На правах рукописи

ШВЕЦОВ Игорь Александрович

НЕЛИНЕЙНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СЕГНЕТОАКТИВНЫХ И ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

Специальность

01.04.07 Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону - 2022

Работа выполнена в Отделении сегнетопьезоматериалов, приборов и устройств Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета.

Научный руководитель:	Рыбянец Андрей Николаевич доктор физико-математических наук, (Южный федеральный университет, НИИ физики, отделение сегнетопьезоматериалов, приборов и устройств, зав. отделением)
Официальные оппоненты:	Исаев Владислав Андреевич доктор физико-математических наук, доцент (ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», кафедра теоретической физики и компьютерных технологий, зав. кафедрой)
	Цысарь Сергей Алексеевич кандидат физико-математических наук, доцент (<i>Московский государственный университет имени</i> <i>М.В. Ломоносова, кафедра фотоники и физики</i> <i>микроволн, доцент</i>)

Защита диссертации состоится **08 июля 2022** года в **15.00** часов на заседании диссертационного совета **ЮФУ01.07** по физико-математическим наукам (специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния и 01.04.18 - Кристаллография, физика кристаллов) при НИИ физики ЮФУ по адресу: Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, НИИ физики ЮФУ, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени Ю.А. Жданова ЮФУ по адресу: Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на официальном сайте: <u>https://hub.sfedu.ru/diss/show/1299715/</u>

Автореферат разослан

____ мая 2022 года

Отзывы на автореферат (укажите дату, свои фамилию, имя, отчество полностью, ученую степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail с нумерацией страниц) в двух экземплярах, с заверенной подписью рецензента и печатью организации, просим направлять Гегузиной Г.А., ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ01.07 при НИИ физики ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, НИИ физики ЮФУ, а также в формате .pdf - на e-mail geguzina@sfedu.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета ЮФУ01.07 при НИИ физики ЮФУ

Гегузина Галина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание и изучение новых функциональных материалов, являющихся элементной основой современной пьезо-И ультразвуковой техники, а также микро- и акустоэлектроники является одним из перспективных направлений физики конденсированного состояния. В настоящее время наблюдается тенденция К переходу OT традиционных сегнетопьезоэлектрических материалов, практически исчерпавших свои возможности по использования новых химических основ и технологий получения, к гетерогенным композиционным сегнетоэлектрикам, масштабированным на различных пространственных уровнях. Промышленное внедрение новых сегнетопьезокерамических и композиционных материалов (композиты 1-3. релаксорные керамики и монокристаллы, пористые керамики, a также сегнетопьезокерамики на основе метаниобата свинца и бессвинцовых составов) стимулировало проведение научных исследований в различных областях физической и нелинейной акустики, а также техники ультразвука. Это, в свою очередь, создало материальную базу для разработки новых методов и конструкций ультразвуковых преобразователей, сенсоров и актюаторов для неразрушающего контроля и диагностики, а также медицинской ультразвуковой техники и технологической ультразвуковой аппаратуры [1 - 3]. Разработка и практическое сегнетопьезокерамических применение новых И композиционных сегнетоэлектриков делает совершенствование актуальными существующих методов исследования, а также, разработку новых методов характеризации функциональных материалов [4 - 6]. Разработка новых композиционных сегнетоэлектрических материалов, функциональных элементов и устройств требует также использования современных математических методов конечно-элементного и конечно-разностного моделирования [7, 8].

Актуальность изучения свойств новых сегнетоэлектрических И материалов композиционных определяется не только ИХ практической значимостью, но также необходимостью решения фундаментальных проблем, таких как установление природы и механизмов упругой дисперсии и потерь, релаксационных и переходных процессов в пространственно-неоднородных сегнетоактивных средах, а также особенностей формирования ультразвуковых полей высокой интенсивности и волновых процессов в сегнетоактивных и средах. Таким образом, можно констатировать, что тема диссипативных диссертационной работы, посвященная установлению физических механизмов релаксационных и переходных явлений, а также особенностей доменноориентационных, нелинейных и волновых процессов в сегнетоактивных и диссипативных средах, представляется актуальной и своевременной.

Объекты исследования:

- сегнетопьезокерамические материалы на основе (ЦТС), ниобата натриялития и титаната натрия-висмута, полученные с использованием метода горячего прессования, а также обычной керамической технологии;

- пористые сегнетопьезокерамики на основе указанных химических соединений;

- пьезоэлементы и ультразвуковые преобразователи, изготовленные из сегнетопьезокерамических материалов;

- образцы биологических тканей, вязкоупругие и жидкие среды.

Выбор объектов исследования обусловлен как особыми физическими свойствами, так и возможностью их практического использования.

Цель работы - установление физических механизмов, определяющих релаксационные и переходные явления, а также особенности доменноориентационных, нелинейных и волновых процессов в многокомпонентных пьезокерамиках на основе ЦТС, титаната натрия-висмута, ниобата натрия-лития и диссипативных органических средах.

Задачи исследования определены в соответствии с целью работы:

1) Определить частотные зависимости комплексных электромеханических параметров сегнетопьезокерамик различных составов и структуры и выявить механизмы, определяющие несинфазный отклик пьезокерамических материалов на внешние воздействия.

2) Исследовать влияние постоянного электрического поля на комплексные электромеханические характеристики сегнетопьезокерамик и установить физические механизмы, определяющие доменно-ориентационные, переходные и релаксационные процессы в области слабых электрических полей.

3) Провести теоретическое, конечно-элементное и конечно-разностное моделирование особенностей волновых процессов и формирования ультразвуковых полей в сегнетоактивных и диссипативных средах.

4) Определить особенности формирования и тепловыделения в фокусированных ультразвуковых полях и полях ультразвуковых стоячих волн с использованием цилиндрических и сферических пьезокерамических преобразователей в диссипативных средах.

Научная новизна основных результатов и выводов заключается в том, что впервые:

- разработан новый метод исследования частотных зависимостей комплексных параметров сегнетопьезокерамических материалов, основанный на анализе импедансных спектров высших обертонов толщинной моды колебаний пьезоэлементов;

- разработан новый метод исследования и анализа нелинейных, релаксационных и переходных явлений, происходящих в сегнетопьезокерамике под действием слабых постоянных электрических полей, основанный на анализе пьезорезонансных спектров;

- определены дисперсионные характеристики комплексных электромеханических параметров и определяющие их микроструктурные особенности текстурированной пьезокерамики на основе твердых растворов системы титаната-натрия висмута ПКР-50 в диапазоне частот от 2 до 50 МГц;

- установлены корреляционные связи между особенностями микроструктуры и частотными зависимостями комплексных характеристик в бессвинцовой горячепрессованной пьезокерамике ниобата-натрия лития ПКР-35 в диапазоне частот от 9 до 90 МГц;

- получен полный набор комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров бессвинцовой горячепрессованной пьезокерамики ниобата-натрия лития ПКР-35;

- обнаружены области аномальной дисперсии электромеханических свойств пористых сегнетопьезокерамик и установлены основные механизмы, определяющие несинфазный отклик пьезокерамических материалов на внешние воздействия;

- на основе конечно-элементного и конечно-разностного моделирования, а также микроструктурных исследований, электрофизических и ультразвуковых измерений определены особенности волновых процессов и основные закономерности формирования ультразвуковых полей в сегнетоактивных и диссипативных средах;

- теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность пространственной и временной локализации энергии в фокусированных ультразвуковых полях и полях ультразвуковых стоячих волн, обеспечивающей экстремальное тепловыделение в диссипативных средах;

- разработаны конструкции ультразвуковых преобразователей и новые методы формирования фокусированных ультразвуковых полей высокой интенсивности в вязкоупругих средах;

- разработан метод комбинационной терапевтической обработки поверхностных тканей пациента, основанный на синергетическом взаимодействии радиочастотного тока, ультразвуковых цилиндрических стоячих волн и вакуумного массажа.

Научная практическая И значимость полученных результатов разработкой методов исследования, аппаратных стендов определяется И программных средств, методик моделирования свойств сегнетопьезокерамик, пьезоэлектрических элементов и ультразвуковых преобразователей, а также практическим использованием разработанных и исследованных материалов в ультразвуковых и пьезоэлектрических преобразователях и устройствах на их основе. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ОКР и НИР, грантов РНФ и РФФИ, а также хоздоговорных работ с промышленными и научными предприятиями РФ и зарубежными компаниями. Отдельные результаты диссертационной работы использованы при выполнении проектов Фонда содействия инновациям. Результаты диссертации использованы также в научноисследовательском и учебном процессах в Южном федеральном университете.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Дисперсионные характеристики комплексных упругих И горячепрессованной электромеханических параметров текстурированной пьезокерамики ПКР-50 В диапазоне частот до 50 ΜГц определяются микроструктурными особенностями слоистых сегнетоэлектриков на основе висмутсодержащих соединений, влияние которых становится более выраженным на высоких частотах.

2. Различия комплексных электромеханических параметров и их частотных зависимостей для различных срезов текстурированных горячепрессованных пьезокерамик ПКР-50 в диапазоне частот до 50 МГц обусловлены степенью преимущественной ориентации и особенностями расположения пластинчатых кристаллитов, ориентированных и поляризованных параллельно (Е||Р) и перпендикулярно (Е⊥Р) оси давления (Р) при горячем прессовании.

3. Экспериментально наблюдаемый гистерезис полевых зависимостей, а временных зависимостей также релаксационный характер комплексных характеристик сегнетомягкой пьезокерамики ПКР-1 при воздействии слабых электрических полей, коэрцитивного, постоянных меньших обусловлен обратимыми переориентациями 90°- ных (71°-, 109°- ных) доменов, приводящими к изменению остаточной поляризации, и процессами экранирования приложенного электрического поля носителями объемного заряда.

4. Разработанный метод, основанный на синергетическом взаимодействии радиочастотного тока и ультразвуковых цилиндрических стоячих волн, обеспечивает контролируемую эффективную локальную модификацию биологических тканей при минимальных временах и уровнях воздействия за счет взаимного усиления радиочастотного и ультразвукового нагрева.

Достоверность и надежность полученных результатов обусловлены:

- взаимодополняющим использованием современных экспериментальных методов исследования и теоретических расчетов;

- использованием апробированных способов получения и методов контроля состава, микро- и доменной структуры, а также электрофизических свойств сегнето- и пьезоактивных материалов;

- использованием статистически значимых выборок экспериментальных образцов каждого типа;

- использованием современного программного обеспечения, методов конечно-элементного и конечно-разностного математического моделирования и современной метрологически аттестованной технологической и измерительной аппаратуры;

- соответствием экспериментальных данных и результатов численного моделирования с теоретическими расчетами;

- согласием полученных экспериментальных результатов с современными теоретическими представлениями об электрофизических свойствах, микроструктурных особенностях, нелинейных и волновых процессах в сегнетоактивных и диссипативных средах.

Апробация основных результатов. Основные результаты диссертации были представлены на следующих Всероссийских и Международных конференциях, симпозиумах и конгрессах: Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов (Анализ современного состояния и перспективы развития) (LFPM-2015; LFPM-2016; LFPM-2017; LFPM-2018; LFPM-2019; LFPM-2020); Порядок, беспорядок и свойства оксидов (ODPO-18); Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2015; PHENMA 2016; PHENMA 2017); International Symposium for Therapeutic Ultrasound (ISTU 2016); INTERMATIC - 2017; Bcepoccийская конференция по физике сегнетоэлектриков (BKC-XXI); Russia/CIS/Baltic/Japan

Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF 2018); Релаксационные явления в твердых телах (RPS-24); Исследование сегнетоэлектрических материалов российскими учеными. Столетие открытия сегнетоэлектричества (СЭ-100); 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2021).

Публикации. Всего по теме диссертации автором опубликовано 50 научных работ, в том числе 32 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 2 статьи в журналах, 2 главы в коллективных монографиях, 13 докладов в трудах международных конференций, 1 патент на изобретение, индексируемые в РИНЦ. Основные публикации автора, отмеченные литерой А, помещены в конце автореферата.

Личный вклад автора заключается В получении основных экспериментальных результатов и выводов научно-квалификационной работы. Автором были разработаны методики измерения и измерительные стенды. Проведены исследования микроструктуры И измерения комплексных электрофизических параметров сегнетопьезокерамик различных составов и структуры. Составлены программы расчета параметров материалов и акустических полей. Изготовлены макетные образцы пьезокерамических элементов И ультразвуковых преобразователей. Проведены расчеты и выполнены исследования акустических полей фокусирующих ультразвуковых преобразователей. Постановка задач, анализ и интерпретация полученных результатов, а также обсуждение вопросов по тематике диссертации проводились совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографии из 145 наименований, изложенных на 187 страницах, и содержит 81 рисунок и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы научная цель и задачи исследования, определены объекты исследования. Особое внимание уделено обоснованию научной И практической новизны, ценности полученных результатов. Сформулированы основные научные положения, выносимые защиту, на представлен личный вклад автора в диссертационную работу, приведены данные об апробации результатов работы, публикациях, объеме и структуре работы.

В первом разделе представлены результаты исследования частотных зависимостей комплексных электромеханических параметров пьезокерамических материалов различных составов и структуры [А1]. Показано, что стандартные методы характеризации сегнето- и пьезоэлектрических материалов не учитывают комплексную природу параметров материалов с высокими упругими и электромеханическими потерями И не позволяют получить комплексные коэффициенты, необходимые для конструирования ультразвуковых И пьезотехнических устройств И моделирования свойств современных композицитных материалов. Рассмотрены принципы пьезорезонансного анализа и импедансной спектроскопии, а также программное обеспечение, используемое для анализа импедансных спектров [9].

В подразделе 1.2 приведены результаты экспериментального исследования микроструктурных особенностей и комплексных диэлектрических, упругих и пьезоэлектрических параметров бессвинцовой сегнетоэлектрической керамики ниобата-натрия лития ПКР-35 [А2 - А4]. Образцы пьезокерамики изготавливались методом горячего прессования. Выбранный состав в структурном отношении – это двухфазная система ромбоэдрической и ромбической фаз (с преобладанием ромбической фазы), сосуществующих между собой.

Для более глубокого понимания высокочастотных электромеханических характеристик бессвинцовой пьезокерамики были исследованы микро- и доменная структура. Для оценки фазового состава, зеренной И доменной сегнетоэлектрической структуры использовалась силовая микроскопия пьезоотклика (СМПО), дополненная сканирующей электронной микроскопией (СЭМ).



Рисунок 1 - Зеренная структура пьезокерамики ПКР-35: (a) СЭМ микрофотография полированной поверхности, (б) сигнал отклонения СМПО

Из СЭМ микрофотографии (рис. 1), иллюстрирующей зеренную структуру ПКР-35, видно, горячепрессованная пьезокерамики что бессвинцовая пьезокерамика характеризуется низкой пористостью P ≈ 1%, плотной и хаотичной укладкой зерен с прямыми и изогнутыми границами кристаллитов со средним размером $R \approx 5$ мкм. Такая зеренная структура обеспечивает низкое затухание высокочастотных ультразвуковых волн в высокочастотном диапазоне. В поляризованных зернах ПКР-35 выявляется сложная доменная структура, состоящая из множественных доменных узоров (в том числе, периодических ламелей). Это подтверждает высокое качество пьезокерамики ПКР-35, так как присутствуют только минимальные аморфные участки без пьезоотклика (как во внеплоскостных, так и в плоскостных модах).

Для измерения и анализа полного набора комплексных констант бессвинцовой сегнетоэлектрической керамики нами использовались стандартные наборы образцов пьезокерамики различной формы и размеров и одномерные моды колебаний, которые соответствуют симметрии класса 6mm. Приведенная матрица комплексных констант (табл. 1) может быть использована при моделировании методом конечных элементов, а также при проектировании пьезоэлектрических и ультразвуковых устройств.

Параметр	Действительная	Мнимая	Параметр	Действительная	Мнимая
	часть	часть		часть	часть
$T = C^D S - hD$ и $E = \beta^D - hS$					
C_{11}^{D} (H/m ²)	1.59·10 ¹¹	$2.45 \cdot 10^9$	<i>h</i> ₁₅ (В/м)	$1.53 \cdot 10^{9}$	$4.12 \cdot 10^7$
C_{12}^{D} (H/m ²)	$3.74 \cdot 10^{10}$	$2.2 \cdot 10^{9}$	<i>h</i> ₃₁ (В/м)	$-1.08.10^{9}$	$1.4 \cdot 10^8$
C_{13}^{D} (H/m ²)	$2.39 \cdot 10^{10}$	7.86·10 ⁹	<i>h</i> ₃₃ (В/м)	$4.4 \cdot 10^9$	$-2.63 \cdot 10^{8}$
C_{33}^{D} (H/m ²)	1.69 [.] 10 ¹¹	3.63·10 ⁹	β_{11}^{s} (м/Ф)	7.88 [.] 10 ⁸	$6.94 \cdot 10^7$
C_{55}^{D} (H/m ²)	$6.63 \cdot 10^{10}$	$1.64 \cdot 10^8$	β_{33}^{S} (м/Ф)	$1.04 \cdot 10^{9}$	$1.73 \cdot 10^5$
C_{66}^{D} (H/m ²)	$6.1 \cdot 10^{10}$	$1.25 \cdot 10^{8}$	ρ (кг/м ³)	$4.5 \cdot 10^3$	-

Таблица 1 - Полные наборы комплексных констант пьезокерамики ПКР-35



Рисунок 2 - Спектры импеданса для основного и высших резонансов толщинной моды колебаний пьезокерамических дисков ПКР-35, поляризованных по толщине (а), и частотные зависимости действительной $C_{33}^{D/}$ и мнимой $C_{33}^{D//}$ частей модулей упругости (б)

Анализ импедансных спектров для основного и высших обертонов толщинной моды колебаний пьезокерамических дисков ПКР-35 диаметром 7 мм и толщиной 0.35 мм (рис. 2 (а)) с помощью программы PRAP показал (рис. 2(б)), что действительная часть модуля упругости $C_{33}^{D/}$ изменяется практически линейно и незначительно в исследуемом диапазоне частот, тогда как мнимая часть $C_{33}^{D//}$ быстро возрастает с частотой. Этот процесс обусловлен ростом затухания ультразвуковых волн из-за рэлеевского рассеяния на керамических зернах. Полученные зависимости коррелируют с результатами исследования микро- и доменной структуры пьезокерамики ПКР-35, определяющий процессы рассеяния высокочастотных ультразвуковых волн с использованием силовой микроскопии пьезоотклика (СМПО) и сканирующей электронной микроскопией (СЭМ).

Установлено, что пьезокерамика ПКР-35 характеризуется высокими пьезо- и электромеханическими характеристиками $d_{33} = 31.9 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $k_t = 0.375$ наряду с высокой анизотропией указанных свойств $d_{31} = -10.1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $k_p = 0.18$, а также низкой плотностью $\rho = 4.45 \cdot 10^3$ кг/м³ и низким акустическим сопротивлением $Z_A = 22$ MRayl. Отмечено, что бессвинцовая пьезокерамика ПКР-35, обладающая уникальным набором электромеханических параметров, слабой дисперсией

ультразвуковых волн в широком диапазоне частот и низким затуханием, может быть применена в области медицинской техники (высокочастотные ультразвуковые преобразователи), а также для неразрушающего контроля.

В подразделе 1.3 представлены результаты экспериментального исследования электромеханических потерь и дисперсии в текстурированной пьезокерамике на основе слоистых висмутсодержащих композиций ПКР-50 в диапазоне частот от 2 до 50 МГц [А5 - А8]. Образцы текстурированной ПКР-50 пьезокерамики изготавливались одноосного методом горячего прессования. Для изучения комплексных электромеханических свойств из горячепрессованных блоков были вырезаны экспериментальные образцы в форме дисков, поляризованные параллельно (EllP) и перпендикулярно (ELP) оси давления (P).



Рисунок 3 - СЭМ микрофотографии сколотых поверхностей текстурированных пьезокерамических элементов ПКР-50 с различной ориентацией нормалей к поверхности относительно оси давления: (a) N∥Р и (б) N⊥Р

На микрофотографии среза N⊥P (рис. 3(б)) наблюдается отчетливо выраженная преимущественная ориентация кристаллитов, которые растут в виде пластин или стержней толщиной 1 - 1.5 мкм, шириной 3 - 10 мкм и длиной 10 - 20 мкм и уложены в плоскости, перпендикулярной оси давления, по сравнению с параллельным расположением кристаллитов на срезе N||P (рис. 3 (а)).

Импедансные спектры и комплексные диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие параметры пьезокерамики ПКР-50 (таблицы 2 и 3) измерялись на пьезокерамических дисках Ø8x0.73 мм с различной ориентацией нормалей к поверхности относительно оси давления с использованием программы PRAP [10].

Параметр	ІЕЕЕ Стандарт	Действительная часть	Мнимая часть
<i>f</i> _p (Гц)	$2.956 \cdot 10^{6}$	$2.954 \cdot 10^{6}$	$1.475 \cdot 10^3$
k _t	0.0815	0.1064	0.003055
<i>С</i> ^{<i>D</i>} ₃₃ (Н/м²)	$1.39 \cdot 10^{11}$	$1.388 \cdot 10^{11}$	$1.386 \cdot 10^8$
\mathcal{C}_{33}^E (H/m ²)	$1.38 \cdot 10^{11}$	$1.372 \cdot 10^{11}$	$4.679 \cdot 10^7$
<i>е</i> ₃₃ (Кл/м²)	-	1.379	0.02522
h ₃₃ (В/м)	-	$1.14 \cdot 10^{9}$	$4.57 \cdot 10^{7}$
$\varepsilon_{33}^{S} (\Phi/M)$	-	$1.208 \cdot 10^{-9}$	$2.636 \cdot 10^{-11}$

Таблица 2	- Комплексные	параметры	пьезокерамики	ПКР-50 среза	E P
-----------	---------------	-----------	---------------	--------------	------

Параметр	ІЕЕЕ Стандарт	Действительная часть	Мнимая часть
<i>f</i> _p (Гц)	$3.05 \cdot 10^{6}$	$3.049 \cdot 10^{6}$	$3.183 \cdot 10^3$
k _t	0.3498	0.3496	0.002257
C_{33}^{D} (H/m ²)	$1.69 \cdot 10^{11}$	$1.688 \cdot 10^{11}$	$3.524 \cdot 10^{8}$
\mathcal{C}_{33}^E (H/m ²)	$1.483 \cdot 10^{11}$	$1.482 \cdot 10^{11}$	$5.756 \cdot 10^8$
е ₃₃ (Кл/м ²)	-	5.116	0.264
h ₃₃ (В/м)	-	$4.022 \cdot 10^{9}$	$1.64 \cdot 10^{8}$
$\varepsilon_{33}^{S}(\Phi/M)$	-	$1.267 \cdot 10^{-9}$	$1.173 \cdot 10^{-10}$

Таблица 3 - Комплексные параметры пьезокерамики ПКР-50 среза Е⊥Р

Анализ импедансных спектров, измеренных на основной частоте и резонансах высших порядков толщинной моды колебаний пьезокерамических элементов различных срезов (рис. 4), позволил исследовать частотные зависимости комплексных параметров текстурированной пьезокерамики ПКР-50 в диапазоне частот 2 - 50 МГц (рис. 5 и 6).



Рисунок 4 - Импедансные спектры для основной и высших порядков резонанса для толщинной моды колебаний пьезокерамических дисков ПКР-50 срезов Е⊥Р (а) и Е||Р (б), поляризованных по толщине



Рисунок 5 - Частотные зависимости действительных $C_{33}^{D/}$, $C_{33}^{E/}$ и мнимых $C_{33}^{D/}$, $C_{33}^{E/}$ частей модулей упругости для E⊥P (а) и E||P (б) срезов пьезокерамических дисков ПКР-50

Из рисунка 5 видно, что действительная и мнимая части модулей упругости $C_{33}^{E/}$, $C_{33}^{E//}$ и $C_{33}^{D//}$ для среза Е \perp Р незначительно увеличивается с частотой, тогда как действительная часть $C_{33}^{D/}$ практически постоянна в измеренном диапазоне частот. Таким образом, пьезокерамика ПКР-50 среза Е \perp Р характеризуется низкими акустическими потерями (коэффициент механической добротности $Q_m^t = C_{33}^{D/}/C_{33}^{D//}$) и отсутствием упругой дисперсии в широком диапазоне частот от

2 до 50 МГц. Напротив, модули упругости $C_{33}^{E/}$, $C_{33}^{E//}$, $C_{33}^{D/}$ и $C_{33}^{D//}$ для среза Е||Р пьезокерамики ПКР-50 увеличиваются с частотой более резко, что обусловлено более быстрым ростом затухания ультразвуковых волн из-за рэлеевского рассеяния на пластинчатых кристаллитах, ориентированных перпендикулярно направлению распространения волны. Коэффициенты механической добротности срезов Е||Р и Е⊥Р, рассчитанные по формуле $Q_m^t = C_{33}^{D/}/C_{33}^{D//}$, составили 1008 и 480 соответственно. Пространственная дисперсия в этом случае имеет нормальный характер - рост скорости звука V_t^D с частотой. Различия в частотных зависимостях комплексных модулей упругости обусловлены особенностями ориентации пластинчатых кристаллитов в текстурированных пьезокерамиках разной огранки.



Рисунок 6 - Частотные зависимости действительной $k_t^{/}$ и мнимой $k_t^{//}$ частей коэффициентов электромеханической связи, измеренные на Е \perp Р (а) и Е||Р (б) срезах пьезокерамических дисков ПКР-50

Действительные части коэффициента электромеханической связи $k_t^{/}$ для обеих ориентаций срезов пьезокерамики (рис. 6) уменьшаются с ростом частоты, а соответствующие мнимые части $k_t^{//}$ растут за счет увеличения электромеханических потерь. Также следует иметь в виду, что эффективное значение k_t , измеренное на резонансах более высокого порядка, резко падает с увеличением номера гармоники $k_{eff.n}^2 = 8k_t^2/((2n+1)\pi)^2$.

В результате экспериментального исследования частотных зависимостей комплексных электромеханических параметров текстурированной пьезокерамики ПКР-50 были обнаружены области упругой и электромеханической дисперсии, характеризующиеся аномалиями частотных зависимостей мнимой И действительной частей комплексных констант в диапазоне частот до 50 МГц. Показано также, что текстурированная пьезокерамика ПКР-50 среза Е⊥Р обладает сочетанием анизотропных электромеханических уникальным параметров $(d_{33} = 35 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $k_t = 0.35$, $d_{31} = -2.28 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $k_p = 0.03$, $Q_M^t = 480$, $Q_M^r = 4700, T_{\rm K} = 920$ K), характеризуется малой дисперсией ультразвуковых волн в широком диапазоне частот и малым затуханием. Поэтому текстурированная пьезокерамика ПКР-50 является перспективным материалом для применения его в области медицинской техники, в неразрушающем контроле, а также в высокочастотных и высокотемпературных ультразвуковых устройствах.

В подразделе 1.4 приведены результаты исследований дисперсионных характеристик комплексных электромеханических параметров сегнетожесткой пористой пьезокерамики ПКР-78 со средним размером пор от 5 до 30 мкм и относительной пористостью 16% [A8, A9].



Рисунок 7 - SEM изображение микроструктуры пористой пьезокерамики ПКР-78 с относительной пористостью 16%

Согласно микрофотографиям (рис. 7), пористая пьезокерамика характеризуется случайным распределением пор неправильной формы с широким распределением размеров от 5 до 30 мкм и плотной упаковкой зерен со средним размером 2 - 5 мкм, не отличающимися от размеров зерен для плотной пьезокерамики того же состава.

Анализ измеренных импедансных спектров для основного и высших резонансов толщинной моды колебаний пьезоэлементов позволил определить частотные зависимости комплексных упругих и пьезоэлектрических параметров пористой пьезокерамики ПКР-78 (рис. 8).



Рисунок 8 - Частотные зависимости действительных $C_{33}^{D/}$, $C_{33}^{E/}$ и мнимых $C_{33}^{D//}$, $C_{33}^{E/}$ частей модулей упругости (а), а также действительной $e_{33}^{/}$ и мнимой $e_{33}^{//}$ частей пьезоэлектрической постоянной (б) пористой пьезокерамики ПКР-78

Как видно из рисунка 8(а), мнимые части $C_{33}^{D//}$, $C_{33}^{E//}$ модулей упругости пористой пьезокерамики ПКР-78 увеличиваются с частотой, что вызвано ростом затухания ультразвуковых волн в результате рэлеевского рассеяния на порах - $\lambda << D$, D - средний размер пор, λ - длина волны. Напротив, действительные части модуля упругости $C_{33}^{D/}$, $C_{33}^{E/}$ демонстрируют аномальное уменьшение с ростом частоты.

Подобное поведение мы наблюдали ранее для сегнетомягкой пористой пьезокерамики и связывали его с частотной зависимостью коэффициента электромеханической связи k_t для толщинной моды колебаний, что, в частности, приводит к уменьшению электромеханического вклада в $C_{33}^{D/}$.

Действительная часть пьезоэлектрической постоянной $e_{33}^{/}$ пористой пьезокерамики убывает с частотой, а мнимая часть $e_{33}^{//}$ демонстрирует нелинейную частотную зависимость (рис. 8(б)). Быстрое уменьшение пьезомодуля e_{33} пористой пьезокерамики с ростом частоты обусловлено, в основном, уменьшением деформаций изгиба-растяжения разветвленного трехмерного пьезокерамического каркаса под действием внешних напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект) или электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект).

Основным физическим фактором, определяющим дисперсные характеристики комплексных электромеханических параметров пористой пьезокерамики, является масштабный фактор, связанный с микроструктурными особенностями пористой пьезокерамики (разветвленная трехмерная каркасная пьезокерамическая структура), которые становятся более выраженными для высоких порядков резонансов толщинных мод колебаний.

Bo втором представлены разделе результаты экспериментальных исследований доменно-ориентационных И релаксационных процессов в сегнетоэлектрической керамике в слабых электрических полях [А10 - А13]. Предложен новый метод исследования переходных и релаксационных процессов, происходящих в сегнетоэлектрической керамике под действием постоянного электрического поля, основанный на последовательном измерении и анализе импедансных спектров с помощью программы PRAP [10]. Объектом исследования была выбрана горячепрессованная сегнетомягкая пьезокерамика системы ЦТС (ПКР-1), находящаяся вблизи ромбоэдрической границы морфотропной области и характеризующаяся низким коэрцитивным полем (7.5 кВ/см при измерении при частоте 50 Гц), а также наличием 90⁰- и 180⁰- ных тетрагональных и 71⁰-, 109⁰- и 180⁰- ных ромбоэдрических доменов.

В подразделах 2.1 и 2.2 приведены результаты исследования полевых и временных зависимостей комплексных параметров сегнетоэлектрической керамики с использованием анализа пьезорезонансных спектров для толщинной и радиальной мод колебаний пьезокерамических дисков ПКР-1. Зависимости действительной части диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^{S/}$ и соответствующего тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta = \varepsilon_{33}^{S/}/\varepsilon_{33}^{S/}$ от постоянного электрического поля *E* в области слабых полей, намного меньших коэрцитивного ($E << E_c \approx 7.5$ кВ/см при 50 Гц), полученные в результате анализа последовательных импедансных спектров для толщинной моды колебаний пьезокерамических дисков, имеют типичный гистерезисный характер (рис. 9). Диэлектрическая проницаемость исследуемой пьезокерамики $\varepsilon/\varepsilon_0 = 780$ (для неполяризованной керамики), $\varepsilon/\varepsilon_0 = 300$ и $\varepsilon/\varepsilon_0 = 570$ (для поляризованной).



Рисунок 9 - Экспериментальные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^{S/}$ (а) и соответствующего тангенса угла диэлектрических потерь tg δ (б) пьезокерамики ПКР-1 от постоянного электрического поля *E*

Наблюдаемая асимметрия петель гистерезиса связана с начальной образом, поляризация поляризацией пьезокерамического элемента. Таким пьезокерамики должна приводить к уменьшению $\varepsilon_{33}^{S/}$, а ее деполяризация - к росту $\varepsilon_{22}^{S/}$. Положительные значения *E* соответствуют противоположным направлениям приложенного постоянного поля и поляризации P_R пьезокерамики. Частичная деполяризация образца пьезокерамики приводит к увеличению $\varepsilon_{33}^{S/}$ и уменьшению tg δ , главным образом, в результате обратимых поворотов 90°- ных тетрагональных и 71°-, 109°- ных ромбоэдрических доменов.

Соответствующее уменьшение tg вызвано частичным снятием начальных механических напряжений, возникающих в результате упомянутых выше обратимых поворотов доменов. При отрицательных значениях Е поляризация направлением приложенного совпадает с керамики постоянного поля. Уменьшение $\varepsilon_{33}^{S/}$ и увеличение tg δ , в этом случае, вызвано дополнительной поляризацией пьезокерамики в результате упомянутых выше отличных от 180°-ых обратимых поворотов доменов. Наблюдаемый на рисунке 9 гистерезис полевых зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости сегнетомягкой пьезокерамики обусловлен, в основном, доменно-ориентационными процессами. Процессы релаксации объемного заряда, в случае, нашем являются несущественными из-за использования малых величин электрического поля Е и больших времен выборки последовательных импедансных спектров (~3 с).



Рисунок 10 - Экспериментальные зависимости действительной $|d'_{31}|$ (а) и мнимой $|d''_{31}|$ (б) частей пьезоэлектрического модуля от постоянного электрического поля *E* для радиальной моды растяжения пьезокерамического диска ПКР-1

Характер зависимостей действительной $|d'_{31}|$ и мнимой $|d''_{31}|$ частей пьезоэлектрического модуля сегнетомягкой пьезокерамики ПКР-1 от постоянного электрического поля *E* (рис. 10) для первоначально совпадающих направлений *E* и *P* обусловлен, главным образом, отмеченными выше 90°- ми (71°-, 109°- ми) обратимыми поворотами доменов, а также вызванными ими механическими напряжениями. Отмеченные в ряде работ процессы релаксации пространственного заряда, в нашем случае, малосущественны из-за низких значений постоянного поля и времени выборки для последовательных импедансных спектров (~ 3 с).



Рисунок 11 - Временные зависимости действительной $|d'_{31}|$ (а) и мнимой $|d''_{31}|$ (б) частей пьезомодуля при приложении электрического поля E = 200 В/мм



Рисунок 12 - Временные зависимости действительной $|d'_{31}|$ (а) и мнимой $|d''_{31}|$ (б) частей пьезомодуля при приложении электрического поля E = -200 В/мм

Временные зависимости действительной и мнимой частей пьезомодуля $|d_{31}|$ (рис. 11 и 12) были получены путем анализа последовательно измеренных импедансных спектров для радиальной моды колебаний тонкого пьезокерамического диска ПКР-1 при воздействии постоянного электрического поля различной полярности. Поскольку керамические образцы ранее были поляризованы в сильном электрическом поле, воздействие на них слабого постоянного электрического поля может привести лишь к небольшим изменениям параметров пьезокерамики. пьезоэлектрических В целом, дополнительная поляризация поляризованной пьезокерамики должна приводить к увеличению пьезомодуля $|d_{31}|$, а его частичная деполяризация - к уменьшению $|d_{31}|$. Эти изменения зависят от полярности приложенного поля и определяются, главным 180° образом, обратимыми поворотами отличных от доменов, а также трансформацией объемного заряда в пьезокерамике.

При приложении положительного электрического поля направления Е и Р пьезокерамики совпадают. Действительная часть пьезомодуля $|d'_{31}|$ резко возрастает за ~30 секунд (рис. 11 (a)) за счет дополнительной поляризации пьезокерамики в результате обратимых 90°- ных (71°-, 109°- ных) поворотов доменов. Это увеличение $|d'_{31}|$ сопровождается резким ростом мнимой части пьезомодуля $|d_{31}^{\prime\prime}|$ (рис. 11 (б)), вызванным механическими напряжениями, которые возникают в результате обратимых поворотов доменов. Последующие релаксации $|d'_{21}|$ к установившемуся значению вызваны частичными обратными 90°- ми (71°-, 109°- ми) поворотами доменов в исходное положение, вызванными механическими напряжениями и экранированием приложенного поля носителями предотвращающими дальнейшую пространственного заряда, поляризацию. Соответствующая релаксация мнимой части пьезомодуля $|d_{31}^{//}|$ вызвана частичным снятием механических напряжений в результате обратных переориентаций 90°-ных (71°-, 109°-ных) доменов. Наблюдаемые на графиках колебания зависимостей отражают отдельные акты переключения доменов.

Приложение отрицательного электрического поля Е, противоположного направлению остаточной поляризации Р пьезокерамики, приводит к резкому падению действительной части пьезомодуля $|d'_{31}|$ (рис. 12 (a)) в течение ~30 секунд из-за частичной деполяризации пьезокерамики, вызванной обратными 90°-ми (71°-, 109°-ми) поворотами доменов. Последующая пульсирующая стационарному значению релаксация к вызвана частичной обратной 90°-ных (71°-, 109°-ных) переориентаций доменов И экранированием приложенного поля носителями объемного заряда, которые «замораживают» доменные стенки. Уменьшение $|d'_{31}|$ сопровождается резким уменьшением мнимой части пьезомодуля $|d_{31}^{\prime\prime}|$ (рис. 12 (б)) в результате снятия начальных механических напряжений, вызванных исходной поляризацией пьезокерамики, с последующей осциллирующей релаксацией к установившемуся значению. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в работах, посвященных ультразвуковому исследованию доменно-ориентационных процессов в пьезокерамике под действием постоянного электрического поля.

Также установлено, что последовательные измерения с заданным временем дискретизации и анализ импедансных спектров толщинной и радиальной мод колебаний тонких пьезокерамических дисков с использованием программы PRAP [10] допускает получение и анализ временных и полевых зависимостей соответствующих комплексных характеристик сегнетомягкой пьезокерамики, обусловленных доменно-ориентационными, релаксационными и переходными процессами.

В *третьем* разделе рассмотрены основные аспекты теоретического и численного моделирования волновых процессов и особенностей формирования ультразвуковых полей в сегнетоактивных и диссипативных средах.

В подразделе 3.1 выполнены теоретические расчеты и численное фокусированных полей моделирование акустических малой амплитуды, создаваемых сферически фокусирующими ультразвуковыми преобразователями. Приведены примеры расчетов линейной фокусировки ультразвукового пучка с использованием точного решения для интеграла Рэлея (для излучателя в виде сферического сегмента с центральным отверстием). Получены распределения интенсивности и мощности тепловых источников на оси излучателя и в фокальной плоскости. Получены также двумерные пространственные распределения поля ультразвукового излучателя в масле, рассчитанные численно с использованием интеграла Рэлея для различных возбуждающих частот И начальных интенсивностей ультразвука. Выполненные расчеты показали, что интеграл Рэлея достаточно точно описывает акустическое поле вогнутого фокусирующего преобразователя в предположении, что длина излучаемой волны много меньше радиуса кривизны, а угол фокусировки мал. Разработанный метод численного расчета может быть использован для оптимизации акустических полей и конструкций HIFU преобразователей медицинского назначения [A14 - A17].

В подразделе 3.2 рассмотрены особенности теоретического описания и моделирования акустических полей высокой численного интенсивности, генерируемых сферическими фокусирующими ультразвуковыми Проанализированы особенности выделения преобразователями. тепла при поглощении нелинейных волн, проведены численные расчеты нелинейных полей и тепловых источников при фокусировке ультразвука в масле. Главным результатом настоящего раздела диссертационной работы является разработка математических моделей и эффективного численного алгоритма для решения аксиальносимметричного уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова (ХЗК). Он может быть использован для подбора параметров излучателя для конкретной задачи и вычисления HIFU поля и соответствующих тепловых источников в биологической ткани для последующей оценки тепловых эффектов [А14].

Подраздел 3.3 посвящен численному моделированию и оптимизации конструкций и ультразвуковых полей ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности, изготовленных из сегнетожесткой пористой пьезокерамики, с использованием разработанных в предыдущих разделах подходов и алгоритмов. Показано, что линейное акустическое поле сферического элемента вблизи фокуса с хорошей точностью аппроксимируется акустическим полем эквивалентного источника поршневого типа, рассчитанного в параболическом приближении дифракционной теории. Результаты исследования показали, что использование сегнетожесткой пористой пьезоэлектрической керамики в HIFU преобразователях имеет существенные преимущества по сравнению с плотной керамикой. Эти преимущества обусловлены высокой адаптивностью пористой пьезокерамики, лучшим акустическим согласованием с биологическими тканями, отсутствием колебательных паразитных режимов И высокой электромеханической эффективностью [А18, А19].

В подразделе 3.4 представлены результаты аналитического и конечноэлементного исследования высокоинтенсивных ультразвуковых полей внутри цилиндрического пьезокерамического преобразователя, заполненного вязкой жидкостью. С помощью конечно-элементного моделирования продемонстрирована возможность формирования высокоинтенсивного ультразвукового поля стоячих цилиндрических волн с использованием его продольных и толщинных мод колебаний. Полученные результаты и разработанные цилиндрические преобразователи использованы в экспериментах по ультразвуковой обработке биологических тканей и тяжелых сортов нефти [А19 - А23].

В *четвертом* разделе представлены результаты экспериментального исследования особенностей формирования и тепловыделения в фокусированных ультразвуковых полях и полях ультразвуковых стоячих волн в диссипативных средах [A24 - A30].

подразделе 4.1 B представлены результаты экспериментального исследования процессов нагрева и тепловой релаксации при воздействии ультразвуковых волн различной частоты и интенсивности в вязкоупругой среде, в качестве которой использовался полиуретан Силагерм 5020 1/3. Для возбуждения ультразвуковых волн использовался плоский ультразвуковой преобразователь с охлаждаемой поверхностью с рабочей частотой от 2 до 7 МГц и излучаемой акустической мощностью до 20 Вт. Было показано, что времена выхода на насыщение и достижения теплового равновесия определяются конкурирующим влиянием ультразвукового нагрева, теплопроводности и охлаждения поверхности образца. Полученные результаты, а также модельные образцы, измерительные стенды и методики, разработанные в настоящей работе, могут быть использованы при конструировании и калибровке ультразвуковой медицинской терапевтической и косметической аппаратуры.

В подразделе 4.2 приведены результаты экспериментального исследования влияния различных дефектов и неоднородностей формы и размера фокусирующих пьезоэлементов, а также элементов конструкции ультразвуковых HIFU преобразователей, теоретическое и численное моделирование которых было проведено в 3 разделе, на особенности формируемых ими акустических полей.



Рисунок 13 - Распределения акустического давления в фокальной плоскости HIFU преобразователя с фокусирующим элементом из сегнетожесткой пористой пьезокерамики на частотах возбуждения 1.61 МГц (а) и 1.64 МГц (б)

Измерение и картирование акустических полей HIFU преобразователей производились в сканирующей ультразвуковой ванне UMS3 с использованием калиброванных игольчатых PVDF гидрофонных зондов. Из рисунка 13 видно, что изменения частоты возбуждения HIFU преобразователя в интервале между резонансной и антирезонансной частотами сферического фокусирующего пьезоэлемента приводят к изменению формы и уровня боковых лепестков основного максимума. Такие изменения вызваны изменениями мод собственных колебаний сферического фокусирующего элемента (волны Лэмба) на разных частотах. Это предположение подтверждается конечно-элементными (FEM) расчетами мод собственных колебаний сферического резонанса (рис. 14 (а)) и антирезонанса (рис. 14 (б)).



Рисунок 14 - Моды собственных колебаний сферического фокусирующего элемента, полученные в результате FEM моделирования с использованием программного пакета ANSYS, на частотах электрического резонанса (а) и антирезонанса (б)

Показано, что любые неоднородности формы и размеров фокусирующего пьезокерамического элемента, флуктуации рабочей частоты, а также конструктивные особенности преобразователей (корпус, мембрана и т.д.) существенно влияют на параметры акустического поля (давление, уровень боковых лепестков и т.д.). Отмечено, что пористые фокусирующие элементы, по аналогии с композитами 1-3 связности, обладают низким акустическим сопротивлением, более высокой электромеханической активностью и низкими паразитными колебаниями, что обеспечивает низкий уровень боковых лепестков и высокую акустическую эффективность преобразователей.

В подразделе 4.3 описан новый метод комбинационного терапевтического воздействия на поверхностные ткани пациента, который основан на последовательном или одновременном приложении конструктивно интерферирующих биологически и физически значимых факторов воздействия: ультразвуковых цилиндрических стоячих волн (ЦУСВ), нагревом радиочастотным током (РЧ) и вакуумным массажем. В отличие от всех существующих нефокусированных и HIFU систем, для ЦУСВ характерна полная локализация ультразвуковой энергии в целевой области тела пациента, параллельно контуру тела. Генерация полей РЧ и ЦУСВ синхронно на одной частоте приводит к многорезонансным движениям ионов и интенсифицирует РЧ абляцию. В свою очередь, РЧ нагрев усиливает воздействие ЦУСВ и кавитационный лизис ткани.

Вакуумный массаж дополнительно усиливает синергетическую комбинацию ЦУСВ и радиочастотного тока и обеспечивает реальную комбинационную обработку биологических тканей (рис. 15).



Рисунок 15 - Терапевтический модуль (а), синергетическая комбинация полей РЧ и ЦУСВ (б) и результирующая термическая модификация говяжьей печени (в) (вид в разрезе)

Предложенное комбинационное воздействие на поверхностные ткани не является тривиальным, поскольку только в разработанной конструкции терапевтического модуля поля ЦУСВ, РЧ и вакуумное воздействие накладываются синхронно и совпадают пространственно, обеспечивая новые биологические и физические эффекты.

В заключении сформулированы *основные научные результаты и выводы* диссертации:

1. Разработан метод исследования частотных зависимостей комплексных электромеханических параметров сегнетопьезокерамических материалов, основанный на анализе импедансных спектров высших обертонов толщинной моды колебаний пьезоэлементов.

2. Установлены корреляционные связи между особенностями микроструктуры и частотными зависимостями комплексных характеристик в бессвинцовой горячепрессованной пьезокерамике на основе твердых растворов ниобата натрия-лития ПКР-35 в диапазоне частот от 9 до 90 МГц.

3. Получен полный набор комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров бессвинцовой горячепрессованной пьезокерамики на основе твердых растворов ниобата натрия-лития ПКР-35.

4. Обнаружены области аномальной дисперсии электромеханических свойств пористых сегнетопьезокерамик и установлены основные механизмы, определяющие несинфазный отклик пьезокерамических материалов на внешние воздействия.

5. Установлено, что дисперсионные характеристики комплексных упругих и электромеханических характеристик горячепрессованной текстурированной пьезокерамики ПКР-50 в диапазоне частот до 50 МГц определяются микроструктурными особенностями слоистых сегнетоэлектриков на основе висмутсодержащих соединений, влияние которых становится более выраженным на высоких частотах.

6. Показано, что различия комплексных электромеханических параметров и ИХ частотных зависимостей ДЛЯ различных срезов текстурированных горячепрессованных пьезокерамик ПКР-50 в диапазоне частот до 50 МГц степенью преимущественной ориентации И особенностями обусловлены расположения пластинчатых кристаллитов, ориентированных и поляризованных параллельно (E||P) и перпендикулярно (E⊥P) оси давления (P) при горячем прессовании.

7. Показано, что разработанный метод комплексной характеризации сегнетоэлектриков, основанный на анализе пьезорезонансных спектров, позволяет исследовать механизмы доменно-ориентационных, релаксационных и переходных процессов в сегнетокерамике с учетом несинфазного отклика материала на внешние воздействия.

8. Установлены физические механизмы, определяющие доменноориентационные, переходные и релаксационные процессы в сегнетомягкой пьезокерамике на основе ЦТС (ПКР-1) под действием слабых электрических полей.

9. Установлено, что экспериментально наблюдаемый гистерезис полевых зависимостей, а также релаксационный характер временных зависимостей комплексных характеристик сегнетомягкой пьезокерамики ПКР-1 при воздействии слабых постоянных электрических полей, меньших коэрцитивного, обусловлен обратимыми переориентациями 90°-ных (71°-, 109°-ных) доменов, приводящими к изменению остаточной поляризации, и процессами экранирования приложенного электрического поля носителями объемного заряда.

10. На основе конечно-элементного и конечно-разностного моделирования, а также микроструктурных исследований, электрофизических и ультразвуковых измерений определены особенности волновых процессов и основные закономерности формирования ультразвуковых полей в сегнетоактивных и диссипативных средах.

11. Теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность пространственной и временной локализации энергии в фокусированных ультразвуковых полях и полях ультразвуковых стоячих волн, обеспечивающей экстремальное тепловыделение в диссипативных средах.

12. Установлено, что предсказанная в результате конечно-элементного моделирования и экспериментально обнаруженная пространственная и временная локализация ультразвуковой энергии, обеспечивающая экстремальное тепловыделение в диссипативных биологических и жидких средах, достигается посредством генерации цилиндрических стоячих волн внутри цилиндрического пьезоэлектрического преобразователя с использованием его продольных и толщинных мод колебаний.

13. Разработаны конструкции ультразвуковых преобразователей и новые методы формирования фокусированных ультразвуковых полей высокой интенсивности в вязкоупругих средах.

14. Показано, что разработанный метод, основанный на синергетическом взаимодействии радиочастотного тока и ультразвуковых цилиндрических стоячих волн, обеспечивает контролируемую эффективную локальную модификацию биологических тканей при минимальных временах и уровнях воздействия за счет взаимного усиления радиочастотного и ультразвукового нагрева.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heywang, W. Piezoelectricity, evolution and future of a technology / W. Heywang, K. Lubitz, W. Wersing. - Berlin : Springer, 2008. - 581 p.

2. Setter, N. Piezoelectric material and devices / N. Setter. - Lausanne, Switzerland : Swiss Federal Institute of Technology, 2002. - 518 p.

3. Topolov, V. Yu. Electromechanical properties in composites based on ferroelectrics / V. Yu. Topolov, C. R. Bowen. - London : Springer, 2009. - 202 p.

4. Kwok, K. W. Evaluation of the material parameters of piezoelectric materials by various methods / K. W. Kwok, H. L. W. Chan, C. L. Choy // IEEE Trans. on Ultrasonics. Ferroelectrics and Frequency Control. - 1997. - V. 44. - N 4. - P. 733-740.

5. Smits, J. G. Iterative method for accurate determination of the real and imaginary parts of the materials coefficients of piezoelectric ceramics / J. G. Smits // IEEE Trans. Sonics Ultrason. - 1976. - SU-23. - N 6. - P. 393-402.

6. Mukherjee, B. K. Characterization of piezoelectric and electrostrictive materials for acoustic transducers: resonance methods / B. K. Mukherjee, S. Sherrit // Proc. Fifth International Congress on Sound and Vibration. - 1997. - V. 1. - P. 385.

7. Ramesh, R. Finite element modeling of dense and porous piezoceramic disks / R. Ramesh, H. Kara, C. R. Bowen // Ultrasonics. - 2005. - V. 43. - P. 173-181.

8. Shchurova, E. I. Modeling of the ceramics structure for the finite element analysis / E. I. Shchurova // Procedia Engineering. - 2016. - V. 150. - P. 179-184.

9. Gonzalez, A. M. Determination of the frequency dependence of characteristic constants in lossy piezoelectric materials / A. M. Gonzalez, C. Alemany // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1996. - V. 29. - P. 2476.

10. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Programme). TASI Technical Software Inc. (<u>www.tasitechnical.com</u>).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

A1. Application of the Impedance Spectroscopy Method for the Study of Relaxation Processes in Ferroelectric Ceramics / **I. A. Shvetsov**, E. I. Petrova, N. A. Shvetsova [et al.] // Ferroelectrics. - 2020. - V. 561. - I. 1. - P. 69-74. - DOI 10.1080/00150193.2020.1736917.

A2. Complex Elastic, Dielectric and Piezoelectric Parameters of Lead-Free Ferroelectric Ceramics / A. N. Rybyanets, M. A. Lugovaya, **I. A. Shvetsov** [et al.] // Journal of Nano- and Electronic Physics. - 2018. - V. 10. - N 1. - P. 01012-1-01012-4. - DOI 10.21272/jnep.10(1).01012.

A3. Frequency Dependences of Complex Constants of Lead-Free Ferroelectric Ceramics / **I. A. Shvetsov**, M. A. Lugovaya, E. I. Petrova [et al.] // Ferroelectrics. - 2020. - V. 561. - I. 1. - P. 142-147. - DOI 10.1080/00150193.2020.1736927.

A4. Microstructure characterization and properties of porous piezoceramics / N. A. Shvetsova, **I. A. Shvetsov**, M. A. Lugovaya [et al.] // Journal of Advanced Dielectrics. - 2022. - V. 12. - N 2. - P. 2160006-1 - 2160006-4. - DOI 10.1142/S2010135X21600067.

A5. Elastic, dielectric, and piezoelectric losses in ceramic-matrix piezocomposites PZT/α -Al₂O₃ / N. A. Shvetsova, M. A. Lugovaya, **I. A. Shvetsov** [et al.] // Ferroelectrics. - 2021. - V. 576. - N 1. - P. 106-110. - DOI 10.1080/00150193.2021.1888267.

А6. Микроструктурные особенности и электрофизические характеристики керамоматричных композитов «керамика-кристалл» / М. А. Луговая, **И. А. Швецов**, Н. А. Швецова [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. - 2018. - Т. 82. - № 3. - С. 356-359. - DOI 10.7868/S0367676518030201.

A7. Microstructural features and electromechanical characteristics of ceramic-matrix piezocomposites / M. A. Lugovaya, E. I. Petrova, **I. A. Shvetsov** [et al.] // Ferroelectrics. - 2021. - V. 575. - N 1. - P. 24-28. - DOI 10.1080/00150193.2021.1888221.

A8. Dispersion characteristics of complex electromechanical parameters of porous piezoceramics / **I. A. Shvetsov**, M. A. Lugovaya, M. G. Konstantinova [et al.] // Journal of Advanced Dielectrics. - 2022. - V. 12. - N 2. - P. 2160004-1 - 2160004-5. - DOI 10.1142/s2010135x21600043.

A9. Elastic Losses and Dispersion in Porous Piesoceramics / M. A. Lugovaya, I. A. Shvetsov, N. A. Shvetsova [et al.] // Ferroelectrics. - 2021. - V. 571. - N 1. - P. 263-267. - DOI 10.1080/00150193.2020.1736909.

А10. Исследование релаксационных и переходных процессов в сегнетопьезокерамике с использованием метода импедансной спектроскопии / И. А. Швецов, М. А. Луговая, Н. А. Швецова [и др.] // Письма в ЖТФ. - 2020. - Т. 46. - Вып. 8. - С. 14-17. - DOI 10.21883/PJTF.2020.08.49301.18207.

А11. Исследование нелинейных процессов в сегнетоэлектрической керамике в слабых электрических полях / Н. А. Швецова, С. А. Щербинин, **И. А. Швецов** [и др.] // Письма в ЖТФ. - 2020. - Т. 46. - Вып. 14. - С. 39-42. - DOI 10.21883/PJTF.2020.14.49666.18224.

A12. The study of domain orientation processes in ferroelectric ceramics in weak electric fields / N. A. Shvetsova, S. A. Shcherbinin, **I. A. Shvetsov** [et al.] // Ferroelectrics. - 2021. - V. 576. - N 1. - P. 100-105. - DOI 10.1080/00150193.2021.1888266.

A13. Study of transient and relaxation processes in ferroelectric ceramics in weak electric fields / **I. A. Shvetsov**, N. A. Shvetsova, S. A. Shcherbinin [et al.] // Ferroelectrics. - 2021. - V. 576. - N 1. - P. 94-99. - DOI 10.1080/00150193.2021.1888265.

A14. Theoretical Calculations and Numerical Modeling of High Intensity Ultrasonic Fields for Optimization of High Intensity Focused Ultrasound Transducers / A. N. Rybyanets, N. A. Shvetsova, **I. A. Shvetsov** [et al.] // Indian Journal of Science and Technology. - 2016. - V. 9. - I. 42. - P. 342-354. - DOI 10.17485/ijst/2016/v9i42/104301.

A15. New Methods of Complex Therapeutic Treatment and Accelerated Regeneration of Superficial Tissues of a Patient / **I. A. Shvetsov**, N. A. Shvetsova, A. N. Reznitchenko, A. N. Rybyanets // Advanced Materials - Techniques, Physics, Mechanics and Applications - Proceedings of the 2016 International Conference on "Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications", PHENMA 2016 / Ivan A. Parinov, Chang, Shun-Hsyung, Muaffag A. Jani. - Cham, Switzerland: Springer Proceedings in Physics, 2017. - V. 193. – Ch. 46. - P. 545-563. - DOI 10.1007/978-3-319-56062-5_46.

A16. Nanoparticles Transport Using Polymeric Nano- and Microgranules: Novel Approach for Advanced Material Design and Medical Applications / A. N. Rybyanets, **I. A. Shvetsov**, M. A. Lugovaya [et al.] // Journal of Nano- and Electronic Physics. - 2018. - V. 10. - N 2. - P. 02005-1-02005-6. - DOI 10.21272/jnep.10(2).02005.

A17. Finite difference simulation and experimental study of ultrasonic waves propagation in inhomogeneous piezoelectrically active composites / M. A. Lugovaya, E. I. Petrova, **I. A. Shvetsov** [et al.] // Ferroelectrics. - 2019. - V. 539. - I. 1. - P. 63-70. - DOI 10.1080/00150193.2019.1570013.

A18. Numerical Simulation and Optimization of Acoustic Fields and Designs of Composite HIFU Transducers / A. N. Rybyanets, **I. A. Shvetsov**, E. I. Petrova [et al.] // Ferroelectrics. - 2019. - V. 543. - I. 1. - P. 48-53. - DOI 10.1080/00150193.2019.1592447.

А19. Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности / **И. А. Швецов**, С. А. Щербинин, П. А. Астафьев [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. - 2018. - Т. 82. - № 3. - С. 405-408. - DOI 10.7868/S0367676518030328.

А20. Конечно-элементное моделирование низкочастотных биморфных преобразователей для диагностики и активации нефтяных скважин / А. Н. Рыбянец, А. В. Наседкин, С. А. Щербинин, Е. И. Петрова, Н. А. Швецова, **И. А. Швецов**, М. А. Луговая // Акустический журнал. - 2017. - Т. 63. - № 6. - С. 685-691. - DOI 10.7868/S0320791917060120.

А21. Конечно-элементное моделирование и экспериментальное исследование цилиндрических фокусирующих пьезопреобразователей / С. А. Щербинин, И. А. Швецов, А. В. Наседкин [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. - 2018. - Т. 82. - № 3. - С. 402-404. - DOI 10.7868/S0367676518030316.

A22. Finite element simulation of ultrasonic standing wave fields inside cylindrical piezoelectric transducers / S. A. Shcherbinin, **I. A. Shvetsov**, A. V. Nasedkin [et al.] // Ferroelectrics. - 2019. - V. 539. - I. 1. - P. 112-117. - DOI 10.1080/00150193.2019.1570020.

А23. Волновой резонанс и сверхзвуковая генерация сдвиговых волн в диссипативных средах / А. Н. Рыбянец, Н. А. Швецова, **И. А. Швецов**, Е. И. Петрова // Известия РАН. Серия физическая. - 2019. - Т. 83. - № 9. - С. 1169-1173. - DOI 10.1134/S0367676519090230.

А24. Процессы тепловой релаксации в вязкоупругих средах при воздействии ультразвуковых волн / А. Н. Рыбянец, С. А. Щербинин, **И. А. Швецов**, Д. И. Макарьев // Известия РАН. Серия физическая. - 2020. - Т. 84. - № 12. - С. 1808-1811. - DOI 10.31857/S0367676520120315.

A25. Ultrasonic transducer designs for combinational treatment of biological tissues / N. A. Shvetsova, **I. A. Shvetsov**, M. A. Lugovaya [et al.] // Ferroelectrics. - 2019. - V. 539. - I. 1. - P. 126-133. - DOI 10.1080/00150193.2019.1570000.

A26. HIFU Transducers Designs and Ultrasonic Treatment Methods for Biological Tissues / A. N. Rybyanets, **I. A. Shvetsov**, S. A. Shcherbinin [et al.] // Journal of Nano- and Electronic Physics. - 2018. - V. 10. - N 2. - P. 02043-1-02043-3. - DOI 10.21272/jnep.10(2).02043.

А27. Новые методы и конструкции фокусирующих пьезопреобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии / Н. А. Швецова, Д. И. Макарьев, И. А. Швецов [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. - 2018. - Т. 82. - № 3. - С. 293-298. - DOI 10.7868/S0367676518030067.

A28. Experimental study of high intensity focused ultrosonic fields generated by piezocomposite transducers / **I. A. Shvetsov**, S. A. Shcherbinin, N. A. Shvetsova [et al.] // Ferroelectrics. - 2019. - V. 539. - I. 1. - P. 118-125. - DOI 10.1080/00150193.2019.1570021.

A29. Combinational Radiofrequency Electromagnetic and Ultrasonic Method for Medical Applications / N. A. Shvetsova, I. A. Shvetsov, M. A. Lugovaya [et al.] // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) - 2021. - P. 377-380. - DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494088.

А30. Патент № 2748502 С1 Российская Федерация, МПК А61Н 23/00, А61N 7/00, А61N 7/02, Н01L 41/00. Способ комплексной косметической обработки поверхностных тканей пациента и устройство для его осуществления : № 2020115704 : заявл. 12.05.2020 : опубл. 26.05.2021, Бюл. №15 / А. Н. Рыбянец, Н. А. Колпачева, И. А. Швецов, Н. А. Швецова. - 17 с: ил.