

На правах рукописи

МАКСИМОВА Анастасия Николаевна

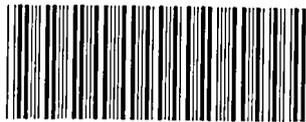
**МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ С
ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

13 АПР 2017

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



006655368

Автор:

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

Москва 2017 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: **Кашурников Владимир Анатольевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры Физики твердого тела
и наносистем НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: **Михеенков Андрей Витальевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
руководитель теоретического отдела
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина РАН

Теленков Максим Павлович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Лаборатории неравновесных и нелинейных
явлений Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт спектроскопии Российской академии наук

Защита состоится «14» июня 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.130.06 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, телефон: 8 (499)324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан

«11» *апреля* 2017 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Руднев И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) являются перспективными материалами для различных электротехнических приложений, поскольку позволяют достигать сверхпроводящее состояние уже при азотных температурах. Одним из важнейших параметров ВТСП является плотность транспортного критического тока j_c . Поведение вихревой решетки, ее взаимодействие с дефектной структурой образца (пиннинг) определяет транспортные свойства, и важной задачей является исследование влияния природы дефектов на плотность критического тока и поиск способов повышения их эффективности как центров пиннинга.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям [1, 2], эффективными являются дефекты, полученные в результате облучения образца нейтронами или высокоэнергетичными ионами, дислокации и другие дефекты кристаллической решетки, границы зерен, включения наночастиц различных веществ. Предполагается, в частности [2-4], что ферромагнитные включения способны повысить величину критического тока, поскольку к обычной, немагнитной части взаимодействия с дефектом (притяжение сердцевин вихря к области нормальной фазы), добавляется энергия взаимодействия магнитного момента примеси с полем вихря.

Существенный интерес представляют гибридные структуры ферромагнетик-сверхпроводник – F/S (тонкие пленки с массивом магнитных точек различной формы, двойные и более F/S слои). В экспериментах измеряются вольт-амперные характеристики (ВАХ) таких структур, исследуется эффект близости [3, 4]. Проводятся и численные исследования динамики вихрей [5]. Отметим, что необходимо учитывать самосогласованное взаимодействие намагниченности магнитных наночастиц

с вихревой решеткой. Также представляют интерес ферромагнитные включения произвольной формы и размера.

Слоистый ВТСП в смешанном состоянии является сложной системой, что затрудняет аналитическое описание вихревой системы при произвольном распределении дефектов и изменении внешних параметров. Поэтому особый интерес приобретают методы численного моделирования вихревых состояний в ВТСП.

Целью работы является расчет намагниченности, ВАХ и критического тока ВТСП с ферромагнитными наночастицами в качестве центров пиннинга методом Монте-Карло, исследование влияния на вихревую решетку протяженных ферромагнитных и немагнитных дефектов, изучение нелинейного взаимодействия в гибридных структурах ферромагнетик-сверхпроводник, а также исследование влияния анизотропии и различных конфигураций протяженных дефектов на критический ток.

В процессе проведенных исследований решены следующие задачи:

1. Разработан метод, позволяющий с помощью алгоритма Монте-Карло моделировать сверхпроводник и ансамбль ферромагнитных частиц как самосогласованную систему. Проведены расчеты магнитных и транспортных характеристик ВТСП с ферромагнитными дефектами в широком диапазоне значений полей, температур, с учетом границы и произвольных конфигураций магнитных дефектов.
2. Проведены расчеты необратимой кривой намагничивания сверхпроводника, находящегося на магнитной подложке. Исследовано влияние намагниченности подложки на форму кривой намагничивания сверхпроводника.
3. Изучено влияние перемагничивания ферромагнитных дефектов внутри высокотемпературного сверхпроводника на его транспортные свойства.

4. Рассмотрено влияние цилиндрических ферромагнитных дефектов произвольного радиуса на магнитные и транспортные характеристики ВТСП, исследовано влияние радиуса дефектов на критический ток.
5. Изучено влияние анизотропии и типа дефектов на плотность критического тока j_c слоистого анизотропного ВТСП конечных размеров с учетом граничных условий. Проанализировано совместное влияние анизотропии и угла наклона дефектов к сверхпроводящим плоскостям на j_c .

Научная новизна работы:

1. Развиг метод, позволяющий с помощью процедуры Монте-Карло рассчитывать намагниченность, транспортные свойства и конфигурации вихрей сверхпроводника с ферромагнитными дефектами при произвольном соотношении между параметрами петель перемангничивания сверхпроводника и ферромагнетика.
2. Численно исследованы особенности перемангничивания ферромагнитных наночастиц, находящихся внутри сверхпроводника. Показано изменение характера перемангничивания с обратимого на необратимый для частиц, оси легкого намагничивания которых перпендикулярны внешнему полю. Показана возможность повышения критического тока с помощью ферромагнитных примесей, как одиночных, так и образующих кластеры.
3. Исследовано перемангничивание образца ВТСП на магнитной подложке. Продемонстрировано нелинейное взаимодействие ферромагнетика и сверхпроводника и появление «парамагнитной фазы» при сильном влиянии подложки.
4. Получена S-образная особенность ВАХ в присутствии внешнего магнитного поля H и распределенных в объеме сверхпроводника ферромагнитных частиц. Построена фазовая (H, T) -диаграмма существования нелинейности ВАХ, сопровождающейся движением

магнитного домена и фронта аннигиляции вихрей от центра к краю образца (T – температура).

5. Получены немонотонные (имеющие один или два максимума) зависимости критического тока от радиуса цилиндрического ферромагнитного дефекта при фиксированной объемной концентрации магнетика, что не наблюдается для образцов с немагнитными примесями. Показано, что наличие максимумов связано с оптимальным соотношением концентрации и глубины ямы дефекта, формирующим суммарный профиль потенциала для вихря.
6. Рассчитан критический ток в зависимости от угла наклона столбчатых дефектов относительно сверхпроводящих плоскостей в ВТСП. Показано, что с ростом величины анизотропии γ критический ток перестает зависеть от наклона дефекта.

Научная и практическая ценность. Разработанная методика позволяет рассчитывать намагниченность, распределения магнитного потока и вихревой плотности образцов ВТСП с ферромагнитными примесями при произвольной концентрации и намагниченности ферромагнитных частиц. Результаты расчетов могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных по перемагничиванию сверхпроводников с магнитными наночастицами в качестве центров пиннинга, систем ферромагнетик-сверхпроводник и сверхпроводящих пленок с массивом магнитных точек, а также для оценки транспортных свойств реальных ВТСП-лент с заданным типом центров пиннинга и при планировании новых экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета магнитных и транспортных характеристик образцов с ферромагнитными дефектами с учетом самосогласованного взаимодействия магнитных моментов примесных наночастиц с вихревой системой.

2. Результаты анализа влияния сверхпроводника на намагниченность ансамбля распределенных в его объеме ферромагнитных наночастиц с различной ориентацией осей легкого намагничивания, показывающие изменение характера перемагничивания примесей с обратимого на необратимый в случае, если оси легкого намагничивания перпендикулярны внешнему полю.
3. Вольт-амперные характеристики сверхпроводника с ферромагнитными дефектами в модели, когда сверхпроводник и частицы ферромагнетика представляют самосогласованную систему, S-образная особенность ВАХ во внешнем магнитном поле и фазовая (H, T) – диаграмма области существования нелинейности. Формирование магнитного домена и связанного с ним движения фронта аннигиляции вихрей.
4. Результаты расчетов намагниченности сверхпроводника на магнитной подложке (гибридной системы сверхпроводник-ферромагнетик), показывающие нелинейное взаимодействие ферромагнетика и сверхпроводника и появление «парамагнитной фазы» при сильном влиянии подложки.
5. Результаты расчетов намагниченности и критического тока сверхпроводников с протяженными цилиндрическими ферромагнитными дефектами, показывающие асимметрию петли перемагничивания и немонотонность зависимости j_c от радиуса дефектов при фиксированной концентрации магнетика.
6. Результаты анализа влияния анизотропии ВТСП на критический ток объемных образцов ВТСП с наклонными немагнитными дефектами. Зависимость j_c от угла наклона дефекта к оси анизотропии при изменении величины γ .

Достоверность научных результатов и выводов. Исследования проводились методом стохастического математического моделирования (методом Монте-Карло), в рамках модели Лоренса-Донника, аналога модели

Гинзбурга-Ландау для слоистого сверхпроводника второго рода. Для решения поставленных задач были развиты алгоритмы с учетом особенностей взаимодействия вихревой нити с ферромагнитным включением и процессов перемagnичивания ансамблей ферромагнитных частиц. Достоверность полученных результатов подтверждается тестовыми расчетами: петли перемagnичивания и вольт-амперные характеристики ВТСИ с немагнитными дефектами; кривые намагничивания сверхпроводника с ферромагнитными включениями, имеющими постоянный магнитный момент, и композитов сверхпроводник-магнитная подложка; вихревые конфигурации, полученные данным методом, качественно совпадают с экспериментальными данными. Кроме того, результаты тестовых расчетов соответствуют численным данным в случае немагнитных дефектов [6-8].

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя состоял в обобщении модели вихревой решетки в слоистом ВТСИ с магнитными наночастицами, самосогласованно взаимодействующей с ансамблем наноразмерных ферромагнитных центров пиннинга, и расчете петель перемagnичивания, вольт-амперных характеристик и критического тока. Разработка, тестирование и отладка расчетных программ и обработка результатов выполнены соискателем лично.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 111 наименований. Общий объем работы составляет 117 страниц, включая 54 иллюстрации.

Апробация работы. Основные результаты работы прошли апробацию на следующих международных и российских конференциях: XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (Звенигород, 2012); 11-я и 12-я Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (EUCAS2013, Генуя, Италия 2013 и EUCAS2015 Лион, Франция 2015); 4-й Семинар по численному моделированию высокотемпературных сверхпроводников (Братислава, Словакия 2014); 4-я, 5-я и 6-я

Международная конференция по математическому моделированию в физических науках (Мадрид, Испания 2014, Миконос, Греция 2015, Афины, Греция 2016); 27-й Международный симпозиум по сверхпроводимости (Токио, Япония 2014); VI Евразийский симпозиум «Тенденции в магнетизме» (Красноярск, 2016); 9-я, 10-я и 11-я Курчатовская молодежная научная школа (Москва, 2011-2013); Научные сессии НИЯУ МИФИ 2011-2015, II и III Международная конференция «Плазменные лазерные, исследования и технологии» (НИЯУ МИФИ 2016, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ в журналах из списка ВАК, 13 из которых индексируются в базах данных Web of Science и SCOPUS.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации и использованных расчетных методик, сформулированы цели и задачи работы.

Первая глава содержит детальный литературный обзор. Обсуждаются работы, посвященные экспериментальному наблюдению и численным расчетам магнитных и токонесущих характеристик и вихревых конфигураций в различных гибридных S/F-структурах, и теоретические модели, объясняющие механизм пиннинга в таких системах. Рассмотрены работы, моделирующие вихревые структуры в объемных образцах ВТСП с учетом анизотропии реальных сверхпроводников.

Во второй главе на основе континуального метода Монте-Карло развита методика, позволяющая самосогласованно рассчитывать вихревые конфигурации и намагниченность трехмерных образцов ВТСП с ферромагнитными наночастицами в качестве центров пиннинга. Приведена формулировка модели слоистого ВТСП и детальное описание метода расчета (см. также [6-8]). Для межплоскостного взаимодействия пэнкейков использованы выражения, полученные в работах [9, 10].

Энергия взаимодействия вихря с магнитными примесями (малыми по сравнению с глубиной проникновения магнитного поля λ) может быть представлена в виде суммы магнитной и немагнитной части: $U_p = U_{pm} + U_{pn}$, $U_{pm} = -\mu H_v$, μ - проекция магнитного момента примесной частицы на направление поля вихрей H_v . При расчете выбирается $\mu \sim 10^3 - 10^4 \mu_b$ (μ_b - магнетон Бора), что близко к реальным экспериментальным данным для магнитных наночастиц. Магнитная подложка вводится в расчет в виде совокупности точечных частиц - «примесей», кривая намагниченности которых известна из эксперимента.

Перемагничивание ферромагнитной примеси в расчете реализуется введением в алгоритм Монте-Карло дополнительного подпроцесса - переориентации ее магнитного момента. Энергия U частицы складывается из энергии момента в локальном магнитном поле H и энергии магнитной анизотропии (одноосного кристалла - для простоты) [11]:

$$U = KV \sin^2(\varphi - \theta) - \mu H \cos \varphi,$$

где K - параметр анизотропии, φ и θ - углы между направлением внешнего поля, магнитным моментом μ и осью легкого намагничивания. Возможны 3 случая: $\theta=0$, $\theta=\pi/2$ и случай, когда оси легкого намагничивания ориентированы случайно. В первом случае петля перемагничивания имеет прямоугольную форму, во втором процесс перемагничивания является строго обратимым, что воспроизводится расчетом Монте-Карло.

Кластер дефектов вводится в расчет в виде группы (размером порядка λ) нескольких отдельных частиц ферромагнетика размером порядка радиуса кора вихря каждая. В таком случае между магнитными моментами частиц в составе протяженной примеси возможно взаимодействие.

В качестве центров пиннинга были рассмотрены включения в виде ферромагнитных цилиндров произвольного радиуса R и намагниченности M . Энергия взаимодействия вихря с дефектом имеет вид:

$$U = -d \frac{\Phi_0 M}{\frac{2\lambda}{R} K_1\left(\frac{R}{\lambda}\right) + K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)} K_0\left(\frac{r}{\lambda}\right)$$

При $R \ll \lambda$ данное выражение переходит в выражение для энергии точечного диполя в поле вихря. d – расстояние между сверхпроводящими слоями.

Выбранные параметры моделирования соответствуют типичным характеристикам $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-\delta}$: $\lambda(0)=1800 \text{ \AA}$, $\xi(0)=20 \text{ \AA}$, $T_c=84 \text{ К}$ с используемой зависимостью $\lambda(T)$: $\lambda(T)=\lambda(0) [1-(T/T_c)^3]^{-1/2}$ [6]. Радиус ферромагнитных цилиндров составляет $0,1\lambda-2\lambda$, намагниченность принята характерной для ферромагнетиков $\sim 10^5 \text{ А/м}$. Принимается, что величина коэрцитивной силы ферромагнетика существенно превышает амплитуду перемагничивающего поля. Ширина ВТСП-пластины выбиралась $\sim 6 \text{ мкм}$ по оси x и $3-5 \text{ мкм}$ по оси y ; размер в направлении оси z определяется числом сверхпроводящих плоскостей $N_L \sim 10$. Размер области выбирался таким образом, чтобы применение периодических граничных условий не привело к существенным ошибкам в расчете взаимодействия вихрей.

В третьей главе представлен анализ транспортных характеристик и процессов перемагничивания в сверхпроводниках с магнитными дефектами.

При расчете кривых намагниченности сверхпроводника исходная полная намагниченность примесей равна нулю и для определенности все магнитные моменты направлены под прямым углом к внешнему полю. Когда магнитные частицы находятся внутри сверхпроводника, среднее поле, действующее на них, равно нулю, пока вихри не проникли в образец, и становится $\sim n\Phi_0$ при конечной двумерной концентрации n вихрей. Для магнитных частиц рассмотрим упоминавшиеся выше 3 случая:

1) $\theta=0$. При небольших полях число частиц с $\varphi=0$ и $\varphi=\pi$ оказывается примерно одинаковым. Переориентация моментов происходит теперь, когда поле в образце $n\Phi_0$ (всегда $n\Phi_0 \leq \mu_0 H$) достигает величины коэрцитивной

силы. То же самое - при смене знака внешнего поля. Таким образом, присутствие сверхпроводника не меняет качественно поведения магнитных частиц. Действительно, расчет показывает уширение петли перемагничивания частиц.

Переориентации магнитных моментов не происходит, если $K > K_c = MH_{\text{max}}$ ($\mu_0 H_{\text{max}} = 100$ мТл – амплитуда перемагничивающего поля). В этом случае вихри не закрепляются на противоположно направленных магнитных моментах, и число эффективных центров пиннинга (n , следовательно, ширина петли) сокращается примерно вдвое.

2) $\theta = \pi/2$. Расчет показывает, что присутствие сверхпроводника делает процесс перемагничивания примесей необратимым. При уменьшении внешнего поля от максимального значения до нуля вихри остаются закрепленными на дефектах, и магнитный момент примеси, захватившей вихрь, повернут в соответствии с полем в его центре, а не с внешним полем – результат нелинейного взаимодействия сверхпроводника и ферромагнитного ансамбля. Коэрцитивная сила же остается постоянной и равной ≈ 45 мТл. Именно при таком поле начинается проникновение в образец вихрей противоположного знака и их аннигиляция с вихрями, закрепленными на дефектах.

3) При случайной ориентации осей легкого намагничивания также наблюдается уширение петли для системы примесей.

Вытянутые кластеры магнитных дефектов, параллельные направлению входа вихрей в образец, могут существенно увеличить ширину петли. Кроме того, как и при периодической решетке точечных дефектов, могут наблюдаться пики на кривой намагниченности, связанные с подстройкой решетки вихрей под решетку дефектов [7]. Взаимодействие между магнитными моментами в кластере уменьшает ширину петли как системы магнитных частиц, так и всего ВТСП-образца.

Также рассмотрен случай, когда через ВТСП с ферромагнитными дефектами, помещенный во внешнее постоянное магнитное поле, пропускаться транспортный ток. Расчет показывает, что наблюдается S-образная особенность ВАХ (рис. 1а), обусловленная самосогласованным взаимодействием магнитных моментов примесей с вихревой системой. Во внешнем поле пластина заполняется сначала вихрями одного знака, параллельно которым поворачиваются все магнитные моменты (точка 1 на рис. 1а и 2). Проникновение вихрей противоположного с внешним полем знака для $\mu_0 H = 40$ мТл начинается при поле тока $\mu_0 H_j = 85$ мТл, причем они сразу занимают почти половину образца, а их средняя плотность много меньше плотности вихрей, заходящих справа. Поля, создаваемого этими вихрями, недостаточно для перемагничивания примесей, вихри беспрепятственно проходят в образец, и напряженность растет. Когда начинается переориентация магнитных моментов, вихри захватываются дефектами, и напряженность падает. В соответствии с этим область аннигиляции смещается из центра образца к левой границе при $\mu_0 H_j = 85$ мТл, далее снова к центру (точки 3-6). При немагнитных дефектах область аннигиляции с ростом тока перемещается монотонно к середине пластины. При уменьшении тока ВАХ особенностей не имеет, поэтому наблюдается гистерезис.

При повышении температуры T нелинейный участок смещается влево (в сторону меньшего напряжения), одновременно выпрямляясь, до почти полного исчезновения. Данные при различных T и H суммированы на рис. 1б, где показана область значений T и H (ограниченная для наглядности штриховой линией), при которых наблюдается S-образная особенность. Граничное значение температуры соответствует случаю, когда kT становится сравнимой с величиной энергии магнитной анизотропии, т.е. существенную роль начинают играть тепловые флуктуации магнитных моментов. Имеем

$KV \sim kT$ (V - объем примеси), откуда при выбранном значении параметра анизотропии $T \approx 6K$.

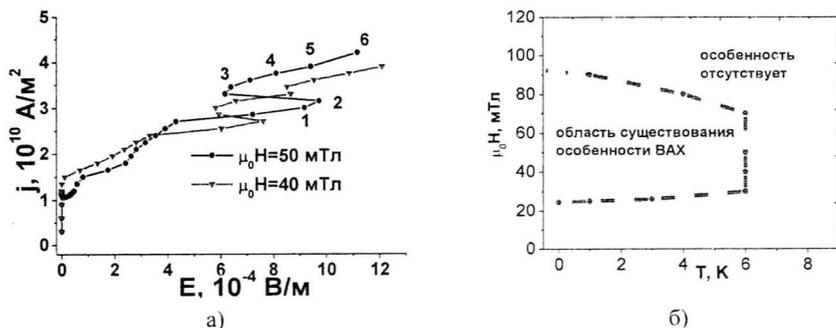


Рис. 1. а) Вольт-амперные характеристики образцов с магнитными дефектами при различной величине внешнего магнитного поля. б) H - T диаграмма существования нестабильности ВАХ (для концентрации магнитных частиц $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$)

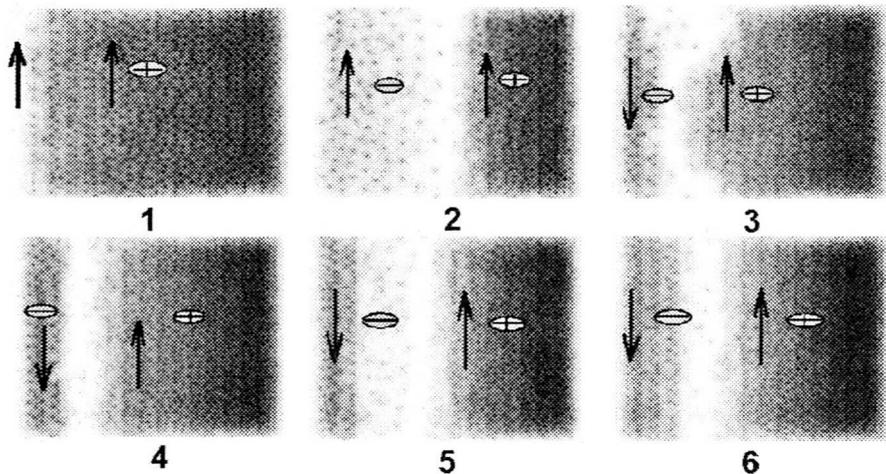


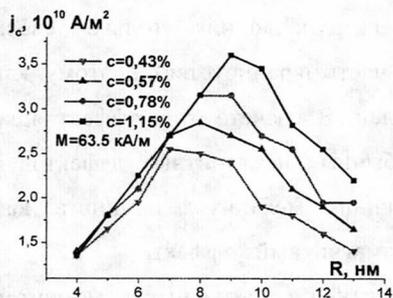
Рис. 2. Конфигурации вихрей, возникающие вблизи особенности ВАХ. Точки 2 и 3 соответствуют падению напряжения при росте тока (рис. 1а).

Знак «+» и стрелка вверх соответствует намагниченности вихрей и дефектов, сонаправленной с внешним постоянным магнитным полем, «-» и стрелка вниз – противоположно направленной.

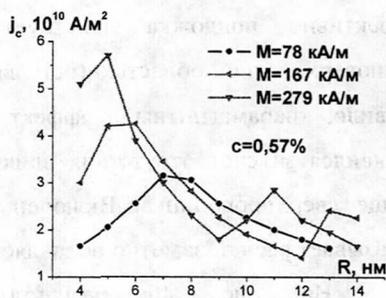
Образец, имеющий падающий участок (участок с отрицательной дифференциальной проводимостью) на ВАХ, может использоваться как

активный элемент в цепи генератора электромагнитных колебаний. Также в области неустойчивости происходит расслоение образца на участки (домены) с различным током или электрическим полем (такие эффекты характерны для полупроводников с S – и N – образными ВАХ).

Петли перемагничивания ВТСП с цилиндрическими магнитными дефектами демонстрируют почти нулевую остаточную намагниченность при поле, противоположном магнитному моменту примеси. Данное свойство типично для ферромагнитных дефектов и связано с отталкиванием вихря от магнитного момента противоположного знака. Зависимости j_c от радиуса R цилиндров при фиксированной объемной концентрации ферромагнетика (так что $N \cdot \pi R^2 = const$, N – число дефектов, рис. 3) имеют максимум (2 максимума при $M > 1,6 \cdot 10^5$ А/м) при определенном размере дефекта. Высота и положение максимума определяются характеристиками дефектов – их концентрацией и намагниченностью. Данные максимумы обусловлены подстройкой решетки вихрей под решетку дефектов. Первый максимум появляется, когда на всех дефектах закреплено по одному вихрю, второй – когда на каждом из дефектов оказывается возможным закрепление двух вихрей.



а)



б)

Рис. 3. Серии зависимостей критического тока от радиуса дефектов при различной концентрации (а) и намагниченности ферромагнетика (б).

В конце главы приводятся основные выводы: установлена смена характера перемагничивания ансамбля магнитных частиц внутри сверхпроводника и изменение пиннингующей способности массива частиц в зависимости от магнитной анизотропии, получена S-образная особенность ВАХ во внешнем магнитном поле и немонотонная зависимость критического тока от радиуса цилиндрических ферромагнитных дефектов.

В четвертой главе представлены результаты расчетов намагниченности сверхпроводников на магнитной подложке при различной величине ее намагниченности и при разной температуре.

На рис. 4 представлена кривая намагниченности сверхпроводника. Видно, что она заходит в парамагнитную область (см. правую нижнюю четверть рисунка). Это можно объяснить тем, что с увеличением намагниченности насыщения подложки возрастает эффективность создаваемых ею магнитных «примесей», усиливается пиннинг вихрей, и их количество возрастает по сравнению с равновесной концентрацией в сверхпроводнике без подложки. Расчет показывает, что суммарная энергия взаимодействия магнитных «примесей» образует достаточно глубокую потенциальную яму с практически плоским дном. В эксперименте такой случай можно реализовать при достаточно толстой подложке. Но на практике эффективно подложка действует на сверхпроводник только своей приповерхностной областью (остальная ее часть экранируется), поэтому, как правило, «парамагнитный» эффект ослаблен. В расчете этот эффект ярко проявился за счет отсутствия влияния обычных немагнитных дефектов в толще сверхпроводника. Включение обычного механизма пиннинга, как показывает расчет, заметно подавляет «парамагнитный» эффект.

На рис. 4б результат сложения магнитных моментов сверхпроводника и ферромагнетика (рис. 4а) наложен на расчетные кривые перемагничивания (как для суммарной системы, так и только для сверхпроводника). Видно, что кривые не совпадают, особенно в области

насыщения ферромагнетика. Таким образом, наблюдается нелинейное взаимодействие ферромагнетика и сверхпроводника.

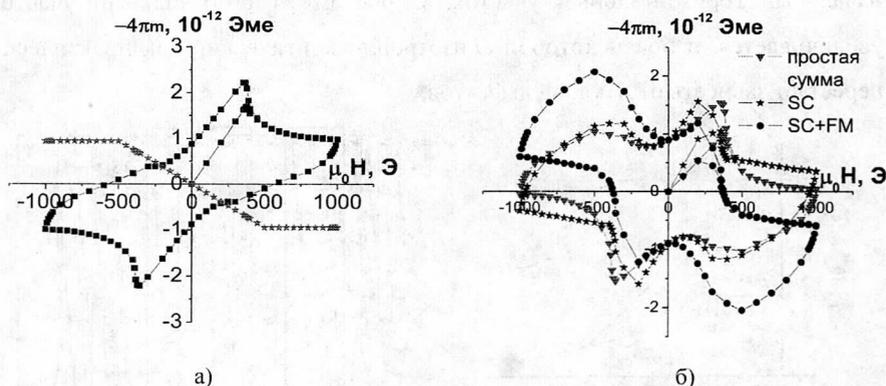


Рис. 4. а) кривая перемагничивания подложки, использованная в расчете (концентрация частиц $c=0,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, магнитный момент частиц $1440 \mu_b$), и петля намагничивания сверхпроводника с дефектами (концентрация $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$) в отсутствие подложки.

б) сравнение результатов точного расчета системы с петлями намагниченности, полученной непосредственным сложением кривых а). Магнитный момент сверхпроводника вместе с примесями $\sim 10^{-12} \text{Эме}$ есть результат прямого расчета: $-4\pi m = (B - H)V - N \cdot \mu_1 \cdot 4\pi$, где V - объем образца, N - количество примесей, μ_1 - магнитный момент отдельной частицы

Основные выводы главы: обнаружено нелинейное взаимодействие ферромагнетика и ВТСП и «парамагнитный» эффект при перемагничивании системы сверхпроводник-магнитная подложка. Результаты расчета качественно согласуются с экспериментом.

В пятой главе представлены результаты расчетов перемагничивания ВТСП в рамках трехмерной слоистой модели. Была исследована возможность повышения критического тока введением дефектов, наклонных по отношению к оси анизотропии ВТСП на некоторый угол ϕ (направление наклона дефектов совпадает с направлением входа вихрей в образец). На рис. 5 показаны результаты расчета.

Легко видеть, что при низких γ (< 10) величина критического тока резко падает с ростом угла наклона, причем при $\gamma \sim 7$ и выше наблюдается начальный горизонтальный участок. С ростом γ горизонтальный участок увеличивается, и при некоторой анизотропии критический ток практически перестает зависеть от наклона дефектов.

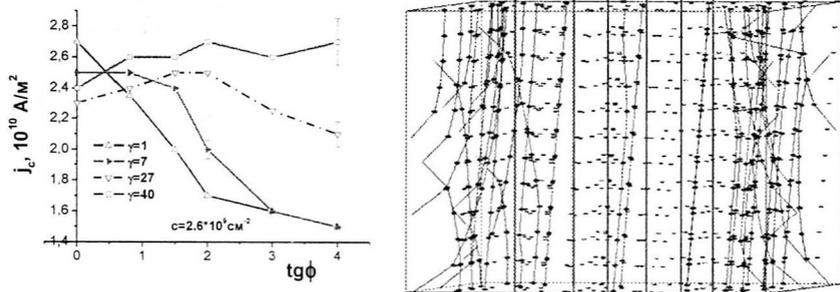


Рис. 5. Зависимости критического тока от наклона дефектов и вихревые нити, закрепленные на наклонных дефектах (обведены прямоугольниками). Черными точками показаны точечные дефекты.

При тепловых отклонениях пэнкейка от оси вихря добавка к энергии, связанная с межслоевым взаимодействием, для бездефектного образца составляет $\sim kT$. Для рассмотренных значений температуры такие отклонения оказываются равными $x_{\max} \sim 0.01 \gamma d$. При наличии дефектов появляется дополнительная добавка к энергии, обусловленная пиннингом вихря на дефекте. Тогда оценки дают $x_{\max} \sim 0.2 \gamma d$. Как показывают расчеты, приблизительно при таком расстоянии между точечными дефектами, составляющими наклонный и расположенными в соседних слоях, начинается уменьшение критического тока (рис. 5).

Таким образом, в данной главе изучено влияние наклона столбчатых дефектов на критический ток, показано, что с ростом анизотропии j_c перестает зависеть от наклона дефектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан метод, позволяющий с помощью алгоритма Монте-Карло исследовать процессы перемагничивания в высокотемпературных сверхпроводниках с ферромагнитными наночастицами в качестве центров пиннинга, рассчитывать намагниченность и критический ток сверхпроводника, при этом магнитные моменты частиц и вихревая решетка рассматриваются как самосогласованная система.
2. Исследовано влияние сверхпроводника на процесс перемагничивания ансамбля ферромагнитных частиц при различной ориентации их осей легкого намагничивания. Установлена смена характера перемагничивания с обратимого на необратимый в случае, когда оси легкого намагничивания перпендикулярны внешнему полю. Найдено, что существует критическое значение параметра магнитной анизотропии K , при котором пиннигующая способность массива дефектов снижается примерно вдвое, и магнитные примеси могут оказаться менее эффективными для повышения критического тока, чем немагнитные. Это происходит, если амплитуды внешнего поля недостаточно для ориентации всех магнитных моментов вдоль поля, т.е. параметр $K > K_c = MH_{max}$, где H_{max} – максимальное поле, созданное вихрями, вошедшими в образец, если оси легкого намагничивания примесей параллельны внешнему полю.
3. Исследование влияния кластеров магнитных дефектов на петлю перемагничивания показало, что наиболее существенно размер кластера влияет на намагниченность в случае, когда протяженные дефекты вытянуты и перпендикулярны направлению входа вихрей в образец. Взаимодействие магнитных моментов в кластере снижает эффективность кластера как центра пиннинга.
4. Для композитов сверхпроводник - магнитная подложка продемонстрировано появление «парамагнитной» фазы и нелинейное

взаимодействие ферромагнетика и сверхпроводника. Качественное совпадение результатов расчета с данными эксперимента подтверждает возможность применения развитого метода для оценки свойств реальных ВТСП-лент.

5. Получена S-образная особенность ВАХ сверхпроводника во внешнем магнитном поле H с ферромагнитными дефектами. Установлено, что особенность обусловлена самосогласованным взаимодействием магнитных моментов примесных частиц с вихревой системой. Найдена область существования особенности на плоскости (T, H) – фазовая диаграмма эффекта (T – температура). Установлено движение волны перемагничивания магнитных дефектов и движение фронта аннигиляции вихрей от центра пластины к краю, несмотря на рост транспортного тока.
6. Для цилиндрических магнитных дефектов получены немонотонные (имеющие один или два максимума) зависимости критического тока от радиуса дефекта при фиксированной объемной концентрации ферромагнетика. Найдено, что наличие максимумов обусловлено подстройкой решетки вихрей под решетку дефектов. Петли перемагничивания являются асимметричными, что может быть использовано для создания логических элементов.
7. Для наклонных дефектов получены убывающие зависимости критического тока от угла наклона дефектов по отношению к сверхпроводящим плоскостям. Показано, что с ростом анизотропии γ зависимость ослабевает и при достижении $\gamma \sim 10$ исчезает.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, А.П. Сотникова, Нелинейное взаимодействие ферромагнетика и высокотемпературного сверхпроводника // ЖЭТФ - 2013 - Т.143, в.3 - С.546-556

2. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, Процессы перемагничивания в слоистых ВТСП с ферромагнетными примесями // ФТТ - 2014 - Т. 56, В.5 - С. 861-877
3. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova and I.A. Rudnev, Ferromagnetic nanoparticles as efficient bulk pinning centers in HTSC // Journal of physics: Conference series - 2014 – Vol. 507 – P. 022017, 1-4
4. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, Нелинейные эффекты при перемагничивании слоистых ВТСП с ферромагнитными примесями под действием тока и внешнего магнитного поля // Письма в ЖЭТФ – 2014 – Vol. 100 (7) – P. 494-500
5. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, Влияние ферромагнитных примесей на процессы перемагничивания в слоистых сверхпроводниках второго рода // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ – 2014 – Т.3, №2 – С. 158-166
6. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova and I.A. Rudnev, The peculiarities of magnetization processes in layered high- temperature superconductors with ferromagnetic defects under applying of transport current and external magnetic field // Journal of Physics: Conference Series – 2015 – Vol. 574 – P. 012129, 1-4
7. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, D.S. Odintsov, The Formation of magnetic flux domain in the type II superconductors with ferromagnetic defects // Physics Procedia – 2015 – Vol. 65 – P. 97-100
8. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, Magnetization of layered high-temperature superconductors with extended ferromagnetic defects // Physics Procedia – 2015 – Vol. 71 - P. 384-388
9. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, Д.С. Одинцов, Домен магнитного потока в сверхпроводниках с ферромагнитными центрами пиннинга // ФТТ – 2015 – Т. 57, В. 9 - С.1685-1689

10. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova and I.A. Rudnev, Magnetization of layered superconductors with ferromagnetic nanorods // Journal of Physics: Conference Series – 2015 – Vol. 633 – P. 012108, 1-4
11. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, Д.С. Одинцов, Намагниченность и транспортные характеристики слоистых ВТСП с различным параметром анизотропии // ФТТ – 2016 – Т. 58, В. 8 - С.1457-1464
12. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, D.S. Odintsov, The critical current density in the layered superconductors with ferromagnetic nanorods // Physica C – 2016 – Vol. 528 – P.17-22
13. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, and D.S. Odintsov, The magnetization processes in layered high-temperature superconductors: the effect of anisotropy // IEEE Transactions on applied superconductivity – 2016 - Vol. 26, No 3 – P. 8200404, 1-4
14. V.A. Kashurnikov, A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, and D.S. Odintsov, Effect of anisotropy on the current-voltage characteristics of layered high-temperature superconductors with internal ferromagnetic defects // Journal of Physics: Conference Series – 2016 – Vol. 738(1) – P. 012074, 1-4

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M.K. Ben Salem, M. A. Almessiere, A. L. Al-Otaibi, M. Ben Salem, F. Ben Azzouz, Effect of SiO₂ nano-particles and nano-wires on microstructure and pinning properties of YBa₂Cu₃O_{7-δ} // Journal of Alloys and Compounds – 2016 – Vol. 657 - P. 286-295
- [2] Alexey Snezhko, Tanya Prozorov and Ruslan Prozorov, Magnetic nanoparticles as efficient bulk pinning centers in type-II superconductors // Phys. Rev. B – 2005 – Vol. 71 – P. 024527, 1-6
- [3] Yurii Proshin, Marat Khusainov, Mansur Khusainov, Proximity effect as a probe of electronic correlations and exchange field in

- ferromagnet/superconductor nanostructures // *Physica C* – 2010 – Vol. 470 – P. 874–876
- [4] E.A. Ilyina, C. Cirillo, C. Attanasio, I–V characteristics and critical currents in superconducting/ferromagnetic bilayers // *Physica C* – 2010 – Vol. 470 – P. 877-879
- [5] E.S. Otabe, S. Komatsu, V.S. Vyatkin, M. Kiuchi, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Numerical estimation of AC loss in superconductors with ripple current // *Physica C* – 2013 – Vol. 494 – P. 173-176
- [6] Igor A. Rudnev, Vladimir A. Kashurnikov, Mariya E. Gracheva, Oksana A. Nikitenko, Phase transitions in a two-dimensional vortex lattice with defects: Monte Carlo simulation // *Physica C* – 2000 – Vol. 332 – P. 383–388
- [7] М.В. Зюбин, И.А. Руднев, В.А. Кашурников, Упорядоченные состояния и структурные переходы в системе вихрей Абрикосова с периодическим пиннингом // *ЖЭТФ* – 2003 – Т. 123, Вып. 6 - С. 1212-1226
- [8] Д.С. Одинцов, И.А. Руднев, В.А. Кашурников, Динамика вихревой системы и энергетические потери в двумерной сверхпроводящей пластине с током // *ЖЭТФ* – 2006 – Т. 130, В. 1 - С. 77-88
- [9] Sandeep Tyagi and Yadin Y. Goldschmidt, Flux melting in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$: Incorporating both electromagnetic and Josephson couplings // *Phys. Rev. B* – 2004 – Vol.70 – P. 024501, 1-14
- [10] Yadin Y. Goldschmidt and Sandeep Tyagi, Interpolation of the Josephson interaction in highly anisotropic superconductors from a solution of the two-dimensional sine-Gordon equation // *Phys. Rev. B* – 2005 – Vol.71 – P. 014503, 1-9
- [11] R. Prozorov, Y. Yeshurun, T. Prozorov and A. Gedanken, Magnetic irreversibility and relaxation in assembly of ferromagnetic nanoparticles // *Phys. Rev. B* – 1999 – Vol. 59 – P. 6956-6965

Подписано в печать 27.03.2017. Формат 60×84 1/16.
Уч.-изд. л. 1,5. Печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 22.

Типография НИЯУ МИФИ
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31.