

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Черных Игоря Анатольевича  
**«Многослойные эпитаксиальные структуры сверхпроводник-интерслои  
для увеличения токонесущей способности сверхпроводящих лент  
второго поколения»,**

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.07 – физика  
конденсированного состояния.

В настоящее время большой интерес вызывает тема развития высокотемпературных сверхпроводников на гибких металлических подложках (ВТСП ленты второго поколения). Практическое использование лент представляет большой интерес из-за их работоспособности при температуре выше температуры кипения жидкого азота, что существенно снижает затраты на системы криостатирования и криообеспечения. В настоящее время ленты уже находят применение не только в кабельных линиях электропередач, но и в токоограничителях, системах магнитного подвеса, сверхпроводящих трансформаторах, токовводах, магнитных системах, электрических машинах и др.

Перспективно использования ВТСП-2 лент для повышения удельной мощности электрических машин за счет увеличения МДС основного магнитного потока, линейной нагрузки и уменьшения электрических потерь. Одной из основных характеристик ВТСП лент второго поколения является их токонесущая способность при температурных диапазонах жидкого азота и в магнитных полях более 0,7 Тл. Повышение токонесущей способности позволяет увеличить параметры электрических машин, снизить их себестоимость.

В диссертационной работе Черных И.А. рассмотрена актуальная проблема повышения токонесущей способности эпитаксиальных ВТСП слоев.

В ходе работы Черных И.А. были изучены особенности эпитаксиального роста буферных слоев на текстурированных металлических подложках Ni-W, было изучено поведение значения плотности критического тока при увеличении толщины пленок сверхпроводника, выявлены факторы, сопровождающие увеличение толщины ВТСП пленок. Был предложен и реализован подход, основанный на формировании промежуточных слоев в пленках сверхпроводника с целью остановки падения значения плотности критического тока.

Благодаря комплексному подходу к решению поставленных задач и детальному анализу полученных результатов автором был получен ряд

новых результатов. В частности, показана связь эффекта образования террасных структур на поверхности подложки при нагреве до температуры 760°C с текстурой буферного слоя  $Y_2O_3$ . Также был выполнен детальный анализ ВТСП пленок различной толщины, наряду с построением зависимости критической плотности тока от толщины пленок, был изучены факторы, которые могут приводить к падению значения критической плотности тока, и определены ключевые из них – появления (100)-ориентированных кристаллитов, а также ухудшение морфологии пленки.

В своей работе автор реализовал подход, позволяющий решить проблему падения критической плотности тока при увеличении толщины ВТСП пленок за счет последовательного формирования слоев ВТСП-интерслои. Данный подход позволил достичь увеличения токонесущей способности по сравнению с однослойными пленками ВТСП. Также на структурах ВТСП-интерслои наблюдался интересный эффект перетекания тока через диэлектрические слои. Был предложен механизм перетекания через дефекты, передающиеся от границ зерен текстурированной подложки. Анализ поперечных срезов с помощью просвечивающей электронной микроскопии позволил подтвердить предложенную гипотезу.

Научная значимость и достоверность результатов, полученных в диссертационной работе не вызывают сомнений и подтверждаются публикациями в рецензируемых научных изданиях и докладами на ведущих российских и зарубежных конференциях.

Работа Черных И.А. обладает высокой практической значимостью, так как посвящена развитию собственных подходов для формирования ВТСП лент второго поколения с высокой токонесущей способностью и может стать основой при разработке технологии создания длинномерных ВТСП лент второго поколения.

Автореферат написан понятным языком и изложен в последовательной форме.

В качестве замечаний, отмечу следующие:

1. Наблюдаемый эффект перетекания тока через интерслои является, в данном случае, особенностью структуры и морфологии текстурированных подложек, неплохо было бы исследовать данный эффект на IBAD-подложках.
2. В настоящее время активно используется внедрения искусственных центров пиннинга в пленки сверхпроводника. Однако в работе используются «чистые» твердотельные мишени  $YBa_2Cu_3O_x$ . Формирование многослойных структур одновременно с внедрением центров пиннинга могло бы позволить увеличить токонесущую способность не только в поле собственного тока, а

также в сильных магнитных полях, что очень важно для применений в устройствах.

3. Не представлены экспериментальные фазовые диаграммы в ВТТ координатах (ток, как функция от индукции внешнего поля перпендикулярного плоскости ленты и температуры) полученных образцов, не позволяющие сделать сравнение с коммерческими лентами и окончательный вывод о конкурентной перспективности практического применения полученных лент в электрических машинах.

4. Не представлены экспериментальные зависимости меньшей величины потерь при работе сверхпроводниковых лент на переменном токе.

Замечания не снижают высокой научной ценности и практической значимости работы.

Считаю, что работа Черных И.А. «Многослойные эпитаксиальные структуры сверхпроводник-интерслоя для увеличения токонесущей способности сверхпроводящих лент второго поколения» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07. – «Физика конденсированного состояния».

Заведующий кафедрой 310 МАИ «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы», д-р техн. наук, профессор

Ковалев Константин Львович

26.01.2016

тел. +7 905 704 89 11

эл. почта: klink@mail.ru

125993, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

тел.: +7 499 158 43 33, [www.mai.ru](http://www.mai.ru), эл. почта: [mai@mai.ru](mailto:mai@mai.ru)

Подпись Ковалева К.Л. удостоверяю:

Декан факультета №3

Ю.Г. Следков