

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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.

Диссертационная работа Черных И.А. посвящена получению и исследованию свойств эпитаксиальных слоев, составляющих основу высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент второго поколения. Несмотря на то, что высокотемпературная сверхпроводимость в сложных оксидах меди была открыта почти 30 лет назад, потребовалось длительное время для разработки технологий создания токопроводящих композитных лент-проводов, которые по своей надежности можно было бы сравнивать с традиционными металлическими проводниками тока, например из меди. В результате усилий ученых и инженеров всего мирового сообщества в последние годы были созданы гибкие многослойные длинномерные ВТСП ленты второго поколения на основе тонких пленок $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, обеспечивающие плотность критического тока выше 1 MA/cm^2 в собственном магнитном поле. Такие ленты чрезвычайно перспективны для использования в линиях электропередач, тоководах, ограничителях тока короткого замыкания и пр. В то же время, сильная анизотропия токонесущих свойств ВТСП лент второго поколения, приводящая, в частности, к сильной зависимости критического тока от магнитного поля, ставит определенные ограничения для применения их в таких устройствах, как соленоиды с высоким магнитным полем, трансформаторы, индукционные накопители энергии, магнито-резонансные томографы, электродвигатели и электрогенераторы. Улучшение свойств ВТСП проводов, поиск и разработка

новых подходов для повышения токонесущей способности эпитаксиальных ВТСП слоев 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.

Диссертационная работа Черных И.А. состоит из введения, трех глав, заключения, выводов и списка литературных источников из 105 наименований. Работа изложена на 136 страницах, содержит 78 рисунков и 6 таблиц.

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

Первая глава является обзором литературных источников, в котором отражены подходы для создания биаксиальной текстуры в ВТСП пленках, описаны используемые типы подложек, их достоинства и недостатки, приведены методы роста буферных и сверхпроводящих слоев, представлена проблема падения плотности критического тока в эпитаксиальных ВТСП пленках, отдельно рассмотрена проблема создания многослойных структур сверхпроводник-интерслои.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. В ней приведено описание метода импульсного лазерного осаждения, с помощью которого были сформированы все эпитаксиальные буферные и сверхпроводящие слои. Приведено описание комплекса аналитических методик, необходимых для всестороннего и полного анализа структуры и свойств объектов.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Глава состоит из пяти разделов, в которых

выполнено комплексное исследование сформированных образцов ВТСП лент второго поколения.

Первый раздел экспериментальной части посвящен изучению особенностей формирования затравочного оксидного слоя на текстурированной металлической подложке. Выполнено исследование влияния условий роста, включая влияние температуры, на текстуру и морфологию буферных слоев.

В разделах 3.2-3.4 представлены результаты исследования свойств ВТСП пленок различной толщины. Изучена токонесущая способность, для описания поведения критической плотности тока использованы теоретические модели, соответствующие различным механизмам пиннинга вихрей в пленках. Также определены наиболее важные экспериментально наблюдаемые факторы, приводящие к падению плотности критического тока с ростом толщины пленки сверхпроводника. Комплексный анализ с использованием ряда взаимодополняющих аналитических методик наряду с анализом модельных представлений позволил автору предложить собственный подход для увеличения токонесущей способности эпитаксиальных пленок высокотемпературных сверхпроводников.

В заключительном разделе экспериментальной части автором предложен и реализован подход, заключающийся во введении оксидных интерслоев в пленку сверхпроводника с целью предотвращения ухудшения морфологии пленок и их токонесущей способности с ростом толщины. Показано кратное увеличение токонесущей способности в структурах из четырех слоев сверхпроводник-интерслой с толщиной ВТСП пленки в 250 нм.

Среди наиболее важных результатов, полученных в работе, считаю необходимым отметить следующие:

1. С помощью *in-situ* RHEED анализа обнаружено образование террасных структур на поверхности подложки Ni-W при температуре 760°C, что

способствует полному наследованию текстуры подложки затравочным буферным слоем Y_2O_3 и устранению поверхностных дефектов.

2. Получена экспериментальная зависимость плотности критического тока от толщины эпитаксиальной ВТСП пленки. Определены факторы, приводящие к падению плотности критического тока: появление ориентации $(100)_{\text{пленки}} \parallel (001)_{\text{подложки}}$, а также ухудшение морфологии пленки сверхпроводника. Проанализирован ряд теоретических моделей, соответствующих различным механизмам пиннинга вихрей в пленке.

3. В сформированных многослойных структурах сверхпроводник-интерслои получено кратное числу слоев сверхпроводника увеличение токнесущей способности, что может рассматриваться как один из путей решения проблемы падения плотности критического тока с толщиной в пленках сверхпроводника при модификации технологии создания длинномерных ВТСП лент второго поколения.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием ряда взаимодополняющих современных аналитических методик, большим объемом экспериментальных данных и их корректной обработкой.

Вместе с тем, диссертационная работа не свободна от **недостатков**.

1. В работе не обсуждаются другие методы повышения критического тока сверхпроводящих слоев, к примеру такие, как внедрение искусственных центров пиннинга в виде нанодобавок или дефектов структуры.
2. При создании многослойных структур не исследован вопрос о наличии или отсутствии эффекта наследования текстуры подложки в верхних ВТСП слоях.
3. При изучении механизма протекания тока через интерслои не приведена схема введения и измерения тока в ВТСП слоях, не оценены

площади поперечного сечения каналов перетекания тока в нижние слои сверхпроводника, что затрудняет возможность оценки правильности вывода о существенном влиянии этого механизма.

4. При анализе возможности применения разных теоретических моделей пиннинга (формулы 2, 3, стр. 44, 100, 101) автор использует одинаковое обозначение «d» одновременно для толщины ВТСП слоя и для расстояния между дефектами, при этом не объясняет, что означают введенные обозначения « f_p , j_o , j_{k0} , j_d ». К примеру, из формулы (2) следует зависимость $J_k \sim d^{-3/2}$, а не $d^{-1/2}$, как это приведено в тексте. Это сильно затрудняет оценку правильности приведенных выводов о наилучшем совпадении модели 2D слабого коллективного пиннинга с экспериментальными данными.
5. На экспериментальных зависимостях, приведенных на рисунках 55, 57, 59, 60, 61 и 76 отсутствуют указания на экспериментальные ошибки.
6. Есть замечание к оформлению списка литературы, в котором, в большинстве статей автор указывает только первого автора, что может быть обосновано в случае, например, коротких тезисов, но вряд ли приемлемо для диссертационной работы.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными, не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Тексты диссертации и автореферата написаны научным языком, понятным для широкого круга специалистов в области физики конденсированного состояния. Суть работы достаточно подробно отражена в публикациях автора. Результаты работы многократно докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях. Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации. Личный

вклад автора и его высокий квалификационный уровень не вызывают сомнений.

Считаю, что диссертационная работа Черных И.А. полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а ее автор 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»

А.П. Менушенков

02.02.2016

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

Сведения о месте работы оппонента:

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

Телефон: +7-909-980-54-55

Электронная почта: armenushenkov@mephi.ru