

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Демихова Тимофея Евгеньевича  
"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".

Диссертационная работа Т.Е. Демихова посвящена одному из наиболее важных вопросов современного этапа прикладной сверхпроводимости – поиску путей повышения критических параметров композитных высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения (2G) на основе эпитаксиальных пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , которые чрезвычайно перспективны для использования в линиях электропередач, ограничителях тока короткого замыкания, токовводах, и пр. В то же время, сильная анизотропия токонесущих свойств ВТСП лент второго поколения, приводящая, в частности, к сильной зависимости критического тока как от амплитуды, так и от ориентации магнитного поля, ставит определенные ограничения для применения их в соленоидах с высоким магнитным полем, трансформаторах, индукционных накопителях энергии, магнито-резонансных томографах, электродвигателях и электрогенераторах. Улучшение свойств ВТСП проводов, поиск и разработка новых подходов для повышения токонесущей способности эпитаксиальных ВТСП слоев, в том числе и с помощью радиационного облучения, является одним из приоритетных направлений в развитии технологий приготовления и использования ВТСП композитов. В связи с этим, выбранная тема диссертационной работы представляется важной и актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

В качестве объектов исследований диссидентом были выбраны коммерческие композитные ВТСП ленты 2-го поколения на основе YBCO(123), производства фирмы SuperPower. Inc. и GdBCO(123), производства компании СуперОкс, имеющие одни из самых высоких значений плотности критического тока. Автор провел облучение исследуемых образцов тяжелыми ионами аргона с энергией 48 МэВ, криптона (107 МэВ) и ксенона (167 МэВ), а также протонным пучком с энергией 2,5 МэВ. 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.

Для проведения измерений зависимости критических параметров ВТСП лент от температуры и магнитного поля в облученных образцах автором была разработана безжидкостная магнитная система с криокуллером и соленоидом на основе сплава NbTi, создающим магнитное поле до 8 Тл.

Диссертационная работа Т.Е. Демихова состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения и изложена на 112 страницах текста, включая 73 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 107 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены методы исследований, и положения, выносимые на защиту, охарактеризован личный вклад автора.

**Первая глава** является обзором литературных источников, в котором отражены некоторые свойства сверхпроводников, рассмотрено влияние ионизирующих излучений на высокотемпературные сверхпроводники, изложены методы охлаждения сверхпроводящих магнитов, включая безжидкостные охладительные системы.

**Вторая глава** посвящена описанию структуры и свойств исследуемых композиционных ВТСП лент 2-го поколения. Здесь также обсуждены экспериментальные методы измерения критической температуры и критического тока исследуемых образцов и способы облучения ВТСП лент тяжелыми ионами и протонами.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментальных исследований влияния облучения тяжелыми высокоэнергетическими ионами на свойства ВТСП лент и их обсуждение. В первом разделе приведены зависимости критического

тока (при температуре 77 К) и критической температуры от флюенса облучения ионами криптона и ксенона, установлены величины флюенсов, приводящих к полной деградации критических параметров тока и температуры. Обнаружен слабый рост критического тока при облучении ионами криптона с флюенсом  $\sim 6 \times 10^{10}$  ион/см<sup>2</sup>. Отмечено, что при облучении ионами аргона при флюенсах до  $10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> критическая температура не обращается в нуль, хотя и проявляет тенденцию к снижению. Второй раздел посвящен результатам расчётов временной зависимости температуры решетки и радиального профиля температуры в слое ВТСП при облучении тяжелыми ионами в соответствии с моделью термического пика. В результате оценены размеры треков ионов, которые рассматриваются как центры пиннинга вихрей Абрикосова. 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 разделе приводятся результаты электронно-микроскопического исследования радиационных дефектов в ВТСП слое с помощью растрового и просвечивающего электронных микроскопов высокого разрешения. Определены толщины и химический состав слоев композитной ленты, а также состав примесных фаз в ВТСП пленке. В облученных криptonом образцах обнаружены радиационные дефекты размером 2–5 мкм различного типа. В четвертом разделе третьей главы обсуждены методы снятия внутренних напряжений в композитных YBCO(123) лентах 2-го поколения с помощью облучения тяжелыми ионами при флюенсах  $(1-2) \times 10^{10}$  ион/см<sup>2</sup>. Отмечено, что облучение способствует сохранению структуры ВТСП пленки при механическом воздействии.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования влияния флюенса облучения протонами с энергиями 2.5 МэВ на критические параметры сверхпроводящих образцов. Установлено резкое падение критического тока, начиная с флюенса  $2.5 \times 10^{15}$  р/см<sup>2</sup>, тогда как уменьшение критической температуры начинается при значительно больших дозах облучения. Не обнаружено какого-либо возрастания критического тока после облучения протонами.

**Пятая глава** посвящена исследованию влияния магнитного поля на критический ток исследуемых композитных ВТСП лент. В первом разделе описана разработанная автором безжидкостная криомагнитная система. Далее представлены результаты измерений характеристик ВТСП лент. Приведены зависимости плотности критического тока для параллельного и перпендикулярного направлению тока магнитного поля. Проведено сравнение параметров лент двух типов от разных производителей. В третьем разделе приведены результаты измерений критического тока с использованием СКВИД-магнитометра, в целом подтвердившие выводы второго раздела.

В заключении автором сформулированы основные результаты, выносимые на защиту диссертационной работы.

В качестве наиболее важных результатов диссертационной работы Т.Е. Демихова считаю необходимым выделить следующие:

1. Автором получены новые экспериментальные данные по влиянию облучения тяжелыми ионами на критический ток и критическую температуру ВТСП лент. Новизна определяется тем, что ионами облучались именно реальные коммерческие композитные ВТСП ленты, а не модельные образцы типа эпитаксиальных пленок, синтезированных различными методами на подложках малого размера, по результатам облучения которых существует большое количество литературных данных.

2. Детально изучено влияние облучения ионами ксенона и криптона на критический ток, критическую температуру и дефектность кристаллической структуры в образцах композитной ВТСП ленты на основе YBCO(123).

3. При низких флюенсах ионного облучения обнаружено небольшое увеличение плотности критического тока при  $T = 77$  К в отсутствие внешнего магнитного поля, что объяснено формированием искусственных центров пиннинга в виде радиационных дефектов. Определено пороговое значение флюенса облучения ионами Kr –  $1 \times 10^{13}$  ион/ $\text{см}^2$ , при котором происходит разрушение сверхпроводимости.

4. Проведенное автором исследование влияния облучения протонами на критические параметры ВТСП лент может представлять практический интерес в

качестве имитационного эксперимента по нейтронному облучению, которому реально подвергаются сверхпроводники в сложных физических установках типа токомаков. Однако, при этом необходимо учитывать, что при нейтронном облучении возникает другой тип дефектов в виде каскадов, не характерных для протонного воздействия.

Вместе с тем, диссертационная работа не свободна от недостатков.

1. В названии диссертации анонсируется исследование влияния облучения и магнитного поля на критические параметры ВТСП лент. В связи с этим, представляется странным, что критический ток до и после облучения не измерялся в магнитных полях, в том числе и в разработанной автором специально для этих целей безжидкостной криомагнитной системе. Данные по критическому току приведены только при азотной температуре и в нулевом магнитном поле. В то же время, с точки зрения практического применения ВТСП проводов для создания соленоидов, электродвигателей, индукционных накопителей энергии, вставок в МРТ магниты, и пр. наиболее важным представляется исследование влияния облучения на величину критического тока как раз в магнитном поле и желательно при разных температурах. Вполне возможно, что ионное облучение может приводить к более существенному росту критического тока в магнитном поле и при низких температурах, чем это наблюдал автор в нулевом поле при 77 К. Однако, эти возможности в диссертации не были реализованы.
2. При перечислении основных результатов работы автор на первом месте приводит разработку безжидкостной криомагнитной системы на 8 Тл, что выглядело бы гораздо более обоснованным при представлении диссертации на соискание ученой степени кандидата технических, а не физико-математических наук. Все исследования в магнитных полях, описанные в главе 5 с успехом могли быть проведены и при использовании заливного гелиевого криостата, а результаты трех предыдущих глав вообще не связаны с измерениями в магнитном поле.
3. При измерении зависимости критического тока от направления магнитного поля в главе 5 автор выделяет две ориентации:  $B \perp I$  и  $B \parallel I$ , хотя и уточняет,

что при  $B \perp I$  магнитное поле направлено перпендикулярно также и слоям ленты. Однако, при использовании ВТСП лент на практике (например в соленоидах) гораздо важнее информация о величине критического тока при направлении магнитного поля перпендикулярно и параллельно слоям ленты, а не направлению тока. При этом в обоих случаях выполняется ориентация  $B \perp I$ , а результаты, полученные автором для  $B \parallel I$ , могут отличаться от важных для практического применения значений величины критического тока, измеренных при направлении магнитного поля параллельно слоям ленты, но перпендикулярно току.

4. Вызывает большой вопрос корректность проведенных измерений критического тока на переменном токе. Утверждение о том, что «при используемой частоте измерений (50 Гц) критический ток по величине близок к измеряемому на постоянном токе» (стр. 66), требует пояснения и экспериментального доказательства, так как на этой частоте потери на переменном токе становятся существенными, и образец находится в формально резистивном состоянии при любой амплитуде тока.
5. Текст диссертации, особенно литературный обзор, перегружен общеизвестными данными об исторических этапах исследования сверхпроводимости, описанием принципов работы криогенных рефрижераторов, таблицами с критическими параметрами низкотемпературных сверхпроводников и пр.; не очень ясно с какой целью в параграфе 1.3 (стр. 34) подробно обсуждается эксперимент по облучению низкотемпературного сверхпроводника Nb<sub>3</sub>Al. В тексте присутствует ряд неточностей, к примеру, фраза на стр. 30 «в конце статьи делается вывод, что влияние облучения быстрыми нейtronами на критические параметры различных ВТСП лент имеет схожий характер» не позволяет понять с чем характер схож; на экспериментальных зависимостях, приведенных на рисунках 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.4, 4.5, 4.6 отсутствуют указания на экспериментальные ошибки; в тексте достаточно много опечаток и не относящихся к предмету исследований подробностей.

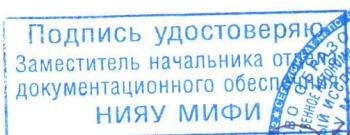
Вместе с тем, несмотря на указанные недостатки, следует отметить, что результаты работы многократно докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях, по материалам диссертации опубликовано 7 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, в том числе 4 статьи в зарубежных журналах. Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

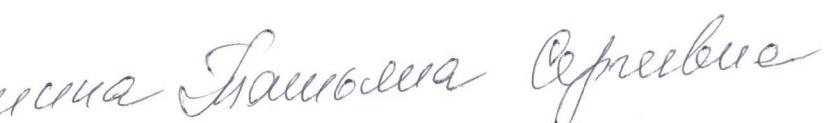
Считаю, что диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а ее автор - Демихов Тимофей Евгеньевич заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, и.о. заведующего кафедрой  
физики твердого тела и наносистем  
Национального исследовательского

ядерного университета «МИФИ»  Алексей Павлович Менушенков

03.03.2016





Сведения о месте работы оппонента:

115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31,  
Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ», кафедра физики твердого  
тела и наносистем.

Телефон: 8 (495) 788-56-99, доб. 9020

Электронная почта: armenushenkov@mephi.ru