ К/Вт и $(K_3^{pro}/K_3^{prt})|_{d2} = 2.21 \pm 0.05$ К/Вт для диаметра пучка $d1$ и $d2$ соответственно. В отличие от эквивалентной температуры образца, которая является макроскопической характеристикой, форма линии пьезоэлектрического резонанса чувствительна к микроскопическим изменениям в кристалле. Значения параметров пьезоэлектрического резонанса ΔPh_3 и ΔU_3 нелинейно зависят от мощности лазерного излучения. На **Рис.10** отображена зависимость параметра ΔU_3 пьезоэлектрического резонанса от мощности лазерного излучения для двух значений диаметра пучка. Полученные результаты аппроксимированы экспоненциальной зависимостью вида $\Delta U_3 = \Delta U_3^0 \exp(-P/P_{di}^U) + C_U$, где P – мощность излучения, C_U – константа. Полученное значение параметра P_{di}^U в два раза меньше для диаметра пучка $d2$ по сравнению с $d1$. Определённые путём экстраполяции пороговые значения интенсивности лазерного излучения: $I_{d1}^{nop} \approx 6 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$ и $I_{d2}^{nop} \approx 700 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$ – для диаметров $d1$ и $d2$ соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан метод импедансной спектроскопии, для исследования воздействия мощного лазерного излучения на нелинейно-оптические

кристаллы. Метод позволяет контролировать изменения оптических, электрических и тепловых свойств нелинейно-оптических кристаллов при воздействии лазерного излучения.

2. Созданный автоматизированный экспериментальный стенд позволяет проводить измерение РЧ спектров электрического импеданса (адмиттанса) пьезоэлектрических кристаллов. Проведены измерения РЧ спектров различных нелинейно-оптических кристаллов при разогреве лазерным излучением.
3. Откалиброванный пьезоэлектрический резонанс позволяет характеризовать неоднородный разогрев кристалла мощным лазерным излучением эквивалентной температурой.
4. Показано, что форма линии пьезоэлектрических резонансов кристалла KTiOPO_4 отличается при различной ориентации внешнего РЧ поля относительно кристаллографических осей. Данное различие, по всей видимости, обусловлено анизотропией ионной проводимости кристалла.
5. Методом импедансной спектроскопии проведена количественная оценка порога оптического разрушения нелинейно-оптического кристалла KN_2PO_4 .

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации содержатся в следующих статьях и тезисах конференций:

1. Кonyaшкин А.В., Доронкин А.В., Тыртышный В.А., Рябушкин О.А., «Радиочастотно-импедансный спектроскоп для исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с кристаллами» // Приборы и Техника Эксперимента (ПТЭ), № 6, С. 60–68, (2009).
2. Doronkin A.V., Konyashkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Myasnikov D.V., Ryabushkin O.A., «Kinetics of the acoustic resonances in nonlinear-optical crystals during the interaction with the single-mode high-power laser radiation» // J. Phys.: Conference Series., Vol. 214, P. 012043(1–5), (2010).
3. Konyashkin A.V., Doronkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Myasnikov D.V., Ryabushkin O.A., «Resonant acoustic spectroscopy of the interaction of the single-mode high-power laser radiation with crystals» // J. Phys.: Conference Series, Vol. 214, P. 012064(1–4), (2010).
4. Рябушкин О.А., Кonyaшкин А.В., Мясников Д.В., Доронкин А.В., Тыртышный В.А., «Радиочастотная спектроскопия нелинейно-оптических кристаллов, взаимодействующих с мощным лазерным

излучением» // Успехи современной радиоэлектроники (УСР), № 5, С. 54–65, (2010).

5. Кonyaшкин А.В., Тыртышный В.А., Доронкин А.В., Рябушкин О.А., «Радиочастотно-импедансная спектроскопия нелинейно-оптического взаимодействия мощного лазерного излучения с кристаллами» // Труды VII международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, Беларусь 17-19 июня 2008), Т. 3, С. 229–232.
6. Ryabushkin O.A., Konyashkin A.V., Myasnikov D.V., «Radio-frequency impedance spectroscopy of the nonlinear interaction of laser radiation with nonlinear-optical crystals» // Proceeding of the EOS Annual Meeting 2008 (Paris, France, 29 September – 2 October 2008), TOM 6, 810.
7. Konyashkin A.V., Doronkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Myasnikov D.V., Ryabushkin O.A., «Resonant acoustic calorimetry of the interaction of high-power laser radiation with crystals» // Ninth International Conference on Solid State Lighting (San Diego, California, USA, 2–6 August 2009), Proceeding of SPIE, Vol. 7422, 742217(1–11).
8. Konyashkin A., Doronkin A., Tyrtshnyy V., Myasnikov D., Ryabushkin O., «Resonant Acoustic Calorimetry of the Interaction of Laser Radiation with Nonlinear-Optical Crystals» // 2009 IEEE International Ultrasonic Symposium Proceedings (Rome, Italy, 20–23 September 2009), P. 2045–2048.
9. Ryabushkin O.A., Konyashkin A.V., Myasnikov D.V., «Equivalent temperature of crystal interacting with laser radiation» // Proceeding of the EOS Annual Meeting 2010 (Paris, France, 26 – 29 October 2010), TOM 6, 3480.
10. Konyashkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Doronkin A.V., Ryabushkin O.A., «Radiofrequency Impedance Spectroscopy of the Nonlinear-Optical Interaction of High Power Laser Radiation with Crystals» // 3rd EPS-QEOD Europhoton Conference (Paris, France, 31 August – 5 September 2008), THp.26.
11. Doronkin A.V., Konyashkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Myasnikov D.V., Ryabushkin O.A., «Kinetics of the acoustic resonances in nonlinear-optical crystals during the interaction with the single-mode high-power laser radiation» // 15th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP15) (Leuven, Belgium, 19–23 July 2009), Book of Abstracts, P. 90, TU-PA-2B-4.
12. Konyashkin A.V., Doronkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Myasnikov D.V., Ryabushkin O.A., «Resonant acoustic spectroscopy of the interaction of the single-mode high-power laser radiation with crystals» // 15th International

- conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP15) (Leuven, Belgium, 19–23 July 2009), Book of Abstracts, P. 332, PO-T14-13.
13. Konyashkin A., Doronkin A., Tyrtshnyy V., Myasnikov D., Ryabushkin O., «Resonant Acoustic Calorimetry of the Interaction of Laser Radiation with Nonlinear-Optical Crystals» // 2009 IEEE International Ultrasonic Symposium (Rome, Italy, 20–23 September 2009), Abstract book, P. 494–495, P2-K-04.
 14. Konyashkin A.V., Zaharchenko S.V., Ryabushkin O.A., «Resonant acoustic spectroscopy technique for the laser-induced damage investigation in nonlinear-optical crystals» // 5th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications (St. Petersburg, Russia, 28 June – 02 July 2010), TuSy-p02.
 15. Tyrtshnyy V.A., Konyashkin A.V., Ryabushkin O.A., «Piezoelectric resonator for measuring the high-power laser radiation parameters» // 5th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, (St. Petersburg, Russia, 28 June – 02 July 2010), TuSy-p03.
 16. Konyashkin A.V., Doronkin A.V., Myasnikov D.V., Tyrtshnyy V.A., Ryabushkin O.A., «Temperature determination of nonlinear-optical crystals heated by laser radiation» // International Conference on Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT 2010) (Kazan, Russia, 23–26 August 2010), LThO10.
 17. Konyashkin A.V., Tyrtshnyy V.A., Doronkin A.V., Ryabushkin O.A., «Equivalent temperature determination of nonlinear-optical crystals during interaction with single-mode laser radiation» // 4th EPS-QEOD Europhoton Conference, (Hamburg University, Germany, 29 August–3 September 2010), TuP.14.

Коняшкин Алексей Викторович

**ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ
КРИСТАЛЛОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Подписано в печать 25.10.2010 Формат 60 x 84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 90 экз. Заказ № ф-

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»
Отдел автоматизированных издательских систем «ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ»

141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9