

На правах рукописи



ПАВЛЕНКО Виталий Николаевич

**ДИНАМИКА ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ВИХРЕЙ В  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СВЕРХПРОВОДНИКЕ  
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  (Bi-2212)**

Специальность 01.04.07: «Физика конденсированного состояния»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук.

МОСКВА – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
Латышев Юрий Ильич.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
Рязанов Валерий Владимирович;

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кошелец Валерий Павлович.

**Ведущая организация:** Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова  
(Физический факультет).

Защита состоится «19» марта 2010 г. в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д.002.231.01 при ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009 г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автореферат разослан «17» февраля 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор



С.Н. Артеменко

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

В классе высокотемпературных сверхпроводников  $\text{Bi-2212}$ , имеющий слоистую структуру, в которой элементарные сверхпроводящие слои связаны между собой джозефсоновским взаимодействием, является одним из самых интересных соединений. Слоистая структура определяет существование в этом материале как абрикосовских вихревых нитей, состоящих из плоских двумерных вихрей, так и джозефсоновских вихрей. Джозефсоновские вихри в  $\text{Bi-2212}$  обладают высокой подвижностью, определяющей перспективу их использования в сверхпроводниковой высокочастотной электронике в терагерцовой области частот.

В то время как динамические свойства и фазовая диаграмма абрикосовских вихрей в  $\text{Bi-2212}$  уже достаточно подробно изучены, динамика джозефсоновских вихрей изучена гораздо меньше. Одной из причин этого является сложность постановки эксперимента, требующего не только совершенных образцов достаточно больших размеров, но и очень высокой точности ориентации образца в магнитном поле.

### **Цель работы**

Целями данной диссертационной работы являлись:

- экспериментальная проверка режима движения джозефсоновских вихрей в слоистом сверхпроводнике  $\text{Bi-2212}$ ;
- определение механизма диссипации при движении джозефсоновских вихрей;
- определение типа решетки джозефсоновских вихрей и исследование переходов от упорядоченного состояния джозефсоновских вихрей к неупорядоченному (плавление решетки);
- получение коллективного отклика массива элементарных джозефсоновских переходов на внешнее излучения суб-ТГц диапазона.

## **Научная новизна**

Впервые (одновременно с немецкой группой Мюллера и Кляйнера) на ВАХ естественных слоистых структур наблюдалась характерная нелинейная ветвь, соответствующая движению джозефсоновских вихрей под действием силы Лоренца. Исследование потерь на линейном участке этой ветви позволило впервые экспериментально подтвердить доминирующий вклад продольной квазичастичной проводимости и найти ее значение при низкой температуре (в сверхпроводящем состоянии).

## **Практическая значимость работы**

При условии решения проблемы синхронизации большого числа плотно упакованных элементарных джозефсоновских переходов (в этом случае мощность излучения будет пропорциональна  $N^2$ ,  $N$  – число переходов), такая система может быть использована в качестве детектора и источника электромагнитного излучения с частотой около 1 ТГц – в области, где эффективность существующих источников низка.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В магнитном поле, параллельном слоям, на слоистых структурах Bi-2212 с латеральными размерами больше джозефсоновской глубины проникновения  $\lambda_J$  обнаружена безгистерезисная ветвь ВАХ с характерным напряжением насыщения, пропорциональным магнитному полю. Резистивность в этом состоянии связана с коллективным движением решетки джозефсоновских вихрей под действием силы Лоренца.
2. Из диссипативных характеристик в режиме движения решетки джозефсоновских вихрей определена продольная квазичастичная проводимость  $\sigma_{ab}$  в сверхпроводящем состоянии. Показано, что она определяет основной вклад в диссипацию.

3. На основе анализа амплитуды осцилляций магнитосопротивления, возникающих вследствие соизмеримости периода решетки джозефсоновских вихрей и длины образца, показано, что плавление треугольной решетки является фазовым переходом 2-го рода, который вызван спонтанным рождением вихрей и антивихрей в элементарных сверхпроводящих слоях.
4. Реализована синхронизация отклика элементарных джозефсоновских переходов на внешнее суб-ТГц излучение, вызванная слабым ( $\sim 0.1$  Тл) поперечным магнитным полем. На ВАХ обнаружена резонансная ступенька, положение которой по напряжению пропорционально амплитуде внешнего излучения и кратно напряжению первой гармоники с максимальным коэффициентом 9, что соответствует частоте джозефсоновских осцилляций  $\sim 1$  ТГц.

### **Достоверность**

полученных результатов подтверждена воспроизводимостью данных на большом числе образцов и их признанием научной общественностью. Определенное в работе значение продольной квазичастичной проводимости  $\sigma_{ab}$  в сверхпроводящем состоянии согласуется с результатами измерений, полученными независимыми методами. Часть обнаруженных эффектов качественно описывается теоретическими моделями, часть количественно согласуется с результатами теоретических расчетов.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в работе на всех этапах получения образцов, постановки эксперимента и анализа результатов. Принимал участие в модернизации установки роста вискеро́в Vi-2212, давшей возможность поддерживать ростовую температуру с точностью  $0.1^\circ\text{C}$ . Значительная часть технологических операций по получению

структур (различные методики травления, изготовление электрических контактов, отжиг, первичная характеристика) проводилась автором. Им разработана и собрана установка для прецизионного вращения образца, помещенного в криостат, в магнитном поле. Им проведена существенная часть измерений, как с аналоговой, так и с цифровой методикой сбора данных. Основной массив экспериментальных данных обработан автором. Он также принимал участие в сопоставлении полученных экспериментальных данных с теоретическими моделями и интерпретации полученных результатов.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации были доложены на российских и международных конференциях:

- 4<sup>th</sup> International Symposium on “Intrinsic Josephson Effect and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors”, November 26 – 28, 2004; Tsukuba, Japan;
- 10<sup>th</sup> International Vortex Workshop, 9-14 January, 2005, Mumbai, India;
- XXXIV Совещание по Физике Низких Температур (НТ-34), 26-29 сентября 2006 г., п. Лоо, г. Сочи;
- International conference “Dubna-Nano2008”, 7-11 июля 2008 г., Дубна, Московская область;
- 12<sup>th</sup> International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, September 12-16, 2009, Yamanashi, Japan.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 10 научных статей (список приведен в конце автореферата), из них 3 публикации в журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 7 статей в ведущих зарубежных журналах. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 54 страницы.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитированной литературы. Работа изложена на 96 страницах, содержит 30 рисунков. Список цитируемой литературы состоит из 55 работ.

## Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и определены её цели. Дана характеристика работы, включая научную новизну и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дается краткий обзор работ, в которых исследованы основные свойства соединения  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ , относящегося к классу купратов, высокотемпературных сверхпроводников, открытых в середине 1980-х годов.

В **разделе 1.1** рассмотрен так называемый внутренний (intrinsic) эффект Джозефсона между соседними купратными слоями. В экспериментальной работе Р. Кляйнера и П. Мюллера [1] были впервые получены ВАХ таких слоистых джозефсоновских переходов с характерным джозефсоновским критическим током и содержащие множество ветвей, соответствующих последовательным переходам отдельных джозефсоновских переходов в резистивное состояние.

Как и в джозефсоновских переходах между обычными сверхпроводниками, в слоистом сверхпроводнике с размерами больше  $\lambda_J = \gamma s$  ( $\gamma = \lambda_c / \lambda_{ab}$  - анизотропия лондоновской глубины проникновения,  $s$  - расстояние между центрами сверхпроводящих слоев) при приложении магнитного поля параллельно слоям возникают джозефсоновские вихри (флюксоны). Теоретические модели джозефсоновских вихрей в системе слоистого сверхпроводника рассмотрены в **разделе 1.2**. В отличие от джозефсоновских переходов между обычными (низкотемпературными) сверхпроводниками, циркулирующие вокруг сердцевины вихря сверхпроводящие токи захватывают много слоев, что приводит к взаимодействию вихрей на значительном расстоянии. Это, в свою очередь, является причиной формирования упорядоченной треугольной решетки



вихрей, которая становится плотной в полях  $B > B_{cr} = \Phi_0 / \pi \gamma s^2$ , где  $\Phi_0$  – квант магнитного потока.

Диссипативное движение джозефсоновских вихрей под действием силы Лоренца при пропускании электрического тока поперек слоев рассмотрено в **разделе 1.3**. Приводятся результаты теоретических расчетов зависимости сопротивления линейного участка ВАХ в режиме движения джозефсоновских вихрей от магнитного поля. Обсуждается вид ВАХ в режиме коллективного движения джозефсоновских вихрей.

В **разделе 1.4** сформулированы основные задачи исследования и подходы к их решению.

**Вторая глава** посвящена методике экспериментального исследования эффектов, вызванных джозефсоновскими вихрями.

В **разделе 2.1** дается описание методики изготовления образцов. Все исследования проводились на вискерах Bi-2212, имеющих совершенную кристаллическую структуру и степень допирования, близкую к оптимальной ( $T_c \approx 77$  К). Для выделения из толщи образца области, где ток протекает поперек слоев, использовалось двустороннее травление фокусированным ионным пучком [2].

В **разделе 2.2** описан эксперимент по измерению ВАХ слоистого перехода в режиме движения джозефсоновских вихрей. Схема эксперимента показана на Рис. 1.

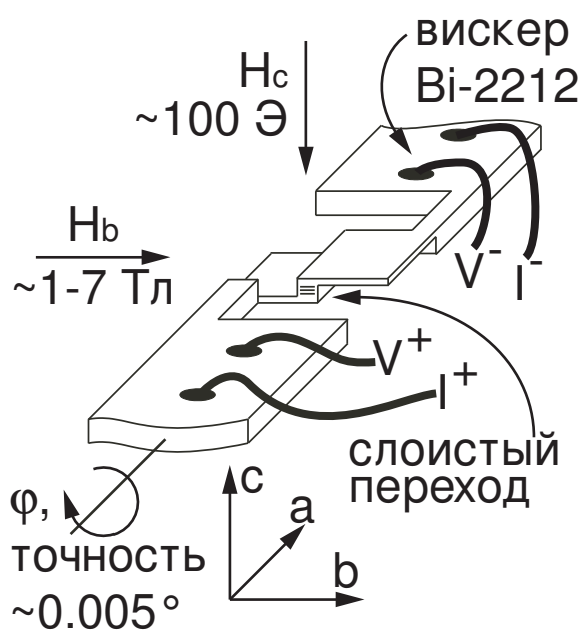


Рис. 1. Схематическое изображение конфигурации эксперимента по измерению ВАХ слоистой сверхпроводящей структуры.

Важным условием для исследования движения джозефсоновских вихрей является точное выравнивание образца в магнитном поле. При недостаточно точном выравнивании из-за компоненты магнитного поля, направленной по оси  $c$ , в образце возникает решетка абрикосовских вихревых линий, являющихся центрами пиннинга для джозефсоновских вихрей. Такие центры пиннинга тормозят или даже останавливают движущуюся решетку джозефсоновских вихрей. Дано описание установки, позволяющей достичь необходимую точность выравнивания образца. Принцип ее работы состоит в использовании дополнительного перпендикулярного соленоида с максимальным полем  $\approx 200$  Э и раздвижной шпильки, позволяющей наклонять криостат в зазоре основного магнита.

В разделе 2.3 приведены ВАХ слоистых джозефсоновских переходов небольших ( $\sim 1$  мкм) размеров. Хорошо различимые на осциллограммах джозефсоновский критический ток, ветвистая структура (см. раздел 1.1), щелевая особенность подтверждают высокое качество образцов. На ВАХ в масштабе малых токов и напряжений заметно, что проводимость на

участке квазичастичной ветви при малых смещениях является конечной, в отличие от джозефсоновских переходов на основе низкотемпературных сверхпроводников. Такое отличие объясняется  $d$ -волновой симметрией волновой функции в Bi-2212 [3].

**Третья глава** посвящена исследованию механизма диссипации при движении решетки джозефсоновских вихрей. Предсказанная в теоретических работах безгистерезисная ветвь ВАХ с характерным напряжением насыщения, пропорциональным магнитному полю, действительно была обнаружена (Рис. 2).

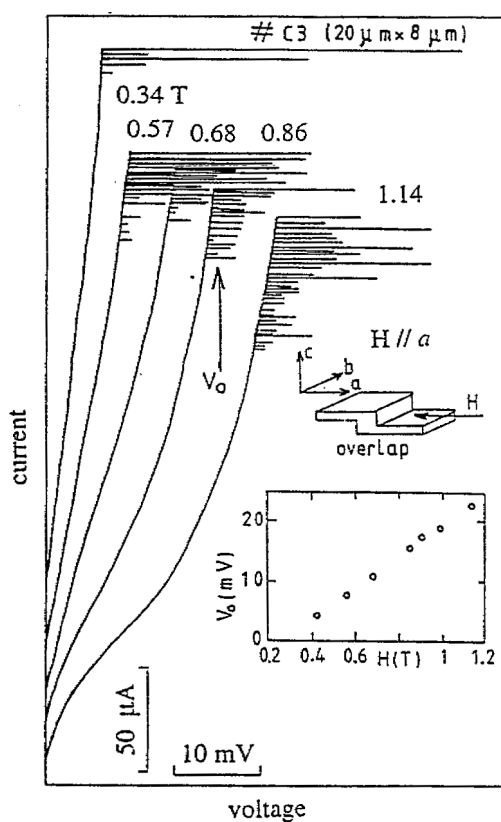


Рис. 2. Семейство ВАХ в режиме движения решетки джозефсоновских вихрей.  $T=4.2$  К. На вставке показана схема эксперимента и зависимость напряжения насыщения от магнитного поля.

Дальнейшее улучшение качества образцов и точности выравнивания слоистого перехода в магнитном поле позволило также исследовать начальный (линейный) участок ВАХ (Рис. 3), для которого зависимость сопротивления от магнитного поля уже достаточно подробно изучалась теоретически [4-6].

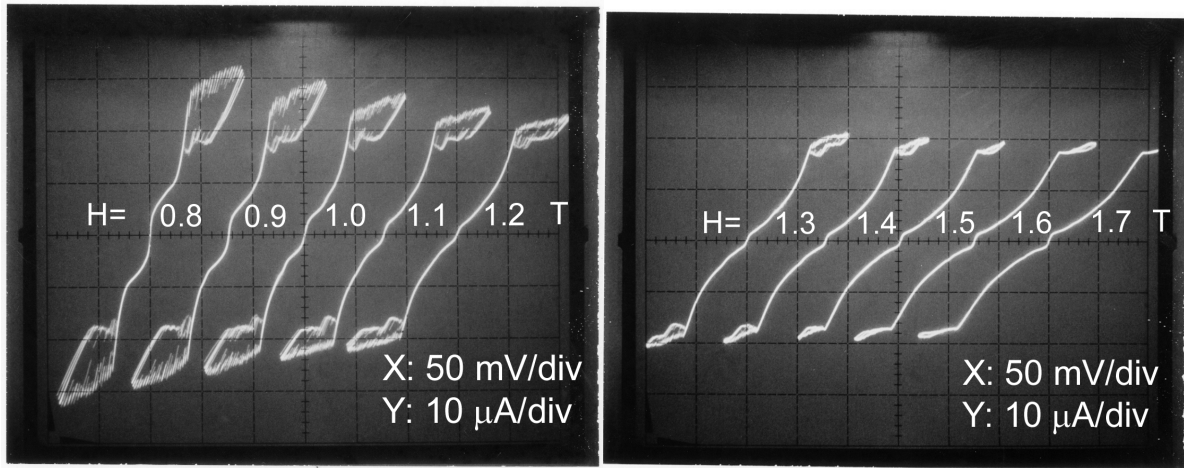


Рис. 3. Семейство ВАХ длинного ( $L_a=30$  мкм,  $L_b=2$  мкм) образца Bi-2212 в магнитном поле  $H//b$ .  $T=20$  К.

Для получения точного значения этого сопротивления из ВАХ небольшая особенность при нулевом напряжении спрямлялась. Результаты этого эксперимента представлены на Рис. 4. Видно отличное согласие экспериментальных результатов с расчетом А.Е. Кошелева из работы [6], где для плотной решетки джозефсоновских вихрей ( $B > B_{cr} = \Phi_0 / \pi \gamma^2$ ) получено выражение:

$$\rho_{Jff} = \frac{B^2}{B^2 + B_\sigma^2} \rho_c, \text{ где } B_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_{ab}}{\sigma_c}} \frac{\Phi_0}{\sqrt{2} \pi \gamma^2 s^2} \quad (1)$$

В отличие от предыдущих теоретических работ, где пренебрегалось вкладом в диссипацию от квазичастичных токов в плоскости слоев, в этом выражении учтены оба вклада ( $\sigma_c$  и  $\sigma_{ab}$ ).

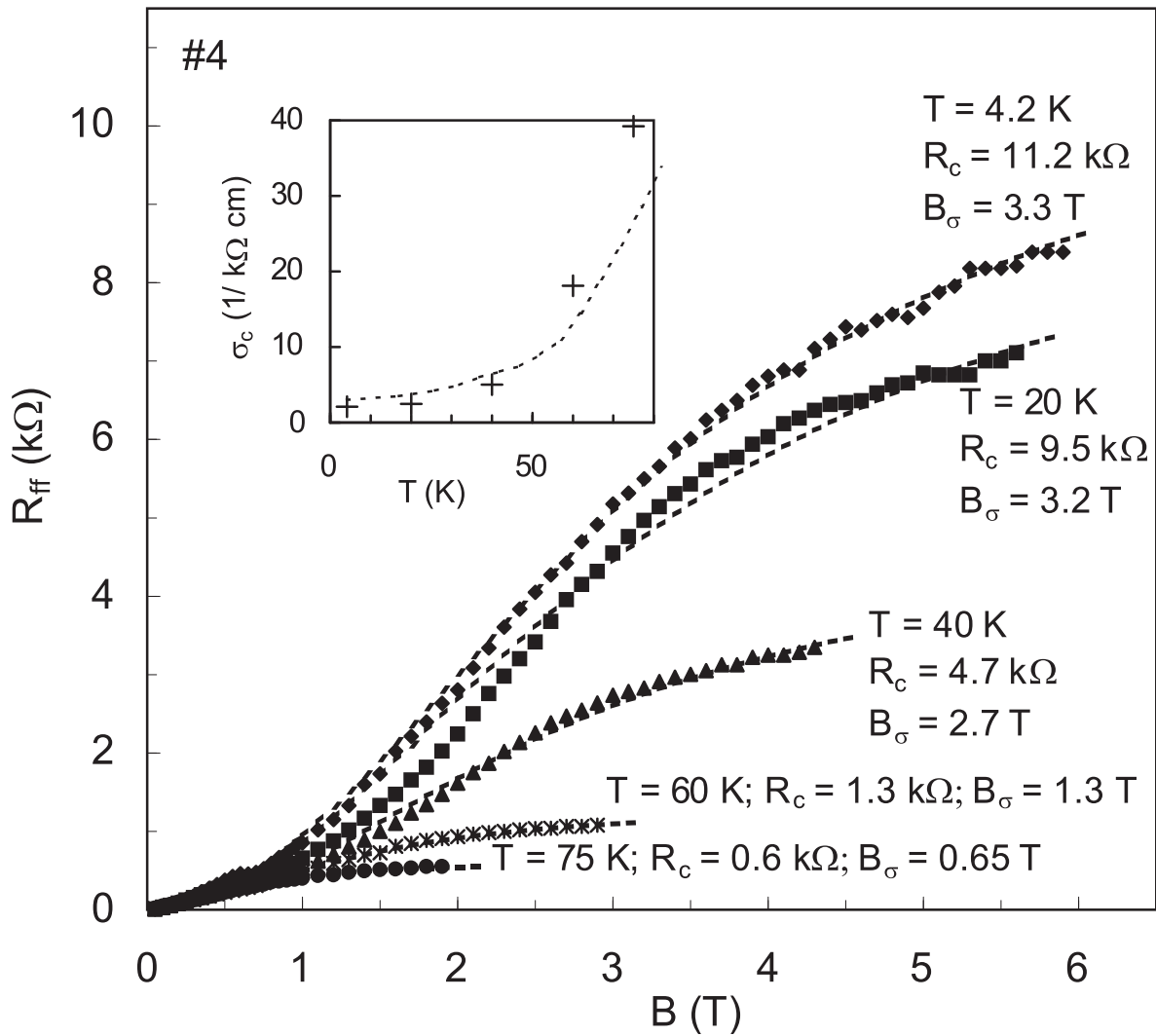


Рис. 4. Магнитосопротивление длинного перехода  $Bi-2212$  в режиме движения джозефсоновских вихрей при температурах 4.2, 20, 40, 60 и 75 К. Пунктирные линии получены из Уравнения (1) при подстановке указанных параметров. На вставке: температурная зависимость  $\sigma_c$ , крестами показаны точки, пунктирная линия – значения, полученные из туннельных экспериментов на переходах небольших размеров в нулевом поле.

Вид зависимости, определяемой Уравнением (1), позволяет получить из экспериментальных данных однозначным образом с высокой точностью значения обоих параметров –  $\rho_c$  и  $B_\sigma$ , а следовательно,  $\sigma_c$  и  $\sigma_{ab}$ . Полученные таким образом значения  $\sigma_c$  с хорошей точностью согласуются с результатами других экспериментов (см. вставку Рис. 4), а из полученного значения  $\sigma_{ab} \approx 4 \cdot 10^4$  (Ом·см) $^{-1}$  следует, что при низкой температуре основной вклад в диссипацию при движении решетки джозефсоновских вихрей вносят квазичастичные токи в плоскости слоев

(При  $T=4.2$  К  $\frac{\sigma_{ab}/\sigma_c}{\gamma^2} \approx 80$ . Вблизи сверхпроводящего перехода  $\frac{\sigma_{ab}/\sigma_c}{\gamma^2} \approx 1$ ).

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию эффектов, являющихся прямым следствием наличия решетки джозефсоновских вихрей и позволяющих изучать ее фазовые переходы.

В **разделе 4.1** описаны осцилляции магнитосопротивления в режиме движения джозефсоновских вихрей, обнаруженные японской группой под руководством профессора К. Хирата в полях выше  $\sim 0.5$  Тл [7]. Причиной появления этих осцилляций является взаимодействие медленно движущейся решетки джозефсоновских вихрей с краями перехода – при целом числе квантов магнитного потока на элементарный переход (устойчивая конфигурация, флюксоны равномерно распределены в переходе и суммарный барьер для входа и выхода флюксона при движении решетки максимален) будут отмечаться локальные минимумы магнитосопротивления. Однако, период осцилляций по магнитному потоку равен не 1, а  $1/2$  кванта на элементарный переход (Рис. 5а). Другими словами, период соответствует вхождению дополнительного кванта магнитного потока на каждые 2 перехода, что и ожидалось для предсказанной теоретически треугольной решетки джозефсоновских вихрей. Такие осцилляции называют соизмеримыми (возникающими вследствие соизмеримости периода решетки джозефсоновских вихрей и длины образца).

В **разделе 4.2** этот метод был применен для построения части диаграммы состояния джозефсоновских вихрей. На Рис. 5б ромбами отмечены границы области существования соизмеримых осцилляций, наличие которых является критерием существования упорядоченной треугольной решетки джозефсоновских вихрей.

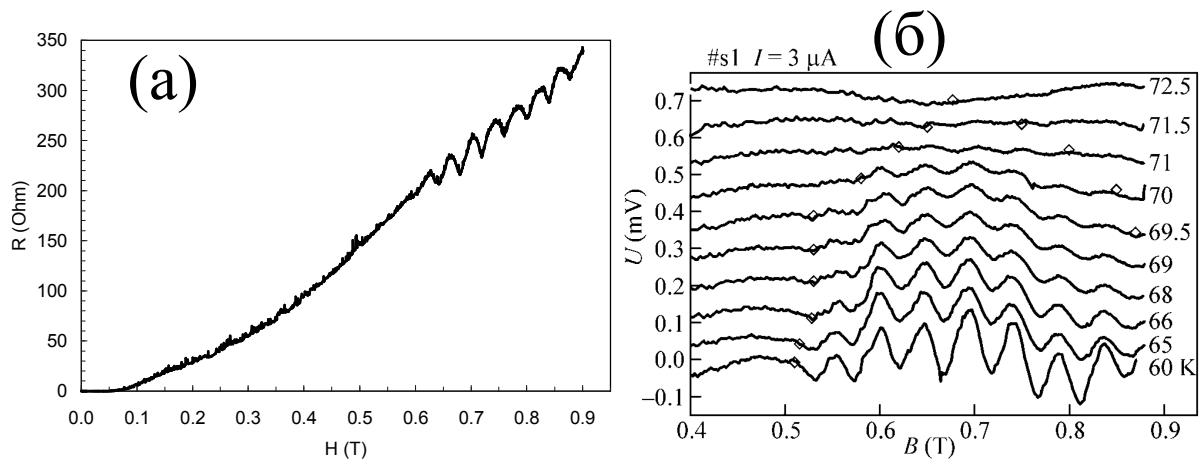


Рис. 5. Магнитосопротивление в режиме движения джозефсоновских вихрей для образца  $\text{Bi-2212}$  с размерами  $L_a \times L_b = 15 \text{ мкм} \times 5 \text{ мкм}$  в магнитном поле  $B // b$ . (а) при  $T = 60 \text{ К}$ ; (б) семейство кривых при температуре от 60 до 72.5 К за вычетом линейного фона, кривые смещены по оси напряжения, ромбами отмечены границы области существования осцилляций.

При повышении температуры амплитуда осцилляций спадает и обращается в ноль при  $T = 72 \text{ К}$ , что приблизительно на 5 К ниже температуры сверхпроводящего перехода в нулевом поле (Рис. 6а). Эта температура соответствует температуре Березинского-Костерлица-Таулесса (БКТ),  $T_{\text{БКТ}}$ , выше которой в элементарных сверхпроводящих слоях происходит спонтанное распаривание пар плоских вихрей и антивихрей [8]. Такое распаривание приводит к образованию прыжков сегментов джозефсоновского вихря (см. вставку Рис. 6б), и пространственная симметрия решетки разрушается, то есть происходит плавление решетки.

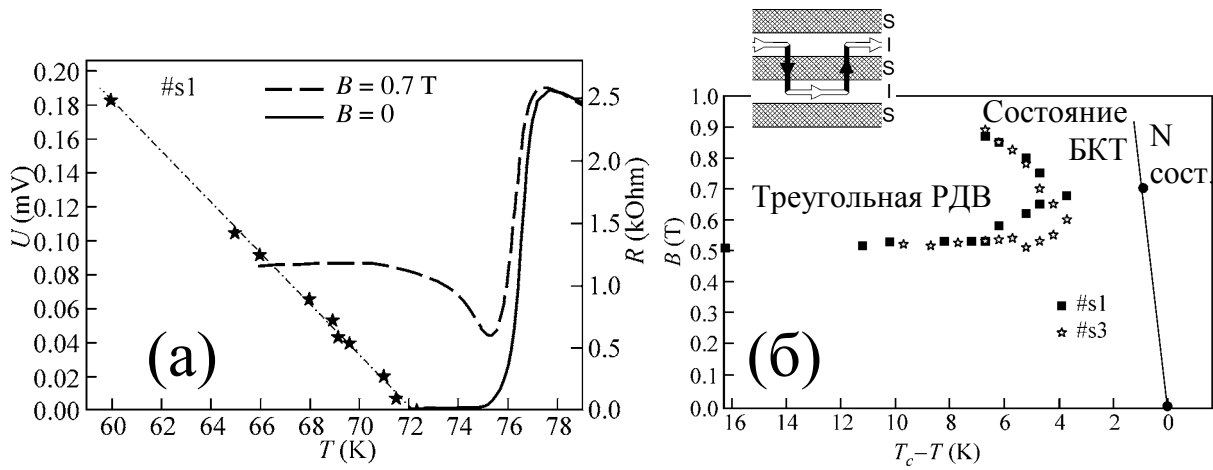


Рис. 6. (а) Температурная зависимость амплитуды осцилляций напряжения, вызванного движением джозефсоновских вихрей, измеренная при значении параллельного магнитного поля около 0.7 Т для слоистой структуры *Vi-2212* ( $I=3$  мкА) и сверхпроводящий переход для той же структуры в нулевом поле и при  $B=0.7$  Т; (б) диаграмма состояния, полученная из условия обращения в ноль амплитуды осцилляций магнетосопротивления, вызванного движением решетки джозефсоновских вихрей, с периодом  $\Phi_0/2$  для двух структур *Vi-2212*. На вставке показана схематическая иллюстрация прыжка сегмента джозефсоновского вихря с образованием петли магнитного потока, содержащей пару 2Д вихрь-антивихрь.

Плавление решетки флюксонов происходит и при температуре ниже  $T_{\text{ВКТ}}$ , за счет того, что пары 2Д вихрь-антивихрь будут распариваться под действием силы Лоренца теми отрезками циркулирующих вокруг флюксона токов, которые текут вдоль сверхпроводящих слоев. Изученная область диаграммы состояния джозефсоновских вихрей показана на Рис. 6б. Нижняя граница области треугольной решетки при  $\sim 0.5$  Тл, по-видимому, соответствует формированию плотной решетки. Верхняя граница (плавление треугольной решетки в состояние БКТ) характеризуется плавным уменьшением амплитуды соизмеримых осцилляций при увеличении температуры (Рис. 6а) и магнитного поля (Рис. 5б). Это позволяет сделать вывод, что такое плавление решетки является переходом второго рода. Экспериментально полученная область диаграммы и вывод о переходе второго рода в состояние БКТ качественно согласуются с теоретическими предсказаниями [9].

**Пятая глава** посвящена исследованию когерентного отклика массива элементарных джозефсоновских переходов на внешнее излучение суб-ТГц



диапазона. Как известно, уникальной особенностью джозефсоновского перехода в резистивном состоянии является прямое преобразование напряжения на переходе  $V$  в излучение с частотой  $\omega$  (либо обратное преобразование), так что  $V = \frac{\hbar\omega}{2e}$  (нестационарный эффект Джозефсона).

В слоистых переходах ситуация усложняется, поскольку, как обсуждалось в первой главе, на ВАХ наблюдаются множественные резистивные ветви. Поэтому основной проблемой является синхронизация всех элементарных джозефсоновских переходов.

В разделе 5.1 рассмотрен способ синхронизации переходов с помощью плотной решетки джозефсоновских вихрей. Бегущая решетка возбуждает джозефсоновские колебания, и на ВАХ при внешнем облучении с частотой 50-160 ГГц возникает ступень Шапиро, положение которой удовлетворяет соотношению:

$$V = N \frac{\hbar\omega}{2e} \quad (2),$$

где  $N$  - число излучающих Джозефсоновских переходов. В эксперименте соотношение (2) выполнялось с точностью около 5% (полное число элементарных Джозефсоновских переходов легко получить с помощью подсчета резистивных ветвей ВАХ в нулевом магнитном поле, см. раздел 2.3). Это означает, что действительно наблюдалась синхронизация всех (порядка 50) переходов в образце. Следует отметить, что для реализации отклика в этом режиме требуются значительные (несколько Тл) магнитные поля. Кроме того, в основном состоянии решетка джозефсоновских вихрей является треугольной, поэтому фаза излучения от четных и нечетных переходов будет близка к противоположной, что существенно снижает эффективность излучателя.

Учитывая эти недостатки, была предпринята попытка осуществления синхронизации элементарных переходов с помощью магнитного поля, перпендикулярного слоям. Магнитное поле  $\sim 0.1$  Тл в этом эксперименте

создавалось постоянным магнитом небольшого размера. В разделе 5.2 приведены данные эксперимента по отклику на внешнее излучение с частотой 100 ГГц (Рис. 7а, б).

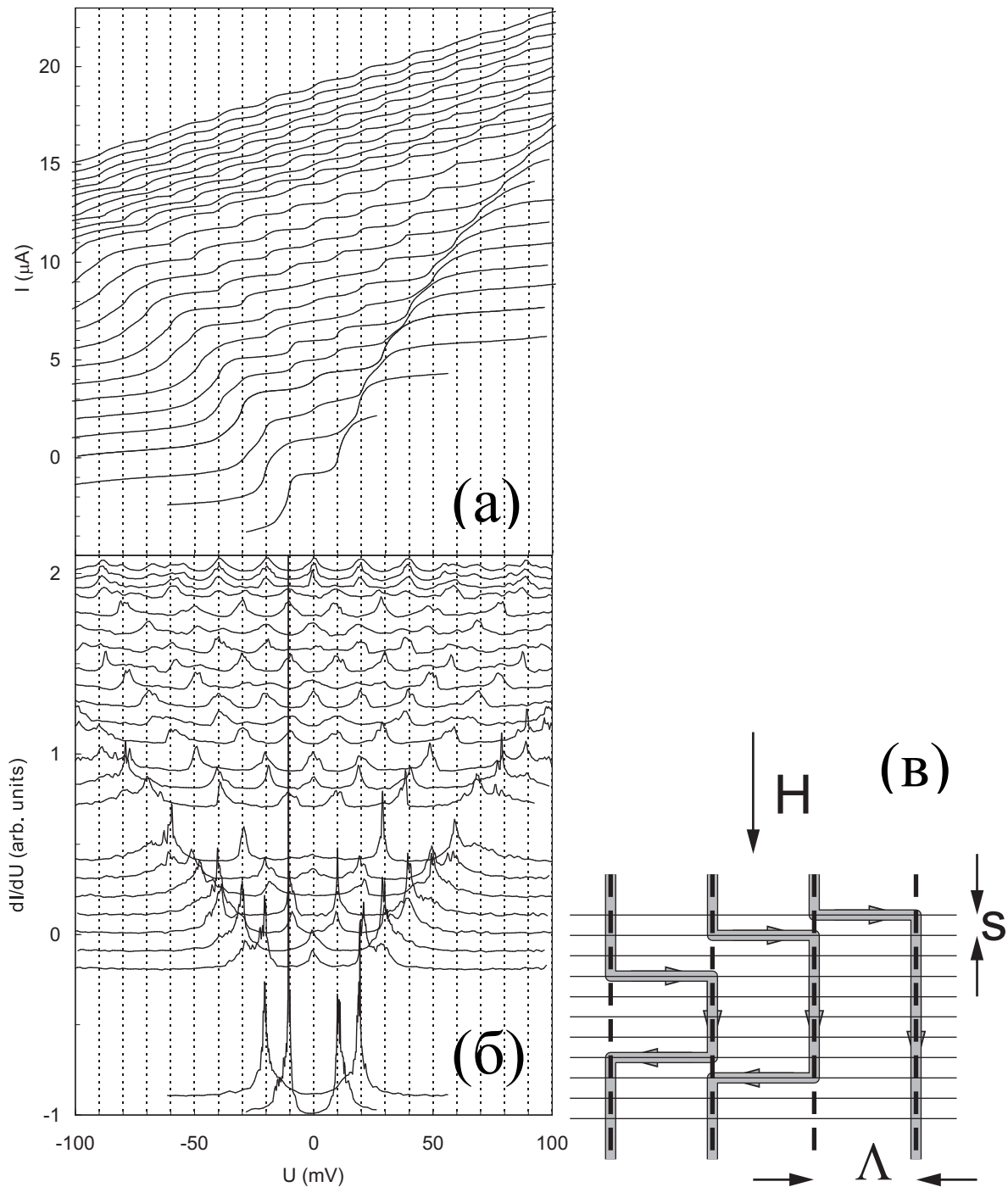


Рис. 7. Отклик на внешнее излучение с частотой 100 ГГц. (а) Семейство ВАХ и (б) соответствующих дифференциальных характеристик для мощности излучения (снизу вверх): -3.03; -1.15; 0.55; 2.23; 3.35; 4.41; 5.46; 6.36; 7.27; 8.17; 8.90; 9.63; 10.36; 10.93; 11.50; 12.07; 12.64; 12.88; 13.12; 13.44; 13.83; 14.23; 14.63; 15.03 дВт. Кривые смещены по вертикали.  $T = 5$  К. (в) схематическое изображение вихревых линий в стеклообразном состоянии.

Положение основной ступени на ВАХ по напряжению пропорционально корню из мощности, то есть амплитуде внешнего СВЧ излучения. В промежутке от 0 до этого напряжения заметны ступени другого типа, напоминающие ступени Шапиро, их положение хорошо описывается уравнением вида:

$$V = nN \frac{\hbar\omega}{2e} \quad (3),$$

где  $n$  – целое число от 1 до 9. Таким образом, соответствующая частота джозефсоновских колебаний для ступени с  $n = 9$  находится в области  $\sim 1$  ТГц. Для объяснения наблюдаемого типа отклика предложена следующая качественная модель. В условиях эксперимента абрикосовские вихревые линии находятся в перепутанном (стеклообразном) состоянии [10]. Это приводит к появлению сегментов джозефсоновских вихрей и антивихрей (Рис. 7в). Под действием силы Лоренца эти сегменты будут двигаться в противоположных направлениях, причем движение это будет происходить в периодическом потенциале, так как абрикосовские вихри выстраиваются в решетку с характерным периодом  $\Lambda \approx 0.15$  мкм, а между абрикосовскими и джозефсоновскими вихрями существует слабое взаимодействие притяжения [11]. То есть механическим аналогом системы является движение шарика по наклонной стиральной доске. Основная резонансная ступень возникает вследствие того, что сегмент вихря проходит под действием переменного тока за один период СВЧ колебаний  $n = k + m$  ямок периодического потенциала, где  $k$  и  $m$  есть число таких ямок в прямом и обратном направлении, соответственно. Ступени с меньшими  $n = k - m$  соответствуют резонансам, когда из-за постоянного смещения сегмент вихря не возвращается в начальную точку. Эксперимент указывает на возможность эффективного преобразования частоты гигагерцовой накачки в джозефсоновскую эмиссию ТГц диапазона.

**В заключении** сформулированы результаты диссертационной работы.

## Основные результаты диссертационной работы:

1. Развита методика, позволяющая получать совершенные образцы Вi-2212 с заданными размерами и числом элементарных джозефсоновских переходов для четырехзондовых измерений ВАХ.
2. Разработана и собрана установка, позволяющая ориентировать образец, помещенный в криостат, с точностью  $0.005^\circ$  относительно внешнего магнитного поля. Это позволило провести измерения ВАХ в режиме движения джозефсоновских вихрей в широком диапазоне температур и магнитных полей.
3. Предложен метод, позволяющий из диссипативных характеристик ВАХ в режиме движения джозефсоновских вихрей определить обе компоненты квазичастичной проводимости,  $\sigma_c$  и  $\sigma_{ab}$ . Метод впервые позволил определить значение  $\sigma_{ab}$  в сверхпроводящем состоянии из транспортных измерений.
4. На основе анализа силы взаимодействия решетки флюксонов с границами образца исследована диаграмма состояния джозефсоновских вихрей.
5. Реализована синхронизация отклика всех элементарных джозефсоновских переходов в образце с помощью внешнего параллельного или поперечного магнитного поля. В предложенной модели джозефсоновские колебания при этом возбуждаются в результате прохождения флюксонов через потенциальные барьеры на границах образца или на абрикосовских вихревых линиях. Получен отклик на внешнее излучение с частотой  $\sim 100$  ГГц, при этом показано, что частота джозефсоновских осцилляций может достигать  $\sim 1$  ТГц.

### Публикации по теме диссертации

- A1. Latyshev Yu.I., **Pavlenko V.N.**, Nevelskaya J.E., Monceau P., “Micron scale stacked structures fabricated from BSCCO 2212 single crystal whiskers”, Journal of Alloys and Compounds 1997, v.251, 236-239.
- A2. Latyshev Yu.I., Monceau P., **Pavlenko V.N.**, “Intrinsic Josephson effects on stacks fabricated from high quality BSCCO 2212 single crystal whiskers”, Physica C, 1997, v.293, 174-180.
- A3. Latyshev Yu.I., Monceau P., **Pavlenko V.N.**, “Intrinsic Josephson effects on BSCCO 2212 single crystal whiskers”, Physica C 1997, v.282-287, 387-390.
- A4. Yu.I. Latyshev, **V.N. Pavlenko**, S.-J. Kim, T. Yamashita, L.N. Bulaevskii, M.J. Graf, A.V. Balatsky, N. Morozov and M.P. Maley, «Interlayer tunneling of quasiparticles and Cooper pairs in Bi-2212 single crystal whiskers», Physica C, Vol. 341-348 (1-4) (2000), 1499-1502.
- A5. Yu.I. Latyshev, S.-J. Kim, **V.N. Pavlenko**, T. Yamashita and L.N. Bulaevskii, “Interlayer tunneling of quasiparticles and Cooper pairs in Bi-2212 from experiments on small stacks”, Physica C, 362 (1-4) (2001) pp. 156-163.
- A6. Yu.I. Latyshev, **V.N. Pavlenko**, S.-J. Kim and T. Yamashita, “Collective motion of Josephson vortex lattice in long stacked junction fabricated from Bi-2212 whisker”, Physica C, 362 (1-4) (2001) pp. 251-255.
- A7. Yu.I. Latyshev, A.E. Koshelev, **V.N. Pavlenko**, M.B. Gaifullin, T. Yamashita and Yuji Matsuda, “Novel features of Josephson flux flow in Bi-2212: contribution of in-plane dissipation, coherent response to mm-wave radiation, size effect”, Physica C, 367 (1-4) (2002) pp. 365-375.
- A8. Yu. I. Latyshev, **V. N. Pavlenko**, A. P. Orlov, X. Hu, Josephson vortex lattice melting in Bi-2212 probed by commensurate oscillations of Josephson flux-flow, Письма в ЖЭТФ, 2005, том 82, вып. 4, стр. 251–254.

- A9. Yu. I. Latyshev, **V. N. Pavlenko\***, and A. P. Orlov, Josephson Vortex Lattice Melting in Bi-2212, *ЖЭТФ*, 2007, том 132, вып. 1, стр. 265–267.
- A10. **V. N. Pavlenko**, Yu. I. Latyshev, J. Chen, M. B. Gaifullin, A. Irzhak, S.-J. Kim, and P. H. Wu, Collective Responses of Bi-2212 Stacked Junction to 100 GHz Microwave Radiation under Magnetic Field Oriented Along the *c*-Axis, *Письма в ЖЭТФ*, 2009, том 89, вып. 5-6, стр. 291–294.

### Цитированная литература

1. R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, P. Muller, *Phys. Rev. Lett.* 68, 2394. (1992).
2. Yu.I. Latyshev, S.-J. Kim, and T. Yamashita, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 9, 4312 (1999).
3. Yu.I. Latyshev, T. Yamashita, L.N. Bulaevskii, M.J. Graf, A.V. Balatsky, and M.P. Maley, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 5345 (1999).
4. J. R. Clem and M. W. Coffey, *Phys. Rev. B* 42, 6209 (1990).
5. L. N. Bulaevskii *et al.*, *Phys. Rev. B* 53, 14 601 (1996).
6. A.E. Koshelev, *Phys. Rev. B* 62, R3616 (2000).
7. S. Ooi, T. Mochiku, and K. Hirata, *Phys. Rev. Lett.* 89, 247002 (2002).
8. S. N. Artemenko, I. G. Gorlova, and Yu. I. Latyshev, *Phys. Lett. A* 138, 428 (1989).
9. X. Hu and M. Tachiki, *Phys. Rev. B* 70, 064 506 (2004).
10. M. B. Gaifullin, Yuji Matsuda, N. Chikumoto, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 84, 2945 (2000).
11. A. E. Koshelev, *Phys. Rev. Lett.* 83, 187 (1999).