

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.075.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН) ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от "11" октября 2019 г. №6

О присуждении Гохфельду Денису Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Магнитный гистерезис и плотность критического тока неоднородных сверхпроводников в сильных магнитных полях» по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния принята к защите 21 июня 2019 г., протокол №5 диссертационным советом Д 003.075.01 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, приказ Минобрнауки № 1513/НК от 25.11.2016 г.

Соискатель Гохфельд Денис Михайлович 1977 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему "Физические процессы, формирующие вольт-амперные характеристики гетерогенных высокотемпературных сверхпроводников с непосредственной проводимостью межкристаллитных границ" по специальности 01.04.07 – "физика конденсированного состояния" защитил в 2004 г. в диссертационном совете Д 003.055.02 при Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Работает старшим научным сотрудником в лаборатории сильных магнитных полей Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН) – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории сильных магнитных полей ИФ СО РАН.

*Научный консультант* – доктор физико-математических наук Балаев Дмитрий Александрович, директор ИФ СО РАН.

*Официальные оппоненты:* д.ф-м.н. Кузьмичев Николай Дмитриевич, профессор кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва; д.ф-м.н. Руднев Игорь Анатольевич, профессор отделения лазерных и плазменных технологий Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; д.ф-м.н. Успенская Людмила Сергеевна, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории квантовых кристаллов Института физики твердого тела Российской академии наук дали положительные отзывы на диссертацию.

*Ведущая организация* – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (ПИЯФ), г. Гатчина в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником группы электромагнитных свойств конденсированных сред Отдела исследований конденсированного состояния Отделения нейтронных исследований Дунаевским Сергеем Михайловичем и кандидатом физико-математических наук, учёным секретарем Воробьевым Сергеем Ивановичем, указала, что решенная в диссертации научная проблема имеет большое практическое значение для создания новых сверхпроводящих материалов, способных нести токи большой величины.

Соискатель имеет 126 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 47 работ, из них в рецензируемых научных изданиях - 23 работы. Также опубликована глава в монографии и имеется свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ. Все работы посвящены исследованиям магнитных свойств неоднородных сверхпроводников. Общий объем работ, опубликованных в рецензируемых журналах 16 усл.-печ.л.

Наиболее значительные работы: 1. Gokhfeld D.M., Balaev D.A., Popkov S.I., Shaykhutdinov K.A., Petrov M.I. Magnetization loop and critical current of porous Bi-based HTS // Physica C. – 2006. – Vol. 434. – № 2. – P. 135-137; 2. Gokhfeld D.M.,

Balaev D.A., Petrov M.I., Popkov S.I., Shaykhutdinov K.A., Val'kov V.V. Magnetization asymmetry of type-II superconductors in high magnetic fields // Journ. Appl. Phys. – 2011. – Vol. 109. – No. 3. – P. 033904 (6pp); **3.** Gokhfeld D.M. Secondary peak on asymmetric magnetization loop of type-II superconductors // J. Supercond. Novel Magn. – 2013. – Vol. 26. – No. 2. – P. 281-283; **4.** Altin E., Gokhfeld D.M., Komogortsev S.V., Altin S., Yakinci M.E. Hysteresis loops of  $\text{MgB}_2 + \text{Co}$  composite tapes // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. – 2013. – Vol. 24. – No. 4. – P. 1341-1347; **5.** Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Клинова Л.А., Жерихина Л.Н., Цвохребов А.М. Увеличение ширины петли намагниченности в сверхпроводнике  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$ . Возможное проявление фазового расслоения // ЖЭТФ. – 2014. – Т. 145. – № 1. – С. 120-127; **6.** Гохфельд Д.М. Расширенная модель критического состояния: асимметричные петли намагниченности и полевые зависимости критического тока сверхпроводников // ФТТ. – 2014. – Т. 56. – № 12. – С. 2298-2304; **7.** Gokhfeld D.M., Balaev D.A., Yakimov I.S., Petrov M.I., Semenov S.V., Tuning the peak effect in the  $\text{Y}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  compound // Ceram. Int. – 2017. – Vol. 43. – No. 13. – P. 9985-9991; **8.** Zeng XL, Karwoth T., Koblishka M.R., Hartmann U., Gokhfeld D.M., Chang C., Hauet T., Analysis of magnetization loops of electrospun nonwoven superconducting fabrics // Phys. Rev. Materials – 2017. – Vol. 1. – No. 4. – P. 044802 (8pp). **9.** Gokhfeld D.M. Use of a sigmoid function to describe second peak in magnetization loops // J. Supercond. Novel Magn. – 2018. – Vol. 31. – No. 6. – P. 1785–1789; **10.** Гохфельд Д.М. Циркуляционный радиус и плотность критического тока в сверхпроводниках второго рода // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – № 2. – С. 3-5.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные):

*Ведущая организация (ПИЯФ).* Отзыв положительный. Замечание: при анализе магнитных свойств не учитывался вклад от межгранульных токов, индуцированных в образцах. Между тем этот вклад может давать заметный вклад в намагниченность в малых магнитных полях.

*Д.ф.-м.н. Кузьмичев Н.Д. – официальный оппонент.* Отзыв положительный. Замечание: Выражение для максимальной плотности тока (плотности тока распаривания), приведенное в диссертации, формула (2), не применимо к таким

сложным системам, как слоистые высокотемпературные сверхпроводники. Следовательно, значения плотности тока распаривания исследуемых соединений могут отличаться от величин, определенных по формуле (2).

*Д.ф.-м.н. Руднев И.А. – официальный оппонент. Отзыв положительный.*

Замечания: 1) Используемая в работе модель разработана для образцов, имеющих цилиндрическую форму. Для полноты картины не хватает расчетов для случая сверхпроводящей пластины. В высокотемпературных сверхпроводниках на основе висмута гранулы имеют пластинчатую форму, и было бы правильным использовать соответствующий вариант модели. 2) Автор в диссертации несколько раз обращается к теме пиннинга вихрей Абрикосова, перестройки решетки вихрей Абрикосова, например, при описании пик-эффекта. Однако в работе полностью отсутствует анализ энергетического ландшафта центров пиннинга, который можно было бы легко получить из временной релаксации намагниченности или уширения резистивного сверхпроводящего перехода в магнитных полях. В частности, анализ релаксации намагниченности мог бы дополнить сведения о пиннинге вихрей как в межгранульных областях (характеристика быстрой релаксации намагниченности), так и во внутригранульных сверхпроводящих областях (долговременная релаксация). Особенно эти данные были бы полезны при анализе влияния немагнитных и магнитных добавок на критический ток. 3) В работе не достаточно полно описаны процедуры подготовки образцов как для резистивных измерений (изготовление мостиков, электрических контактов), так и для магнитных измерений, имея в виду, что неизбежная механическая обработка гранулированных сверхпроводников с целью получения образцов нужного размера и формы может привести к деградации свойств, например, из-за появления микротрещин. Следует пояснить, насколько тщательно контролировался этот процесс. 4) В диссертации указано, что измерения намагниченности проводились при достаточно малой скорости развертки магнитного поля 0,03 Тл/мин. Не ясно, насколько при этом учитывалась релаксация намагниченности, которая при высоких температурах может быть весьма заметной и вносить вклад в измеряемые значения намагниченности.

*Д.ф.-м.н. Успенская Л.С. – официальный оппонент. Отзыв положительный.*

Замечания: 1) в разделе, посвященном модели, не рассматривается вопрос о намагниченности образцов с отличающейся топологией, например, колец, мультислойных пленок и пр. 2) В разделе, посвященном анализу экспериментальных данных, полученных на  $\text{MgB}_2$ , не отражен факт, что этот сверхпроводник имеет две энергетических щели и, соответственно, нетривиальное взаимодействие между вихрями Абрикосова.

*Д.ф.-м.н. Романенко А.И. Отзыв положительный, замечаний нет.*

*Д.ф.-м.н. Водолазов Д.Ю. Отзыв положительный, замечаний нет.*

*Д.ф.-м.н. Лыков А.Н. Отзыв положительный. Замечания:* 1) В модели, развитой автором, используется большое число подгоночных параметров, что затрудняет проведение корректных оценок и получение с ее помощью достоверных результатов. 2) В модели не учитывается слоистая структура купратных ВТСП, изучению которых главным образом посвящена диссертация. Такая структура влияет, в частности, на магнитную индукцию внутри микрокристаллов. Также в диссертации не учитывается влияние крипа магнитного потока на магнитные характеристики ВТСП. Известно, что в этих сверхпроводниках крип потока оказывает заметное влияние на магнитные характеристики и даже на величину критического тока. 3) Седьмая глава диссертации посвящена исследованию намагниченности всего лишь одного монокристалла, причем его форма далека от продолговатой формы, требуемой моделью, которая используется автором для описания петель гистерезиса намагниченности. Для подтверждения полученных результатов желательны измерения на других образцах.

*Д.ф.-м.н. Тейтельбаум Г.Б. и д.ф.-м.н. Таланов Ю.И. Отзыв положительный.*

Замечание: Предложенное широкое использование пористых ВТСП материалов, связанное с их малой плотностью, имеет смысл только при условии сохранения величины критических параметров (в частности  $j_c$ ) на достаточно высоком уровне. Однако представленные на рис. 6 автореферата значения критического тока пористого  $\text{Bi-2223}$  заметно уступают по величине величинам критического тока, характерным для сплошных образцов подобных материалов.

*Д.ф.-м.н. Прошин Ю.Н.* Отзыв положительный. Замечание: При внедрении магнитных наночастиц между сверхпроводящих гранул должен учитываться эффект близости.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловлен тем, что они являются ведущими как в России, так и в мире специалистами в области физики конденсированного состояния, в частности, в экспериментальных и теоретических исследованиях структуры и магнитных свойств сверхпроводящих материалов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработана модель для магнитного гистерезиса с произвольной асимметрией, характерного для неоднородных сверхпроводников. Предложен метод определения циркуляционного радиуса и соответствующих значений плотности критического тока сверхпроводника на основе измерений петли гистерезиса намагниченности.

2. Исследовано влияние реализации пористой структуры в висмутовых высокотемпературных сверхпроводниках и влияние добавления магнитных наночастиц в  $\text{MgB}_2$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  на плотность критического тока.

3. Исследовано аномальное увеличение высоты магнитного гистерезиса в сильных полях в  $\text{Y}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$ .

*Теоретическая значимость работы* обоснована тем, что развита модель, связывающая особенности петель гистерезиса намагниченности с циркуляционным радиусом и плотностью критического тока неоднородных сверхпроводников. Предложено использовать функцию Больцмана для описания перехода между состояниями с различными значениями критического тока, вызывающего пик эффект на полевых зависимостях намагниченности. Показано, что фазовое расслоение, имеющее место в металлооксидных материалах, может приводить к аномальному увеличению высоты магнитного гистерезиса в сильных полях.

*Значение полученных соискателем результатов исследования для практики* заключается в том, что разработанная модель позволяет описывать асимметричные петли гистерезиса намагниченности и оценивать значения плотности критического

тока сверхпроводников; созданная вспомогательная программа используется для анализа магнитных характеристик; предложенные методы управления критическим током могут найти применение при создании сверхпроводящих проводов и крупноразмерных сверхпроводящих устройств.

*Достоверность результатов исследования* подтверждается тем, что в работе применялись стандартные методики измерения магнитных свойств твердых тел во внешних магнитных полях с использованием высокочувствительной регистрирующей аппаратуры. Результаты, полученные на образцах классических сверхпроводящих соединений, совпадали с литературными данными. Все полученные результаты измерений воспроизводимы и повторяемы.

*Личный вклад соискателя* заключается в постановке цели и задач исследования, планировании экспериментов и анализе экспериментальных данных, разработке моделей, проведении численных расчетов, физической интерпретации полученных результатов, формулировке основных выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке научных статей.

На заседании 11 октября 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Гохфельду Денису Михайловичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и 10 по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений», участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета Д 003.075.01  
д.ф.-м.н. академик РАН

Шабанов В.Ф.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.075.01  
д.ф.-м.н., с.н.с.

Втюрин А. Н.

11.10.2019 г.