

«Утверждаю»

Директор научного направления –
заведующий Отделением ОАО
«Всероссийский научно-
исследовательский проектно-
конструкторский и технологический
институт кабельной промышленности»
Доктор технических наук

/Высоцкий В.С./

Отзыв

ведущей организации: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» на диссертацию Черных Игоря Анатольевича «Многослойные эпитаксиальные структуры сверхпроводник-интерслои для увеличения токонесущей способности сверхпроводящих лент второго поколения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы.

Высокотемпературные сверхпроводящие ленты второго поколения представляют интерес для реализации ряда устройств на их основе, в частности, для устройств электроэнергетики (ограничители тока короткого замыкания, токовводы, линии электропередач, двигатели, генераторы, накопители энергии, трансформаторы), медицины (магнитно-резонансные томографы), научных мегаустановок (высокополевые магниты для ускорителей) и других отраслей.

При использовании текстурированных подложек RABiTS ключевой задачей является формирование эпитаксиального оксидного затравочного слоя на металлической подложке. Это необходимо для наследования текстуры

подложки и передачи текстуры в вышележащие буферные слои и сверхпроводящий слой. Поэтому изучение особенностей наследования текстуры затравочным слоем является актуальной задачей.

Одной из главных характеристик ВТСП лент второго поколения является токонесущая способность на сантиметр ширины пленки при температуре 77 К в поле собственного тока. При увеличении толщины пленки сверхпроводника происходит существенное падение плотности критического тока. Это явление наблюдается для всех материалов системы Re-Ba-Cu-O и практически не зависит от метода формирования слоя сверхпроводника. Падение плотности критического тока в пленках сверхпроводника не позволяет получать требуемые токи только за счет увеличения толщины пленки. Изучение причин уменьшения плотности тока в пленках сверхпроводника наряду с созданием новых подходов для увеличения токонесущей способности являются важными современными задачами.

Поэтому диссертационная работа Черных И.А. посвященная исследованию многослойных эпитаксиальных структур сверхпроводник-интерслои для увеличения токонесущей способности сверхпроводящих лент второго поколения является несомненно актуальной.

Научная новизна работы, прежде всего, заключается в успешной реализации подхода с формированием многослойных структур сверхпроводник-интерслои, что позволило остановить деградацию критической плотности тока и значительно повысить токонесущую способность по сравнению с однослойными ВТСП пленками.

В данной работе впервые было продемонстрировано перетекание тока в структурах сверхпроводник-интерслои через слои SrTiO_3 и CeO_2 толщиной вплоть до 50 нм. Такой эффект значительно упрощает схему заведения тока в многослойные структуры.

Автором впервые наблюдался эффект перестройки поверхности текстурированной подложки Ni-W при нагреве до температуры 760°C с образованием террасных структур на поверхности. Было выполнено

исследование влияния наблюдаемого эффекта на особенности наследования текстуры затравочным слоем Y_2O_3 . Автор показал, что при формировании затравочного слоя на поверхности с террасными структурами происходит полное наследование текстуры затравочным слоем.

Также в работе было впервые показано, что формирование ВТСП пленок с высокими критическими характеристиками методом импульсного лазерного осаждения, возможно из распыляемых мишеней с различным кислородным коэффициентом. В частности, вариация кислородного индекса x в диапазоне от 6,85 до 6,12 в мишени состава $YBa_2Cu_3O_x$ не влияет на токонесущую способность ВТСП пленок.

Основные научные результаты работы.

Диссертационная работа Черных И.А. состоит из введения, трёх глав, выводов, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 136 страницах, включает 78 рисунков, 6 таблиц. Список цитированной литературы включает 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, представлены цель и задачи работы, кратко описано содержание диссертации.

В обзоре литературных источников (**глава 1**) автор рассматривает способы получения биаксиальной текстуры на лентах второго поколения, описывает основные методы формирования пленок высокотемпературных сверхпроводников, останавливаясь на особенностях каждого метода. Здесь же автор рассматривает возможные варианты буферных слоев для текстурированных подложек. В обзоре литературных источников выполнено рассмотрение факторов, которые по литературным данным могут приводить к падению плотности критического тока в пленках сверхпроводника, изучены основные модели, описывающие падение плотности тока на основе различных механизмов пиннинга вихрей в пленках. Также автор уделил внимание рассмотрению существующих подходов при создании многослойных сверхпроводящих структур, разделенных интерслоями.

Глава 2 является методической частью. В ней приведено описание комплекса методов необходимых для получения эпитаксиальных буферных и ВТСП слоев, а также для всестороннего анализа получаемых структур.

Глава 3 посвящена описанию и обсуждению экспериментальных результатов, полученных в настоящей работе. Глава 3 логично разделена на 5 частей.

В разделе **3.1.** автор приводит исследование особенностей формирования эпитаксиальных затравочных слоев на текстурированных подложках Ni-W. Автором установлено, что нагрев текстурированных подложек до температуры 760°C приводит к реконструкции поверхности – образованию террасных структур. Было показано, что эффект образования террасных структур является благоприятным для эпитаксиального роста затравочного слоя и приводит к полному наследованию текстуры подложки затравочным слоем Y_2O_3 .

В разделе 3.2. было выполнено токонесущей способности ВТСП пленок с различной толщиной, показано падение значения плотности критического тока при увеличении толщины пленки. Полученные результаты хорошо коррелируют с литературными данными. Также была получена высокая токонесущая способность – более 200 А/см ширины ленты. В разделе **3.3.** автор выполнил сопоставление полученных экспериментальных данных с существующими модельными представлениями. Было показано, что модель 2D слабого коллективного пиннинга хорошо описывает поведение экспериментальных данных, что дополнительно подтверждает фундаментальность наблюдаемого явления. В результате. В разделе **3.4.** автор продолжил углубление в исследование ВТСП пленок. Были детально изучены пленки различной толщины и приведены факторы, сопровождающие увеличение толщины ВТСП пленок. Здесь автор работы выполнил сопоставление с литературными данными и пришел к выводу, что ряд факторов приводится в литературе ошибочно. Основываясь на данных рентгеновской дифрактометрии и растровой электронной микроскопии, автор выделил ключевые факторы, приводящие к падению плотности критического тока при увеличении толщины ВТСП пленок:

развитие морфологии поверхности и появлении ориентации $(100)_{\text{пленки}} \parallel (001)_{\text{подложки}}$. На основании **разделов 3.3-3.5** автор делает предположение, что разделение слоев сверхпроводника на отдельные тонкие слои за счет формирования интерслоев более простых оксидных соединений может помочь решить проблему деградации значения плотности критического тока.

В **разделе 3.5.** автор реализует концепцию формирования многослойных эпитаксиальных структур сверхпроводник-интерслой. На основе результатов разделов 3.3-3.5 были выбраны толщины отдельных слоев сверхпроводника. Также были предложены материалы интерслоев – CeO_2 и SrTiO_3 . Основываясь на проведенных исследованиях автор работы определил оптимальные толщины ВТСП слоя в многослойной структуре, материал интерслоя, а также толщины интерслоев. В результате им было показано, что в многослойных структурах возможно увеличение тока кратно количеству слоев сверхпроводника, что, безусловно, является очень ценным достижением как с точки зрения реализации эпитаксиального приема, так и для перспективы применения полученного результата на длинномерных ВТСП лентах второго поколения. Также был изучен интересный эффект – перетекание тока через диэлектрические слои. Отметим, что автор не остановился на полученных результатах, а предложил возможный механизм перетекания тока, а также наглядно показал области, в которых интерслои претерпевают разрывы. Что делает работу еще более логичной и законченной. Эффект перетекания тока, наблюдаемый в работе делает уникальным использование многослойных структур в комплексе с текстурированными подложками RABiTS, т.к. разрывы в интерслоях передаются по границам зерен подложки, которые являются крупными морфологическими и кристаллическими дефектами.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования комплекса полученных новых знаний при разработке собственной технологии создания ВТСП лент второго поколения на

текстурированных подложках RABiTS методом импульсного лазерного осаждения.

Успешная реализация подхода с многослойными эпитаксиальными структурами сверхпроводник-интерслои может стать началом нового подхода в создании ВТСП лент второго поколения с высокой токонесущей способностью.

Результаты работы могут быть использованы для улучшения качества высокотемпературных сверхпроводников второго поколения и совершенствования их производства в НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИИТФА», АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», компании СуперОкс и других.

В целом, следует отметить, что работа выполнена на высоком методическом уровне. Все эпитаксиальные слои (как буферные, так и сверхпроводящие) сформированы одним способом – методом импульсного лазерного осаждения. Для полной и комплексной характеристики объектов исследования автор использует такие современные аналитические методы как дифракция быстрых электронов на отражение, дифракция обратно рассеянных электронов, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, рентгеновская дифракция. Также в работе разработана методика измерения токонесущей способности на коротких образцах 4-х контактным способом, что однозначно показывает токонесущую способность ВТСП пленок. Используемый комплекс методов и корреляция данных, полученных с помощью различных методик, позволяет судить о высокой достоверности полученных результатов и выводов.

Работа построена логично, иллюстрационный материал полностью характеризует исследуемые объекты. Вместе с тем, по работе есть ряд замечаний:

1. В работе были выбраны текстурированные подложки состава $\text{Ni}+5\text{at}\%W$, которые обладают следующими недостатками:
 - низкие прочностные характеристики;

- сплав Ni+5at%W является магнитным при температуре 77 К, что приводит к потерям на перемагничивание подложки при использовании на переменном токе.

Следовало бы рассмотреть иные варианты текстурированных подложек.

2. Вызывает вопрос корректность измерений токонесущей способности на мостике шириной 1 мм и последующий пересчет на сантиметр ширины подложки.
3. Токонесущая способность в настоящей работе была измерена в поле собственного тока. Для ряда применений важной является значение критического тока в магнитном поле, чего в работе не представлено.

Указанные замечания не подвергают сомнению научную новизну, практическую значимость, актуальность результатов и не сказываются на высокой оценке работы. Диссертационная работа Черных И.А. «Многослойные эпитаксиальные структуры сверхпроводник-интерслои для увеличения токонесущей способности сверхпроводящих лент второго поколения» представляет собой самостоятельно выполненную, завершенную научно-квалификационную работу. В ней получен ряд новых научных результатов, которые являются новым шагом в исследовании и создании эпитаксиальных слоев для ВТСП лент второго поколения на текстурированных металлических подложках RABiTS. Определяющая роль автора в выполнении исследований не вызывает сомнений.

Автореферат диссертации полностью отражает основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы многократно обсуждались на Российских и международных конференциях. Публикации автора достаточно полно отражают результаты работы.

Материалы диссертации представляют высокий интерес для специалистов в области создания и исследования ВТСП лент второго поколения.

В заключении необходимо отметить, что диссертационная работа «Многослойные эпитаксиальные структуры сверхпроводник-интерслои для

увеличения токонесущей способности сверхпроводящих лент второго поколения» удовлетворяет требованиям, установленным постановлением Правительства РФ №842 «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор – Черных Игорь Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Научный доклад по диссертации заслушан и обсужден на заседании секции «Сверхпроводящие провода и кабели» Научно-технического совета ОАО «ВНИИКП», 15 января 2016 года.

Отзыв составил:

Заместитель заведующего отделением – заведующий лабораторией
к.т.н.

Фетисов Сергей Сергеевич

Телефон: 495-542-22-70 доб. 209

E-mail: sergey.fetisov@gmail.com

111024, г. Москва, Шоссе Энтузиастов д. 5

Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности

Телефон: 8 (495) 678-0216

E-mail: vniikp@vniikp.ru

Подписи заверяю,

Ученый секретарь секции «Сверхпроводящие провода и кабели» НТС ОАО «ВНИИКП»

к.т.н.

Потанина Л.В.