На правах рукописи

ДЕГТЯРЕНКО Павел Николаевич

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ С ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРОЙ

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Автор: Делерия

МОСКВА – 2011

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии «Всероссийский Электротехнический Институт им. В.И. Ленина»

Научный руководитель:	Кандидат технических наук, доцент НИЦ «Курчатовский институт» Круглов В. С.
Официальные оппоненты:	Доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт» Романовский В. Р.
	Доктор технических наук, профессор МАИ (ГТУ) Ковалев К. Л.

Защита состоится «20» апреля 2011 года в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 при НИЯУ МИФИ по адресу:

Объединенный институт высоких температур РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 323-91-67.

Автореферат разослан «18» марта 2011 года.

Ведущая организация:

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета НИЯУ МИФИ д. ф. – м. н., профессор

Сприя Чернов И. И.

~ 2 ~

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

<u>АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ</u>

Неизменно высокий интерес к разработкам новых композиционных материалов, в частности, сверхпроводящих, базируется на стремительно развивающихся технологических возможностях совершенствования структуры композитов и адаптации их свойств к требованиям технических применений. Композиционные ниобий-оловянные и ниобий-титановые сверхпроводники, относящиеся к низкотемпературным сверхпроводникам (НТСП) на протяжении уже десятков лет, успешно используются для создания лабораторных магнитов с индукцией до 20 Тл, магнитных систем магнитно-резонансных томографов, индуктивных накопителей энергии разного назначения и другого оборудования. В рамках международного проекта ITER создается уникальная по своим масштабам и характеристикам система сверхпроводящих магнитов первого энергетического термоядерного реактора, базовыми проводниками которой являются ниобий-оловянные и ниобий-титановые микрокомпозиты.

В последние годы во многих развитых странах освоено промышленное производство высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) композитов – ВТСП 1-го поколения – на базе висмутовых сверхпроводящих керамик. По меньшей мере, две американские компании – SuperPower и AMSC – начали промышленный выпуск ВТСП лент 2-го поколения, представляющих собой сверхпроводящие пленки YBaCuO, нанесенные на металлическую текстурированную подложку. Как традиционные НТСП микрокомпозиты, так и ВТСП материалы являются продуктами самых передовых высоких технологий, и их создание – результат объединения усилий специалистов развитых стран из самых разных областей науки, техники и технологии.

Ключевые характеристики сверхпроводников, такие как, критическая температура T_c , второе критическое поле H_{c2} , критическая плотность тока j_c – интенсивно исследуются с целью более глубокого понимания фундаментальной природы и механизмов сверхпроводимости, а также поиска технологических путей совершенствования их свойств применительно к конкретным применениям. Адекватность объяснения измеряемых сверхпроводящих характеристик базируется на достоверности моделей, описывающих электродинамику изучаемых объектов. При описании электродинамики сильноточных сверхпроводников, являющихся жесткими сверхпроводниками 2-го рода, традиционно и успешно используется предложенная Бином модель критического состояния. В Процессе совершенствования сильноточных НТСП композитов и появления ВТСП керамик потребовалось обобщение модели критического состояния при-

менительно к новым типам сверхпроводящих объектов – волокнистым композиционным материалам и гранулярным анизотропным керамикам. В ВТСП текстурированных объемных керамиках и тонких пленках следует также принимать во внимание нелокальные эффекты, обусловленные соизмеримостью размеров проводника и лондоновской глубины проникновения магнитного поля λ_L.

В последние годы в связи с повышением требований к прочности НТСП, для крупных сверхпроводящих магнитных систем создан новый специальный тип композитов CuNb с толщиной волокон всего лишь в десятки нанометров. Вследствие сильно выраженного размерного эффекта величина их электропроводности существенно зависит от расстояния между волокнами. В физических свойствах, этих пока еще мало изученных наноструктурированных композитных материалов, должны проявляться эффекты, связанные с размерной перенормировкой параметров сверхпроводящей составляющей и доминированием актов рассеяния нормальных электронов матрицы, границей металл – сверхпроводник (Андреевское отражение на границе металл – сверхпроводник). Волокнистая структура композита и наномасштаб создают условия формирования сильной анизотропии свойств, значительно усложняющей анализ свойств материала при уменьшении масштаба его структурирования.

Композитная структура металл-сверхпроводник необходима и в случае сильноточных ВТСП длинномеров. В случае ВТСП 1-го поколения (Bi2212/Ag, Bi2223/Ag) уже созданы композиты, пригодные для работы в переменном магнитном поле с индукцией в пределах нескольких десятых долей тесла. Значительно более проблематична и пока окончательно не решена задача создания промышленных композитов на базе более перспективного ВТСП 2-го поколения. И, хотя на основе этих ленточных сверхпроводников уже созданы полномасштабные модели кабелей и ограничителей тока, требуется серьезное исследование вопроса об эффективности, реализованной в настоящее время стабилизации этих сверхпроводников и путях ее совершенствования.

Таким образом, видно, что вопросы, касающиеся характеристик композитных сверхпроводников с высокодисперсной структурой, не могут быть решены в рамках одного физического подхода. Необходимо решение вопросов и развитие существующих подходов, учитывающих изменение электродинамических характеристик композитных НТСП и ВТСП при протекании транспортного тока и приложении внешнего магнитного поля вследствие изменения как размеров включений, так и расстояния между ними. Кроме этого необходимо учитывать сильную анизотропию подобных систем, что может сказываться на конкретных электродинамических характеристиках. В частности необходимо построение моделей, описывающих аномальное поведение композитных сверхпроводников в магнитных полях. Все эти перечисленные факторы и определяют актуальность диссертационной работы.

<u>ЦЕЛЬ РАБОТЫ</u>

Экспериментальное исследование и определение электродинамических особенностей композитных низко- и высокотемпературных сверхпроводников с высокодисперсной структурой и их интерпретация, а также развитие существующих подходов в описании нестационарных процессов в ВТСП материалах, возникающих при токовых перегрузках различной мощности и длительности.

Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие задачи:

- исследовать электрические и магнитные характеристики «трехмерных» НТСП *in–situ* композитов CuNb как с различными размерами дисперсных сверхпроводящих включений и расстояниями между ними, так и приготовленных с существенно различными скоростями охлаждения из расплава, а также интерпретировать полученные результаты;
- исследовать особенности электродинамики ВТСП лент 2-го поколения при токовых перегрузках различной мощности и длительности;
- провести анализ поведения нестабилизированных ВТСП лент 2-го поколения при протекании непрерывного переменного тока.

<u>НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ</u>

В процессе выполнения работы впервые получены следующие результаты:

- Обнаружено качественное различие в поведении вольт-амперных характеристик (BAX) образцов CuNb с различной концентрацией сверхпроводника и размерами сверхпроводящих включений, формируемых при различных скоростях охлаждения из расплава.
- Показано, что поведение вольт-амперных характеристик нанокомпозитов CuNb в продольном и поперечном магнитных полях удовлетворительно объясняется возникновением джозефсоновской генерации в мезоскопической системе переходов сверхпроводник-металл.
- При изучении нагрева и охлаждения ВТСП лент 2-го поколения в динамическом режиме с учетом изменения кривой переходного

кипения жидкого азота в нестационарном режиме установлено, что при протекании переменного тока, превышающего критическое значение, существует пороговое значение запасаемой энергии, по достижении которого лента переходит в неоднородное состояние и происходит формирование резистивного домена.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность результатов, изложенных в работе, обеспечена использованием апробированных методов исследования электродинамических характеристик сверхпроводников и подтверждается сравнением результатов экспериментальных исследований с проведенными оценками, а также известными литературными данными.

<u>НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ</u>

Представленные результаты диссертационной работы расширяют известные ранее представления об электродинамических характеристиках композитных сверхпроводников с высокодисперсной структурой, стимулируют новые исследования и могут быть использованы в работах, ставящих своей целью изучение поведения вихревой структуры, влияние дефектов на протекание транспортного тока и ряда других. Установлена качественная модификация сверхпроводящих характеристик трехмерных сверхпроводящих микро- и нанокомпозитов CuNb, которая позволит развить существующие подходы в описании электродинамических особенностей новых классов сверхпроводников, таких как ВТСП и MgB₂. Развита модель расчета охлаждения ВТСП лент 2-го поколения для различных геометрий, используя нестационарную кривую кипения жидкого азота. Развита методика исследования ВТСП при перегрузках значительно превышающих значение их критического тока. Впервые обнаружено образование резистивного домена при протекании непрерывного тока по ВТСП ленте 2-го поколения, которое происходит в результате тепловой накачки. Все результаты исследований, полученные в диссертационной работе, должны учитываться при проектировании конкретных устройств как на основе НТСП, так и ВТСП, в том числе ограничителей тока короткого замыкания, трансформаторов, сверхпроводящих кабелей и других сверхпроводниковых изделий.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Обнаружена качественная модификация сверхпроводящих характеристик «трехмерных» микро- и нанокомпозитов при переходе к наномасштабному уровню структурирования в виде размерной перенормировки и уменьшения критической температуры нанокомпозита по сравнению с гранулярным и массивным сверхпроводником.

- 2. Развита модель, которая качественно описывает изменение ВАХ нанокомпозитов CuNb и объясняет падение сопротивления на обнаруженном резистивном участке ВАХ.
- 3. Разработан метод измерений ВАХ ВТСП лент 2-гопоколения различной геометрии в интервале значений тока от 1,2 до 2*I*_c, с помощью специально спроектированной установки, которая также позволила изучить более подробно электродинамические и тепловые процессы в нестационарных режимах.
- 4. Впервые обнаружено и интерпретировано явление формирования резистивного домена при протекании переменного тока через ВТСП ленты 2-го поколения.

<u>ПУБЛИКАЦИИ</u>

По теме диссертации опубликовано 12 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, в том числе 5 публикаций в журналах из перечня ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции EUCAS (Brussels, Belgium, 2007) и EUCAS (Dresden, Germany, 2009); конференции ИСФТТ по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению (Москва 2007 г.); конференции по прикладной сверхпроводимости (Москва 2010 г.); научных сессиях НИЯУ «МИФИ» (2007, 2008 гг.).

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания и выводов, содержит 102 страницы, включая 31 рисунок, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 91 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, показана научная новизна и практическая ценность исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Анализ современного состояния исследований особенностей электродинамического поведения, как НТСП, так и ВТСП показал, что для интерпретации и объяснения наблюдаемых физических явлений, связанных с изменением параметров композитов, а также для их совершенствования, требуются как подробные экспериментальные исследования, так и развитие существующих подходов с учетом наблюдаемых электродинамических особенностей.

В связи с этим, и в соответствии с целью работы и поставленным задачам, используя индуктивный и резистивный методы, изучены композитные образцы CuNb, приготовленные медленным и быстрым охлаждением из расплава. В табл. 1 представлены размеры исследуемых образцов, содержание сверхпроводящей фазы, а также значения критической температуры T_c . Также проводились исследования ВТСП лент 2-го поколения, получаемых по технологии МОСVD в динамическом и статистическом режимах. Эти ленты представляют собой сверхпроводящую пленку YBCO толщиной 1 или 2 мкм и шириной 12 мм, нанесенную на электрополированную ленту из Хастэллоя (сплав на основе никеля с добавками хрома, молибдена и ряда других элементов) производства компании SuperPower.

Образцы CuNb. В результате проведенного анализа экспериментальных данных свойств «трехмерных» микро- и нанокомпозитов CuNb с высокодисперсной структурой и различной концентрацией компонентов (см. табл. 1) установлено, что переход от микронного к наноскопическому уровню дисперсности композита сопровождается качественным изменением его электромагнитных характеристик. Подтверждением этого является отличие температуры начала сверхпроводящего перехода $T_{\rm c}$ (рис. 1), а также проведенные исследования образцов во внешнем магнитном поле (рис. 2 и 3), демонстрирующие принципиально разное влияние поля *H* на ширину и форму сверхпроводящего перехода в двух типах образцов. В случае «литого» образца достаточно сильное поле выявляет два этапа перехода (рис. 2, *a*), типичные для гранулярных сверхпроводников с размером гранул $r_{\rm eff} \ge \lambda_L$ (λ_L – лондоновская глубина проникновения). При этом внешнее магнитное поле существенно снижает температуру возникновения «бесконечного» сверхпроводящего кластера, или вовсе препятствует завершению его образования. В случае «закаленного» образца переход в сверхпроводящее состояние аналогично переходу, наблюдающемуся в «грязном» жестком сверхпроводнике. При увеличении магнитного поля температура перехода снижается, но при этом форма кривых $\rho(T)$ (см. рис.2, δ и 3, δ) достаточно хорошо сохраняется в полях от 0 до 3 кЭ.

Таблица 1

Образец	Кол-во Nb		Толщина образца <i>d</i> , мм	Ширина образца а, мм	<i>Т</i> _{<i>c</i>} , К
	ат. %	об.%			$R(T)/\chi'(T)$
CuNb12a	11,2	17	0,039	1,1	7,0//7,0
CuNb12b	11,2	17	0,040	1,5	6,5//6,5
CuNb15	16,0	24	0,024	0,7	- //6,2
CuNb20	18,9	28	0,027	1,6	- //6,0
B1	24,9	35	0,500	4,0	8,7//8,7
B2	24,9	35	0,500	1,2	9,2//9,2

Температура *T_c* начала перехода образцов CuNb в сверхпроводящее состояние, измеренная по сопротивлению *R* и динамической магнитной восприимчивости χ'



Рис. 1. Изменение вещественной части динамической магнитной восприимчивости образцов CuNb12a и B1 при сверхпроводящем переходе (линии). Амплитуда переменного магнитного поля *h*=1 Э. Прерывистыми линиями показаны изменения сопротивления с температурой этих образцов, пересчитанные по формуле (ρ(*T*)-ρ₀)/ρ₀=Δρ/ρ₀.

В исследованных характеристиках закаленных образцов отсутствуют очевидные проявления гранулярных свойств. Это дает основания полагать, что в них формируется эффективная сверхпроводящая среда, характеристики которой могут быть заметно перенормированы по сравнению с исходными для чистого ниобия. Для подтверждения этого факта, на основании экспериментальных данных (рис. 2, б) зависимости температуры сверхпроводящего пере-

хода образца CuNb12 и заранее определенного значения $H_{c2}(0)=(8,3\pm1,6)$ кЭ также была вычислена длина когерентности $\xi_d=220$ А́ эффективной среды. Это значение близко к характерному значению размера ниобиевых включений в рассматриваемом образце и подтверждает сделанные ранее предположения.



Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления образцов B2 (*a*) и CuNb12 (*б*) в окрестности сверхпроводящего перехода при различных значениях внешнего магнитного поля.



Рис. 3. Температурная зависимость вещественной (*a*) и мнимой (*б*) частей динамической магнитной восприимчивости образцов В1 и CuNb12b в окрестности сверхпроводящего перехода.

Таким образом, изученные электромагнитные свойства трехмерных микро- и нанокомпозитов CuNb свидетельствуют о качественной модификации сверхпроводящих характеристик образцов при переходе к наномасштабному уровню их структурирования. Гранулярная сверхпроводящая среда микрокомпозита трансформируется в эффективную сверхпроводящую среду нанокомпозита. Длина когерентности последней оказывается близкой к размерам ниобиевых капель, обособлено и равномерно распределенных в медной матрице, и становится значительно меньше длины когерентности массивного ниобия. Соответственно происходит размерная перенормировка и уменьшение критической температуры нанокомпозита по сравнению с гранулярным и массивным сверхпроводником на основе ниобия.

При исследовании образцов было обнаружено, что в некоторой ограниченной области тока I, BAX образцов CuNb12, демонстрирует аномальное, существенно замедленное изменение поля E(I) (рис. 4, кривые, обозначенные светлыми символами). При некотором критическом значении тока наблюдается переход образца в резистивное состояние (рис. 5). При этом зависимость напряжения от тока на значительном промежутке оказывается довольно медленно возрастающей функцией, а затем ее рост существенно ускоряется.



Рис. 4. Вольт-амперные характеристики образцов В2 и CuNb12b при T = 4,2 К.



Рис. 5.Вольт-амперные характеристики «закаленного» образца CuNb12b во внешнем магнитном поле в силовой (темные символы) и бессиловой (светлые символы) конфигурациях при T = 4,2 K.

Кроме того, ВАХ на начальном резистивном участке практически не реагирует на изменение направления магнитного поля. Величина критического тока и форма ВАХ остаются неизменными как в поперечном, так и в продольном внешнем магнитном поле. Однако, как известно, в сверхпроводниках второго рода критический ток в продольном поле может существенно превышать ток в поперечном поле. Увеличение критического тока в несколько раз наблюдалось в материалах как со слабым, так и сильным пиннигом, в проводах и тонких лентах. Основным объяснением этому явлению было предположение о геликоидальном протекании тока по сверхпроводнику (бессиловая конфигурация тока-поля). В такой конфигурации сила Лоренца не действует на вихри и, соответственно, не должно быть рассеяния энергии движущимися вихрями.

Для объяснения аномального поведения ВАХ в работе проведено одно из наиболее вероятных объяснений такой формы ВАХ – возникновение джозефсоновской генерации в мезоскопической системе сверхпроводник – металл переходов в закаленных образцах CuNb. Для выяснения такой возможности было проведено сравнение экспериментальной ВАХ с теоретической ВАХ одиночного SN контакта. Наиболее близкой к эксперименту оказалась интерполяция пологого участка ВАХ пробной функцией $V=R\sqrt{I^2-(I_c)^2}$ для данных, полученных в присутствие магнитного поля. Это согласуется с тем обстоятельством, что резистивная модель Джозефсона, справедлива лишь в узкой окрестности T_c. Вдали от T_c наблюдаются значительные отклонения от этой модели, приводящие к существенной модификации (уплощению) начального участка ВАХ контакта. Для рассматриваемого набора экспериментальных кривых удаление температуры измерений, равной 4,2 К, от T_c сокращается с ростом поля H. Соответственно этому, с увеличением магнитного поля экспериментальные кривые становятся все более похожими на описываемые корневым законом резистивной модели Джозефсона (рис. 6).



Рис. 6. Фрагменты ВАХ образца CuNb12b (темные символы) и результат расчета корневой ВАХ по формуле $V=R\sqrt{I^2-(I_c)^2}$ (линии). ВАХ измерены при T=4,2 К и направлении поля $H\perp I$. Значения I_c подобраны из соображений близости расчетных и экспериментальных данных на аномальном участке ВАХ, величина R для всех трех расчетных кривых одинакова и равна 3,5 мкОм.

ВТСП ленты 2-го поколения. В результате проведенных динамических испытаний лент 2-го поколения для случая одиночной и бифилярной геометрий ленты, для различных амплитуд тока, было установлено, что нагрев лент происходит по-разному. Подобное отличие, по всей видимости, может быть обусловлено изменением конфигурации поля на границах образца. Для подтверждения этого результата, был рассчитан нагрев адиабатически изолированной ленты и нагрев с учетом теплоотдачи для одного из наиболее характерных то-ков – 793 А (рис. 7). Из сравнения результатов, видно, что экспериментальная и



Рис. 7. Экспериментальное и расчетное изменения температуры образца при амплитуде тока 793 А для одиночной и бифилярной лент.

расчетная кривые зависимостей температуры от времени в период нагрева удовлетворительно согласуются как для бифилярной геометрии, так и для одиночной ленты. Этот результат позволил сравнить основные заявленные параметры лент с полученными экспериментальными результатами, исследовать их стабильность и устойчивость при многократных перегрузках.

Следующим этапом исследований явилось изучение процесса остывания лент после пропускания импульса тока для одиночной ленты (рис. 8, *a*) и ленты, помещенной между двумя кремниевыми пластинами (размер пластины



Рис. 8. Остывание одиночной лент (*a*) и ленты помещенной между двумя кремниевыми пластинами (*б*).

 $52 \times 12 \times 0.8 \text{ мм}^3$) (рис. 8, б). Было установлено, что во втором случае остывание происходит быстрее. По всей видимости, такое поведение связано с разрушением пленочного режима кипения жидкого азота, следовательно, и со способом передачи тепла через сплошную пленку пара, отделяющую поверхность ВТСП ленты от массы жидкого азота с температурой 77 K, и переходом к режиму переходного кипения на ленте с последовательным чередованием паровых и жид-костных структур, омывающих поверхность ленты.

Для проверки полученного результата был проведен расчет с использованием кривой кипения жидкого азота на поверхности нагрева при стационарном режиме тепловыделения и теплоотдачи (рис. 9). Эта кривая состоит из пяти различных областей с различными режимами теплопередачи. Границы между различными режимами стационарной кривой кипения обозначены буквами *a*, *b*, *c*, *d*, *e* и *f*. Анализ кривых охлаждения ВТСП лент, нагретых в импульсном режиме до температур T_{max} , заметно превышающих минимальную температуру поверхности нагрева при пленочном кипении, позволяет заключить, что их охлаждение сначала происходит в соответствии со стационарной кривой пленочного кипения. Однако согласно опытным данным, полученным при остывании образцов ВТСП ленты различной длины (рис. 8, *б*) потеря устойчивости



Рис. 9. Кривая кипения жидкого азота при атмосферном давлении.



Рис. 10. Зависимость избыточной температуры на границе между пленочным и переходным режимами кипения от избыточной температуры до начала охлаждения ленты. Экспериментальные данные (квадраты) и квадратичный полином (кривая).

паровой пленки азота происходит при более высокой температуре перехода от пленочного режима кипения к переходному режиму, чем в стационарном случае. Более того, чем больше максимальный перегрев ленты, достигнутый по окончании импульса, тем больше температура v_e . Согласно экспериментальным данным для лент SF12100 длиной 50 см, соотношение избыточной температуры v_e с максимальной избыточной температурой v_f в начальной точке охлаждения представлено на рис. 10.

Для проведения дальнейшего расчета охлаждения ленты было выдвинуто предположение, что переходный режим кипения при охлаждении ленты после импульсного нагрева может быть описан прямой в логарифмической системе координат, как и в стационарном режиме теплоотдачи, проходящей через точки e и c. Параметры этой прямой для области переходного кипения при охлаждении легко найти, используя предварительно найденное значение v_e , используя данные рис. 8 и q_e по стационарной кривой теплоотдачи для пленочного режима кипения.

На рис. 11 показано сравнение расчетных и измеренных зависимостей изменения температуры ленты во времени при охлаждении после окончания импульса тока. Для последней области кривая теплоотдачи получена из рассмотренной выше оценки. При использовании реальной толщины ленты видно, что наклон расчетных кривых охлаждения в различных областях близок к наклону экспериментальных кривых охлаждения, но достижение переходного режима кипения происходит несколько позднее, чем по результатам эксперимента.



Рис. 11. Охлаждение ленты 2-го поколения (SF12100) в жидком азоте после пропускания импульса тока амплитудой 750 А.

Однако, если принять эффективную толщину лены равной примерно 0,7 – 0,75 от реального значения (т.е. 70 – 75 мкм), то можно получить почти идеальное соответствие расчетных и опытных кривых охлаждения, особенно для образцов большой длины (50 см).

При исследовании динамических ВАХ также было обнаружено, что в некоторой области токов данные характеристики необратимы при амплитудах тока $I_0 > 680$ A (рис. 12). Эффективное электрическое сопротивление увеличивается даже после того, как ток I(t) испытывает спад после достижения максимума. Более того, рассчитанные значения сопротивления образцов $R_{\rm eff} \approx 0.5$ мОм и $R_{\rm eff} \approx 0.8$ мОм при токах $I_0 \sim 693$ А и $I_0 \sim 706$ А соответственно, оказывается достаточно малой величиной в сравнении с сопротивлением ленты в нормальном состоянии, которое приблизительно равно 1,4 мОм/см при 92 К. Принимая во внимание резкое изменение динамических ВАХ вблизи минимума V(I), было выдвинуто предположение, что данное поведение отражает переход ленты в новое состояние с образованием резистивного домена в сверхпроводящем состоянии. Такое поведение наблюдалось на различных участках ленты. Исходя из вышеописанных наблюдений и расчетов, для определения условий перехода ленты в резистивное состояние, был проведен расчет запасаемой энергии вблизи сверхпроводящего перехода. Как оказалось, значение запасаемой энергии, определяющее условие перехода, $E_{\rm th} \sim 5$ мДж/см, в случае адиабаты, приводит к увеличению температуры YBCO, следовательно, и слоев серебра ленты на величину ~ 10 K.



Рис. 12. Динамическая ВАХ образца длиной 23 см для различных амплитуд тока. На врезке показана временная зависимость сопротивления образца при амплитуде тока *I*₀ = 693 A.



Рис. 13. Временная зависимость запасаемой энергии в ленте на сантиметр длины.

Более подробное изучение развития неустойчивости в ленте с использованием выше изложенных результатов было проведено для режима протекания по ленте переменного тока. Из рис. 13 видно, что неустойчивость развивается при малых амплитудах переменного тока, но при значениях $I > I_c$. Накапливаемая энергия, которая необходима для перехода ленты в неустойчивое состояние, дает возможность оценить число необходимых периодов. Расчет периодов показал, что переход ленты в резистивное состояние происходит только после некоторого порогового значения. Например, для амплитуды тока $I_0 = 480$ A переход начинается только через 170 периодов. Для проверки данного результата было проведено измерение временной зависимости падения напряжения и тока вдоль ленты, длиной 43 см.

Результаты проведенных испытаний на переменном токе представлены на рис. 14. Видно, что при пропускании переменного тока, в течение 4,71 с, сигнал от образца ведет себя квазигармонично, а затем резко падает. При непосредственном наблюдении образца обнаруживается узкая область кипения вдоль ленты, длиной 1 см. Такое поведение ленты подобно работе токоограничителя при непосредственном ограничении тока при коротком замыкании. Расчетное сопротивления данного участка $R_d \approx 2$ мОм/см, что намного больше, чем сопротивление ленты при 92 К. Данное обстоятельство позволяет предположить, что наблюдаемая область кипения находится в нормальном состоянии. По мощности диссипации также был рассчитан перегрев этой области ленты, который составил значение порядка 8 К.



Рис. 14. Временная зависимость начального и конечного фрагментов тока и падения напряжения в образце. На вставке показан переход ленты в резистивное состояние.

Согласно экспериментальным результатам, переход ленты в резистивное состояние происходит при конкретной величине $I_{\rm th} = 474$ А. Следовательно, беспрепятственное протекание тока может быть при значении $I_0 < I_{\rm th}$, когда лента находиться в тепловом равновесии. По рассчитанному значению энергии необходимой для перехода ленты, которое составляет Q = 5,3 мДж/см, рассчитано необходимое число периодов переменного тока, для осуществления перехода. По данному значению было рассчитано время перехода ленты для различных токов $I_0 > I_{\rm th}$ и проведено сравнение с расчетным значением.



Рис. 15. Зависимость времени перехода ленты в резистивное состояние от амплитуды тока.

Результаты расчетов, показанные на рис. 15, качественно согласуются с экспериментальными результатами с учетом допущений, сделанных при расчете.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Обнаружена модификация сверхпроводящих характеристик трехмерных микро- и нанокомпозитов CuNb с различной степенью дисперсности ниобиевых включений при переходе к наномасштабному уровню их структурирования в виде размерной перенормировки и уменьшения критической температуры нанокомпозита по сравнению с гранулярным и массивным сверхпроводником, что связано с приближением размеров ниобиевых включений к длине когерентности эффективной сверхпроводящей среды ξ_d = 220 Á.
- 2. Обнаружено изменение ВАХ в нанокомпозите CuNb. На ВАХ нанокомпозита присутствуют черты ВАХ мезоскопических контактов металл – сверхпроводник. Уровень сопротивления на этом резистивном участке ВАХ более чем на порядок ниже ожидаемого даже с учетом снижения эффективности рассеяния нормальных электронов на границе металл-сверхпроводник за счет андреевского отражения. Полученные результаты удовлетворительно объясняются в рамках резистивной модели джозефсона вблизи критической температуры T_c .
- 3. Изучены электродинамические и тепловые процессы при токовых нагрузках различной мощности и длительности в импульсном и непрерывном режимах на специально сконструированной установке.
- 4. Используя модифицированную кривую переходного кипения жидкого азота, в том числе, для случаев различных изоляторов, развита модель расчета охлаждения ВТСП лент 2-го поколения. Использованный метод расчета кривых охлаждения показал удовлетворительное согласие опытных кривых охлаждения и развитой модели.
- 5. Впервые было обнаружено, что при протекании непрерывного переменного тока через ВТСП ленты 2-го поколения, в результате тепловой накачки, имеет место образование резистивного домена. Проведенные аналитические оценки подтверждают наблюдаемое поведение ленты и хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- И. Ф. Волошин, П. Н. Дегтяренко, А. С. Иванов, В. С. Круглов. Исследование сверхпроводящих свойств образцов CuNb с высокодисперсной структурой. // В Сб.: Труды научной сессии МИФИ, 2007, т. 4 с. 155-156.
- P. N. Degtyarenko, A. S. Ivanov, V. S. Kruglov and I. F. Voloshin. Superconductivity in Cu-Nb with extremely fine structure. // In: Abstracts of 8th European Conference on Applied Superconductivity, 15-21 September, 2007, Brussels, Belgium, p. 115.
- 3. P. N. Degtyarenko, A. S. Ivanov, V. S. Kruglov and I. F. Voloshin. Superconductivity in Cu-Nb with extremely fine structure. // J. Phys.: Conf. Ser., 2008, v. 97(1), 012024 (8pp).
- И. Ф. Волошин, П. Н. Дегтяренко, А. С. Иванов, В. С. Круглов. Исследование сверхпроводящих образцов CuNb с высокодисперсной структурой. // В Сб.: Аннотац. докладов конференции по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению, 2007, РНЦ «Курчатовский институт», с. 204.
- И. Ф. Волошин, П. Н. Дегтяренко, А. С. Иванов, В. С. Круглов. Исследование сверхпроводящих свойств высокоупрочненных микрокомпозитов CuNb. // В Сб.: Труды научной сессии МИФИ, 2008, т. 4, с. 32-33.
- 6. И. Ф. Волошин, П. Н. Дегтяренко, А. С. Иванов, В. С. Круглов. Экспериментальное исследование электродинамических свойств «трехмерных» композитов CuNb с высокодисперсной структурой. // Инженерная физика, 2008, т. 2, с. 26-30.
- L. M. Fisher, P. N. Degtyarenko, I. N. Dul'kin, A. V. Kalinov, I. F. Voloshin. Study of current instability in 2G HTS tape for fault current limiters. // In Abstracts of 9th European Conference on Applied Superconductivity, 13-17 September 2009, Dresden, Germany, p. 59.
- L. M. Fisher, P. N. Degtyarenko, I. N. Dul'kin, A. V. Kalinov I. F. Voloshin. Thermal behavior of 2G HTS tape for use in resistive fault current limiters. // In: Abstracts of 9th European Conference on Applied Superconductivity, 13-17 September 2009, Dresden, Germany, p. 150.
- 9. И. Ф. Волошин, П. Н. Дегтяренко, А. С. Иванов, В. С. Круглов. Сверхпроводимость и резистивные аномалии образцов Cu-Nb с высокодисперсной структурой. // Нанотехника, 2009, т. 4(20), с. 33-43.
- 10. D. F. Alferov, P. N. Degtyarenko, I. N. Dul'kin, L. M. Fisher, V. P. Ivanov, A. V. Kalinov, V. A. Sidorov and I. F. Voloshin. Thermal

behavior of 2G HTS tape for use in resistive fault current limiters. // J. Phys.: Conf. Ser., 2010, v. 234(3), 032001 (5pp.).

- 11. Д. Ф. Алферов, И. Ф. Волошин, П. Н. Дегтяренко, И. Н. Дулькин, В. П. Иванов, А. В. Калинов, В. А. Сидоров, Л. М. Фишер. Тепловые процессы в ВТСП лентах 2-го поколения при пропускании синусоидального импульса тока. // В Сб.: Труды конференции по прикладной сверхпроводимости, 2010, Москва, с. 18.
- P. N. Degtyarenko, I. N. Dul'kin, L. M. Fisher, A. V. Kalinov, I. F. Voloshin, V. A. Yampol'skii. Thermoelectric instability induced by a single pulse and alternating current in superconducting tapes of second generation. // Fizika Nizkikh Temperatur, 2011, v. 37(2), p. 127-133.