

О Т З Ы В  
официального оппонента на диссертацию Т.Е.Демихова  
“Влияние радиационного облучения и магнитного поля на критические  
параметры композитных сверхпроводящих лент на основе ВТСП”,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07  
«Физика конденсированного состояния»

Область приложений, в которых используются сверхпроводящие материалы постоянно расширяется, при этом важную роль играет понимание фундаментальных процессов взаимодействия абрикосовских вихрей с естественными (вакансии, дислокации и т.п) и искусственными (радиационные повреждения) дефектами кристаллического строения. Как известно, именно это взаимодействие (пиннинг вихрей) определяет величину критического тока и его поведение во внешнем магнитном поле. С другой стороны, представляют интерес влияние радиационного облучения на сверхпроводящие устройства в процессе их эксплуатации. Целью диссертационной работы являлось изучение действия радиационного облучения на критические параметры сверхпроводников, а также создание установки-безжидкостной криомагнитной системы с индукцией 8Тл, с помощью которой проведено настоящее исследование. Поскольку использование сверхпроводящих лент на основе высокотемпературных сверхпроводников является перспективным направлением для применения в ядерной физике тема диссертации несомненно актуальна

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и Приложения, она основана на материалах семи публикаций в реферируемых журналах из списка ВАК и докладах на 17 отечественных и международных конференциях. Во Введении дан общий обзор приложения сверхпроводимости в различных технических устройствах и короткая историческая справка прогресса в повышении критических параметров сверхпроводников. Обоснована актуальность настоящего исследования, сформулированы цели и задачи работы, описаны образцы и методы исследований, научная новизна и положения выносимые на защиту. Отмечен авторский вклад, достоверность и аппробация результатов, и общая структура диссертации.

В первой главе дан литературный обзор параметров некоторых сверхпроводящих материалов, имеющих отношение к теме исследования, а также описано влияние ионизирующих излучений на высокотемпературные сверхпроводники. Кратко изложена модель пиннинга вихрей, детально описаны криорефрижераторы замкнутого цикла и использование ВТСП лент в сверхпроводящих устройствах.

Вторая глава посвящена архитектуре и свойствам композитных лент, где также описаны использованные методики исследования. В первом параграфе представлена сложная конфигурация ВТСП многослойной ленты на основе YBCO(123)-торговая марка SCS4050, обеспечивающая работоспособность ленты: токонесущую, механическую прочность, термостабилизацию. Каждый из слоёв приготовлен по особой технологии и выполняет свою функцию. В частности, высокий критический ток обеспечивает слой сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  толщиной 1мкм, полученный химическим осаждением из паров металлогорганических соединений. Помимо этого слоя, имеется слои подложки, буферный слой, слои серебра и меди, а общая толщина ленты менее 100 мкм. Такой композит имеет критическую плотность тока при температуре 77К порядка 2МА/см<sup>2</sup>, при критической температуре сверхпроводника 92 К. Вместо Y могут быть использованы другие редкоземельные элементы, например

, гадолиний Gd. Такой слой использовался в ленте SF12100 без медной оболочки, что позволило в последующих экспериментах определить толщину и химический состав всех слоёв композита. В следующем разделе описаны экспериментальные методы, использованные в работе: измерения критической температуры, критического тока на постоянном и переменном токе и сквид магнитометрии. Также описаны условия радиационного облучения, подготовки образцов для растровой и просвечивающей электронной микроскопии. В конце второй главы приведены результаты исследования влияния термоциклизации и изгиба на критический ток ленты на основе GdBaCuO.

Влияние радиационного облучения на свойства композитных ВТСП лент представлено в третьей главе. Это самая большая из экспериментальных глав и содержит наиболее важные результаты. В предисловии намечены пути повышения критического тока за счёт создания искусственных центров пиннинга, образующихся в результате облучения сверхпроводника тяжёлыми высоконергетичными ионами. В первом разделе рассмотрено влияние облучения ионами Ar (48Мэв), Xe(167 Мэв) и Kr (107Мэв) на критическую температуру и критический ток при 77К. Обнаружено, что при малом флюенсе порядка  $10^8 - 10^{11}$  ion/cm<sup>2</sup> критический ток повышается на 10-20%, однако при дальнейшем увеличении дозы резко падает. В то же время критическая температура сверхпроводника практически не изменяется до флюенса  $10^{12}$  ion/cm<sup>2</sup>. В следующем разделе рассмотрена модель формирования треков и проведены расчёты, позволяющие оценить размер дефектов возникающих при облучении ионами аргона (5 нм), криптона (~6 нм) и ксенона (~7 нм). Эти оценки находятся в хорошем согласии с результатами прямого наблюдения с помощью высокоразрешающего просвечивающего микроскопа, представленными в третьем разделе. Здесь же приводятся результаты исследования состава сверхпроводника с помощью рентгеновского энергодисперсионного анализа, обнаружившей нестихиометрию с заметным недостатком бария. Помимо нанометровых дефектов, которые предполагаются основной причиной увеличения критического тока, обнаружены и другие дефекты, роль которых не вполне ясна. Физические процессы, протекающие во время облучения и релаксации достаточно сложны и включают в себя разогрев, кристаллизацию, образование радиационно стимулированных дефектов (вакансий и внедрённых атомов), ускоряющих диффузию и множество других проявлений. Тем не менее, в результате исследований отмечено, что радиационная стойкость зависит от энергии и массы ионов, а также архитектуры ленты. Обнаружено, что критический ток резко падает при флюенсах примерно на порядок меньших, чем начинает падать критическая температура. В последнем разделе рассмотрено влияние облучения тяжёлыми ионами на напряжённое состояние композитных ВТСП лент. Несмотря на предпринимаемые меры для согласования параметров кристаллических решёток соседствующих слоёв композитной ленты, в изделии сохраняются внутренние напряжения, что приводит к растрескиванию, как показали исследования с применением сканирующего микроскопа. Анализ внутренних напряжений был проведен и с помощью рентгеновской дифракции по измерению ширины дифракционных пиков (на половине высоты) в исходных и облучённых образцах. Обнаружено, что при облучении ионами аргона при флюенсе  $2 \cdot 10^{10}$  ion/cm<sup>2</sup> наблюдается минимальное значение полуширины, свидетельствующее о уменьшении внутренних напряжений. Последнее согласуется с результатами наблюдения в сканирующем электронном микроскопе. Наблюдаемый эффект связывается с облегчением процесса релаксации за счёт ускорения диффузии в результате облучения, что в какой то степени эквивалентно отжигу.

Четвёртая глава посвящена протонному облучению ВТСП лент . Рассмотрено влияние облучения протонами с энергией 2,5 МЭВ на критический ток при 77К и критическую температуру для композитных лент с иттрием и гадолинием. Не обнаружено увеличения критического тока при облучении. В исследованном диапазоне флюенсов  $10^{14} - 10^{17}$  наблюдалось резкое падение критического тока при относительно малом изменении критической температуры, поэтому радиационную стойкость следует определять именно по этому параметру. Причины такого поведения связываются с характером радиационных повреждений, образующихся при протонном облучении. В отличие от облучения тяжёлыми ионами продуцирующими протяжённые колончатые дефекты, протонное облучение приводит к образованию точечных дефектов (вакансии, межузельные атомы), которые являются относительно слабыми центрами пиннинга особенно при высоких температурах для анизотропных ВТСП.

Последняя глава диссертации посвящена поведению композитных лент в во внешнем магнитном поле. Значительное место уделено описанию безжидкостной криомагнитной системы со сверхпроводящим соленоидом на 8 Тл (Приложение), благодаря которой удалось провести исследования в перпендикулярном и параллельном плоскости ленты. При заполнении тёплой зоны соленоида жидким азотом, что позволяет конструкция криомагнитной системы, проводились измерения зависимости критической плотности тока от магнитного поля при 77К. Магнитополевые зависимости критического тока были измерены с помощью сквид магнитометрии в наливном гелиевом криостате с соленоидом на 5 Тл. Критическая плотность тока падает на два порядка при 77К для образцов ленты GdBCO  $10^2 \text{ A/cm}^2$  в полях 3-5 Тл , в то время как при 20 К критическая плотность тока изменяется на порядок и составляет  $2 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$  . В заключении отмечено, что изменение критического тока с магнитным полем существенное в перпендикулярной геометрии, что обусловлено анизотропией композитных лент из ВТСП материалов.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые свидетельствуют о том, что выполнен большой объем исследований по проектированию и реализации безжидкостной криомагнитной системы, исследовано влияние облучения на радиационную стойкость и механические свойства лент на основе ВТСП. Результаты работы уже находят приложения в конкретных устройствах.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. В третьей главе показано теоретически и экспериментально, что пробег тяжёлых ионов при облучении образцов составляет  $\sim 10\text{мкм}$ . В работе исследовались как стабилизированные ленты с медной оболочкой  $\sim 20\text{мкм}$ , так и без медного покрытия (SF12100) на которых и получены основные результаты по облучению тяжёлыми ионами. Однако это обстоятельство не нашло отражения в автореферате, что затрудняет понимание (см стр 16 автореферата).
2. В четвёртой главе приведены результаты измерений критического тока , облучённых протонами с энергией 2.5 МЭВ . Не обнаружено увеличения критического тока при температуре 77К. Однако такое влияние могло бы быть обнаружено, судя по характеру предполагаемых дефектов, возникающих при облучении протонами (клusterы ,дислокационные петли и т.п.) при более низких температурах исследования, когда такие дефекты становятся эффективными центрами пиннинга вихрей.
3. Следует отметить некоторые терминологические неточности, например,

«магнитные вихри» (стр. 2, 32 диссертации, стр. 15 автореферата) хотя явно подразумеваются «вихри Абрикосова» и другие опечатки по тексту диссертации, на которые указано автору.

Сделанные замечания относятся, в основном, к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы. В целом диссертация выполнена и изложена на самом высоком экспериментальном и технологическом уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в понимание радиационной стойкости сверхпроводников и улучшении критических параметров высокотемпературных сверхпроводников, тем самым способствуя их новым приложениям. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, МГУ г. Москва, ФИАН г.Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург, ИМС РАН, Нижний Новгород. Автореферат и опубликованные работы подробно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных международных семинарах и конференциях.

Диссертационная работа Т.Е. Демихова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

профессор, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07, ведущий научный сотрудник лаборатории сверхпроводимости Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук

Винников Лев Яковлевич

Подпись Винникова Л.Я. заверяю  
Ученый секретарь ИФТТ РАН  
Доктор физ.-мат. наук

Г.Е.Абросимова



19 февраля 2016 года

Контактная информация:

Почтовый адрес 142432, Черноголовка, Московской обл., ул. Осипьяна 2,  
Телефон +8 4965228295; e-mail: vinnik@issp.ac.ru