

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «Институт радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11 корп. 7.
член-корр. РАН Никитов Сергей Аполлонович



2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу КОРОТКОВА В.С.

«ИМПУЛЬСНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ МОНОДОМЕННЫХ

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ»,

представленную на соискание учёной степени кандидата

физико-математических наук

по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

Со времени открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) множество научных групп занимаются исследованием их электродинамики для создания сверхпроводящих электромагнитов, работающих в жидком азоте. Для создания постоянных магнитных полей могут быть применены соленоиды композитной ленты на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, однако анизотропия токонесущей способности ленты ограничивает максимальные достижимые магнитные поля в таких солеоидах. Сложность создания низкоомных контактов между лентами делает проблематичным использование соленоидов из ВТСП лент в короткозамкнутом (автономном) режиме из-за диссипации энергии на контактах. В качестве альтернативы ВТСП лентам в научной литературе рассматриваются монокристаллические высокотемпературные сверхпроводники состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, для которых проблема контакта отсутствует. Поскольку технология создания монокристаллических сверхпроводников быстро развивается в

последние годы, с их помощью возможно создание портативных и экономичных магнитов с высокой индукцией ($B > 2$ Тл) в области «азотных» температур. Для намагничивания монокристаллических сверхпроводников до столь высоких полей могут быть использованы либо сверхпроводящие магниты на основе низкотемпературных сверхпроводников, либо может быть применено импульсное намагничивание. Реализация последнего значительно экономичнее из-за возможности проводить намагничивание с использованием резистивных соленоидов в жидком азоте без сверхпроводящего магнита. Таким образом, импульсное намагничивание позволяет исключить из магнитной системы всю наиболее дорогостоящую низкотемпературную часть. Вышеизложенное поясняет актуальность исследования импульсного намагничивания монокристаллических высокотемпературных сверхпроводников для создания автономных магнитов с захваченным потоком.

В диссертации рассматривается импульсное намагничивание монокристаллических ВТСП-колец в жидком азоте. В результате проведенных исследований автором был решен ряд важных задач физики сверхпроводимости и был создан и исследован комбинированный магнит из высокотемпературного сверхпроводника и ферромагнетика с магнитным полем в зазоре, равным 2.5 Тл. Применение магнитов, подобных созданному в данной работе, возможно в научных исследованиях, в частности, в магнитных системах для ЭПР или ЯМР-томографов.

В первой главе диссертации проводится детальный обзор литературных источников по методам намагничивания высокотемпературных сверхпроводников, проблеме скачков потока в ВТСП и релаксации захваченного магнитного потока. Особое внимание в литобзоре уделено неоднородности диссипации энергии при диффузии магнитного потока в сверхпроводник с азимутальной неоднородностью силы пиннинга. Методика эксперимента и устройство экспериментальной установки, применяемые для намагничивания монокристаллических ВТСП-колец, представлены во второй главе.

Описаны характеристики импульсов магнитного поля, применяемые для намагничивания, методы измерения остаточных магнитных полей и токов сверхпроводника. **Третья глава** диссертации посвящена исследованию импульсного намагничивания монокристаллических $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -колец и обсуждению наиболее важных результатов — исследованию скачков магнитного потока при импульсном намагничивании и исследованию радиального распределения аксиальной компоненты захваченного поля ВТСП-колец после импульсного намагничивания со скачком потока. В **четвертой главе** диссертации исследованы особенности релаксации магнитного потока высокотемпературного сверхпроводника после импульсного намагничивания. Разработка и создание магнита из $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ - колец и полюсов из пермендюра описываются в **пятой главе** диссертации.

Среди важнейших **результатов**, полученных в ходе исследования импульсного намагничивания монокристаллических $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ - колец, необходимо отметить следующие:

- обнаружен, исследован и объяснен эффект быстрого снижения экранирующего тока ВТСП-кольца при импульсном намагничивании в жидком азоте, сопровождающийся скачком потока в сверхпроводник. Затухание тока происходит на области кольца со сниженным значением критического тока, где локализуется диссипация энергии экранирующих токов.
- измерено радиальное распределение температуры сверхпроводника при импульсном намагничивании, объяснена «отрицательная релаксация» магнитного поля в центральной области ВТСП-кольца при малых захваченных полях
- создан работающий в жидком азоте магнит из высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с максимальным полем 2.5 Тл и импульсным намагничиванием.

Новизна данных результатов состоит в том, что впервые показан возможный сценарий развития скачка магнитного потока в массивном ВТСП-

кольце в $T = 78$ К, где термомагнитная нестабильность не реализуется. Скачок развивается в результате неоднородного нагрева кольца узкой области кольца экранирующим током. Впервые исследованы и объяснены конфигурации остаточного поля в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ – кольце после импульсного намагничивания со скачком потока. Путем использования импульсов с длительным временем снижения поля достигнута максимальная намагниченность в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ – кольцах, соответствующая процессу охлаждения в поле. Результаты фундаментальных исследований позволили использовать импульсное намагничивание на практике для достижения захваченного поля 2.5 Тл в магните из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ – колец и пермендюрных полюсов.

Достоверность результатов диссертации определяется применением общепризнанных методов регистрации магнитных полей и токов; соответствием предложенных моделей результатам эксперимента.

Содержание диссертации и отзыва обсуждено на научном семинаре в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова от 26.04.2018. После доклада последовало продолжительное обсуждение представленной соискателем работы. Основные замечания и вопросы к диссертационной работе, высказанные участниками семинара, состояли в следующем:

1) Одним из выводов работы является образование при импульсном намагничивании в ВТСП-кольце «горячего канала», однако в работе отсутствует экспериментальное наблюдение локализованного роста температуры кольца на 10 К каким-либо прямым методом.

2) В главе 5 показано, что в гибридном магните существуют области с «отрицательной» релаксацией (возрастание поля с течением времени при небольших захваченных полях) и положительной релаксацией (вблизи максимальной намагниченности захваченное поле снижается со временем). В таком случае, наиболее стабильное поле в магните должно наблюдаться в той области, где скорость релаксации изменяет знак. Однако, этот режим не

исследован достаточно полно. Исследование условий получения «нулевой релаксации» было бы важно для практических приложений

3) Возможно ли увеличение поля гибридного магнита путем снижения температуры ниже 78 К путем охлаждения криокулером?

4) Должна быть более подробно обоснована применимость представленной в работе математической модели в случае, когда в кольце существует более одной неоднородности.

5) Отсутствие рисунка, демонстрирующего предполагаемое направление силовых линий захваченного поля в ВТСП-кольце после намагничивания со скачком, осложняет объяснение инверсии знака магнитного поля в центре кольца.

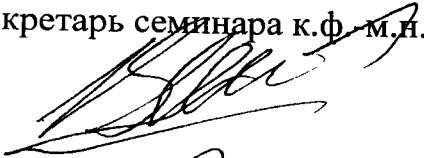
Несмотря на указанные недочеты, по результатам голосования участников семинара единогласно было принято решение рекомендовать диссертацию к защите.

Сказанное выше позволяет заключить, что диссертационная работа Короткова В.С. представляет собой оригинальное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком научно-техническом уровне. Материалы диссертации представлены в семи публикациях в журналах международного уровня, входящих в Перечень ВАК, базы Scopus и Web of Science. Результаты диссертации докладывались на российских и международных научных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации и публикации достаточно полно отражают содержание работы. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния. Диссертационная работа В.С. Короткова отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, а

ее автор Коротков Василий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., профессором, руководителем лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике Шавровым В.Г. Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова и в.н.с., д. ф.-м.н., Коледовым В.В., секретарь семинара к.ф.-м.н., в.н.с., В.А.Котов.

д. ф.-м. н., зав. лаб.



Шавров В.Г.

д.ф.-м.н., в.н.с



Коледов В.В.

к.ф.-м.н., в.н.с.



Котов В.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова», 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11 корп. 7. веб-сайт <http://cplire.ru> Телефон : +7(495)629 3574