

ОТЗЫВ

официального оппонента на кандидатскую диссертацию

Короткова Василия Сергеевича

**«Импульсное намагничивание монокристаллических высокотемпературных
сверхпроводников»,**

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

Рецензируемая диссертация посвящена вопросам динамики магнитного потока в монокристаллических высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) состава $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ в импульсных магнитных полях. Высокая **актуальность** данных исследований обусловлена с практической точки зрения использованием импульсного намагничивания как наиболее экономичного метода для намагничивания «магнитов захваченного поля» на основе ВТСП с замороженным потоком. Такие магнитные системы в настоящее время активно изучаются, поскольку не требуют внешнего источника энергии и токовводов, потребляют значительно меньше энергии, чем традиционные электромагниты. С исследовательской точки зрения, метод импульсного намагничивания позволяет изучить электродинамические свойства ВТСП в области напряжений, недоступной для исследований в режиме постоянного тока.

Диссертация Короткова В.С. изложена на 130 страницах, состоит из введения, обзора литературных источников (глава 1), описания экспериментальной установки и методики эксперимента (глава 2), обсуждения результатов эксперимента (главы 3 и 4), практической реализации магнита захваченного поля из монокристаллических ВТСП и ферромагнетика (глава 5) и списка цитируемой литературы из 92 источников.

Первая глава работы представляет собой обзор литературы, в ней проанализированы существующие в настоящее время подходы к

намагничиванию монокристаллических ВТСП, характерные значения плотности токов в синтезируемых монокристаллических ВТСП, предельные значения размеров синтезируемых REBCO-образцов (RE – редкоземельный элемент), максимальные захваченные поля при различных методах намагничивания. Отдельный раздел 1й главы посвящен методам расчета диффузии магнитного потока при импульсном намагничивании в образец с неоднородными свойствами пиннинга.

Во второй главе представлена схема экспериментальной установки для импульсного намагничивания высокотемпературных сверхпроводников и описана процедура эксперимента по измерению экранирующих токов и остаточных полей при импульсном намагничивании. В качестве исследуемого материала использовались кольца из $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, выращенные методом охлаждения расплава на затравке из Gd. В разделе 2 представлены параметры соленоидов, которые использовались для получения импульсных магнитных полей и приведено аналитическое решение уравнения эволюции токов в разрядной RLC-цепи. В разделе 3 представлен метод измерения локальной температуры колец в процессе импульсного намагничивания с помощью миниатюрной термопары, расположенной в плоскости симметрии между двумя кольцами.

Обсуждение результатов эксперимента по импульсному намагничиванию монокристаллических ВТСП представлены **в третьей главе**. Показано различие в эволюции токов и полей в случае скачка потока и в случае отсутствия скачка потока (при низких амплитудах импульса). При отсутствии скачка ВТСП-кольцо, представляющее собой короткозамкнутый виток жесткого сверхпроводника II-го рода, подчиняется картине эволюции полей и токов, качественно описываемой моделью Бина. В области более высоких амплитуд намагничивающих импульсов для описания используется численная модель, изложенная в разделе 3.

Релаксация захваченного потока после импульсного намагничивания

описана в **главе 4**. Результаты измерения эволюции локальной температуры сверхпроводника при импульсном намагничивании. **Пятая глава** посвящена практическим применениям импульсного намагничивания ВТСП-колец. Разработанный магнит из монокристаллических ВТСП и полюсов из магнитомягкого сплава «пермендиор» (48% Fe – 50 % Co – 2% V) позволяет достигать полей 2.5 Тл при температуре кипения жидкого азота.

Одним из важнейших результатов, полученных в диссертационной работе, являются наблюдение и описание скачка магнитного потока в ВТСП кольце при импульсном намагничивании в жидком азоте. Исследование скачков потока при импульсном намагничивании важно, поскольку высокие экранирующие токи, наводимые импульсным полем, препятствуют намагничиванию импульсами с низкой амплитудой. Скачок потока позволяет устранить экранирующие токи, не вызывая его механического разрушения. При скачке потока возникает локальный перегрев сверхпроводника, что приводит к затуханию экранирующего тока за короткое время по сравнению с временем импульса. Скачки потока проявляются в жестких сверхпроводниках II-го рода в области низких температур и обусловлены низкой теплоёмкостью сверхпроводников при низких температурах ($C \sim T^3$). В диссертации установлено, что скачок потока в кольцевой геометрии при импульсном намагничивании может наблюдаться и в области $T = 78$ К, где скачки в условиях статического намагничивания отсутствуют. Предложена упрощенная математическая модель эволюции тока в ВТСП-кольце с азимутальной неоднородностью, которая дает возможность для описания эволюции токов $I(t)$ в области высоких амплитуд импульсов. Представленные экспериментальные результаты и их трактовка, предложенные подходы к моделированию являются оригинальными, что отражает достаточную степень **научной новизны** данной работы.

Важнейшим практическим результатом работы является достижение намагниченности, соответствующей процессу охлаждения в поле при

импульсном намагничивании, используя скачок потока, инициированный импульсом магнитного поля. В качестве другого прикладного результата работы представлен магнит с импульсным намагничиванием из ВТСП и ферромагнитных полюсов, который создает магнитное поле 2.5 Тл при температуре, равной 78 К, с достаточно высокой однородностью магнитного поля, что делает представленный магнит уникальным. Эти результаты отражают высокую **практическую значимость** работы для создания автономных магнитов с замороженным потоком.

Достоверность изложенных результатов и выводов подтверждается применением общепризнанных методов измерений, как холловская магнитометрия, соответствием наблюдаемых экспериментальных результатов результатам расчетов и оценок.

Необходимо сделать следующие **замечания** :

1. С физической точки зрения интересно рассмотреть граничную скорость изменения внешнего магнитного поля dH/dt . Было бы важно рассмотреть, какими параметрами сверхпроводника определяется эта величина. Кроме того, для полноты картины необходимо было бы узнать минимальную амплитуду импульса, при которой возникает скачок потока.
2. Отрицательная релаксация, рассмотрена в главе 4 представляет собой возрастание захваченного магнитного поля в центре сверхпроводника. В диссертации указано, что рост поля может продолжаться «достаточно большое время». Для практических целей является оценка характерного времени, за которое возрастание поля сменится снижением поля сверхпроводника является важной.
3. В работе (глава 1 и глава 3) подчёркивается, что при намагничивании в кольцевой геометрии скачки потока возникают, однако при намагничивании дисков без отверстия скачки потока отсутствуют. Было бы немаловажно указать предельный радиус отверстия в ВТСП, при котором скачок потока при импульсном намагничивании начинал бы проявляться.

4. В тексте диссертации присутствуют неточности и опечатки. Для некоторых рисунков подписи перенесены на другую страницу, что затрудняет чтение диссертации.

Указанные недостатки не снижают значимость представленной диссертации. Автореферат диссертации в полной мере соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных журналах. Работа базируется на достаточном количестве примеров, и проведена на высоком научном уровне.

По актуальности темы, научной новизне и практической ценности полученных результатов, по обоснованности и достоверности научных положений, считаю, что диссертационная работа Короткова Василия Сергеевича «Импульсное намагничивание монокристаллов высокотемпературных сверхпроводников» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу и соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор В.С. Коротков заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Физики твердого тела и наносистем,
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31
e-mail : iarudnev@mephi.ru

Руднев Игорь Анатольевич
05.05.2018

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ



Машкина Татьяна Сергеевна