

На правах рукописи

ОДИНЦОВ Дмитрий Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

01.04 07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор



Москва 2008

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

Научный руководитель: д.ф.-м н., профессор Кашурников Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: д.ф.-м н., с.н.с. Агафонов Александр Иванович, Институт сверхпроводимости и физики твердого тела Российского научного центра "Курчатовский институт"

к ф.-м.н. Кугель Климент Ильич, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

Ведущая организация: Институт спектроскопии РАН

Защита состоится 18 июня 2008г в 15 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130 06 в, Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) по адресу 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, конференц-зал корпуса К, аудитория К-608, тел. (495) 321-95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского инженерно-физического института (государственного университета).

Автореферат разослан «14» мая 2008г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. П. Яковлев

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) II-го рода являются перспективными материалами для использования в электротехнических приложениях, что вызывает постоянный интерес к физике вихревых состояний в ВТСП, которая определяет их транспортные свойства. В вопросах практического применения особый интерес представляют исследования потерь в собственном поле переменного транспортного тока и критического состояния сверхпроводников, при котором образец находится в насыщенном состоянии (вихри заполняют весь объем), а потери из гистерезисных, связанных с пиннингом вихрей на дефектной структуре образца, переходят в потери в насыщенном слое, связанные с течением вихрей и аннигиляцией пар вихрь-антивихрь. Формы кривых намагниченности и значения критического тока ВТСП-образца находятся в сильной зависимости не только от концентрации дефектов, наличия или отсутствия внешнего магнитного поля, но и от дефектной структуры (хаотический пиннинг, периодический, протяженные (колумнарные) дефекты, точечные). Так, хаотический пиннинг точечных дефектов характерен для природных дефектов, структуры с протяженными дефектами — для искусственных дефектов, возникающих в результате химических и радиационных воздействий. Зависимости транспортных характеристик от значений концентраций дефектов позволяют делать заключения о радиационной стойкости сверхпроводящих материалов. Экспериментальные работы указывают на неизбежную деградацию транспортных свойств сверхпроводников при их продолжительном облучении. Также транспортные характеристики ВТСП сильно зависят от анизотропии, связанной с их слоистой структурой. Так, многие теоретические и экспериментальные работы указывают на влияние анизотропии на характер поведения вихревой решетки, на зависимость фазовых диаграмм ВТСП от значения параметра анизотропии, на расположение на ней фазовых состояний.

Высокотемпературный сверхпроводник с дефектами при наличии вихревой структуры представляет собой сложную многочастичную систему с

большим числом степеней свободы, аналитическое рассмотрение которой с изменением внешних параметров существенно затруднено. В связи с этим особое значение приобретают численные методы исследования ВТСП, позволяющие точно учитывать межчастичные взаимодействия при произвольном изменении параметров системы.

Цели диссертационной работы:

- Разработка алгоритма на основе метода Монте-Карло для большого канонического ансамбля, позволяющего проводить расчет намагниченности в собственном поле тока, а также моделировать процессы проникновения, распределения, захвата и течения магнитного потока в широком диапазоне значений транспортного тока, внешних полей и температур с учетом распределения дефектов различного типа и анизотропии ВТСП.
- Расчет потерь, возникающих при перемагничивании собственным полем тока, вольт-амперных характеристик и намагниченности в случае различного типа дефектов. Исследование влияния пиннинга и анизотропной структуры слоистых сверхпроводников второго рода на поведение намагниченности, величину потерь и значения критического тока при пропускании транспортного тока через ВТСП-образец.
- Выяснение и объяснение механизмов, приводящих к деградации транспортных характеристик ВТСП при продолжительном радиационном воздействии.
- Визуализация состояний системы вихрей, соответствующих различным состояниям намагниченности двумерного и объемного образцов

Научная новизна результатов работы:

- Для исследования процессов проникновения, распределения и захвата магнитного потока собственного поля тока в высокотемпера-

турных слоистых сверхпроводниках разработаны новые алгоритмы, позволяющие методом Монте-Карло рассчитывать потери на перемагничивание слоистого сверхпроводника второго рода, распределения вихревой плотности и магнитного потока в слоистом сверхпроводнике второго рода в широком диапазоне значений анизотропии, полей, температур при произвольном распределении дефектов различного типа

- Впервые проведен расчет намагниченности собственным полем тока слоистого сверхпроводника с дефектами. Изучены процессы проникновения и распределения магнитного потока в сверхпроводнике. Показано, что процесс перемагничивания сверхпроводника током сопровождается эффектом движения волны аннигиляции магнитного потока разного знака. Проанализированы особенности распределения вихревой плотности в случае перемагничивания током во внешнем магнитном поле
- Проведен расчет транспортных потерь при перемагничивании сверхпроводника током при разных значениях концентраций дефектов и внешнего магнитного поля. Показаны области действия гистерезисных и динамических механизмов транспортных потерь. Получены вольт-амперные характеристики
- Проведен расчет влияния концентраций дефектов на зависимость критического тока, объяснен механизм подавления критического тока большими концентрациями дефектов.
- Впервые изучено влияние анизотропии на процессы перемагничивания внешним полем объемных образцов ВТСП с разными типами дефектов.

Научная и практическая ценность:

- Разработанная методика расчета позволяет рассчитывать транспортные характеристики слоистых ВТСП во всех точках фазовой диаграммы слоистого ВТСП, т.е. в широком диапазоне значений

полей, температур, анизотропии при заданных произвольных распределениях дефектов различного типа.

- Результаты расчетов потерь, вольт-амперных характеристик, распределений магнитного потока и вихревой плотности могут быть использованы для интерпретации результатов экспериментальных исследований и при планировании новых экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод Монте-Карло расчета транспортных характеристик объемных слоистых ВТСП при различных внешних и внутренних параметрах: транспортном токе, внешнем магнитном поле, анизотропии, температуре, распределении и типе дефектов
- Распределения вихревой плотности и магнитного поля, соответствующие процессу перемагничивания высокотемпературного сверхпроводника током.
- Транспортные потери в высокотемпературном сверхпроводнике в зависимости от концентраций дефектов
- Зависимости критического тока высокотемпературных сверхпроводников от концентрации дефектов
- Кривые намагниченности внешним полем и вольт-амперные характеристики объемного слоистого высокотемпературного сверхпроводника.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на: 34 Сессии по физике низких температур (НТ-34) (26-30 сентября 2006 г., г. Ростов-на-Дону); Международной конференции “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах” (12-15 сентября 2007г., г. Махачкала); Конференции по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению РНЦ “Курчатовский институт” (26-30 ноября 2007г., г. Москва.); Научных

сессиях МИФИ в 2005, 2006, 2007, 2008 годах.

Публикации. По теме публикации опубликовано 13 печатных работ, в том числе в ведущих отечественных журналах

Личный вклад автора. Цели работы и методы исследования были сформулированы руководителем диссертационной работы д.ф.-м.н В. А. Кашурниковым. Личный вклад автора состоял в разработке модели вихревого состояния слоистого ВТСП с током, метода исследования модели и расчете транспортных характеристик слоистых ВТСП. Все вошедшие в диссертацию научные результаты получены автором лично

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем составляет 91 страницу, включая 33 рисунка и библиографию из 68 наименований.

Содержание работы

Первая глава посвящена литературному обзору. Проведен сравнительный анализ в области расчета транспортных характеристик ВТСП, моделирования вихревых систем в ВТСП, рассмотрены их модели и методы моделирования. Рассмотрено влияние анизотропии ВТСП на свойства вихревой системы. Здесь же формулируются основные цели работы.

Вторая глава посвящена описанию модели и методики расчета. Рассматривается трехмерный образец ВТСП, слоистый в плоскости $X - Y$, конечной ширины L_x в направлении X и имеющий бесконечные размеры в направлениях Y и Z , вдоль которых действуют периодические граничные условия, расстояние между сверхпроводящими слоями d . В образце течет ток I вдоль сверхпроводящих плоскостей, создаваемое этим током поле и внешнее постоянное магнитное поле ориентированы перпендикулярно сверхпроводящим плоскостям. Магнитные вихри в объемном образце представляют собой наборы двумерных вихрей (pancake vortices), расположенных в различных плоскостях. В магнитном поле система лэнкеев

рассматривается как система модельных классических частиц. Взаимодействия в трехмерной системе пэнкеев описываются на основе функционала Лоренса–Дониака [1], предполагающего межплоскостные взаимодействия только в пределах одной вихревой нити и только в ближайших плоскостях.

Термодинамический потенциал Гиббса такой системы будет иметь вид:

$$G = \sum_z \left\{ N_z \varepsilon_1 + \sum_{i < j} V_{in-plane}(r_{ij}) + \sum_{i,j} V_p(r_{ij}) + \sum_{i,j} V_{surf}(r_{ij}^{(zm)}) - \sum_i \Delta \Omega_I(r_i) + \sum_i V_{inter-plane}(r_i^{z,z+1}) \right\}, \quad (1)$$

где N_z — количество пэнкеев в плоскости z , собственная энергия пэнкейка [2]:

$$\varepsilon_1 = d\varepsilon_0 \left(\ln \frac{\lambda(0)}{\xi(0)} + 0.52 \right), \quad (2)$$

где $\varepsilon_0 = \Phi_0^2 / (4\pi\lambda)^2$, $\Phi_0 = hc/2e$ — квант магнитного потока, λ — глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводящую плоскость, $\lambda(0)$, $\xi(0)$ — глубина проникновения магнитного поля и размер кора вихря при $T = 0$ соответственно

Энергия парного взаимодействия пэнкеев в плоскости

$$V_{in-plane}(r_{ij}) = 2d\varepsilon_0 K_0(r_{ij}/\lambda). \quad (3)$$

где K_0 — функция Макдональда. Строго говоря, использование K_0 вместо логарифмического потенциала взаимодействия в двумерной плоскости возможно только в случае корреляции между положениями пэнкеев в различных плоскостях [3], однако в силу логарифмического поведения K_0 при малых значениях аргумента такой выбор взаимодействия принципиально не искажает результаты в случае отсутствия корреляции между положениями пэнкеев.

Энергия взаимодействия пэнкеев с границей, представляемое как взаимодействие с системой изображений:

$$V_{surf}(r_{ij}^{(zm)}) = -d\varepsilon_0 K_0 \left(\frac{|r_i - r_j^{(zm)}|}{\lambda} \right) \quad (4)$$

Энергия взаимодействия пэнкейков с центрами пиннинга:

$$V_p(r_{ij}, T) = -\alpha \frac{\lambda(0)}{\lambda(T)} \frac{1}{1 + r_{ij}/\xi} \exp\left(-\frac{r_{ij}}{2\xi}\right), \quad (5)$$

где α — параметр, характеризующий глубину потенциальной ямы дефекта. Выбранная форма потенциала дефекта соответствует случаю, когда один дефект пиннингует один пэнкейк.

Взаимодействие пэнкейков с мейсснеровским и транспортным токами в системе вычисляется как работа токов по перемещению пэнкейка от края пластины вглубь образца [4].

$$\Delta\Omega_I(x) = \frac{1}{4\pi} \int_{\pm L_x/2}^x \mathbf{j}\Phi_0 dx = \frac{\Phi_0}{4\pi} \left[\mathbf{H}_0 \left(1 - \frac{\text{ch}(x/\lambda)}{\text{ch}(L_x/2\lambda)} \right) + \mathbf{H}_I \left(\frac{\text{sh}(x/\lambda)}{\text{sh}(L_x/2\lambda)} \mp 1 \right) \right] \quad (6)$$

Межплоскостное взаимодействие $V_{inter-plane}(r_i^{z,z+1})$ есть сумма электромагнитного взаимодействия пэнкейков [5]

$$V_{em}(r_i^{z,z+1}) = 2d\epsilon_0 [C + \ln(r_i^{z,z+1}/2\lambda) + K_0(r_i^{z,z+1}/\lambda)], \quad (7)$$

где $C = 0.5772$ — постоянная Эйлера, и джозефсоновского [6]

$$V_{jos}(r_i^{z,z+1}) = \begin{cases} \epsilon_0 d [1 + \ln(\lambda/d)] \frac{1}{4} (r_i^{z,z+1}/r_g)^2 \ln(9r_g/r_i^{z,z+1}), & r_i^{z,z+1} \leq 2r_g \\ \epsilon_0 d [1 + \ln(\lambda/d)] [(r_i^{z,z+1}/r_g) - \frac{1}{2}], & r_i^{z,z+1} > 2r_g, \end{cases} \quad (8)$$

где $r_g = \gamma d$ — характерное расстояние джозефсоновского потенциала, $\gamma = \lambda_z/\lambda_{xy}$ — параметр анизотропии.

Для расчета транспортных характеристик взяты параметры реально-го слоистого сверхпроводника $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ $\lambda(0) = 1800 \text{ \AA}$, $\xi(0) = 20 \text{ \AA}$, $T_c = 84 \text{ K}$ [7], $\gamma = 50, 250$ Температурная зависимость глубины проникновения магнитного потока в сверхпроводник задается в виде

$$\lambda(T) = \lambda(0) [1 - (T/T_c)^3]^{-1/2}. \quad (9)$$

Основные расчеты проведены для образцов ширины $L_x = 5, 10$ мкм по оси X , размером $L_y = 3 - 4$ мкм по оси Y , с количеством плоскостей $N_L \sim 10$ по оси Z

Для применения модели (1) разработана новая методика численного расчета [8]. Алгоритм, основанный на методе Монте-Карло, предполагает работу в рамках большого канонического ансамбля, что обеспечивает моделирование процессов проникновения в образец магнитного потока с границы и перемагничивание сверхпроводника второго рода. Алгоритм позволяет моделировать перемагничивание током объемного образца с количеством плоскостей N_L , либо одну сверхпроводящую плоскость при тех внешних и внутренних параметрах, когда рассчитанные результаты по одной плоскости являются усредненным откликом всего образца. В последнем случае в модели (1) не учитывается межплоскостное взаимодействие $V_{inter-plane}$. Методика расчета позволяет учесть поверхностные явления, учитывать взаимодействие с полем дефектов произвольного типа, учитывать процессы аннигиляции вихрь-антивихрь. Помимо численных характеристик моделируемых вихревых систем, разработанный метод позволяет получать визуальные распределения вихревой плотности в образце.

Третья глава представляет результаты исследования поведения вихревой системы при перемагничивании двумерной сверхпроводящей пластины собственным полем транспортного тока в присутствии и отсутствии постоянного внешнего магнитного поля. Рассчитаны петли перемагничивания током (рис. 1) как вклад в намагниченность половин пластин появляющимися на краях вихрями разных знаков. Получены визуальные распределения вихревой плотности поля тока в разных точках кривых намагниченности (рис. 2). Показано, что в пластине одновременно рождаются вихри разных знаков, и каждая половина пластины одновременно перемагничивается потоками разной направленности вектора магнитной индукции. При больших значениях поля тока вихри разных знаков достигают середины пластины и аннигилируют, образуя область аннигиляции (рис. 2с, ф). В то же время во время перемагничивания наблюдаются вол-

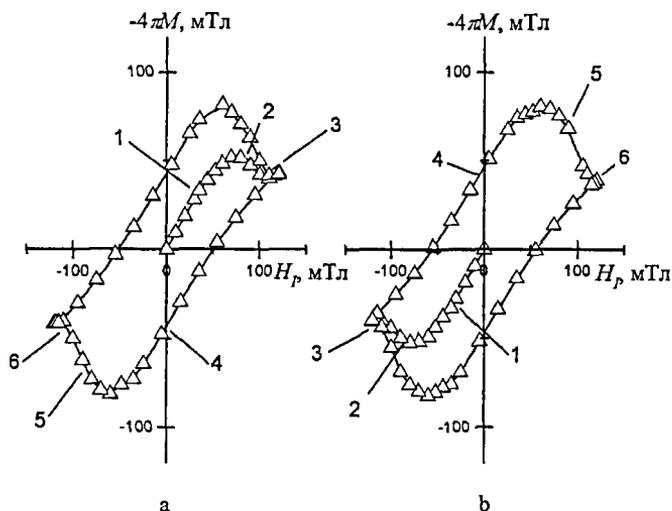


Рис 1. Зависимость $M(H_I)$ при перемагничивании током в отсутствии внешнего поля а) вклад от левой половины пластины; б) вклад от правой половины пластины

ны аннигиляции магнитного потока (рис. 2e), аналогичные возникающим при перемагничивании сверхпроводника внешним полем [9]. Также показано, что постоянное внешнее магнитное поле искажает распределения вихревой плотности в образце (рис. 3) Постоянное значение внешнего поля увеличивает суммарное поле на одной из половин пластины и уменьшает на другой, что и выражается в разном числе входящих с разных сторон вихрей. При этом в сверхпроводнике образуются области с замороженным магнитным потоком, которые в силу вышеуказанных искажений не перемагничиваются при повторных циклах изменения направления тока (рис. 3g,h)

В четвертой главе исследуются транспортные характеристики двумерной сверхпроводящей пластины при пропускании переменного тока. В частности, рассчитывается влияние дефектов на гистерезисные потери, рассчитываются вольт-амперные характеристики образца, рассчитывается зависимость критического тока J_c при большом диапазоне изменения концентраций дефектов

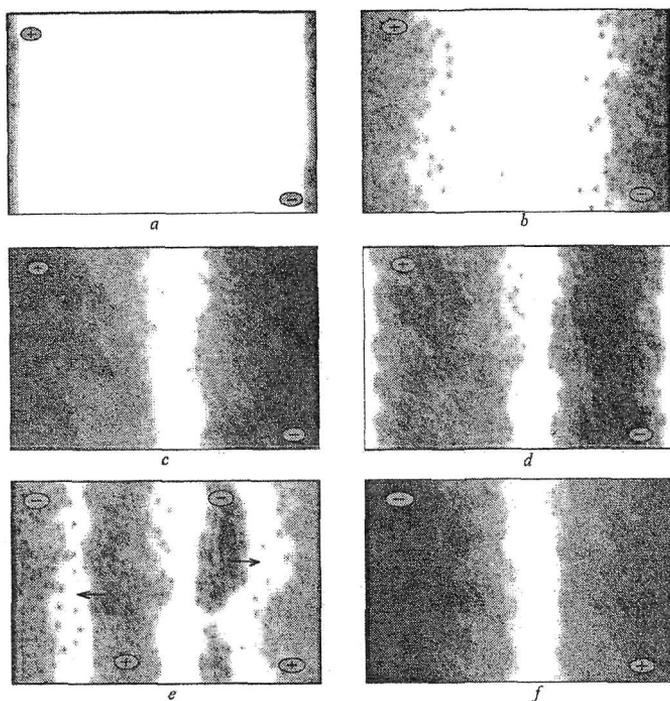


Рис. 2: Конфигурации вихрей в пластине, соответствующие отмеченным точкам 1-6 на кривых намагниченности на рис. 1. Символами "+" и "-" обозначены области, занимаемые вихрями соответствующего знака. На рис. 2e стрелками обозначен фронт волны аннигиляции магнитного потока. Ширина пластины $L_x = 10$ мкм.

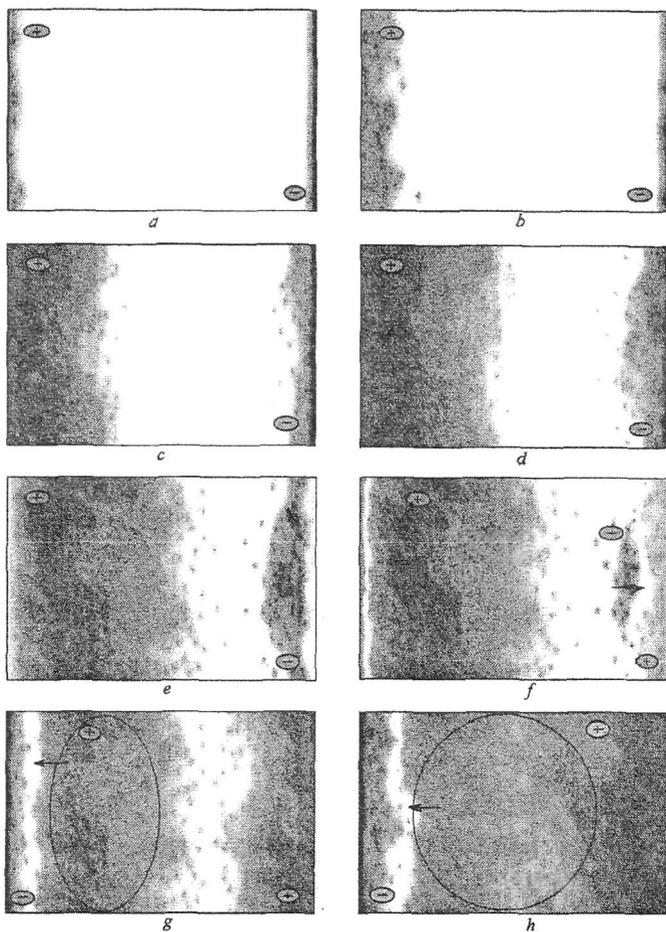


Рис. 3: Конфигурации вихрей в пластине при перемagnичивании током в присутствии внешнего магнитного поля $H_0 = 20$ мТл ($n_d = 2.73 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, $T = 5$ К, $\alpha = 0.1$ эВ) при полях тока $H_I = 18$ мТл (a), 35 мТл (b), 70 мТл (c), 90 мТл (d), 0 (e), -25 мТл (f), -70 мТл (g), -90 мТл (h). Ширина пластины $L_x = 10$ мкм.

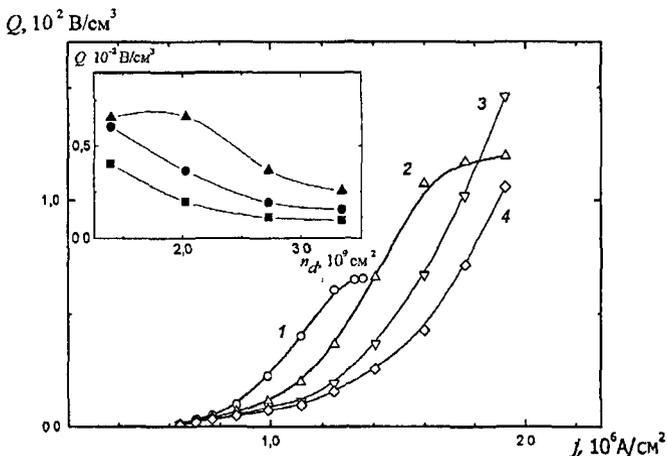


Рис 4 Энергетические потери Q как функция плотности транспортного тока j при $\alpha = 0.1 \text{ эВ}$ для разных концентраций дефектов n_d ($T = 5 \text{ К}$) 1 - $n_d = 1.39 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$; 2 - $n_d = 2.03 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$; 3 - $n_d = 2.73 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$; 4 - $n_d = 3.34 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ Ширина пластины $L_x = 10 \text{ мкм}$

Потери на переменном токе, возникающие в режиме $j < j_c$, известны как гистерезисные и связаны с перемангничиванием ВТСП-провода полем переменного транспортного тока. Величину потерь можно получить, рассчитав площади петель перемангничивания током. На рис 4 показаны рассчитанные зависимости гистерезисных потерь, построенные для разных значений концентраций дефектов. С ростом величины тока гистерезисные потери выходят на насыщение, что связано с заполнением пластины вихрями — достижением j_c (рис 2c,f) и сменой механизма выделения мощности. В то же время, с увеличением количества дефектов величина потерь уменьшается (см. вставку на рис. 4), т.к. большая концентрация дефектов способствует уменьшению площади проникновения магнитного потока в сверхпроводник и, следовательно, площадей петель перемангничивания, что и ведет к уменьшению потерь. Кривые гистерезисных потерь при разных значениях дефектов, нормированные на значение критического тока и построенные в зависимости от $\beta = I/I_c$, размещаются на одной универсальной кривой (рис 5), что обычно наблюдается в

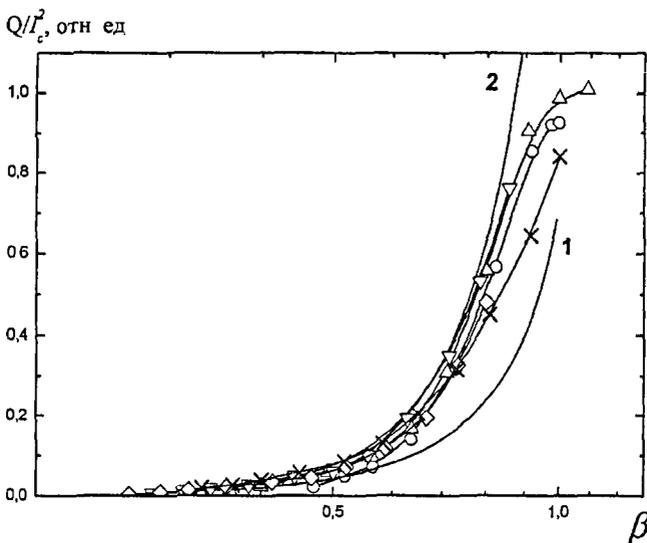


Рис. 5: Нормированные энергетические потери $Q(\beta)/I_c^2$ как функция $\beta = I/I_c$ при параметре пиннинга $\alpha = 0.1$ эВ для разных концентраций дефектов n_d . Символы, отвечающие разному числу дефектов при этом значении α , соответствует обозначениям на рис. 4, \times — $n_d = 3.34 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, $\alpha = 0.01$ эВ. Цифрами обозначены построенные зависимости Норриса: 1 — эллиптическое сечение, 2 — прямоугольное сечение.

экспериментальных работах. Эти кривые были рассчитаны аналитически впервые Норрисом на основе модели Бина [10], а в данной работе получены путем расчета конкретных образцов. Зная форму универсальной кривой нормированных потерь, можно определять абсолютные значения потерь для других значений концентраций дефектов.

При значениях транспортного тока $j > j_c$, когда вихри заполняют пластину и аннигилируют в ее центре, сверхпроводник находится в резистивном состоянии, поскольку в нем устанавливается вязкое течение вихрей. Движение вихрей сопровождается выделением энергии, приводящей к появлению на краях образца напряжения. Потери в этом состоянии динамического равновесия можно определить из вольт-амперных характеристик как $W = E_j$. Энергия, выделяемая при аннигиляции па-

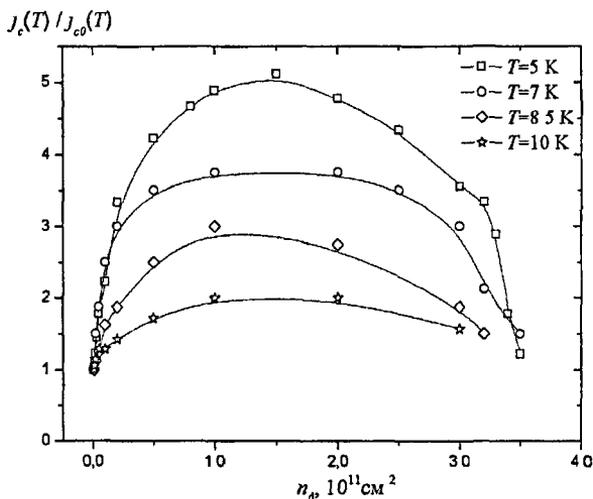


Рис 6. Зависимость критического тока, нормированного на исходное значение, от концентрации дефектов при разных температурах в случае слабого пиннинга ($\alpha = 0.01$ эВ). Ширина пластины $L_x = 5$ мкм.

ры вихрь-антивихрь равна в точности только работе, затраченной на их перемещение к месту аннигиляции (6), поскольку в этот момент на краях образца рождается еще одна пара вихрь-антивихрь. Поскольку в методе Монте-Карло вместо реального времени имеет место только расчетное время, то рассчитанные ВАХ сопоставляются и нормируются на экспериментальные кривые. В результате, по рассчитанным ВАХ построены зависимости потерь от тока, объединяющие гистерезисные и динамические потери для сверхпроводника с током.

Обычно дополнительные дефекты создаются в образцах с целью повышения критического тока путем облучения тяжелыми высокоэнергетичными ионами. Однако первоначальное увеличение критического тока J_c сменяется его деградацией по мере увеличения дозы облучения и соответственно числа создаваемых дефектов [11]. В работе рассчитаны зависимости J_c в зависимости от концентраций дефектов n_d (рис. 6). Показано, что падение критического тока связано с коллективным депиннингом — коллективным взаимодействием системы вихрей с системой дефектов. С

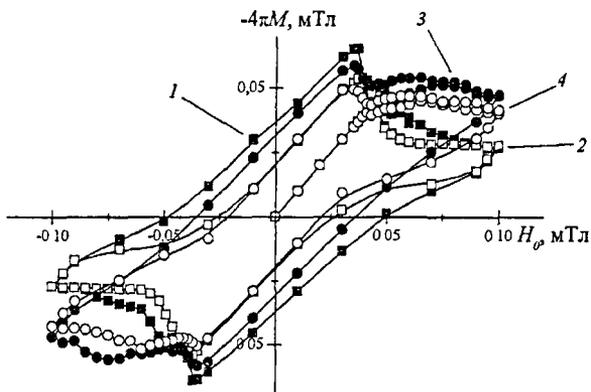


Рис 7 Петли перемагничивания при пиннинге $\alpha = 0.1$ эВ, температуре $T = 5$ К, концентрации дефектов $n_d = 7 \cdot 10^8$ см $^{-2}$. 1 - $\gamma = 50$, хаотические дефекты, 2 - $\gamma = 50$, колумнарные дефекты; 3 - $\gamma = 250$, хаотические дефекты, 4 - $\gamma = 250$, колумнарные дефекты. Ширина образца $L_x = 5$ мкм

увеличением n_d вследствие перекрытия потенциальных ям отдельных дефектов происходит "выравнивание" дна потенциальной ямы системы дефектов, что ведет к уменьшению эффективной силы пиннинга системы дефектов и деградации J_c .

В пятой главе анализируется влияние анизотропии и типа дефектов на намагниченность объемных сверхпроводников

На рис. 7 построены петли перемагничивания, соответствующие разным параметрам. Как видно из поведения кривых, вихревые нити с большим трудом проникают в сверхпроводник с большей анизотропией. Это объясняется эффективным пиннингом на границах вихревых нитей с большей подвижностью пэнкейков, т.е. нитей в материале с большей анизотропией. Вихревая нить может проникать в такой объемный образец частично, сохраняя межплоскостные связи с границей, при этом ее продвижение вглубь будет затруднено, поскольку растет энергия межплоскостной связи $V_{inter-plane}$ (7), (8)

Тип дефектов — протяженные (колумнарные) или точечные — также влияет на формы петель намагниченности. Можно видеть, что петли при условии колумнарных дефектов имеют меньшую площадь, что показыва-

ет их меньшую способность замораживать магнитный поток в сравнении с хаотическими. Это объясняется тем, что точечные хаотические дефекты эффективней заполняют образец, поэтому возрастает эффективность пиннинга такой дефектной структурой.

Построенные вольт-амперные характеристики показывают, что у объемных образцов в сравнении с двумерными более четко выражена область перехода на линейный участок, а угол наклона кривых больше, что показывает ограниченность двумерных моделей в расчете транспортных характеристик реальных сверхпроводников и необходимость учета анизотропии реальных материалов.

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

- Представлен новый метод численного расчета транспортных характеристик двумерных и объемных образцов ВТСП. Метод позволяет проводить расчеты по определению транспортных потерь и критического тока в широком диапазоне значений транспортного тока, внешних полей, анизотропии и температур при произвольном распределении и типе дефектов.
- Проанализирован процесс перемангничивания сверхпроводника током. Впервые рассчитаны распределения вихревой плотности в разных точках процесса перемангничивания.
- Рассчитаны транспортные потери при различных значениях дефектов в двумерной сверхпроводящей пластине. Установлено, что существуют два механизма потерь в сверхпроводнике при перемангничивании током. Показано, что критический ток может увеличиваться с ростом концентрации дефектов.
- Показано, что зависимость критического тока от концентрации внедренных дефектов немонотонна в широком диапазоне изменения степени облучения. Объяснен механизм деградации критического тока, показано, что причиной служит явление коллективного депиннинга — коллективного взаимодействия системы вихрей с системой дефектов.

- Рассчитаны кривые намагниченности трехмерного слоистого сверхпроводника с различным параметром анизотропии. Обнаружены особенности проникновения магнитного потока с границы, связанные с влиянием анизотропии сверхпроводника и типа дефектов. Найдены различия в кривых перемагничивания для точечных и протяженных дефектов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Д.С. Одинцов, В.А. Кашурников, И.А. Руднев, Намагниченность и транспортные потери сверхпроводящей пластины с током // Научная сессия МИФИ-2005 . сб научных трудов : в 16 т. - М.: МИФИ, 2005 - Т. 4. - С. 177-178.
2. Д.С. Одинцов, В.А. Кашурников, И.А. Руднев, Влияние дефектов на критический ток высокотемпературных сверхпроводников // Научная сессия МИФИ-2006 : сб. научных трудов : в 16 т. - М.: МИФИ, 2006 - Т. 4 - С. 194-195.
3. Д.С. Одинцов, В.А. Кашурников, И.А. Руднев, Диссипативные процессы в сверхпроводнике с током // Научная сессия МИФИ-2006 . сб научных трудов в 16 т. - М. МИФИ, 2006. - Т. 4 - С. 226-227.
4. 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, вып. 1(7). - С. 77-88.
5. Д.С. Одинцов, И.А. Руднев, В.А. Кашурников, К вопросу о механизмах транспортных потерь в высокотемпературных сверхпроводниках // 34 Совещание по физике низких температур (НТ-34) . Труды конференции в 2 т. - 2006 - Т. 2 - С. 200-201.
6. И.А. Руднев, Д.С. Одинцов, В.А. Кашурников, Механизм подавления критического тока ВТСП при увеличении концентрации дефек-

тов // 34 Совещание по физике низких температур (НТ-34) . Труды конференции в 2 т. - 2006 - Т 2 - С. 205-206

7. И. А. Руднев, Д. С. Одинцов, В. А. Кашурников, Механизм влияния концентраций дефектов на критический ток ВТСП // Научная сессия МИФИ-2007 : сб. научных трудов : в 17 т. - М.: МИФИ, 2007. - Т. 15. - С 14-15.
- 8 Д. С. Одинцов, В. А. Кашурников, И. А. Руднев, Моделирование объемных слоистых ВТСП методом Монте-Карло // Научная сессия МИФИ-2007 : сб. научных трудов : в 17 т - М.: МИФИ, 2007. - Т. 15. - С. 16-17.
- 9 Д. С. Одинцов, И. А. Руднев, В. А. Кашурников, К вопросу о механизмах транспортных потерь в высокотемпературных сверхпроводниках // ЖЭТФ. - 2007. - Т 132, вып. 1(7). - С 287-289.
- 10 И. А. Руднев, Д. С. Одинцов, В. А. Кашурников, Механизм подавления критического тока высокотемпературных сверхпроводников при увеличении концентрации дефектов // Известия РАН. Серия физическая. - 2007. - Т. 71, вып. 8. - С. 1121-1123.
11. Д. С. Одинцов, В. А. Кашурников, И. А. Руднев, Моделирование слоистых ВТСП методом Монте-Карло // "Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах", г. Махачкала, Дагестан : Труды конференции. - 2007. - С. 95-97.
- 12 И. А. Руднев, Д. С. Одинцов, В. А. Кашурников, Механизм уменьшения критического тока сверхпроводников при увеличении концентрации дефектов // Конференция по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению, г Москва, РИЦ "Курчатовский институт" : Труды конференции - 2007. - С. 220.
- 13 Д. С. Одинцов, В. А. Кашурников, И. А. Руднев, Влияние анизотропии ВТСП на проникновение магнитного потока // Научная сессия МИФИ-2008 . сб. научных трудов : в 15 т. - М. МИФИ, 2008 - Т. 2. - С. 164-165

Список цитируемой в автореферате литературы

1. S. Ryu, S. Doniach, G. Deutcher, and A. Kapitulnik, Phys Rev. Lett **68**, 710-713 (1992).
2. В. В. Погосов, А. Л. Рахманов, К. И. Кугель, ЖЭТФ **118**, 676-686 (2000)
3. S. Tyagi and Y. Y. Goldschmidt, Phys. Rev. B **70**, 024501-1 - 024501-14 (2004).
4. Yu. A. Genenko, Phys Rev. B **49**, 6950-6957 (1994).
5. J. R. Clem, Phys. Rev. B **43**, 7837-7846 (1991).
6. Y. Y. Goldschmidt, S. Tyagi, Phys Rev. B **71**, 014503-1 - 014503-9 (2005).
7. S. L. Lee, P. Zimmermann, H. Keller, et al, Phys. Rev. Lett **71**, 3862-3865 (1993)
8. Д. С. Одинцов, И. А. Руднев, В. А. Кашурников, ЖЭТФ **130**, вып 1(7), 77-88 (2006)
9. В. А. Кашурников, И. А. Руднев, М. В. Зюбин, ЖЭТФ **121**, 442-452 (2002).
10. W. T. Norris, J. Phys. D **3**, 489-507 (1970).
11. K. Ogkubo, M. Nakano, T. Shtamichu, T. Terao, M. Yamawaki, S. Okayasu, K. Hojou, Physica C **378-381**, 368-371 (2002)

Подписано в печать 13 05 2008 г
Печать трафаретная

Заказ № 394
Тираж 100 экз

Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш, 36
(495) 975-78-56, (499) 788-78-56
www.autoreferat.ru