

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П. Н. Лебедева

Российской Академии Наук

На правах рукописи

Демихов Тимофей Евгеньевич

**Влияние радиационного облучения и
магнитного поля на критические параметры
композитных сверхпроводящих лент на основе
ВТСП**

Специальность 01.04.07. – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва, 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: Член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Сибельдин Николай Николаевич
(ФИАН, ОФТТ)

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Михайлова Галина Николаевна
(профессор, ИОФ РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Винников Лев Яковлевич (профессор,
ИФТТ РАН)

доктор физико-математических наук
Менушенков Алексей Павлович,
(профессор, НИЯУ «МИФИ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Физико-
технический Институт им. А.Ф. Иоффе
Российской Академии Наук (ФТИ)

Защита состоится «21» марта 2016 года в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.023.03 Физического института им.
П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Факс: 8(495)135-78-80

e-mail: postmaster@lebedev.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу:

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Электронная версия автореферата размещена: <http://www.lebedev.ru>

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

д.ф.-м.н.

М.А. Казарян

Общая характеристика работы

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время одним из важных направлений научно-технического прогресса является создание различных устройств на основе сверхпроводимости. Это особенно актуально для нашей страны с её огромными территориями, где неизбежно теряются гигантские объемы энергии при её передаче.

Хотя явление сверхпроводимости было открыто Х. Камерлинг Оннесом в 1911 г. [1], бурное развитие этой области физики пришлось на вторую половину XX столетия, когда были получены основополагающие результаты по теории сверхпроводимости и был открыт ряд сплавов и соединений, сохраняющих сверхпроводящее состояние в сильных магнитных полях (~10 Тл) при высоких значениях тока, протекающего по сверхпроводнику. Это так называемые сверхпроводники 2 рода с критической температурой 10-20К. На основе этих материалов до сих пор создаются и работают мощные магнитные системы в установках физики высоких энергий, медицинских томографах и другом оборудовании при охлаждении жидким гелием.

Однако продолжались поиски сверхпроводников с более высокой критической температурой. В 1977 г. была опубликована монография [2], в которой рассматривались возможные пути радикального повышения критической температуры сверхпроводников и обсуждались физические свойства тех систем, с которыми связаны надежды на значительное повышение критической температуры. За открытие в 1986 г. соединения La-Ba-Cu-O [3] из класса высокотемпературных сверхпроводящих купратов была присуждена Нобелевская премия. А в 1987 г. в Хьюстонском Университете, США, было открыто первое сверхпроводящее соединение с критической температурой выше точки кипения азота - $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO-123) [4], впоследствии было показано,

что иттрий можно заменить другими редкоземельными элементами (Nd, Eu, Gd, Ho), и при этом свойства сверхпроводника практически не изменяются.

Сверхпроводимость в сложных оксидах меди была открыта уже более 25 лет назад, однако потребовалось длительное время для разработки сложнейших технологий, обеспечивших получение композитных лент-проводов, которые по своей надежности можно было бы сравнивать с металлическими проводниками тока, например из меди. Венцом усилий ученых и инженеров всего мира было создание гибких длинномерных многослойных ВТСП проводов 2-поколения, которые имеют плотность критического тока выше 1 MA/cm^2 при 77К в собственном магнитном поле. Поскольку по своей природе указанные материалы имеют сильную анизотропию токонесущих свойств, быстрое уменьшение плотности криттока в магнитных полях, в частности, в случае приложения поля вдоль оси *c*, ставит ограничения для применения таких проводов в моторах, трансформаторах, генераторах, соленоидах и магнито-резонансных томографах (МРТ). Улучшение свойств уже сформированных проводов второго поколения (2G) является одним из приоритетных направлений в развитии технологий их приготовления и использования.

Данная работа посвящена исследованию влияния радиационных дефектов на свойства сверхпроводников. Сверхпроводники очень чувствительны к наличию структурных дефектов, которые могут являться центрами пиннинга абрикосовских вихрей и определять токонесущие свойства сверхпроводника в магнитных полях. Методом, позволяющим направленно изменять дефектную структуру материала, является облучение сверхпроводника ионизирующими частицами различной природы. Поэтому одной из актуальных задач физики сверхпроводимости является изучение радиационных эффектов. Это принципиально важно и для радиационного материаловедения: в плане модификации сверхпроводящих свойств для практических применений и

прогнозирования поведения материала в экстремальных условиях, поскольку сверхпроводники широко применяются в установках физики высоких энергий.

В последние два десятилетия проводились многочисленные исследования свойств ВТСП лабораторных пленочных образцов различного структурного совершенства в условиях облучения высокоэнергетическими частицами различной природы (см., например, [5],[6],[7],[8]). Однако композитные ВТСП на основе купратов – это многослойные или многожильные структурированные материалы, которые существенно меньше изучались с точки зрения радиационной стабильности и накопления радиационных дефектов при облучении.

В работе [9] были определены критические параметры и сила пиннинга в монокристаллах $(Y_xTm_{1-x})Ba_2Cu_3O_7$ после облучения ионами Kr с дозами до 6×10^{11} ион/см². Магнитные измерения в импульсных полях до 50 Тл в диапазоне температур 4.2–90 К выявили, что в полях до 20 Тл значительно увеличивается критический ток и что в диапазоне температур от $T = 40$ до 90 К существенно увеличивается критическое поле.

К началу работы над диссертацией коллегами уже были получены результаты воздействия ионов $^{132}Xe^{27+}$ (167 МэВ), $^{84}Kr^{17+}$ (107 МэВ), $^{40}Ar^{8+}$ (48 МэВ) на ВТСП 2G ленты YBCO [10]. Была определена критическая доза облучения ионами $^{132}Xe^{27+}$, при которой происходит необратимое разрушение сверхпроводящего состояния. Для ионов $^{40}Ar^{8+}$ был определен диапазон флюенсов, в котором происходит увеличение критического тока (до 18%), а также найдены значения флюенсов для ионов $^{84}Kr^{17+}$, при которых начинается снижение критической температуры.

В данной диссертационной работе эти исследования были продолжены с применением новых подходов и методов, дополнены, уточнены и детально проанализированы.

В результате численного моделирования процессов облучения композитной ленты YBCO (123) ионами аргона, криптона и ксенона с энергией 1,2 МэВ/а.е.м. оценен размер трехмерной области вокруг траектории тяжелого иона, в которой возможны фазовые переходы типа плавления и испарения, и, следовательно, образуются треки тяжелых ионов. Радиусы треков, полученные из расчетов, сравнивались с данными просвечивающей электронной микроскопии (HRTEM) на образцах ленты YBCO(123), облученных ионами криптона с энергией 107 МэВ при флюенсах 10^{10} - 10^{11} ион/см². Имеется хорошее согласие экспериментальных данных с расчетами. Размер треков примерно равен размеру абрикосовского вихря, поэтому такие дефекты могут служить центрами пиннинга. Этот результат позволяет объяснить экспериментальные данные по влиянию ионного облучения на критические параметры сверхпроводника и подтверждает справедливость принятых приближений в использованной модели термического пика.

Методами электронной микроскопии и дифракции рентгеновских лучей показано, что в образцах композитной ВТСП ленты имеются значительные внутренние напряжения, которые со временем приводят к разрушению сверхпроводящего слоя. Было обнаружено, что после облучения композитной ВТСП ленты ионами $^{40}\text{Ar}^{8+}$ с энергией 48 МэВ или $^{84}\text{Kr}^{17+}$ с энергией 107 МэВ при флюенсе 10^{10} ион/см² происходит снятие внутренних напряжений. Наблюдаемый эффект объяснен ускорением диффузионных процессов за счет возникающих при образовании треков избыточных термодинамически неравновесных дефектов, что приводит к образованию более равновесных структурно-фазовых состояний.

. Кроме этого, были использованы протоны в качестве ионизационного излучения, а также проведены эксперименты с новой ВТСП лентой на основе GdBCO(123).

Широкое применение сверхпроводящих материалов потребовало от криогенной техники разработки методов и средств для более удобного и дешевого проведения экспериментов и создания низких температур для охлаждения сверхпроводников без использования жидкого азота и гелия. Разработки в этом направлении привели к созданию криогенных рефрижераторов, работающих по циклу Гиффорда-МакМагона. Необходимость в таких криорефрижераторах продиктована также и постепенно снижающимися запасами газообразного гелия [11].

Попытки создать сверхпроводящий соленоид на конвекционном охлаждении с помощью криорефрижераторов в начале 80-х годов не увенчались успехом – теплопритоки от медных токовводов не позволяли охладить магнит до рабочей температуры. С появлением ВТСП лент стало возможным создать гибридные токовводы и тем самым снизить теплопритоки в криостат с магнитом в 5-10 раз. В начале 90-х годов в Японии был создан гибридный сверхпроводящий магнит из NbTi/Nb₃Sn на 10 Тл, охлаждаемый криорефрижератором. Отверстие с комнатной температурой имело диаметр 100 мм, а в качестве токовводов были использованы ВТСП ленты из Bi (2212) [12]. Поэтому в диссертации была поставлена задача создать криомагнитную систему с криорефрижератором для изучения влияния ионизирующего излучения на критические токи в сильных магнитных полях в ВТСП лентах второго поколения, тем более что в нашей стране таких установок еще не было.

ЦЕЛИ и ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Основной целью данной работы являлось исследование влияния радиационного облучения и магнитного поля на критические параметры (температура сверхпроводящего перехода, плотность критического тока) многослойных композитов на основе ВТСП составов YBCO(123), GdBCO(123),

а также разработка и реализация безжидкостной криомагнитной системы с индукцией магнитного поля до 8 Тл для выполнения этих исследований.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Рассчитана, спроектирована, изготовлена, испытана и введена в эксплуатацию безжидкостная криомагнитная система с паспортной индукцией магнитного поля до 8 Тл. В ходе испытаний достигнута величина индукции магнитного поля 9 Тл.
2. Изучена радиационная стойкость образцов композитных ВТСП лент на основе YBCO(123) к облучению ионами криптона.
3. С использованием модели термического пика (МТП) рассчитаны временная (после попадания единичного иона) зависимость температуры решетки слоя ВТСП в центре трека и радиальный профиль температуры при облучении ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ), $^{84}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (48 МэВ). Рассчитаны диаметры треков ионов в композитной ленте ВТСП.
4. Методами рентгеноструктурного анализа, растровой и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения изучены микроструктура и радиационные дефекты в облученных ионами криптона образцах.
5. Исследовано влияние облучения ионами на внутренние напряжения в сверхпроводниковом слое многослойных ВТСП лент.
6. Изучено влияние облучения протонами с энергией 2,5 МэВ на ВТСП ленты 2-го поколения на основе YBCO(123) и GdBCO(123).
7. Исследовано влияние температуры и магнитного поля на критический ток ВТСП лент на основе YBCO(123) и GdBCO(123).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были выбраны коммерческие ВТСП ленты 2-го поколения на основе YBCO(123) (SuperPower. Inc.) и GdBCO(123) (СуперОкс) шириной 4 и 12 мм. Облучение тяжелыми ионами Хе, Кг и Аг проводилось в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова в ОИЯИ, облучение протонами – на ускорителях Ван-де-Граафа в Лаборатории им. И.М.Франка в ОИЯИ и в НИИЯФ МГУ. Изменение кристаллической структуры сверхпроводника в результате ионного облучения изучалось с помощью рентгеновской дифрактометрии. Для исследования микроструктуры и радиационных дефектов использовались растровый электронный микроскоп с рентгеновским микроанализатором и просвечивающий электронный микроскоп высокого разрешения.

Критическая температура образцов ВТСП композитных лент определялась из зависимости сопротивления от температуры $R(T)$ в диапазоне 300-4,2 К. Для измерения критического тока использовались резистивные методы: четырехзондовый метод измерения вольт-амперных характеристик на постоянном токе и импульсный на переменном токе [10],[13],[14*],[19]. Зависимость критического тока от температуры и магнитного поля в GdBCO образцах изучалась также с помощью СКВИД-магнетометра [15],[21]. Критические токи во внешнем магнитном поле измерялись как в продольной ($I_c \parallel H$), так и в поперечной геометрии ($I_c \perp H$). Магнитное поле до 8 Тл создавалось безжидкостной магнитной системой с соленоидом на основе сплава NbTi, криокулером и теплым полем [17*], разработанной специально для этих исследований.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

- Создана компактная мобильная безжидкостная криомагнитная система на 8 Тл с рабочей камерой диаметром 50 мм при комнатной температуре, в

которой также предусмотрена возможность заполнения рабочего объема жидким азотом. Получен патент на полезную модель.

- Для ВТСП лент YBCO(123) определено критическое значение дозы облучения ионами криптона (10^{13} ион/см²), при которой происходит разрушение сверхпроводимости.

- С помощью модели термического пика (МТП), модифицированной для описания взаимодействия быстрых ионов с многослойной структурой ВТСП ленты, оценены размеры радиационных дефектов, которые могут играть роль новых центров пиннинга абрикосовских вихрей.

- С помощью электронной микроскопии высокого разрешения обнаружены радиационные дефекты, размеры которых (~ 5 нм) по порядку величины согласуются с расчетными данными на основе МТП.

- Впервые показано, что при флюенсах 10^{10} - 10^{11} ион/см² при облучении ионами $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (48 МэВ) и $^{86}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) происходит релаксация внутренних напряжений в сверхпроводниковом слое многослойных ВТСП лент, увеличивается критическая плотность тока и улучшается адгезия к подложке. Получен патент на метод обработки сверхпроводника.

- Получены данные о влиянии облучения протонами на критические характеристики композитных ВТСП лент; установлено, что при облучении протонами с энергией 2,5 МэВ критический ток падает более чем на порядок при дозах $\Phi=2\times 10^{16}$ р/см² для YBCO(123) и 6×10^{16} р/см² для GdBCO(123), в то время как критическая температура уменьшается незначительно.

- Установлены зависимости критического тока от индукции магнитного поля в ВТСП лентах на основе GdBCO(123) в широком диапазоне температур и магнитных полей.

- Получены данные об анизотропии критического тока композитной ВТСП ленты GdBCO(123) во внешнем магнитном поле.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Результаты расчетов диаметров треков ионов с помощью модели термического пика: радиусы треков ионов аргона с энергией 48 МэВ, криптона (107 МэВ) и ксенона (167 МэВ) составляют 5 нм, 6,2 нм и 6,8 нм, соответственно.
2. Размеры радиационных дефектов от облучения ионами криптона, измеренные с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, сравнимы с размерами абрикосовских вихрей и составляют ≈ 5 нм, что хорошо согласуется с результатом расчета.
3. При облучении сверхпроводящей композитной ленты на основе ВТСП ионами криптона при флюенсах 10^{10} - 10^{11} ион/см² происходит релаксация внутренних напряжений и улучшение адгезии ВТСП слоя к подложке.
4. Результаты исследования влияния облучения протонами с энергией 2,5 МэВ в диапазоне флюенсов 10^{14} - 10^{17} р/см² на критическую температуру и критический ток ВТСП лент на основе GdBCO(123). Критический ток падает больше, чем на порядок при $\Phi=2 \times 10^{16}$ р/см² для YBCO(123) и 6×10^{16} р/см² для GdBCO(123).
5. Результаты исследования влияния магнитного поля с индукцией до 8 Тл на критические параметры ВТСП лент на основе GdBCO(123). Критический ток снижается более чем на порядок при $B = 2.5$ Тл в перпендикулярном направлении тока магнитном поле и при $B = 8$ Тл в параллельном поле.
6. Технические характеристики и устройство безжидкостной криомагнитной системы на 8 Тл для изучения свойств материалов в сильных магнитных полях.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Автор лично спроектировал криомагнитную систему на 9 Тл, участвовал в намотке соленоида, сборке и испытаниях системы, а также осуществил ввод в эксплуатацию системы в ИОФ РАН в Лаборатории лазерной физики полупроводников. Автор лично принимал участие в экспериментальных исследованиях, проведенных в ИОФ РАН с 2011 г. по 2015 г., связанных с изучением радиационной стойкости ВТСП лент, в том числе в подготовке образцов, измерениях критических токов без поля и в магнитных полях, в интерпретации полученных результатов, в подготовке публикаций. Лично выступал на 7 конференциях.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность и обоснованность результатов определяется использованием различных дополняющих друг друга экспериментальных методов, многократными измерениями на большом наборе образцов, жёсткой воспроизводимостью результатов измерений, а также удовлетворительным согласием результатов теоретических вычислений с экспериментальными данными. Результаты также согласуются с экспериментальными данными, известными из литературы.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты воздействия ионизирующего излучения (ионов, протонов) на ВТСП ленточные проводники могут быть использованы на предприятиях Росатома и Роскосмоса для прогнозирования влияния радиационных дефектов на рабочие характеристики проектируемых сверхпроводящих систем для физики высоких энергий и изучения космического пространства (в ускорителях, установках термоядерного синтеза, плазменных двигателях и др.)

Результаты показывают, что при определенных условиях облучения сверхпроводящие свойства композитных ВТСП лент могут быть заметно улучшены. Эти данные могут быть использованы при разработке современных сверхпроводящих материалов и изделий на основе пленочных технологий.

Разработанная безжидкостная криомагнитная система может быть тиражирована и использована для исследования свойств различных материалов в сильных магнитных полях в широкой области температур без использования жидкого гелия, что существенно снижает стоимость экспериментов и делает их безопасными.

Результаты, полученные в ходе реализации безжидкостной криосистемы, использованы при создании векторной, с управляемой ориентацией магнитного поля, криомагнитной системы с максимальной индукцией по осям координат 2/5 Тл.

АППРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенных в ходе выполнения данной диссертационной работы исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22), Марсель, Франция, 12-16 сентября 2011; IV Международная конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости -2011», 3-7 Октября 2011 года, Москва; I Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости, НКПС-2011, 6-8 декабря 2011, Москва; ICSM-2012 (International Conference on Superconductivity and Materials), 29 апреля - 4 мая 2012, Стамбул; 34-е международное совещание по физике низких температур, 2-6 июля 2012, С.-Петербург; E-MRS-2012 Fall Meeting, Sept. 17-21, Warszawa, Poland; 7th Mechanical and Electromagnetic Effects in Superconductors (MEM13) Workshop (Экс-ан-Прованс, Франция), 12 -14 марта 2013; 21-я Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью», ВИП 2013, Ярославль,

август 2013; EUCAS conference, 15-19 сентября 2013, Генуя, Италия; 2-я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости, НКПС-2013, Курчатовский институт, 26-28 ноября 2013, Москва; XXXI семинар МНТЦ, ноябрь 2013, Южная Корея, Ульсан; ZIENL4 (Будущее и инновации в энергетике с помощью ВТСП), 10-11 марта 2014, Бонн, Германия; 1st International Symposium on Energy Challenges & Mechanics, Абердин, Великобритания, 8-10 июля 2014; E-MRS-2014, Spring Meeting, Lille, France, 25-30 of May, 2014; Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2015), 26 мая - 28 мая 2015 г., МГУ, Москва; Международный семинар МНТ-ХIII «Структурные основы модифицирования материалов» 30 июня – 2 июля 2015 г. Обнинский институт атомной энергетики Национального Исследовательского Ядерного Университета (ИАТЭ НИЯУ МИФИ); XIII Российско-Китайский симпозиум по новым материалам и технологиям. Казань 21-26 сентября 2015 г.; MT-24 International Conference on Magnet Technology, Seoul, Korea, October 18-23 2015.

ПУБЛИКАЦИИ

По материалам диссертации опубликовано 7 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, в том числе 4 статьи в иностранных журналах ([14*], [17*], [18*], [24*], [25*], [26*], [27*]). Результаты работы доложены на 18 конференциях.

Получены Патент на полезную модель 10 августа 2013 г.[28*] и Патент на изобретение 20 марта 2013[29*].

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации 112 страниц текста с 73 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 107 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность данной диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, приведены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна исследований и практическая значимость.

В **первой главе** дан литературный обзор по теме диссертации. Здесь описаны некоторые свойства сверхпроводников, рассмотрено влияние ионизирующих излучений на высокотемпературные сверхпроводники, изложены методы охлаждения сверхпроводящих магнитов; при этом основное внимание уделено безжидкостным методам охлаждения.

В **первом** параграфе дается история создания и обзор современных сверхпроводящих материалов, приводятся критические параметры проводников, а также затронута тематика сверхпроводящих материалов будущего – таких, которые смогут работать при комнатной температуре. Во **втором параграфе** приводятся данные об исследовании сверхпроводящих материалов, облученных электронами, ионами, а также подвергающихся механическому воздействию во внешнем магнитном поле и в отсутствие этого поля. **Третий** параграф раскрывает теоретическую основу пиннинга магнитных вихрей в различных материалах. Следующие три параграфа посвящены техническим вопросам, так, например, в **четвертом** параграфе подробно описаны принципы действия криогенных рефрижераторов замкнутого цикла, а также приводятся способы достижения рекордно низких температур. В параграфе **номер 5** рассмотрены способы достижения высоких магнитных полей, также приводятся данные о практическом использовании магнитов в медицине, науке и энергетике. **Шестой** параграф посвящает читателя работы в принципы создания криостатов с рефрижераторами замкнутого цикла. И наконец, в **седьмом** параграфе приводятся данные об использовании ВТСП материалов в конструкции сверхпроводящих соленоидов.

Глава 2 «Архитектура и свойства исследованных композитных лент, экспериментальные методы» посвящена исследуемым образцам лент. В

первом параграфе дается архитектура лент. На рис.1 изображена структура ВТСП-ленты на основе YBCO 2-го поколения марки SCS4050 [16].

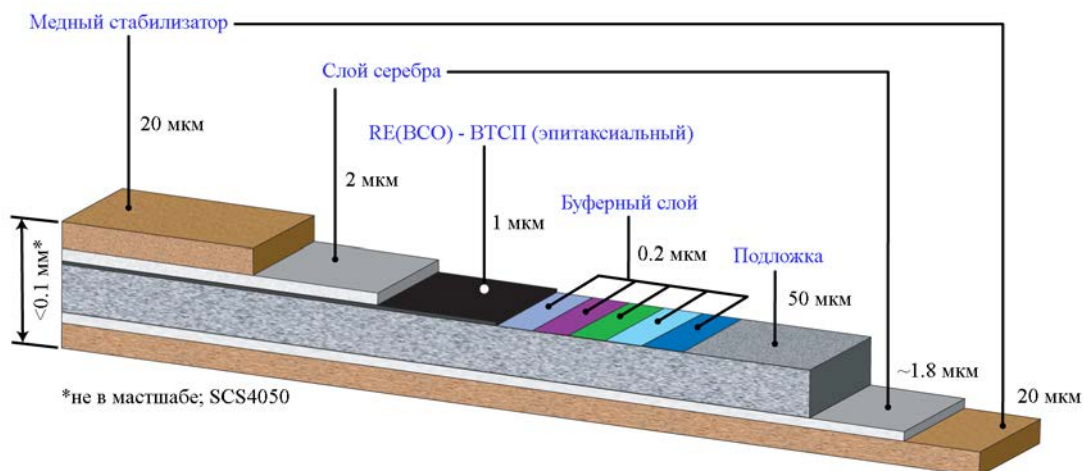


Рис. 1. Конфигурация ВТСП ленты YBCO(123) 2-го поколения марки SCS4050 [16].

Кроме того, в этом параграфе приводятся функциональные параметры и структура 12-мм ленты SF12100 на основе YBCO(123), а также 12-мм ленты на основе GdBCO (123).

Второй параграф посвящен описанию экспериментальных методов. Измерения зависимости электрического сопротивления ленты от температуры $R(T)$ для определения критической температуры (T_c) проводились с использованием стандартного четырехзондового метода.

Измерения критического тока было проведено двумя способами: резистивным и магнитным с помощью СКВИД магнетометра. В первом случае значение критического тока (J_c) при $T=77$ К определялось по данным измерений вольт-амперных характеристик ленты с использованием четырехзондового метода. Во втором, измерения проводились при температурах 2-100К на образцах размерами 4×4 мм², которые вырезались из исследуемой ленты GdBCO. Метод определения $J_c(B)$ от $m(T)$ подробно описан в работах [15],[21].

При исследовании зависимости критических параметров образцов от магнитного поля использовалась безжидкостная магнитная система, описанная в Главе 5 и Приложении диссертации [17*].

Облучение тяжелыми ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ), $^{84}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (48 МэВ) проводилось в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова в ОИЯИ на ускорителе ИЦ-100. Флюенсы ионного облучения изменялись в диапазоне от 5×10^8 до 6×10^{13} ион/см². Облучение протонами с энергией 2,5 МэВ проводилось на ускорителях Ван-де-Граафа в Лаборатории им. И.М.Франка ОИЯИ и в НИИЯФ МГУ. Флюенсы для протонов изменялись в пределах от 10^{15} до 10^{17} р/см².

В работе проводились рентгеноструктурные исследования образцов, а также исследования с помощью электронной просвечивающей и растровой микроскопии.

В 3-й главе «Радиационные дефекты в композитных ВТСП лентах 2-го поколения» представлены результаты изучения ВТСП лент, облученных тяжелыми высокоэнергетичными ионами.

На рис. 2 приведены зависимости критических параметров от флюенса облучения ионами криптона, измеренные при температуре 77 К. При флюенсе $\Phi \cong 6 \times 10^{10}$ ион/см² происходит небольшое увеличение критического тока (5%), а затем начинается его резкое уменьшение вплоть до нуля при $\Phi \cong 2 \times 10^{12}$ ион/см².

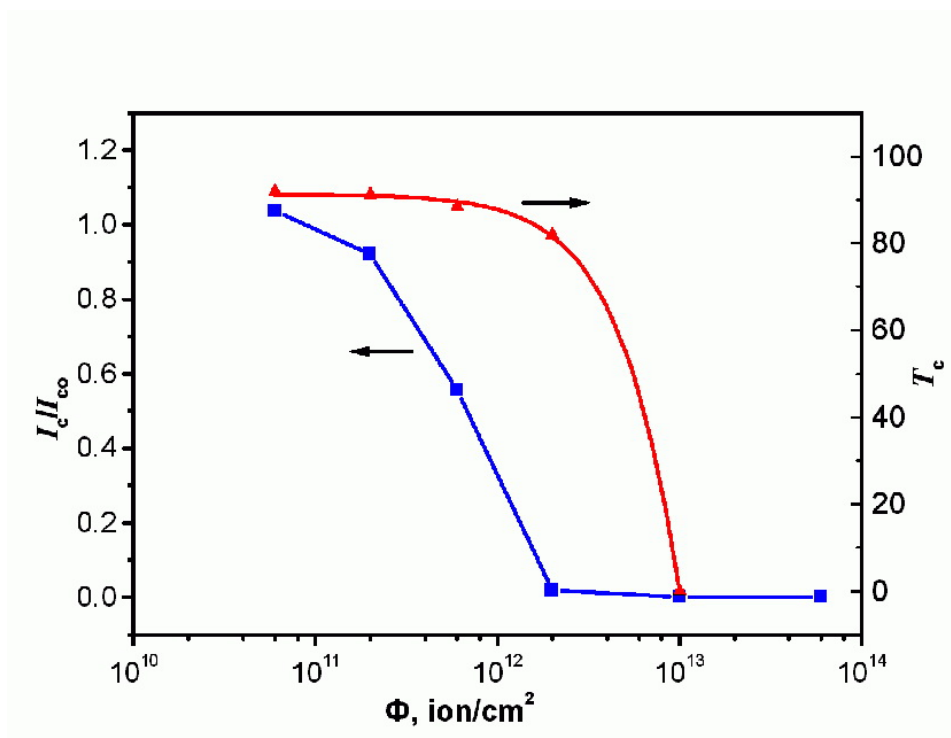


Рис. 2. Зависимость I_c/I_{c0} (■) и T_c (▲) для ленты SF12100 (YBCO) от флюенса облучения ионами $^{86}\text{Kr}^{17+}$.

Аналогичные зависимости для случаев облучения ионами аргона и ксенона приведены в **первом параграфе** этой главы диссертации. Дозы облучения, при которых T_c обращается в нуль, для ионов ксенона и криптона составляют, соответственно, 6×10^{12} ион/см² и 10^{13} ион/см². Эти значения флюенсов определяют пороги разрушения сверхпроводимости. При облучении аргоном при флюенсах до 10^{13} ион/см² T_c не обращается в нуль, однако ее снижение уже очевидно.

В **втором параграфе** приводятся результаты расчётов по модели термического пика (МТП) [20] временной зависимости температуры решетки и радиального профиля температуры слоя ВТСП при облучении ионами Хе (167 МэВ), Kr (107 МэВ) и Ar (48 МэВ). Эти зависимости позволили оценить размеры треков ионов, которые и являются центрами пиннинга абрикосовских вихрей. Рассчитанный размер дефектов, созданных в ВТСП слое ионами аргона, составляет 5 нм, ионами криптона – 6,2 нм и ионами ксенона – 6,8 нм.

В третьем параграфе приводятся результаты электронно-микроскопического исследования радиационных дефектов в сверхпроводнике.

Для исследования структуры композитной ленты и распределения элементов в слоях ленты использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) FEI XL30 (FEI, Нидерланды) с рентгеновским микроанализатором INCA (Oxford). Образцы для РЭМ приготавливались полировкой: снимался верхний слой серебра толщиной 2 мкм с помощью алмазной пленки на полимерной основе в отсутствие воды. Исследования на присутствие возможных вторичных фаз и линейных дефектов проводились с помощью ПЭМ (просвечивающего электронного микроскопа) высокого разрешения CM300UT/FEG (FEI, Нидерланды) с использованием режимов светлого поля. Образцы для ПЭМ были приготовлены травлением ионами Ag с дальнейшей механической полировкой и разрезанием сфокусированным лучом ионов в микроскопе Quanta 3D (FEI, Нидерланды). Исследовались образцы YBCO(123) – необлученные и облученные ионами $^{84}\text{Kr}^{17+}$ с энергией 107 МэВ и флюенсами 10^{10} , 10^{11} ион/см².

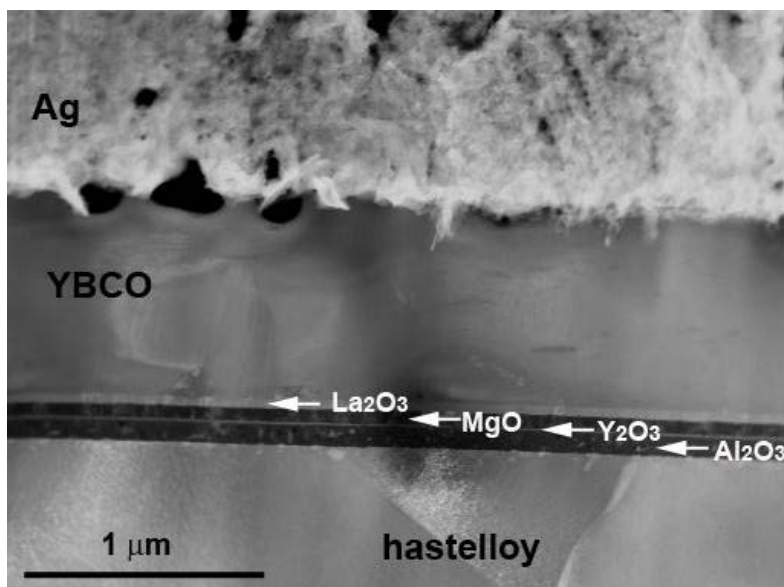


Рис. 3. Структура ВТСП ленты YBCO(123) SF12100. РЭМ изображение.

Детальное изучение архитектуры ленты с помощью РЭМ (рис. 3) позволило определить толщину слоев, а также химический состав слоев и

примесных фаз в сверхпроводнике: подложка из сплава хастеллой С276 толщиной 100 мкм; буферные слои: 93 нм Al_2O_3 , 10 нм Y_2O_3 , 58 нм MgO , 37 нм La_2O_3 ; 1 мкм YBCO (123), 2 мкм Ag . В пленке сверхпроводника имеются преципитаты Y_2O_3 и $\text{BaCuO}_{2,5}$.

Проведение электронно-микроскопических исследований было продиктовано желанием обнаружить радиационные дефекты, вызванные ионным облучением. С помощью ПЭМ высокого разрешения были обнаружены в облученных криптоном образцах радиационные дефекты размером 2–5 мкм (рис.4). Некоторые из этих дефектов сохраняют искаженную кристаллическую структуру YBCO , однако некоторые обладают аморфным ядром.

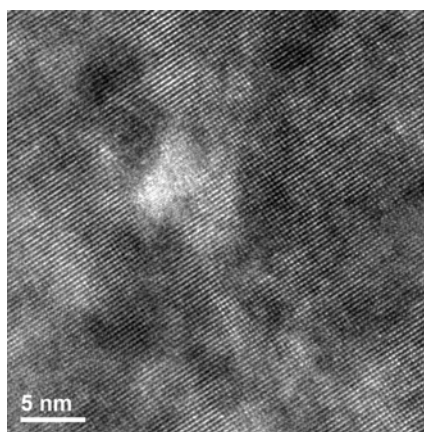


Рис. 4. Микроизображение (ПЭМ) облученного слоя YBCO . Вблизи центральной части изображения виден дефект с разупорядоченной структурой.

В четвертом параграфе третьей главы речь идет о методах снятия внутренних напряжений в композитных $\text{YBCO}(123)$ лентах 2-го поколения с помощью облучения ионами $^{40}\text{Ar}^{8+}$ с энергией 48 МэВ или $^{84}\text{Kr}^{17+}$ с энергией 107 МэВ при флюенсах $(1-2) \times 10^{10}$ ион/см² [18*].

При изучении детальной структуры композитной ленты с помощью РЭМ было обнаружено, что в процессе подготовки образца после снятия слоя серебра в процессе механической полировки в исходном слое $\text{YBCO}(123)$ появляются трещины, расположенные достаточно регулярно (рис. 5(a)). Было высказано

предположение, что причина появления трещин – внутренние напряжения, возникающие в процессе осаждения ВТСП покрытия. В образце после облучения ионами криптона трещины после полировки не возникали (рис. 5(б)).

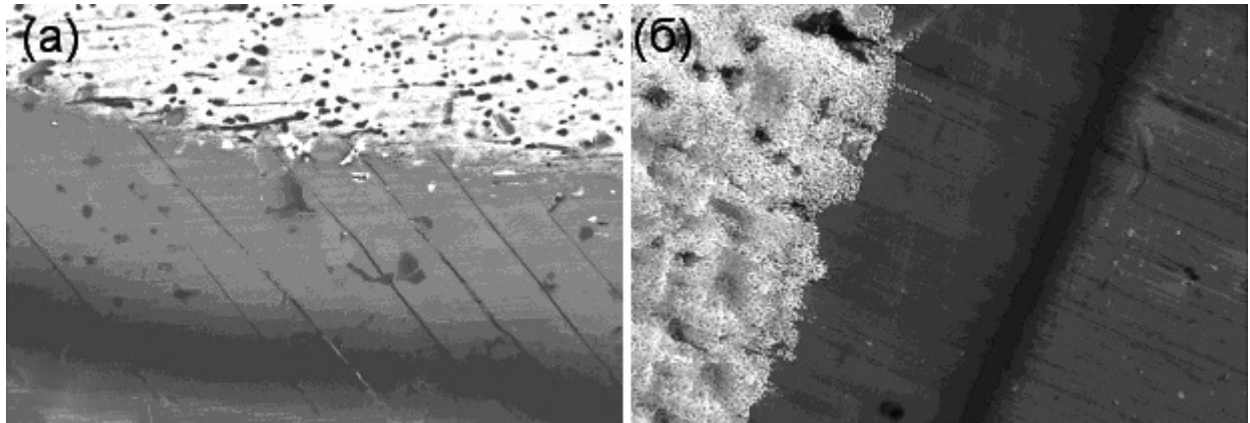


Рис. 5. Микрофотография РЭМ ленты SF12100 сразу после удаления серебра: (а) – в необлученном образце; (б) – слой YBCO(123) без трещин в образце, облученном ионами Kr.

В главе 4 «Влияние протонного облучения на критические параметры лент ВТСП на основе YBCO и GdBCO» описаны исследования влияния облучения протонами с различными флуенсами на критические параметры сверхпроводящих образцов.

Образцы GdBCO(123) представляли собой отрезки композитной ВТСП ленты 2G размерами примерно $0,1 \times 4 \times 30$ мм³. Нами исследовались также образцы 4-мм ленты YBCO(123) SuperPower марки SCS 4050, имевшей следующие критические параметры: $I_c = 100$ А, $T_c = 92$ К.

Энергия протонов была выбрана такой, чтобы частицы достигали ВТСП слоя в многослойной ленте. С этой целью был проведен расчет с помощью программы SRIM [22]. На рис. 6 представлены зависимости $I_c/I_{c0}(\Phi)$ и $T_c(\Phi)$ для ВТСП ленты СуперОкс после облучения протонами. Наблюдается резкое падение критического тока, начиная с флуенса $2,5 \times 10^{15}$ р/см², тогда как

уменьшение критической температуры начинается при значительно больших дозах облучения.

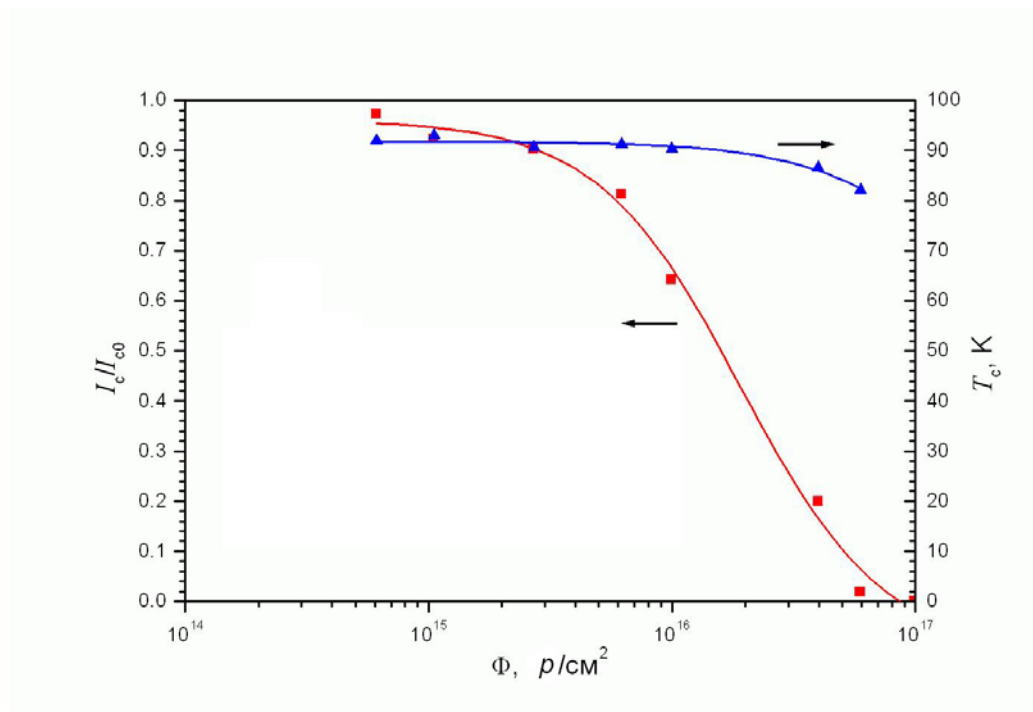


Рис. 6. Зависимости $I_c/I_{c0}(\Phi)$ и $T_c(\Phi)$ для ВТСП ленты GdBCO(123) после облучения протонами. (\blacktriangle) – T_c ; (\blacksquare) – I_c/I_{c0} .

В наших экспериментах не обнаружено возрастания критического тока после облучения протонами ни для лент на основе YBCO, ни для лент на основе GdBCO. Во **втором параграфе** обсуждаются результаты облучения протонами, а также сравниваются причины изменения свойств ВТСП лент при облучении протонами, ионами и электронами.

В **первом параграфе пятой главы «Влияние магнитного поля на критические токи композитных ВТСП-лент на основе GdBCO и YBCO»** описано создание безжидкостной криомагнитной системы с рабочим пространством комнатной температуры. Ее конструкция показана схематически на рис. 7. В описываемой конструкции предусмотрена возможность заполнять это пространство жидкими хладагентами, например, жидким азотом. Так как

основное предназначение системы – измерение электрофизических свойств ВТСП лент в магнитном поле, именно такая конструкция оптимальная для быстрой замены и поддержания рабочей температуры образцов.

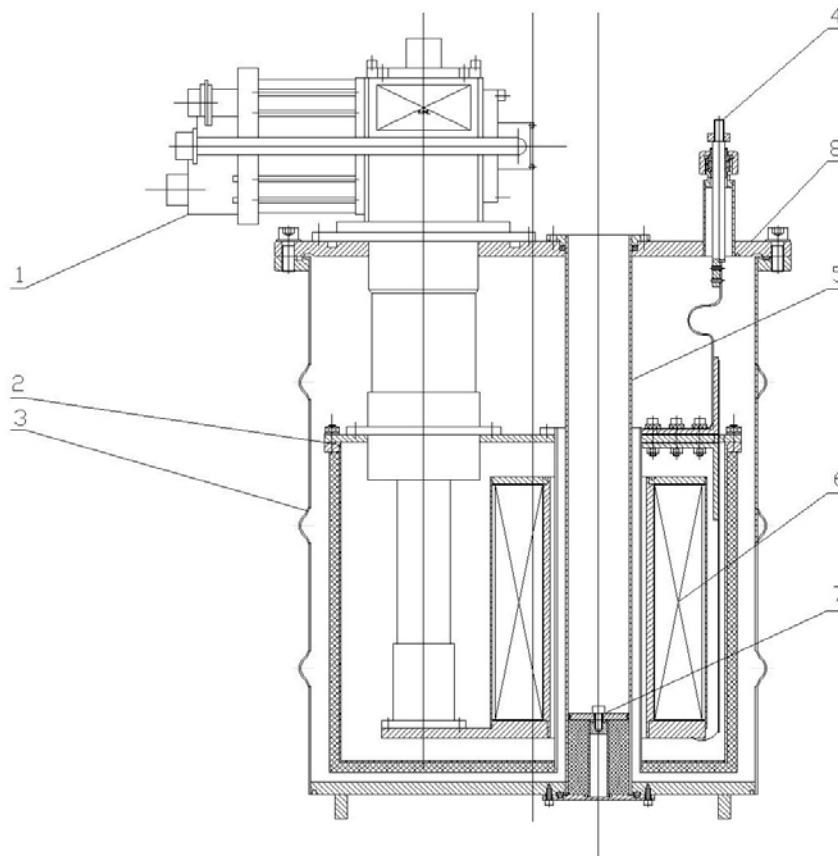


Рис. 7. Конструкция безжидкостной криомагнитной системы (показано схематически). 1 – криорефрижератор, 2 – радиационный экран, 3 – внешний кожух, 4 – токовводы, 5 – внутренняя труба, 6 – сверхпроводящий соленоид, 7 – азотная заглушка, 8 – верхняя плита.

Сверхпроводящий соленоид для данной криомагнитной системы был рассчитан на поле 8 Тл. В качестве провода для его обмотки был использован сверхпроводящий провод на медной основе из ниобий-титана. При испытаниях соленоида в рабочем объеме было получено поле с индукцией 9 Тл

Во втором параграфе представлены результаты измерений характеристик ВТСП ленты на основе GdBCO-123, изготовленной методом импульсного лазерного осаждения ЗАО СуперОкс, и ленты на основе YBCO-123 производства компании SuperPower (США), ВТСП слой которой сформирован химическим осаждением из паровой фазы [16]. Сравнены параметры этих двух лент.

Измерения зависимостей критического тока от индукции внешнего магнитного поля проведены при $T = 77$ К. На рис. 8 показаны зависимости плотности критического тока $j_c(B)$ для параллельного и перпендикулярного направлению тока магнитного поля. В последнем случае направление поля также перпендикулярно слоям ленты.

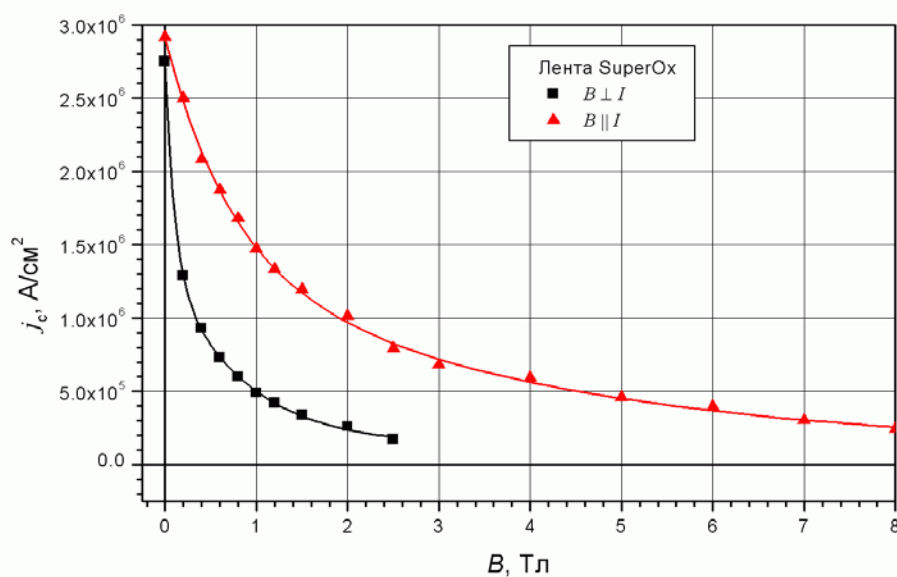


Рис. 8. Зависимости плотности критического тока от индукции внешнего магнитного поля для ВТСП ленты $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($B \perp I$ и $B \parallel I$, $T = 77$ К).

В этом параграфе также проведено сравнение результатов измерений зависимостей $j_c(B)$ в перпендикулярном и параллельном току магнитном поле на образцах лент $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В третьем параграфе приведены результаты измерений критического тока с использованием СКВИД-магнитометра. Опыты проводились в заливном

гелиевом криостате со сверхпроводящим соленоидом, позволявшем получать магнитное поле с индукцией до 5 Тл. Поле в этих опытах было направлено нормально к плоскости ВТСП слоя. Полученные сравнительные данные показывают, что ВТСП лента на основе GdBCO, полученная методом импульсного лазерного осаждения (SuperOx-Япония), близка по своим токнесущим характеристикам ВТСП ленте на основе YBCO, полученной методом химического осаждения из паровой фазы (SuperPower, США).

В разделе **ЗАКЛЮЧЕНИЕ** обобщены основные результаты диссертации.

В **ПРИЛОЖЕНИИ** к диссертационной работе приводятся расчеты, использованные при создании криомагнитной системы, описанной в параграфе 5.1.

Ниже приведены основные результаты и выводы работы.

1. Впервые в России рассчитана, спроектирована и реализована безжидкостная криомагнитная система на 8 Тл с рабочей камерой при комнатной температуре диаметром 50 мм по оси магнита [17*]. Данная магнитная система имеет оригинальную конструкцию охлаждения сверхпроводящего соленоида, в которой каркас магнита крепится непосредственно ко 2-й ступени криорефрижератора, что дает улучшенные характеристики охлаждения, а также приводит к снижению веса и размеров криосистемы. Установка имеет следующие технические параметры: время охлаждения – 16,5 часов, время развертки поля до 8 Тл – 60 минут, неоднородность поля в сфере диаметром 1 см не превышает 5×10^{-3} . Результаты, полученные в ходе реализации данной криосистемы, были использованы при создании векторной, т.е. с управляемой ориентацией магнитного поля, криомагнитной системы с максимальной индукцией по осям координат 2/5 Тл [27*], на которую получен патент [28*].

2. Детально изучено влияние облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ) и $^{84}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) на критический ток, критическую температуру и разупорядочение кристаллической структуры в образцах композитной ВТСП ленты на основе YBCO(123) [14*]. Определено пороговое значение флюенса облучения ионами Kr – 1×10^{13} ион/см², при котором происходит разрушение сверхпроводимости. При низких флюенсах ионного облучения обнаружено увеличение плотности критического тока при $T = 77$ К в отсутствие внешнего магнитного поля, что объяснено формированием радиационных дефектов, которые могут служить центрами пиннинга вихрей Абрикосова.

3. В результате расчётов [20] по модели термического пика (МТП) временной зависимости и радиального профиля температуры кристаллической решетки ВТСП при облучении ионами Xe (167 МэВ), Kr (107 МэВ) и Ar (48 МэВ), оценены размеры радиационных дефектов цилиндрической формы, которые могут являться центрами пиннинга абрикосовских вихрей. Рассчитанный радиус дефектов, созданных в ВТСП слое ионами аргона, составляет 5 нм, ионами криптона – 6,2 нм и ионами ксенона – 6,8 нм.

4. В необлученном образце в результате исследования с помощью растровой электронной микроскопии поперечного сечения структуры Ag/YBCO/буфер/ хастеллой определены химические составы и размеры всех слоев композита. В сверхпроводящем слое YBCO(123) обнаружены преципитаты Y_2O_3 и отклонение от стехиометрии (недостаток бария в кристаллической решетке).

5. С помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения в облученном ионами криптона сверхпроводнике обнаружены радиационные дефекты размером 2-5 нм, которые могут являться центрами пиннинга абрикосовских вихрей [14*]. Результаты хорошо согласуются с расчетами в рамках МТП. Полученные данные также четко указывают на

появление на границе ВТСП-подложки интерфейсного слоя шириной 30-40 нм в облученном образце.

6. Обнаружено, что этот интерфейсный слой оказывает существенное влияние на механические свойства композита: в результате облучения композитной YBCO ленты ионами аргона или криптона до флюенсов 10^{10} - 10^{11} ион/см² происходит релаксация внутренних напряжений, улучшается адгезия сверхпроводящего слоя к подложке [18*]. Эффект объяснен на основе МТП с учетом ускоренной диффузии атомов. Метод обработки сверхпроводника ионным облучением запатентован [29*].

7. Получены данные о радиационной стойкости ВТСП лент 2-го поколения на основе YBCO(123) и GdBCO(123) по отношению к облучению протонами с энергией 2,5 МэВ [24*],[25*]. Критический ток падает больше, чем на порядок при увеличении флюенса до $\Phi=2 \times 10^{16}$ p/см² для YBCO(123) и до 6×10^{16} p/см² для GdBCO(123). При этом вплоть до флюенса 6×10^{16} p/см² критическая температура образцов снижалась не более, чем на 12 %.

8. С использованием резистивного метода и метода СКВИД магнетометрии получены магнитополевые зависимости плотности критического тока для образцов ВТСП лент на основе GdBCO(123) и YBCO(123) в поле, ориентированном параллельно и перпендикулярно плоскости ВТСП в диапазоне температур 2-100 К. Эти результаты позволяют сделать вывод, что экспериментальная лента СуперОкс по своей токонесущей способности в магнитных полях практически не уступает лентам SuperPower.

9. Выполнено сравнение функциональных характеристик композитных ВТСП лент 2-го поколения на основе GdBCO(123) производства ЗАО СуперОкс и на основе YBCO(123) производства SuperPower (США) [16]. Проведены измерения зависимостей критического тока от температуры и индукции внешнего магнитного поля в конфигурации параллельного и перпендикулярного

направлению тока поля, а также измерения критического тока после термоциклирования; определены радиусы критического изгиба лент. Показано, что эти ленты близки по своим эксплуатационным характеристикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kamerlingh Onnes H. Leiden Comm.. 1911, v. 122b, p. 124
2. Булаевский Л.Н., Гинзбург В.Л., Жарков Г.Ф., Киржниц Д.А., Копаев Ю.В., Максимов Е.Г., Хомский Д.И. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости, Наука, Москва, 1977, 400 с.
3. Bednorz J.C. and Muller K.A. Possible High-Tc superconductivity in the La-Ba-Cu-O System // Z. Phys. B: Condens. Matter, 1986, v. 64, p. 189-193.
4. M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu (1987). "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure". Physical Review Letters 58 (9): 908–910.
5. Moschalkov V.V., Didyk A.Yu., Guntherodt Gt. et al. **Название** // Phys. Rev. B. 1995. V. 50. P. 642–646.
6. Moschalkov V.V., Didyk A.Yu., Bruynseraede Y. et al. //The Vortex State. Amsterdam: Kluwer Acad. Publ., 1994. P. 293–302.
7. Didyk A.Yu., Varichenko V.S. // Nucl. Tracks and Radiat. Meas. 1995. V. 25. № 1/4. P. 119–124.
8. Trappniers L., Vanacken J., Goncharov I.N., Didyk A.Yu. // Physica C. 1999. V. 313. № 1/2. P. 1–10.
9. L. Trappniers, J. Vanacken, L. Weckhuysen, K. Rossel, A.Yu. Didyk and others, Critical currents, pinning forces and irreversibility fiels in $(Y_xTm_{1-x})Ba_2Cu_3O_7$ single crystals with columnar defects in fields up to 50 T, Physica C 313(1999) 1-10
10. Л. Х. Антонова, А. Г. Белов, В. В. Воронов, А. Ю. Дидык, Е. И. Демихов, Л. И. Иванов, В. А. Мальгинов, Г. Н. Михайлова, А. В. Троицкий, Зависимость критических параметров ВТСП-ленты от флуенсов при облучении тяжелыми ионами и электронами высоких энергий, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, № 5, с. 84–91
11. Selling the Nation's Helium Reserve, National Academy Press, 2010, Committee on Understanding the Impact of Selling the Helium Reserve, National Materials Advisory Board, National Research Council.

12. M. Urata, K. Koyanagi, T. Kuriama et. al., “A 10 T cryo-cooled superconducting magnet with 100 mm room temperature bore”, *Physica B* 216 (1996) 209 – 211
13. Аксенов В.П., Антонова Л.Х., Белов А.Г., В.В. Воронов, Е.И. Демихов, А.Ю. Дидык, Л.И. Иванов, В.А. Мальгинов, Г.Н. Михайлова и А.В. Троицкий. Влияние облучения электронами и ионами высоких энергий на изменения критических параметров YBCO(123) лент второго поколения // *ДАН*. 2009. Т. 428. № 5. С. 608–610.
- 14*. Mikhailova G., Antonova L., Troitskii A., Didyk A., Vladimir Malginov, Demikhov T., Suvorova E., Radiation resistance and generation of pinning centers in composite HTSC under heavy ion irradiation // *Physica Status Solidi C*, 2013, V.10, No 4, 677-680.
15. L.K. Antonova, A.V.Troitskii, G.N.Mikhailova, T.E.Demikhov, S.V.Samoilenkov, A.A.Molodyk, J.Noudem, P. Bernstein. The current-carrying parameters of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ tapes in magnetic fields. Сборник трудов XIII Российско-Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии». Под ред. К.А. Солнцева в двух томах. М. Интерпункт. Наука 2015, с. 48-50.
16. www.superpower-inc.com
- 17*. T. Demikhov, E. Kostrov, V. Lysenko, E. Demikhov and N. Piskunov “9 T cryogen free magnet HTS test stand”, *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 22, No. 3, 9501004, (2012)
- 18*. Л. Х. Антонова, В. В. Воронов, Г. Н. Михайлова, А. В. Троицкий, Т. Е. Демихов, А. Ю. Дидык, Е. И. Суворова. Релаксация внутренних напряжений композитных ВТСП 2-го поколения с помощью высокоэнергетического ионного облучения. *Физика металлов и металловедение*, 2013, том 114, № 2, с. 161–163.
19. Волков Э.П., Флейшман Л.С., Мальгинов В.А., Мальгинов А.В. Переходные процессы в токоограничивающем устройстве на основе ВТСП проводов второго поколения. *Известия академии наук. Энергетика*. 2009г., №2, с.64-76
20. Л.Х. Антонова, Г.Н. Михайлова, А.В. Троицкий, А.Ю. Дидык, Д.З. Музафаров, Т.Е. Демихов, Е.И. Суворова. Формирование треков тяжелых ионов в композитных ВТСП: расчет и электронно-микроскопические исследования. Сборник расширенных тезисов IV Международной конференции *Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости – (ФПС-11)*, Москва, ФИАН, 2011, с.330-331.

21. C. McLoughlin, Y. Thimont, J. Noudem, C. Harnois, P. Bernstein. The decrease of the critical current of coated conductors when a perpendicular magnetic field is applied : a Josephson effect point of view. *Physics Procedia* 36 (2012) 1564 – 1569
22. P. Biersack and L.G. Hagmark. A Monte Carlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous Targets // *Nucl. Instr. and Meth. B*, 1980, V.174, pp.257-269. (<http://www.srim.org>).
23. Kieszun M., Huehne R., Holzappel B., Schultz L. Ion-beam-assisted deposition of textured NbN thin films // *Supercond. Sci. Technol.* 2010. V. 23. 025010 6 pp.
- 24*. Антонова Л.Х., Демихов Т.Е., Троицкий А.В., Юрасов А.Д., Самойленков С.В., Дидык А.Ю., Кобзев А.П., Куликаускас В.С., Михайлова Г.Н., Влияние протонного облучения р (2.5 МэВ) на критические параметры композитных ВТСП лент, *Перспект. Мат* 2014 №5
- 25*. Landysh Antonova , Timofey Demikhov , Alexey Troitskii , Alexander Didyk, Alexander Kobzev, Alexander Yurasov , Sergey Samoilenkov, Galina Mikhailova. Effect of 2.5 MeV proton irradiation on the critical parameters of composite HTS tapes // *Physica Status Solidi C*, Vol.12, No 1-2, pp. 94-97, 2015.
- 26*. T. E. Demikhov, A. V. Troitskii, V. V. Voronov, L. Kh. Antonova, G. N. Mikhailova, and E. I. Demikhov, Investigation into the Critical Current of Second_Generation Wire_Tapes Based on the GdBa₂Cu₃O₇ (GdBCO) High Temperature Superconductor Fabricated by Pulsed Laser Deposition, *Doklady Physics*, 2014, Vol. 59, No. 4, pp. 163–165
- 27*. E I Demikhov, T E Demikhov, E A Kostrov, V V Lysenko and N A Piskunov, 2T/5T Two-Axis Cryogen Free Superconducting Vector Magnet With Variable Temperature Space, *Journal of Physics Conference Series* 05/2014; 507(3):032027. DOI: 10.1088/1742-6596/507/3/032027.
- 28*. Тимофей Евгеньевич Демихов, Евгений Александрович Костров, Николай Андреевич Пискунов, Валерий Викторович Лысенко, Демихов Евгений Иванович, Патент на полезную модель «Криостат для электрофизических измерений» № 131135 от 10 августа 2013 г.
- 29*. Г.Н. Михайлова, В.В. Воронов, А.В. Троицкий, А.Ю. Дидык, Т.Е. Демихов, Е.И. Суворова, Патент на изобретение «Способ обработки высокотемпературного сверхпроводника» № 2477900 от 20 марта 2013.