

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИФ СО РАН

Балаев Дмитрий Александрович

«29» мая 2019 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского
отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)
Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии
наук - обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН)**

Диссертация «Магнитный гистерезис и плотность критического тока неоднородных сверхпроводников в сильных магнитных полях» выполнена в лаборатории сильных магнитных полей ИФ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Гохфельд Денис Михайлович работал в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН в должности старшего научного сотрудника лаборатории сильных магнитных полей.

В 2000 г. с отличием окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева по специальности – «Физика».

В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Физические процессы, формирующие вольт-амперные характеристики гетерогенных высокотемпературных сверхпроводников с непосредственной проводимостью межкристаллитных границ» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Научный консультант – доктор физико-математических наук, доцент Балаев Дмитрий Александрович, директор Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН.

На основании обсуждения диссертационной работы на заседании отдела физики магнитных явлений, дана положительная оценка выполненной соискателем работы.

Основные результаты работы:

1. На основе модели критического состояния и расширенной модели критического состояния получено описание магнитного гистерезиса с произвольной асимметрией относительно оси H , характерного для неоднородных сверхпроводников. Введён новый параметр, отношение глубины равновесно намагниченного приповерхностного слоя к циркуляционному радиусу. Величина параметра определяет асимметрию петли гистерезиса намагниченности относительно оси H . Полученная модель позволила рассчитать петли гистерезиса намагниченности гранулярных сверхпроводников и сверхпроводящих кристаллов различных составов и определить значения характеристических параметров, таких как плотность критического тока, поле полного проникновения, поле необратимости, циркуляционный радиус.
2. Разработан метод определения циркуляционного радиуса R и соответствующих значений плотности критического тока J_c сверхпроводника из измерений магнитного гистерезиса. Обнаружено, что значения J_c исследованных высокотемпературных сверхпроводников достигают от 5 до 30 % от максимально возможного значения плотности критического тока, определяемого теорией Гинзбурга-Ландау. Значения R , определенные по разработанной модели, для всех поликристаллических образцов совпадают со средним радиусом гранул (в случае сверхпроводников $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ со средним радиусом пластинчатых гранул в ab плоскости).
3. В рамках модели предложен способ описания аномального увеличения модуля намагниченности (пик-эффект) на полевых зависимостях намагниченности, как перехода между состояниями с различными значениями критического тока.
4. Применение разработанной модели показало, что магнитные свойства поликристаллических сверхпроводников $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ определяются циркуляцией токов в ab плоскостях гранул. Зависимости J_c от температуры соответствуют теории коллективного закрепления вихрей Абрикосова на слабых центрах пиннинга. Значительная пористость образцов не влияет на внутригранульную плотность критического тока в сверхпроводнике $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ с пористостью 62 % и в плотном из нанонитей $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ с пористостью 99.3 %. Различия в величине диамагнитного сигнала образцов вызваны различием среднего размера гранул в ab плоскости. Параметр анизотропии текстурированного $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, определяемый из намагниченности при различной ориентации образца, равен 2.5, что намного меньше, чем анизотропия кристаллов Bi-2223. Причиной слабой наблюдаемой анизотропии является неидеальное упорядочение гранул в полученном текстурированном образце.

5. С помощью разработанной модели получено описание петель гистерезиса намагниченности поликристаллических сверхпроводников $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с частичным замещением Y на Nd. Температурные зависимости особенностей петель гистерезиса при аномальном увеличении модуля намагниченности (пик-эффект) согласуются с теорией Кошелева-Винокура, рассматривающей увеличение критического тока при переходе решетки вихрей Абрикосова из упорядоченного в неупорядоченное состояние. При увеличении содержания Nd, замещающего иттрий в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, положение вторичного пика на петлях сдвигается в область меньших магнитных полей.

6. Использование разработанной модели позволило учесть различия в величине R образцов и провести сравнение плотности внутригранульного критического тока в поликристаллических сверхпроводниках MgB_2 с добавлением наночастиц Co (с размером менее 20 нм) и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с добавлением наночастиц CuO (с средним размером 13 нм). Максимальное увеличение плотности внутригранульного критического тока по сравнению с реперным образцом MgB_2 наблюдалось в композите $\text{MgB}_2 + \text{Co}$ с массовой долей наночастиц Co 10 %. В этом композите значение J_c увеличивается в 1.3 раза при $T = 10$ К и в 2.4 раза при $T = 30$ К. В композите $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + \text{CuO}$ при $T = 4.2$ К максимальное увеличение J_c в 1.1 раза по сравнению с реперным образцом $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ наблюдалось при объемной доле наночастиц CuO 1% и 20 %.

7. Вычисления по разработанной модели позволили установить особенности намагничивания монокристалла $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$. При $T = 2$ К и нулевом магнитном поле объемная доля сверхпроводящей фазы в образце составляет лишь 10 %. Увеличение внешнего магнитного поля приводит к росту объемной доли сверхпроводящей фазы, что наблюдается как пик-эффект на петлях гистерезиса намагниченности. Циркуляционный радиус, определенный по расширенной модели критического состояния, согласуется с размером сверхпроводящих областей. Температурная и магнитополевая эволюция пик-эффекта объясняется в рамках подхода Горбачевича – Токатлы, рассматривающего электронное фазовое расслоение в сверхпроводнике $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором, либо при его непосредственном участии. Автор ставил цели и задачи, проводил анализ экспериментальных данных, выполнял численные расчеты, предлагал физическую интерпретацию полученных результатов и участвовал в обсуждении результатов с соавторами работ. Разработка модели для описания петель гистерезиса намагниченности

неоднородных сверхпроводников выполнена автором при сотрудничестве с д.ф.-м.н. профессором В.В. Вальковым. Программное обеспечение для обработки экспериментальных данных и метод оценки циркуляционного радиуса созданы автором.

Достоверность результатов

Достоверность данных, полученных в представленной диссертации, обеспечена применением стандартных методик 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.

Научная новизна результатов

1. Разработана модель, позволяющая описывать асимметричные петли гистерезиса намагниченности сверхпроводников и проводить сравнение различных сверхпроводящих материалов. Введен параметр, глубина равновесно намагниченного приповерхностного слоя, связанный с равновесной намагниченностью образца. Отношение глубины равновесно намагниченного приповерхностного слоя к циркуляционному радиусу определяет асимметрию петли гистерезиса намагниченности относительно оси H .
2. Разработан оригинальный метод для оценки циркуляционного радиуса неоднородных сверхпроводников. Применение метода рекомендуется для анализа магнитных свойств различных сверхпроводников и сравнения их плотности критического тока.
3. Впервые исследованы магнитные свойства пористого сверхпроводника $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, полотна из нанонитей $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ и текстурированного сверхпроводника, полученного из пористого $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$. Обнаружено, что критический ток образцов соответствует теории коллективного закрепления вихрей Абрикосова на слабых центрах пиннинга.
4. Петли гистерезиса намагниченности с аномальным увеличением модуля намагниченности (пик-эффект) поликристаллических сверхпроводников $\text{Y}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и монокристаллического сверхпроводника $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$ впервые были рассчитаны с использованием функции Больцмана, описывающей изменение состояния двухуровневой системы.
5. Впервые исследовано влияние замещения Y на Nd на особенности петли гистерезиса и пик-эффект в сверхпроводнике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Обнаружено, что увеличение содержания

Nd в $Y_{1-x}Nd_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ приводит к уменьшению магнитного поля, при котором происходит пик-эффект.

6. Исследовано влияние поверхностного декорирования сверхпроводящих гранул магнитными наночастицами на внутригранульный критический ток в поликристаллических MgB_2 и $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Максимальное увеличение плотности внутригранульного критического тока сверхпроводниках обнаружено при добавлении 1 или 10 % массовых долей наночастиц Co (с размером менее 20 нм) в MgB_2 и 1 и 19 % массовых долей наночастиц CuO (с средним размером 13 нм) в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Практическая значимость

Разработана модель, описывающая асимметричные петли гистерезиса намагниченности сверхпроводников. Разработан метод для определения радиуса циркуляции экранирующих токов. Написана программа для анализа магнитных характеристик.

Проведены исследования высокопористых сверхпроводников. Пористая структура обеспечивает 1) уменьшенное время синтеза, благодаря быстрому насыщению кислородом всего объема образца; 2) эффективное охлаждение, благодаря проникновению хладагента в поры; 3) уменьшенный вес и уменьшенное количество химических прекурсоров на единицу объема сверхпроводника; 4) возможность формировать структуры различного размера и формы (масштабируемость). Высокопористые ВТСП также являются промежуточным элементом для получения текстурированных материалов. Благодаря малым значениям плотности, исследованные материалы могут использоваться в спутниковых системах, например, в системах стыковки космических аппаратов, системах сбора космического мусора, системах микрометеоритной защиты.

Предложены способы изменения интервала магнитных полей, в котором происходит увеличение плотности критического тока (пик-эффект).

Установлено, что внедрение наночастиц в межгранульное пространство сверхпроводников MgB_2 и $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ приводит к увеличению плотности внутригранульного критического тока по сравнению с реперными образцами.

Показано, что при температуре ниже 10 К плотность критического тока в гранулах исследованных материалов достигает до 10 % от теоретического предела для плотности тока (плотность тока распаривания). Таким образом, остаются возможности для дальнейшего увеличения плотности внутригранульного критического тока.

Апробация работы

Результаты, включённые в диссертацию, были представлены и обсуждались на международных конференциях «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (Звенигород, 2004 г.; 2006 г.; 2011 г.), международном симпозиуме «Novel materials with electronic correlations, strong coupling and different dimensionalities» (Дрезден, Германия, 2004 г.), международных конференциях «Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors» (Дрезден, 2006 г.; Токио 2009 г.), симпозиуме «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Лео, 2007 г.), симпозиуме «Нанопизика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2010 г.), Байкальской конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» (Иркутск, 2012 г.), International workshop on processing and applications of superconducting (RE)BCO large grain materials (Льеж, Бельгия, 2015 г.), Европейско-азиатском симпозиуме «Trends in Magnetism» (Красноярск, 2016 г.), Московском международном симпозиуме по магнетизму (Москва, 2017 г.) International Conference on Strongly Correlated Electron Systems «SCEC» (Прага, 2017 г.), Всероссийском семинаре «Моделирование неравновесных систем» (Красноярск, 2017 г.). В целом работа докладывалась на научных семинарах лаборатории сильных магнитных полей, отдела физики магнитных явлений и физическом семинаре Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск, 2019 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых системами цитирования Web of Science и Scopus, и 1 глава в монографии. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Результаты диссертации опубликованы соискателем в следующих работах:

1. Petrov M.I., Balaev D.A., Shaihutdinov K.A., Gokhfeld D.M., Popkov S.I., Satzuk S.A. Magnetic properties of a low-density Bi-based HTSC // Phys. Met. Metallogr. – 2006. – Vol. 101. – Suppl. 1. – P. S29-S32.
2. 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.
3. Петров М.И., Балаев Д.А., Белозерова И.Л., Васильев А.Д., Гохфельд Д.М., Мартыанов О.М., Попков С.И., Шайхутдинов К.А. Получение методом одноосного прессования в жидкой среде и физические свойства висмутовой ВТСП керамики с высокой степенью текстуры // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33. – № 17. – С. 52-60.

4. Gokhfeld D.M., Balaev D.A., Popkov S.I., Shaykhutdinov K.A., Petrov M.I. Asymmetry of magnetization curves of textured BSCCO // *Physica C*. – 2010. – Vol. 470. – Suppl. 1. – P. S870-S872.
5. 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).
6. Altin S., Gokhfeld D.M. Magnetization loops and pinning force of Bi-2212 single crystal whiskers // *Physica C*. – 2011. – Vol. 471. – P. 217-221.
7. 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.
8. 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.
9. Yakinci Z.D., Gokhfeld D.M., Altin E., Kurt F., Altin S., Demirel S., Aksan M.A., Yakinci M.E. J_c enhancement and flux pinning of Se substituted YBCO compound // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2013. – Vol. 24. – No. 12. – P. 4790-4797.
10. Altin E., Gokhfeld D.M., Kurt F., Yakinci M.E. Physical, electrical, transport and magnetic properties of $\text{Nd}(\text{Ba},\text{Nd})_{2.1}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ system // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2013. – Vol. 24. – No. 12. – P. 5075-5084.
11. Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И., Шайхутдинов К.А., Клинкова 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.
12. Altin E., Gokhfeld D.M., Demirel S., Oz E., Kurt F., Altin S., Yakinci M.E. Vortex pinning and magnetic peak effect in $\text{Eu}(\text{Eu},\text{Ba})_{2.125}\text{Cu}_3\text{O}_x$ // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2014. – Vol. 25. – No. 3. – P. 1466-1473.
13. Гохфельд Д.М. Расширенная модель критического состояния: асимметричные петли намагниченности и полевые зависимости критического тока сверхпроводников // *ФТТ*. – 2014. – Т. 56. – № 12. – С. 2298-2304.
14. Gokhfeld D.M. Critical current density and trapped field in HTS with asymmetric magnetization loops // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2016. – Vol. 695. – No. 1. – 012008 (5pp).
15. Gokhfeld D.M., Semenov S.V., Balaev D.A., Yakimov I.S., Dubrovskiy A.A., Terentyev K.Yu., Freydmann A.L., Krasikov A.A., Petrov M.I., Establishing of peak effect in YBCO by Nd substitution // *JMMM*. – 2017. – Vol. 440. – 127-128.

16. Gokhfeld D.M., Balaev D.A., Yakimov I.S., Petrov M.I., Semenov S.V., Tuning the peak effect in the $Y_{1-x}Nd_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ compound // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. 43. – No. 13. – P. 9985-9991.
17. Koblishka M.R., Gokhfeld D.M., Chang C., Hauet T., Hartmann U., Pinning force scaling of electrospun Bi-2212 nanowire networks // *Solid State Commun.* – 2017. – Vol. 264. – P. 16-18.
18. 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).
19. Gokhfeld D.M. Magnetization of polycrystalline high- T_c superconductors // *High-temperature superconductors: Occurrence, synthesis and applications.* – Ed. M. Miryala and M.R. Koblishka. – (New York: Nova Science). – 2018. – P. 181-194.
20. 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.
21. Gokhfeld D.M. Analysis of superconductor magnetization hysteresis // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* – 2018. – Vol. 11. – No. 2. – P. 219-221.
22. Lepeshev A.A., Patrin G.S., Yurkin G.Yu., Vasiliev A.D., Nemtsev I.V., Gokhfeld D.M., Balaev A.D., Demin V.G., Bachurina E.P., Karpov I.V., Ushakov A.V., Fedorov L.Yu., Irtyugo L.A., Petrov M.I. Magnetic properties and critical current of superconducting nanocomposites $(1-x)YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + xCuO$ // *J. Supercond. Novel Magn.* – 2018. – Vol. 31. – No. 12. – P. 3841–3845.
23. Bykov A.A., Terent'ev K.Yu., Gokhfeld D.M., Savitskaya N.E., Popkov S.I., Petrov M.I. Superconductivity on interfaces of nonsuperconducting granules La_2CuO_4 and $La_{1.56}Sr_{0.44}CuO_4$ // *J. Supercond. Novel Magn.* – 2018. – V. 31. – No. 12. – P. 3867–3874.
24. Гохфельд Д.М. Циркуляционный радиус и плотность критического тока в сверхпроводниках второго рода // *Письма в ЖТФ.* – 2019. – Т. 45. – № 2. – С. 3-5.
25. Гохфельд Д.М. Анализ магнитных измерений // программа ЭВМ. Свидетельство о гос. рег. № 2018618200 от 10.06.2018.

Диссертация «Магнитный гистерезис и плотность критического тока неоднородных сверхпроводников в сильных магнитных полях» Гохфельда Дениса Михайловича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Заключение принято на заседании отдела физики магнитных явлений.

Присутствовало на заседании 41 чел. Результаты голосования:

«за» – 41 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.,

протокол № 6 от 16 апреля 2019 г.

Председатели семинара:

д.ф.-м.н., профессор

Овчинников Сергей Геннадьевич

д.ф.-м.н., профессор

Исхаков Рауф Садыкович

Секретарь семинара

д.ф.-м.н.

Гавричков Владимир Александрович

