

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Мартиросян Ирина Валерьевна

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
СОСТОЯНИЙ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
КОМПОЗИТАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2023 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

Руднев Игорь Анатольевич,

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика твердого тела и наносистем» (№70) НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Гохфельд Денис Михайлович, доктор ф.-м.н., старший научный сотрудник Института физики Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатории Сильных магнитных полей

Кузьмичев Николай Дмитриевич, доктор ф.-м.н., профессор Рузаевского института машиностроения (филиала) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», кафедры Конструкторско-технологической информатики

Зубко Василий Васильевич, доктор т.н., главный научный сотрудник ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности», г. Москва

Защита состоится «21» июня 2023 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.1.04 НИЯУ МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/>

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, ученому секретарю диссертационного совета МИФИ.1.04.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МИФИ.1.04,

доктор физико-математических наук, доцент

Руднев Игорь Анатольевич

Общая характеристика работы

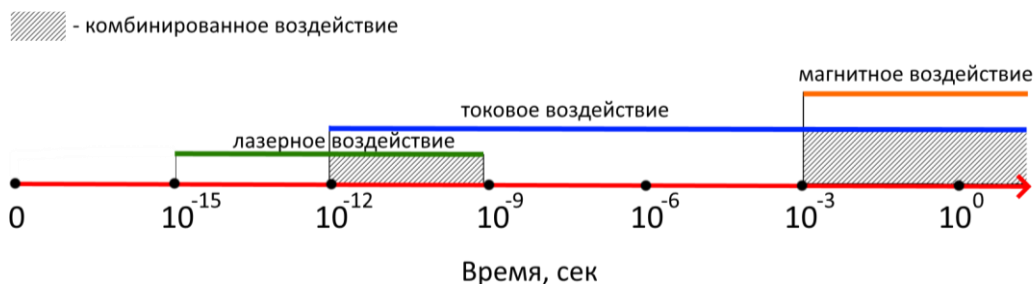
Актуальность темы исследования. Исследование динамических состояний в сверхпроводниках является не только одной из актуальных фундаментальных задач физики твердого тела, но и основой для практического применения этих материалов в магнитных и электрических системах.

Сверхпроводящее состояние в сверхпроводнике ограничено так называемой критической поверхностью и зависит от трех основных критических параметров: критической температуры T_c , критического магнитного поля H_c (H_{c2}) и критической плотности тока J_c . При магнитных и токовых воздействиях для сверхпроводников II рода характерно возникновение напряжения, связанное с началом движения вихрей Абрикосова. Когда плотность тока J (транспортного или наведенного) превышает J_c сверхпроводника, под действием силы Лоренца происходит движение магнитных вихрей (режим течения магнитного потока). При $J < J_c$, движение вихрей может быть связано с медленными термоактивированными перескоками вихрей между центрами пиннинга (крип магнитного потока). При этом любое движение вихрей неизбежно приводит к тепловыделению и энергетическим потерям и является примером динамического состояния (ДС), способного при определенных условиях привести к развитию тепловой неустойчивости и резистивному S-N (сверхпроводящее – нормальное состояние) переходу. Повышение температуры в системе, как в случае термического воздействия, так и в случае тепловыделения вследствие движения магнитного потока, напрямую связано с влиянием тепловых флуктуаций на взаимодействие вихрей Абрикосова с центрами пиннинга и приводит к заметному уменьшению реальной плотности критического тока в сверхпроводниках II рода. В случае прямого термического воздействия наиболее интересным с точки зрения изучения механизма генерации ДС, обусловленных тепловым депиннингом магнитных вихрей, является, например, быстрый локальный нагрев материала, который может быть реализован с использованием лазерного излучения длительностью десятки пикосекунд и более. Таким образом, магнитное, токовое и лазерное воздействия являются тремя основными видами воздействий, приводящих к возникновению термоиндуцированных динамических состояний. Однако тепловые процессы являются не единственной возможной причиной формирования ДС в сверхпроводниках. Динамические состояния также могут возникать вследствие распаривания куперовских пар, являющимися носителями заряда в сверхпроводниках. В этом случае внешние

воздействия, как правило, субпикосекундной и фемтосекундной длительности приводят к формированию неравновесных состояний (НС) без термического воздействия на образец. Неравновесные состояния являются частным случаем динамических состояний и на практике наиболее просто реализуются с использованием ультракороткого лазерного воздействия.

Несмотря на интенсивное изучение высокотемпературных сверхпроводников в последние годы, многие вопросы остаются актуальными: какие виды воздействий и при каких условиях приводят к формированию динамических состояний, какой механизм генерации ДС формируется при заданном типе и режиме воздействия, какова динамика развития ДС в случае преобладания тепловых процессов и в случае прямого распаривания куперовских пар, каковы механизмы и особенности неравновесного отклика системы на различные виды возбуждающих воздействий – все эти вопросы имеют важное фундаментальное и практическое значение. Для ответа на них необходимо проведение комплекса экспериментальных и численных исследований, а также анализ в совокупности результатов исследований динамики развития ДС в сверхпроводниках при внешних воздействиях различной длительности.

В рамках диссертационной работы в качестве основных воздействий, приводящих к формированию ДС в сверхпроводниках, выбраны три вида: магнитное, токовое и лазерное. Ниже на временной шкале представлена диаграмма исследованных времен воздействия и типов внешних возбуждений, соответствующих этим временам.



Выявление закономерностей развития динамических состояний, а также механизмов и условий их генерации является одной из ключевых задач не только с точки зрения формирования представлений о физических причинах быстроразвивающихся процессов в сверхпроводниках второго рода, но и с точки зрения практического применения этих материалов в коммутирующих устройствах, быстродействующих переключателях и других электрических и магнитных системах.

Актуальность данной работы также подтверждается выполнением отдельных исследований в рамках государственных контрактов и договоров, научно-

исследовательских проектов, финансируемых Российским научным фондом (РНФ), Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), фондом «Талант и успех», госкорпорацией Росатом, ФЦП «Приоритет 2030».

Объекты и методология исследований. В качестве объекта исследований выбран ленточный высокотемпературный сверхпроводящий композит на основе соединения типа $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (REBCO, где RE – редкоземельный элемент). Выбор REBCO в качестве объекта исследования обусловлен, главным образом, наличием в литературных источниках широкого набора экспериментальных данных о структуре и свойствах этого материала. Эти данные (например, анизотропный коэффициент теплопроводности, коэффициент отражения, коэффициент вязкости при плавлении и т.д.) могут быть использованы в качестве входных параметров численных моделей, а также для сравнения результатов расчетов и экспериментальных исследований. REBCO в виде композитных ВТСП лент обладает рядом преимуществ, такими как прочность, гибкость, хорошая теплопроводность, легкость термостабилизации и др., а главное – высокие критические характеристики. Поскольку при производстве ВТСП лент используются новейшие современные технологии лазерного напыления, такие ленты также получили название ВТСП ленты второго поколения или 2G ВТСП ленты (2G - 2nd generation). Ввиду сложной слоистой архитектуры и наличия функциональных покрытий, ВТСП ленты также часто называют композитными ВТСП лентами или ВТСП композитами, а также СС-ВТСП лентами (СС – coated conductor – проводник с покрытием). Такие названия наиболее часто упоминаются в литературных источниках и применяются в рамках диссертационной работы для обозначения одного и того же объекта исследований – REBCO ВТСП лент на металлической подложке. В рамках представленной работы рассмотрены характеристики ВТСП лент нескольких производителей, но основная часть результатов получена с использованием 2G ВТСП лент промышленного производства российских компаний СуперОкс и С-Инновации, в которых в качестве редкоземельного элемента выступает Gd или Y.

Исследование механизмов генерации и закономерностей развития динамических состояний было выполнено для трех основных видов внешних возбуждающих воздействий, отличающихся характерными временами: магнитное (от миллисекунд до десятков секунд), токовое (от сотен пикосекунд до нескольких секунд), лазерное (от десятков фемтосекунд до сотен пикосекунд), а также для комбинированных типов этих

воздействий. В качестве основных **экспериментальных методов** исследования использовались:

- измерение кривых намагничивания
- измерение магнито-силового взаимодействия в градиентных магнитных полях (силы левитации);
- накачка импульсами магнитного поля (flux-pump);
- низкотемпературная сканирующая холловская магнитометрия;
- низкотемпературная магнитооптическая визуализация магнитного потока в сверхпроводниках;
- транспортные измерения ВАХ ВТСП при быстропротекающих токовых процессах;
- высокоскоростная визуализация тепловых процессов в ВТСП композитах при критических токовых нагрузках;
- оптические измерения методом накачка-зондирование с использованием фемтосекундного лазера (pump-probe спектроскопия)

Для моделирования исследуемых процессов использовались следующие **численные методы**:

- численное решение нестационарных уравнений Максвелла в двусторонней связке с нестационарным уравнением теплопередачи в твердых телах;
- численное решение нестационарного уравнения теплопередачи в твердых телах в модели динамического сопротивления;
- расчет динамических характеристик системы с использованием модели эквивалентной электрической цепи;
- численное решение нестационарного уравнения теплопередачи в модели двухфазной зоны.

Исследовались нестационарные процессы как в отдельных ВТСП лентах, так и в композициях, представленных в виде стопок композитных ВТСП лент. Характеристики самих ВТСП композитов, включая их архитектуру, а также геометрические и критические параметры, подбирались индивидуально в зависимости от вида и целей исследования и приводятся отдельно для каждого исследованного случая. В зависимости от вида проводимого исследования, диапазоны температур, транспортных токов, магнитных полей и энергий лазерного излучения, приводящих к формированию динамических состояний, могли отличаться (Таблица 1).

Таблица 1. Диапазоны воздействующих факторов

Параметр	Диапазон
Температура	4 – 300 К
Транспортный ток	$< 3.3 J_c$ в импульсе
Внешнее магнитное поле	0 – 5 Тл
Энергия лазерного излучения	10 - 600 мкДж/см ²

Целью диссертационной работы является установление закономерностей и физических механизмов развития динамических состояний в высокотемпературных сверхпроводящих композитах при магнитном, токовом и лазерном воздействиях различной длительности.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

1. На основе метода конечных элементов разработаны численные модели для анализа и прогнозирования динамики термоиндуцированных динамических состояний в ВТСП композитах при магнитных, токовых и лазерных воздействиях длительности десятки пикосекунд и более. Разработан алгоритм расчета динамического сопротивления ВТСП слоя композитных лент при импульсных токовых нагрузках. Разработана модель на основе подхода эквивалентной электрической цепи для прогнозирования ВАХ ВТСП при быстропротекающих токовых процессах.
2. В интервале магнитных полей от 0 до 3 Тл и диапазоне температур от 5 К до 77.4 К проведено численное моделирование динамики магнитного потока в ВТСП композитах в условиях изменяющегося однородного и градиентного внешнего магнитного поля. Выполнен численный анализ магнитных и левитационных характеристик ВТСП образцов, подверженных однократному и циклическому воздействию внешнего градиентного магнитного поля. Проведено сравнение с экспериментальными результатами. Численно исследовано влияние скорости ввода внешнего магнитного поля на магнитные характеристики ВТСП композитов.
3. Численный анализ электродинамических и тепловых процессов в ВТСП композитах при импульсных токовых нагрузках до $3.3 J_c$ выполнен для структур различной топологии (лента, микромостик, меандр). Изучены процессы перераспределения токов между слоями ВТСП композитов при сверхкритических токовых нагрузках. Исследовано влияние стабилизирующих слоев на транспортные характеристики ВТСП лент. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

4. Разработан экспериментальный стенд для визуализации с высоким временным разрешением динамики тепловых процессов в ВТСП композитах. С использованием разработанного стенда проведено детальное изучение процесса разрушения ВТСП образца под действием критической токовой нагрузки, исследованы особенности тепловых процессов, приводящих к смене режимов кипения жидкого хладагента.
5. Проведено моделирование динамических состояний в сверхпроводнике, связанных с нагревом слоистой структуры в следствие импульсного лазерного воздействия. Выполнен численный анализ тепловых процессов и моделирование ВАХ ВТСП при комбинированном токовом и лазерном воздействии длительности 150 пс.
6. Методом накачка-зондирование (pump-probe спектроскопия) выполнено экспериментальное исследование динамики отражательной способности открытой ВТСП пленки в широком интервале температур (4 – 300 К) и энергий лазерного излучения (14 – 143 мкДж/см²). Выявлены особенности формирования неравновесных состояний в сверхпроводнике при фемтосекундных возбуждающих воздействиях, показаны особенности оптического отклика пленки при разрушении сверхпроводящего состояния.

Научная новизна исследования. В диссертационной работе:

- впервые представлено объяснение физического механизма насыщения зависимости силы левитации от числа ВТСП лент в композитной сборке в широком интервале рабочих температур;
- впервые для различных температур установлено существование оптимальных конфигураций стопок композитных ВТСП лент для достижения наибольшей эффективности захвата магнитного потока, а также конфигураций, при которых величина захваченного магнитного потока насыщается;
- впервые показана возможность управления тепловыми характеристиками ВТСП композиций при быстром (до 30 Тл/с) изменении внешнего магнитного поля за счет изменения условий и параметров охлаждения;
- впервые проведено расширение модели динамического сопротивления на случай ВТСП лент со стабилизирующим медным покрытием;
- впервые показана возможность устойчивого и обратимого тепловых переключений ВТСП лент в нормальное состояние при сверхкритических токовых нагрузках микросекундной длительности;

- впервые показана возможность пропускания импульсного тока микросекундной длительности с амплитудой, превышающей критический ток ВТСП композита более чем в 3 раза, без термического разрушения образца;

- впервые показана возможность термической активации возникновения динамических состояний при комбинированном токовом и лазерном воздействии длительности ~ 150 пс;

- методом накачка-зондирования впервые установлена зависимость изменения отражательной способности ВТСП композита от температуры при лазерном возбуждении фемтосекундной длительности, в том числе обнаружен двойной временной оптический отклик. Предложено объяснение динамики фотовозбужденных неравновесных состояний при сверхкоротких лазерных воздействиях.

Практическая значимость работы.

С практической точки зрения полученные результаты могут быть использованы:

- при прогнозировании термоиндуцированных динамических состояний в ленточных ВТСП композитах, сборках из ВТСП лент, а также устройствах на их основе при магнитных, токовых и лазерных воздействиях;
- при исследовании и анализе транспортных, магнитных и оптических свойств сверхпроводящих композитов и устройств на их основе;
- при разработке и использовании переключающих устройств и магнито-левитационных систем различного типа;
- при оптимизации широкого спектра устройств на основе ленточных ВТСП композитов и адаптации их характеристик к техническим требованиям конкретных приложений.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

- динамика магнитного потока в стопках ВТСП лент определяется как условиями намагничивания и охлаждения, так и архитектурой, геометрией и критическими характеристиками образца;
- при магнитных возбуждениях в интервале длительностей воздействия от миллисекунд до десятков секунд нестационарные процессы в ВТСП композитах обусловлены возникновением термоиндуцированных динамических состояний,

которые могут быть описаны в рамках решения термосвязанной электродинамической задачи;

- уменьшение длительности импульсной токовой нагрузки приводит к смещению значений критического тока перехода в режим течения магнитного потока в сторону меньших амплитуд транспортного тока и смещению значения критического тока перехода в омический режим в сторону больших амплитуд транспортного тока;
- при токовых воздействиях микросекундной длительности доминирующим механизмом генерации динамических состояний является тепловой механизм, однако для корректного описания электродинамического и теплофизического поведения сверхпроводника необходим учет динамического сопротивления ВТСП слоя, которое может быть рассчитано из прямых измерений ВАХ ВТСП при быстропротекающих токовых процессах;
- при фемтосекундных временах лазерного воздействия в $(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ проявляется фотовозбужденная генерация неравновесных динамических состояний, при этом непосредственное переключение сверхпроводника в нормальное состояние происходит за времена от сотен фемтосекунд до нескольких пикосекунд.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, определяется комплексным подходом к проведению экспериментальных и численных исследований, качественным и количественным согласием результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными как в рамках настоящего исследования, так и представленными в литературных источниках.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались на следующих Всероссийских и международных конференциях: Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школе-конференции (Москва, Россия, 2016, 2017, 2018, 2023), III— VIV Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017— 23» (Москва, Россия, 2017— 2023), 13th and 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS-2017, Женева, Швейцария и EUCAS-2021, Москва, Россия), 6th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors (HTS-modeling-2018, Капарика, Португалия), Coated conductors for applications (CCA-2018, Вена, Австрия), The 15th IIR International Conference (Cryogenics-2019, Прага, Чехия), Конкурсе научно-исследовательских проектов молодых научно-педагогических работников и аспирантов Института «ЛаПлаз» (Москва, Россия, 2019), VII Euro-Asian

Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2019, Екатеринбург, Россия), The 31th and 32th symposium on superconductivity (ISS-2018, Цукуба, Япония и ISS-2019, Киото, Япония), XV Российско-Китайском Симпозиуме «Новые материалы и технологии» (Сочи, Россия, 2019), International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight 2018, 2022, Москва, Россия), 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2020, Бодрум, Турция), Materials Research Society Spring Virtual Seminar (MRS-2020, онлайн-формат), 27th International Conference on Magnet Technology (MT-2021, Фукуока, Япония), 6th International Conference on Advances in Functional Materials (AFM-2021, Чеджу, Корея), XXXIII международной конференции «Лазеры в науке, технике, медицине» (Москва, Россия, 2022), 29ой Международной конференции «Advanced Laser Technologies 2022» (Москва, Россия, 2022).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 30 научных публикациях (24 в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science (из них 5 публикаций в журналах Q1 и Q2), 6 – в журналах РИНЦ (ВАК), представлены в двух РИД и более чем в 50 тезисах докладов на Всероссийских и международных научных конференциях.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в разработке и реализации численных моделей для анализа термоиндуцированных динамических состояний в высокотемпературных сверхпроводниках при магнитных, токовых и лазерных воздействиях, разработке экспериментального стенда для высокоскоростной визуализации тепловых процессов в ВТСП композитах при критических токовых нагрузках и проведении соответствующих экспериментальных исследований, экспериментальном исследовании динамических состояний в ВТСП композитах при импульсных токовых воздействиях, проведении экспериментальных исследований динамики изменения нестационарной отражательной способности открытых ВТСП пленок при фемтосекундных лазерных возбуждениях, обработке экспериментальных результатов, сравнении результатов моделирования с полученными и имеющимися экспериментальными данными, проведении аналитических оценок и физической интерпретации полученных результатов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертационной работы составляет 195 страницы, включая 131 рисунок и 6 таблиц. Список литературных источников содержит 183 наименования.

Содержание работы

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, выбора объектов и методов исследования, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые автором на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературных источников и анализу современного состояния проблемы определения механизмов формирования и закономерностей развития динамических состояний в сверхпроводниках при внешних воздействиях различного вида. Рассмотрены теоретические и экспериментальные работы, посвященные исследованию режимов течения магнитного потока в сверхпроводниках и особенностям крипа магнитного потока в ВТСП. На основе данных, полученных из литературных источников, проведено сравнение свойств ВТСП лент и объемной ВТСП керамики на основе REBCO. Продемонстрирован дефицит информации и отсутствие комплексных исследований динамических состояний в ленточных ВТСП композитах при магнитных, токовых и лазерных воздействиях. В заключении Главы 1 приводится обоснование выбора экспериментальных и численных методик для достижения поставленной цели исследования.

Вторая глава диссертационной работы является методической и содержит подробное описание архитектуры и характеристик исследуемых образцов, а также экспериментальных и численных методик, перечень которых приведен в разделе «Объекты и методология исследований» настоящего автореферата. Численные модели в терминах компонент напряженности магнитного поля ($\mathbf{H}$) [1-3] и/или токового векторного потенциала ($\mathbf{T}$) [4-6] применимы для описания электродинамического поведения сверхпроводников, но вне зависимости от формулировки управляющие уравнения моделей сводятся к нестационарным уравнениям Фарадея (1) и Ампера (2):

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \left(E_c \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c(B,Q)} \right)^{k(B)} \frac{\mathbf{J}}{J_c(B,Q)} \right) = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times (T\mathbf{n}) \quad (2)$$

где $E_c = 1$ мкВ/см – критерий критической напряженности электрического поля $\mathbf{E}$, $\mathbf{J}$ – плотность токов, k – показатель степени ВАХ ВТСП, J_c – критическая плотность тока, зависящая от магнитного поля $\mathbf{B}$ и локальной температуры Q , $\mathbf{n}$ – вектор нормали. Локальная температура вычисляется на основе решения нестационарного уравнения теплопередачи в твердых телах [7] в двусторонней связке с электродинамической

моделью, при этом учитываются температурные зависимости плотностей, теплопроводностей и теплоемкостей всех слоев ВТСП композита, токонесущие слои которого выступают в качестве объемных источников тепловыделения. Описана постановка граничных условий для выполнения расчета теплофизических характеристик системы при безжидкостном охлаждении и при охлаждении жидким азотом. В последнем случае посредством ввода динамического коэффициента теплоотдачи [8-10] реализуется гистерезисный характер кривой кипения жидкого азота. Помимо этого, в главе 2 представлена модель для расчета динамического сопротивления ВТСП слоя композитных лент при импульсных токовых нагрузках и модель на основе эквивалентной электрической цепи, позволяющая при известном динамическом сопротивлении слоя REBCO прогнозировать ВАХ композитных ВТСП лент при быстропротекающих токовых процессах. Нестационарное уравнение теплопередачи в твердых телах было расширено до теплового уравнения в модели двухфазной зоны [11, 12] и позволяет производить учет теплового воздействия лазерного излучения на слоистые структуры с учетом процессов плавления, испарения, затвердевания, уноса энергии лазерного излучения испарившимся материалом. Все описанные в Главе 2 численные методики применимы для анализа и прогнозирования термоиндуцированных динамических состояний в ВТСП композитах. Для исследования фотоиндуцированных неравновесных состояний применяется экспериментальная методика спектроскопии накачка-зондирование.

В третьей главе приводятся результаты исследований динамики магнитного потока в ВТСП композитах при воздействии внешнего магнитного поля. С использованием разработанных численных моделей проведено моделирование намагниченности отдельных ВТСП лент и ВТСП композиций в однородном магнитном поле. Результаты численного анализа с хорошей точностью согласуются с результатами измерений петель намагничивания ВТСП композитов. Показана динамика проникновения токов и магнитного потока с периферии образца в его центр, данные подтверждаются магнитооптическими исследованиями для образцов круглой и квадратной формы, а также данными, полученными с использованием сканирующей холловской магнитометрии. Установлено, что импульсное намагничивание в однородном магнитном поле может приводить в зависимости от времени магнитного воздействия и температуры как к потере захваченного магнитного потока, так и к росту намагниченности стопок лент. Так, при уменьшении времени намагничивания стопки

из 10-ти ВТСП лент во внешнем однородном магнитном поле 3 Тл со 120 сек до 0.5 сек при температуре $T=77$ К наблюдается деградация максимального захваченного магнитного потока на величину $\sim 46\%$, а при температуре 5 К прирост намагниченности на величину $\sim 14\%$. Такое поведение объясняется различной динамикой развития термоиндуцированных динамических состояний в ВТСП композитах при перераспределении тепла, выделяющегося в процессе намагничивания образцов, и влиянием тепловых процессов на критические характеристики композитов.

Результаты моделирования процессов намагничивания стопок ВТСП лент в градиентных магнитных полях продемонстрировали влияние эффектов экранировки и неравномерного намагничивания (рисунок 1, А) на динамику магнитного потока и силы левитации при увеличении высоты стопки ВТСП лент в интервале температур от 5 К до 80 К. Для различных температур показано существование оптимальной для наиболее эффективного захвата магнитного потока высоты стопки ВТСП лент и предельной высоты, при достижении которой намагниченность образца в градиентном магнитном поле перестает изменяться (рисунок 1, Б). В работе разработаны и проанализированы эффективные методы управления параметрами теплопередачи системы при различных скоростях ввода внешнего магнитного поля (от миллисекунд до секунд), предложены способы управления тепловыми характеристиками стопок лент при быстром (порядка нескольких миллисекунд) вводе внешнего градиентного магнитного поля.

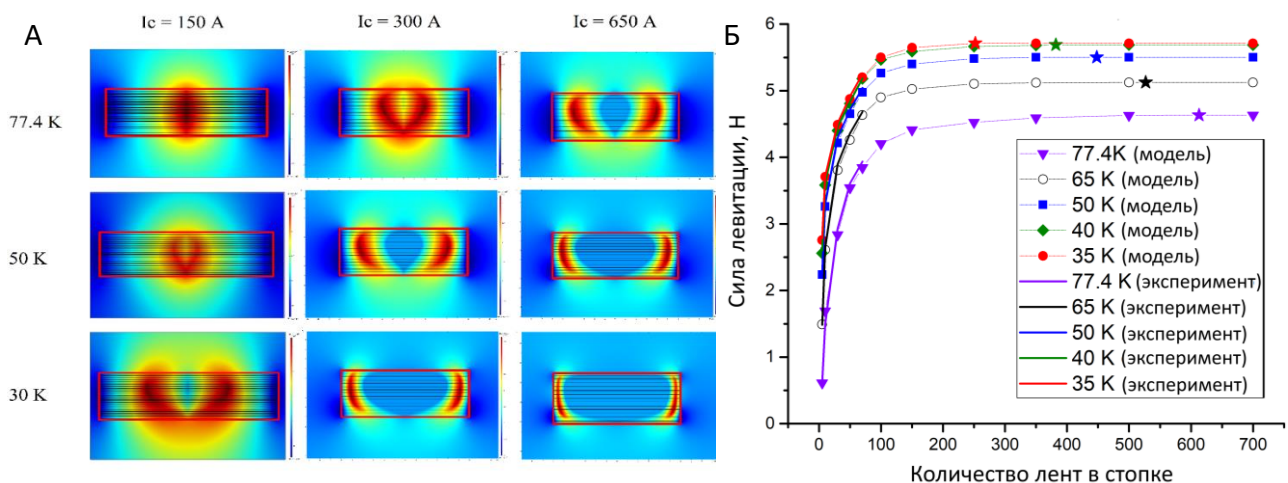


Рисунок 1. А - Визуализация распределения захваченного магнитного потока стопками 50 ВТСП лент с разным I_c при различных температурах. Безжидкостное охлаждение, скорость намагничивания 0,05 Тл/с. Б - Зависимости силы левитации от количества лент в стопке. На каждой расчетной зависимости звездочкой отмечена высота стопки, при превышении которой сила левитации остается неизменной.

Показано, что за счет использования дополнительных охлаждающих элементов, в том числе механического канала охлаждения, в ряде случаев возможно подавление термоиндуцированных динамических состояний в сверхпроводнике, что приводит к приросту левитационной силы ВТСП композиций от 5 до 14% (рисунок 2).

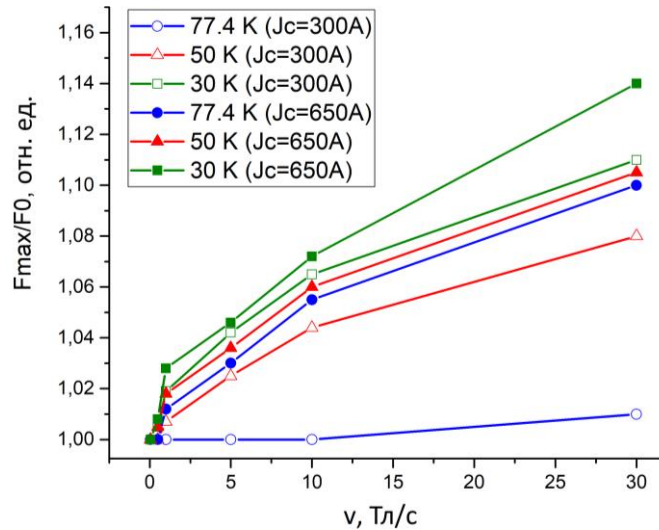


Рисунок 2. Относительный прирост силы левитации для стопки 70 ВТСП лент при различных скоростях ввода внешнего магнитного поля.

Влияние режимов намагничивания на динамику формирования и развития динамических состояний в ВТСП композитах $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ исследовано для случаев намагничивания образцов в градиентных магнитных полях сложных конфигураций и циклического намагничивания при различных способах подвода источника внешнего магнитного поля. Показано, что при условии полного намагничивания ВТСП лент за первый цикл накачки, последующие итерации магнитного воздействия приводят к снижению максимального захваченного магнитного поля ввиду возникновения термоиндуцированных динамических состояний, при этом снижение максимальной намагниченности связано с перераспределением магнитного потока в объеме ВТСП материала, что подтверждается результатами расчета интегральной намагниченности.

В **Главе 4** представлены результаты исследования динамических процессов в ВТСП композитах $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ в условиях импульсной токовой нагрузки. Экспериментальные исследования и численный анализ электродинамических и теплофизических процессов, протекающих в 2G ВТСП ленте, подверженной нагрузке импульсами электрического тока длительности порядка нескольких секунд показали, что, при превышении критического тока сверхпроводника, резкое увеличение тепловыделения приводит к перегреву ВТСП слоя и резистивному S-N переходу.

Динамические процессы исследованы с использованием специально изготовленного стенда для высокоскоростной визуализации тепловых процессов в ВТСП композитах.

На миллисекундной временной шкале длительностей импульсов выделено три режима поведения напряжения на ВТСП лент при протекании электрического тока – низковольтный нелинейный режим, а также два линейных резистивных режима, описывающих обратимое переключение ВТСП образца при амплитудах токового импульса менее $1.7 J_c$ и развитие необратимой динамической тепловой неустойчивости для более высоких величин тока (рисунок 3, А). Необратимое переключение характеризуется продолжающимся ростом напряжения на образце при поддержании постоянной токовой нагрузки, а обратимое – снижением напряжения на образце во время приложения токового импульса. Установлено наличие временной задержки возникновения напряжения на образце, обусловленное особенностями развития термоиндуцированных динамических состояний в системе. Численно исследовано влияние толщины стабилизирующих слоев на транспортные характеристики ВТСП композита.

Для импульсов тока микросекундной длительности выявлены особенности динамических процессов при протекании тока выше и ниже критического тока ВТСП лент. Показано отсутствие нелинейного режима напряжения на образце и переход сверхпроводника в режим течения потока при вводе импульса тока за времена ~ 1 мкс. Получено устойчивое переключение сверхпроводника в омический режим при амплитудах тока выше $2.3 J_c$ (рисунок 3, Б). Результаты возникновения напряжения на образцах при коротких токовых импульсах проанализированы в рамках модели динамического сопротивления, которая была расширена на случай наличия стабилизирующего медного покрытия. Рассмотрены процессы перетекания тока между слоями ВТСП композита, проведен расчет динамического сопротивления ВТСП слоя ленты при импульсных токовых нагрузках. На примере импульсной нагрузки микросекундной длительности показана возможность необратимого (рисунок 4, А) и обратимого (рисунок 4, Б) переключения сверхпроводника в резистивный режим при надкритической токовой нагрузке.

Процессы контролируемой генерации динамических термоиндуцированных состояний в ВТСП композитах при миллисекундных токовых воздействиях были представлены на примере сверхпроводящего переключающего устройства, управляющего параметрами питания цепи.

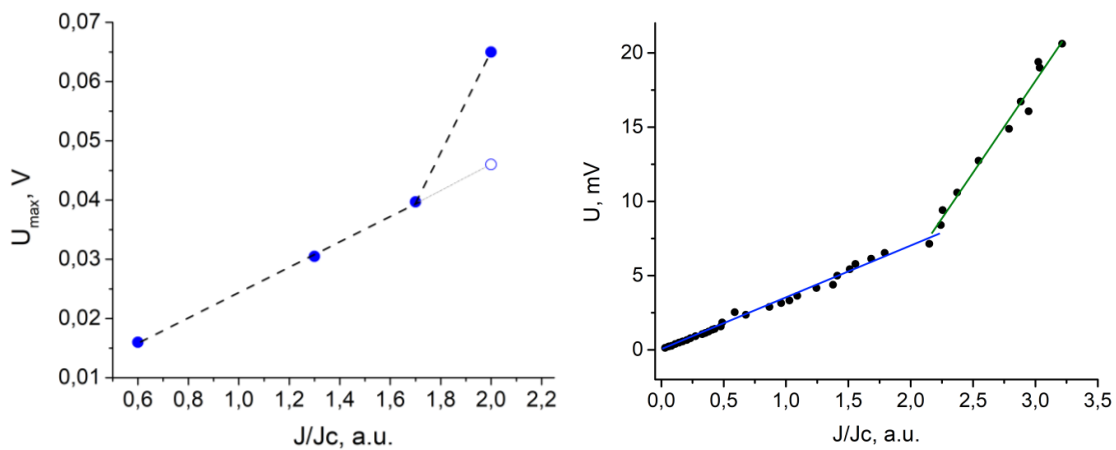


Рисунок 3. А - Расчетная зависимость максимального напряжения на ВТСП ленте от амплитуды импульса тока. Длительность импульса 40 мс, время нарастания фронта – 20 мс, $I_c=150$ А, охлаждение жидким азотом. Б - Экспериментальная зависимость максимального значения напряжения на сверхпроводнике от амплитуды тока. $I_c = 150$ А, длительность импульса – 50 мкс, время нарастания фронта воздействия – 1 мкс

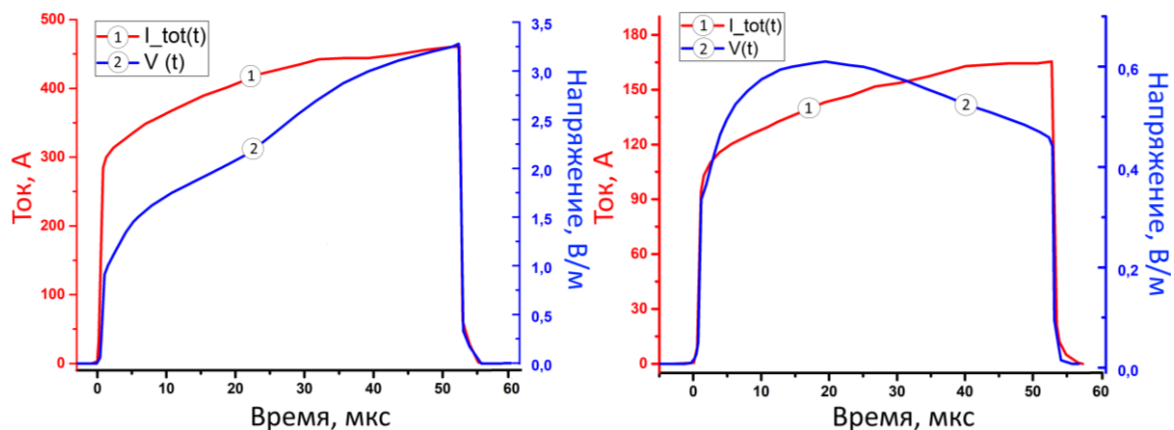


Рисунок. 4. Экспериментальные зависимости тока и напряжения в ВТСП ленте.

А - Амплитуда импульса 460 А ($\sim 3 J_c$), скорость ввода тока 300 А/мкс. Б - Амплитуда импульса 160 А ($\sim 1.1 J_c$), скорость ввода тока 50 А/мкс

В **Главе 5** продемонстрирована возможность активации термоиндуцированных динамических состояний в ВТСП композитах, переносящих постоянный подкритический транспортный ток и подверженных короткому лазерному воздействию длительности ~ 150 пс. Показаны особенности динамических процессов, связанных с локальным нагревом ВТСП ленты в процессе лазерного воздействия и распространением тепла после окончания воздействия.

С использованием Ti:Sapphire лазерного комплекса (рисунок 5) методом накачка-зондирование в широком интервале температур (4-300 К) проведены измерения динамики отражательной способности открытых ВТСП пленок при различных энергиях ($14 - 143$ мкДж/см²) лазерного излучения длительности 50 фс.

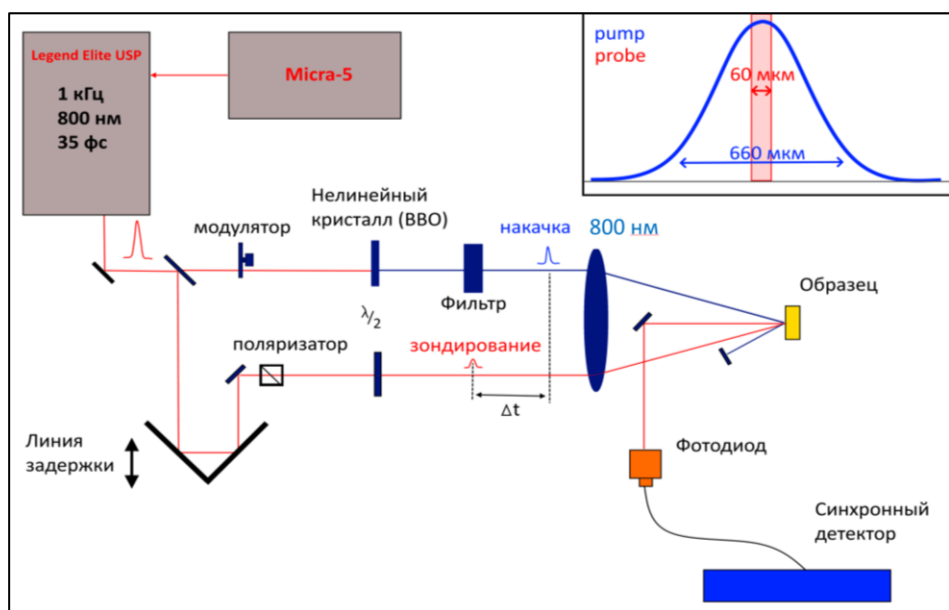


Рисунок 5. Блок схема фемтосекундного лазерного комплекса.

На вставке – соотношение диаметров накачивающего и зондирующего лазерных лучей

На рисунке 6 в качестве примера приведены оптические отклики ВТСП пленки для нескольких энергий возбуждающего лазерного импульса. Для нормальной фазы пик оптического отклика ниже, чем для сверхпроводящей, а скорость релаксации выше (более быстрый временной спад зависимости). Для объяснения оптического поведения пленки был рассчитан чистый сверхпроводящий отклик образца [13], на основе анализа которого с использованием феноменологической модели Ротварфа и Тейлора [14] проведена качественная интерпретация процессов релаксации фотовозбужденных квазичастиц и процессов восстановления сверхпроводимости за времена порядка нескольких пикосекунд. Экспериментальные зависимости сверхпроводящего отклика пленки от температуры согласуются с теоретическими данными (рисунок 7).

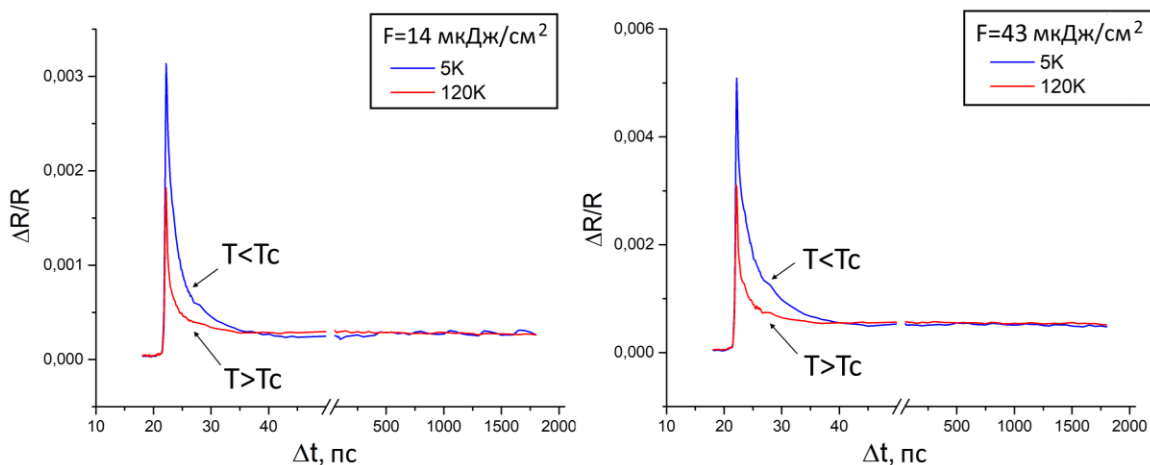


Рисунок 6. Изменение отражательной способности пленки YBCO, подверженной химическому травлению, при $T > T_c$ и $T < T_c$ для различных энергий лазерного излучения

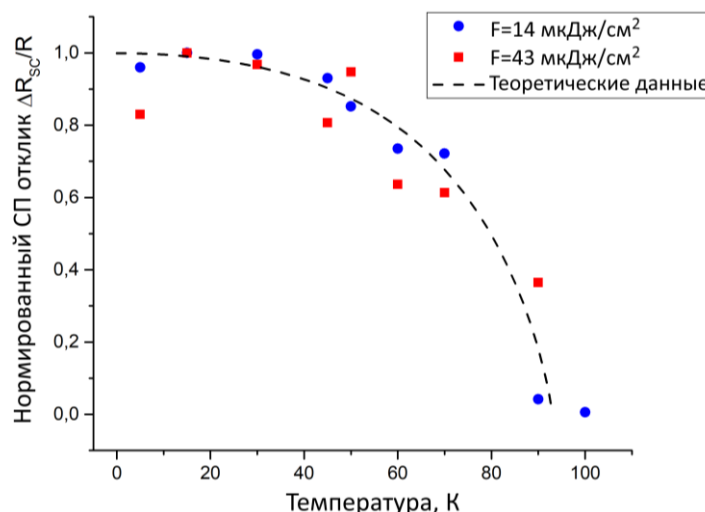


Рисунок 7. Нормированные температурные зависимости пика сверхпроводящего отклика

Для нескольких серий экспериментальных исследований показаны различия в динамике фотовозбужденных неравновесных состояний, впервые выявлен двойной оптический отклик чистой ВТСП пленки, обусловленный быстрым откликом электронной подсистемы и формированием накопительного сигнала, связанного с накоплением популяции квазичастиц в зондируемой области. На рисунке 7 приведены температурные распределения оптического отклика чистой пленки в течении 5 пс после возбуждения. Хорошо видно, что быстрый отклик существует при любых энергиях воздействия и при любых температурах, причем время жизни зондируемых квазичастиц практически не зависит от энергии воздействия и составляет ~ 0.5 пс. Накопительный сигнал формируется медленнее и при определённых температурах может накладываться на быстрый пик, из-за чего различить оба вклада на зависимостях $\Delta R/R(t)$ не всегда представляется возможным. Время существования накопительного сигнала определяется количеством возбужденных квазичастиц и процессами их релаксации при восстановлении сверхпроводимости, в связи с чем сильно зависит от энергии лазерного излучения.

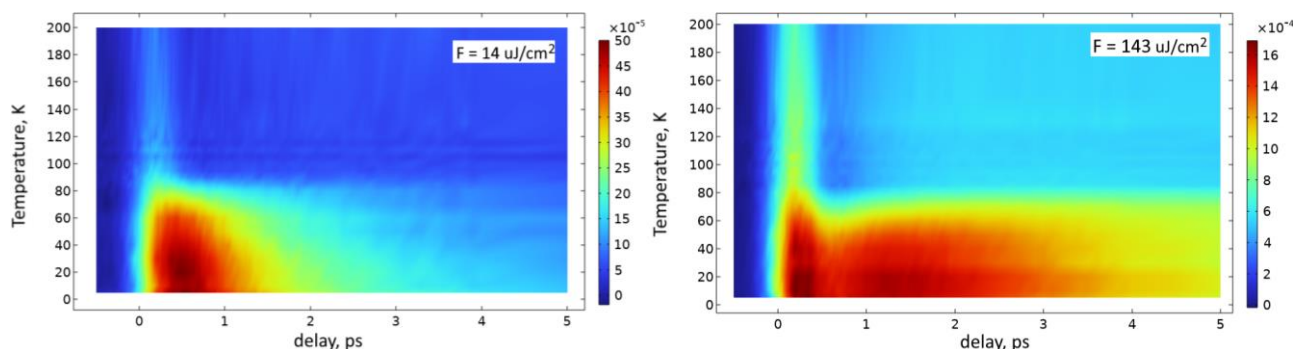


Рисунок 7. Распределения изменений отражательной способности $\Delta R/R(t, T)$ в течении 5 пс после лазерного возбуждения длительности 50 фс

Двойной пик в динамике оптического отклика свидетельствует о том, что быстрый пик нельзя интерпретировать в терминах насыщающейся медленной компоненты, которая связана с динамикой восстановления сверхпроводящего состояния и описывается феноменологической моделью рекомбинации квазичастиц посредством фонон-опосредованного спаривания. На основе модельных представлений, рассматривающих каскады нестационарных процессов при электро-электронном и электрон-фононном взаимодействии, предложена интерпретация динамики формирования неравновесного оптического отклика ВТСП пленки.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы работы:

1. С использованием уникальных экспериментальных методик и численных моделей проведено комплексное исследование механизмов формирования динамических состояний в ленточных ВТСП композитах при магнитных, токовых и лазерных воздействиях различной длительности. Анализ электродинамических и теплофизических процессов при генерации термоиндуцированных динамических состояний охватывает диапазон времен внешних воздействий от десятков пикосекунд до десятков секунд. Фотоиндуцированные динамические состояния экспериментально исследованы на субпикосекундной временной шкале при фемтосекундной длительности возбуждающего лазерного воздействия.

2. Установлено, что при магнитных возбуждениях в интервале длительностей воздействия от миллисекунд до десятков секунд неравновесные процессы в ВТСП композитах обусловлены возникновением термоиндуцированных динамических состояний, развитие которых определяется параметрами системы охлаждения, конфигурацией внешнего магнитного поля и условиями намагничивания. Показана возможность оптимизации магнитных и левитационных характеристик ВТСП лент и композиций на их основе за счет подавления термоиндуцированных динамических процессов в их структуре.

3. Выявлены особенности динамических состояний, возникающих в ВТСП композитах при токовых возбуждениях различной длительности (от микросекунд до секунд). Для токовых импульсов секундной и миллисекундной длительности установлено наличие задержки возникновения напряжения на ВТСП лентах, связанное со временем развития динамической тепловой неустойчивости в объеме материала. Обнаружено смещение границы перехода сверхпроводника в нормальное состояние в

сторону больших транспортных токов при уменьшении длительности возбуждающего токового воздействия. Установлена возможность пропускания через ВТСП импульсного тока, превышающего критический ток в 3,3 раза.

4. Показано, что лазерное воздействие длительности 150 пс при протекании через ВТСП ленту постоянного подкритического транспортного тока приводит к развитию тепловой неустойчивости в объеме сверхпроводника и обратимому переходу в нормальное состояние. Механизм генерации динамических состояний при этом основан на локальном термическом воздействии лазерным импульсом высокой мощности, приводящем к локальному нагреву и росту температуры выше критической температуры сверхпроводника. При этом наблюдается задержка возникновения напряжения на образце, связанная с динамикой развития тепловых процессов. Времена прямого и обратного переключения сверхпроводника определяются количеством подведенной энергии и параметрами охлаждения системы.

5. Показано, что при фемтосекундных временах лазерного воздействия в пленках $(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ проявляется фотовозбужденная генерация динамических состояний, при этом в зависимости от качества образца динамика оптического отклика пленки может существенно изменяться, а непосредственное переключение сверхпроводника в нормальное состояние происходит за времена от сотен фемтосекунд до нескольких пикосекунд. Механизм генерации неравновесных состояний в системе при фемтосекундных лазерных воздействиях определяется преобладанием отдельных нестационарных каскадных процессов возбуждения и рекомбинации квазичастиц в процессе электрон-электронных и электрон-фононных взаимодействий.

Основные публикации автора по теме диссертации

- A1. M. Osipov, A. Starikovskii, **I. Anishenko**, S. Pokrovskii, D. Abin, and I. Rudnev. Influence of temperature on levitation characteristics of the system CC tapes – Permanent magnets at lateral displacements// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022, vol. 546, p. 168896. (**Scopus, WoS, Q1**)
- A2. M. Osipov, A. Starikovskii, **I. Anishenko**, S. Pokrovskii, D. Abin, and I. Rudnev. Magnetic-Force Characteristics of Hybrid Levitation Systems Based on CC-Tapes// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-5. (**Scopus, WoS**)
- A3. A. S. Starikovskii, M. A. Osipov, **I. V. Anishchenko**, D. A. Abin, S. V. Pokrovskii, and I. A. Rudnev. Performance of a Levitation System Consisting of Magnetized and Non-Magnetized Tape Stacks// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-4. (**WoS, Scopus**)
- A4. Rudnev I, Abin D, Pokrovskii S, **Anishchenko I** *et al.* Influence of Ion Irradiation on Critical Characteristics of Second-Generation HTSC Tapes // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-5. (**Scopus, WoS**)
- A5. A. I. Podlivaev, S. V. Pokrovskii, S. V. Veselova, **I. V. Anishchenko**, and I. A. Rudnev. The Magnetization of HTSC Tapes Stack in the Flux Pump Regime // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021, vol. 31, no. 5, pp. 1-5. (**Scopus, WoS**)
- A6. Osipov M, **Anishenko I**, Starikovskii *et al.* Scalable superconductive magnetic bearing based on non-closed CC tapes windings//Superconductor Science and Technology. 2021, vol. 34, no. 3, p. 035033. (**Scopus, WoS, Q1**)
- A7. M. Osipov, A. Starikovskii, **I. Anishchenko**, S. Pokrovskii, D. Abin, and I. Rudnev. The influence of temperature on levitation properties of CC-tape stacks // Superconductor Science and Technology. 2021, vol. 34, p. 045003. (**Scopus, WoS, Q1**)
- A8. И. А. Руднев, **И.В.Анищенко**. Физические принципы создания магнитолевитационных систем на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов второго поколения (Обзор)”, Журнал технической физики. 2021, том 91, вып. 12, стр. 1813–1847. (**Перечень ВАК**) I. A. Rudnev, I. V. Anishchenko. Physical principles of development of magneto-levitation systems based on the second generation high temperature superconducting composites // Technical Physics. 2021, vol. 91, is.12,pp. 1813-1847. . (**WoS, Scopus**)
- A9. **И. В. Анищенко**, С. В. Покровский, М. А. Осипов, Д. А. Абин, Д. И. Грицаенко, И. А. Руднев. Неравновесные состояния в ВТСП-композитах второго поколения при сверхкритических импульсных токовых воздействиях // Письма в ЖТФ. 2021, вып. 47, №. 12, стр. 22-25. (**Перечень ВАК**)
- A10. **I. Anishchenko**, S. Pokrovskii, I. Rudnev, and M. Osipov. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex configurations // Superconductor Science and Technology, 2019, vol. 32, no. 10, p. 105001. (**Scopus, WoS, Q1**)
- A11. Подливаев А.И., Покровский С.В., **Анищенко И.В.**, Руднев И.А. Магнитометрическая диагностика дефектов высокотемпературных сверхпроводящих лент в градиентном магнитном поле // Журнал технической физики. 2019, вып.89, № 4, стр.524-533. (**Перечень ВАК**) A. I. Podlivaev, S. V. Pokrovskii, **I. V. Anishchenko**, and I. A. Rudnev. Magnetometry Diagnostics of Defects in High-Temperature Superconducting Tapes in a Gradient Magnetic Field // Technical Physics. 2019, vol. 64, no. 4, pp. 480-489. (**WoS, Scopus**)
- A12. **I. V. Anishchenko**, S. V. Pokrovskii, and I. A. Rudnev. Simulation of Magnetic Levitation Systems Based on Superconducting Rings // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2018, vol. 45, no. 12, pp. 373-376. (**Scopus, WoS**)
- A13. A. Podlivayev, **I. Anishchenko**, S. Pokrovskii, and I. Rudnev. Contactless Verification of the Defects in 2G HTSC Tapes With Two-Side Superconducting Layers // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018, vol. 28, is. 4, p. 9001905. (**Scopus, WoS**)
- A14. A. Podlivaev, S. Pokrovskii, **I. Anishchenko**, and I. Rudnev, "Precise Magnetometric Diagnostics of Critical-Current Inhomogeneities in High-Temperature Superconductor Tapes // Technical Physics Letters. 2017, vol. 43, pp. 1136-1139. (**Scopus, WoS**)

Список литературных источников

- [1] J. Geng and T. A. Coombs. Modeling methodology for a HTS flux pump using a 2D H-formulation// *Superconductor Science and Technology*, 2018, vol. 31, no. 12, p. 125015.
- [2] F. Sass, G. G. Sotelo, R. d. A. Junior, and F. Sirois. H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors," *Superconductor Science and Technology*// 2015, vol. 28, no. 12, p. 125012,.
- [3] B. Shen, F. Grilli, and T. Coombs. Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications// *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 100403-100414.
- [4] F. Huber, W. Song, M. Zhang, and F. Grilli. The T-A formulation: an efficient approach to model the macroscopic electromagnetic behaviour of HTS coated conductor applications// *Superconductor Science and Technology*, 2022, vol. 35, no. 4, p. 043003.
- [5] T. Benkel *et al.* T–A-Formulation to Model Electrical Machines With HTS Coated Conductor Coils// *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020 vol. 30, no. 6, pp. 1-7.
- [6] E. Berrospe-Juarez, V. M. R. Zermeno, F. Trillaud, and F. Grilli. Real-time simulation of large-scale HTS systems: multi-scale and homogeneous models using the T–A formulation// *Superconductor Science and Technology*, 2019, vol. 32, no. 6, p. 065003.
- [7] S. Zou, V. M. R. Zermeno, A. Baskys, A. Patel, F. Grilli, and B. A. Glowacki. Simulation and experiments of stacks of high temperature superconducting coated conductors magnetized by pulsed field magnetization with multi-pulse technique// *Superconductor Science and Technology*, 2017, vol. 30, no. 1, p. 014010.
- [8] V. V. Zubko, S. M. Ryabov, S. S. Fetisov, and V. S. Vysotsky. Heat Transfer Simulation to Liquid Nitrogen from HTS Tapes at the Overload Currents// *Physics Procedia*, 2015, vol. 67, pp. 619-624.
- [9] V. Zubko, S. Fetisov, S. Zanegin, and V. Vysotsky. Analysis of behaviour of HTS tapes cooled by liquid nitrogen under currents more than the critical current// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 502, no. 1, p. 012178.
- [10] S. S. Fetisov, V. S. Vysotsky, and V. V. Zubko. HTS Tapes Cooled by Liquid Nitrogen at Current Overloads// *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 1323-1327.
- [11] M. A. Gjennestad. Modeling of Heat Transfer in Two-Phase Flow Using the Level-Set Method//2013.
- [12] K.-H. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, and L. Sigl, *Thermo-Fluidodynamical Modelling of Laser Beam-Matter Interaction in Selective Laser Melting*. 2016.
- [13] L. Stojchevska *et al.* Mechanisms of nonthermal destruction of the superconducting state and melting of the charge-density-wave state by femtosecond laser pulses// *Physical Review B*, 2011, vol. 84, no. 18, p. 180507.
- [14] A. Rothwarf and B. N. Taylor. Measurement of Recombination Lifetimes in Superconductors// *Physical Review Letters*, 1967, vol. 19, no. 1, pp. 27-30.