

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РАН

На правах рукописи



Чигинев Александр Валерьевич

**Резонансное взаимодействие движущихся
джозефсоновских вихрей и собственных мод
массивов распределенных контактов**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН, Н.Новгород.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Курин Владислав Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Демиховский Валерий Яковлевич
Нижегородский Государственный
Университет им. Н.И. Лобачевского

доктор физико-математических наук
Жаров Александр Александрович
Институт физики микроструктур РАН,
Н.Новгород

Ведущая организация: Московский Педагогический
Государственный Университет

Защита состоится 27 января 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (603950,
г. Нижний Новгород, ГСП-105)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
микроструктур РАН

Автореферат разослан 27 декабря 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, проф.

К. П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Эффект Джозефсона [1, 2] представляет собой туннельный эффект в сверхпроводниках, заключающийся в формировании когерентного состояния сверхпроводящих электронов, находящихся по обе стороны потенциального барьера. Проявлением данного эффекта является протекание сверхпроводящего тока через два сверхпроводника, разделенных тонкой диэлектрической прослойкой. Его основными особенностями являются малые характерные времена, ограниченные величиной энергетической щели в сверхпроводниках, и высокая чувствительность к внешним электромагнитным полям. Устойчивый интерес к эффекту Джозефсона связан с его применением в генераторах электромагнитного излучения, в устройствах для измерения слабых магнитных полей, в элементах стандарта напряжения, в элементах логических схем. Обсуждается возможность применения эффекта Джозефсона в логических элементах устройств квантовой обработки информации.

Джозефсоновский контакт представляет собой структуру, состоящую из двух сверхпроводящих обкладок, разделенных диэлектрической прослойкой. Если хотя бы один из размеров такой структуры в плоскости прослойки является достаточно большим, то такую структуру называют распределенным, или длинным джозефсоновским контактом. Динамика распределенных контактов является существенно более сложной по сравнению с динамикой точечных контактов из-за появления пространственно-неоднородных решений. Многообразие решений, возникающих в распределенных джозефсоновских системах, может быть описано на языке взаимодействия линейных волн и джозефсоновских вихрей, поэтому изучение особенностей такого взаимодействия является актуальным с фундаментальной точки зрения. Кроме того, исследование взаимодействия вихрей и линейных волн важно для практических применений в связи с возможностью создания генераторов и усилителей на основе распределенных джозефсоновских переходов.

Динамика джозефсоновских вихрей и линейных волн является сложной и разнообразной в случае, когда распределенные джозефсоновские контакты объединены в многослойные структуры и способны взаимодействовать между собой. Существующая к настоящему моменту технология позволяет изготавливать такие структуры с высоким качеством и небольшим разбросом параметров. Кроме того, интерес к динамике джозефсоновских вихрей в многослойных структурах в значительной мере связан с тем, что некоторые высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с сильной анизотропией обладают внутренним эффектом Джозефсона, и являются в этом смысле естественными джозефсоновскими сверхрешетками.

Многослойные джозефсоновские структуры могут служить основой для

построения генераторов электромагнитного излучения, верхний предел по частоте которых ограничен величиной энергетической щели в сверхпроводниках и составляет величину порядка 1 ТГц для искусственных структур на основе ниобия и порядка 10 ТГц для слоистых ВТСП. Для обеспечения эффективной генерации электромагнитных волн из слоистых структур необходима синхронизация отдельных контактов системы, и в этой связи актуальной является проблема устойчивости движущихся решеток джозефсоновских вихрей в многослойных сверхпроводящих структурах.

В последнее время наблюдается возрождение интереса к исследованию динамики джозефсоновских вихревых решеток в слоистых сверхпроводниках, связанное с недавним обнаружением генерации электромагнитных волн с частотой около 1 ТГц из структуры на основе $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ [3]. Несмотря на значительные усилия теоретиков, механизм данного излучения остается непонятным. Возможной причиной этого является несовершенство моделей, традиционно используемых для описания джозефсоновской динамики слоистых сверхпроводников. Поэтому развитие теории, описывающей динамику джозефсоновских вихрей в слоистых ВТСП, является актуальной задачей.

Настоящая диссертация посвящена исследованию эффектов взаимодействия движущихся джозефсоновских вихрей и линейных мод систем, основанных на распределенных переходах Джозефсона. В работе изучается возбуждение одиночными вихрями и вихревыми решетками линейных волн со сложной дисперсией, которая возникает как из-за наличия внешних электродинамических систем, так и из-за сложной кристаллической структуры исследуемых материалов. При рассмотрении этих задач используются простые представления для сверхпроводящего тока и тока квазичастиц, и основное внимание обращается на электромагнитное взаимодействие вихрей и линейных мод.

Цель диссертационной работы

- исследование влияния внешних электродинамических систем на динамику вихрей в длинных джозефсоновских контактах и джозефсоновских сверхрешетках;
- развитие теории, описывающей взаимодействие линейных волн и джозефсоновских вихрей в слоистых высокотемпературных сверхпроводниках;
- изучение влияния внутренних резонансов на динамику решеток джозефсоновских вихрей в слоистых сверхпроводниках.

Научная новизна

Проведено исследование черенковского излучения джозефсоновского вихря в длинном контакте, связанном с полосковой линией, без предположения о малости величины связи контакта и полосковой линии. Отсутствие малости данной связи приводит к изменению формы джозефсоновского вихря в контакте, которое было учтено в работе.

Впервые исследована устойчивость джозефсоновской вихревой решетки в слоистой структуре, связанной с пассивной областью, с учетом индуктивной связи между слоями. Это расширяет применимость результатов главы также на случай слоистых ВТСП, в которых величина индуктивной связи велика и является неизменяемой характеристикой материала.

Впервые построена модель гидродинамического типа, на равных основаниях описывающая взаимодействие различных типов линейных волн в слоистых ВТСП с джозефсоновскими вихрями. Использован оригинальный подход к построению модели, позволивший учесть пространственную дисперсию электронов, и сохранить симметрию исходных уравнений в окончательной формулировке модели.

Впервые в численном эксперименте продемонстрировано возбуждение фононных и гибридных мод движущейся решеткой джозефсоновских вихрей в слоистых сверхпроводниках.

Практическая значимость

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для построения генераторов электромагнитного излучения терагерцового диапазона на основе слоистых сверхпроводников, для повышения мощности и улучшения спектральных характеристик существующих генераторов на основе распределенных джозефсоновских структур, а также для развития методов джозефсоновской спектроскопии сверхпроводящих высокотемпературных соединений.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Распределенный джозефсоновский контакт, электродинамически связанный с полосковой линией, описывается нелокальным во времени и пространстве уравнением типа синус-Гордона. Наличие полосковой линии, электродинамически связанной с распределенным джозефсоновским переходом, приводит к такому изменению дисперсионной характеристики линейных волн в системе, что становится выполнимым условие черенковского синхронизма между движущимся вихрем и линейной волной. В результате при определенных скоростях вихря возникает черенковское излучение линейных волн вихрем, проявляющееся в появлении ступенек на вольт-амперной характеристике длинного контакта с полосковой линией.

2. Наличие замедляющей системы, электродинамически связанной с многослойным распределенным джозефсоновским переходом, приводит к устойчивости и спонтанному установлению синфазного режима движения решетки джозефсоновских вихрей в определенном диапазоне скоростей вихревой решетки. При этом диапазон скоростей решетки, при которых достигается ее устойчивость, зависит от степени замедления электромагнитной волны замедляющей системой.

3. Взаимодействие движущейся решетки джозефсоновских вихрей и собственных мод слоистого сверхпроводника может быть описано в рамках предложенной единой модели гидродинамического типа. Влияние нормальных электронов и дополнительных степеней свободы, таких как фононы, учитывается в данной модели с помощью соответствующих выражений для диэлектрических восприимчивостей. Линейные моды возбуждаются движущейся вихревой решеткой, что приводит к появлению ступеней на ВАХ слоистых сверхпроводников с движущейся решеткой джозефсоновских вихрей.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на 2-й международной конференции по сверхпроводящей электронике, Осака, Япония, 2001; на международной конференции по физике и применениям внутреннего эффекта Джозефсона, Поммерсфельден, Германия, 2002; на XII научной школе «Нелинейные волны – 2004», Нижний Новгород, Россия, 2004; на 2-й международной конференции “Frontiers of Nonlinear Physics”, Нижний Новгород – Санкт-Петербург, Россия, 2004; на XIII научной школе «Нелинейные волны – 2006», Нижний Новгород, Россия, 2006; на X ежегодном симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2006; на 5-м международном симпозиуме по внутреннему эффекту Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках, Лондон, Великобритания, 2006; на 2-й международной конференции «Фундаментальные проблемы сверхпроводимости ФПС-06», Звенигород, Россия, 2006; на международной конференции по теоретической физике “Dubna–Nano 2008”, Дубна, Россия, 2008; на XIII ежегодном симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2009.

Публикации.

Основное содержание диссертационной работы отражено в пяти статьях в реферируемых научных журналах [A1–A5] и трудах научных конференций [A6–A18].

Личный вклад автора

— равнозначный (совместно с научным руководителем В.В. Куриным, N. Flytzanis, N. Lazarides, J.-G. Caputo) в вывод интегро-дифференциального уравнения, описывающего динамику распределенного джозефсоновского перехода, связанного с полосковой линией, исследование дисперсионных характеристик исследуемой системы, разработку схемы численного моделирования [A1];

— равнозначный (совместно с научным руководителем В.В. Куриным) в вывод модели, описывающей динамику многослойного джозефсоновского перехода, связанного с внешней волноведущей системой, исследование устойчивости синфазного режима в исследуемой структуре, разработку схемы численного моделирования, и интерпретацию результатов численного эксперимента по расчету вольт-амперной характеристики исследуемой системы [A2,

А3, А6-А10];

— определяющий в написание компьютерной программы для численного моделирования динамики решеток джозефсоновских вихрей в многослойном распределенном переходе Джозефсона, соединенном с внешней полосковой линией, и проведение с ее помощью численных расчетов вольт-амперной характеристики исследуемой системы [А3, А9, А10];

— равнозначный (совместно с научным руководителем В.В. Куриным) в вывод модели гидродинамического типа, описывающей совместную динамику джозефсоновских вихрей и линейных мод различной природы в слоистых высокотемпературных сверхпроводниках, анализ дисперсионных характеристик исследуемой системы, разработку схемы численного моделирования, и интерпретацию результатов проведенных численных расчетов [А4, А5, А11-А18];

— определяющий в написание компьютерной программы для численного моделирования совместной динамики решеток джозефсоновских вихрей и линейных волн в слоистых сверхпроводниках, и проведение на основе выведенной модели численных расчетов вольт-амперных характеристик слоистого сверхпроводника с движущейся решеткой джозефсоновских вихрей [А16-А18].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации, и списка цитированной литературы.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Рассмотрены основные уравнения, описывающие эффект Джозефсона, и их важнейшие решения, и введены ключевые определения, использующиеся при описании джозефсоновских структур.

В первой главе исследуется динамика джозефсоновского вихря в длинном джозефсоновском переходе, электродинамически связанном с латеральной полосковой линией (рис. 1). В качестве основы для описания данной структуры используется система, состоящая из двумерного уравнения синус-Гордона, описывающего джозефсоновский контакт, и двумерного волнового уравнения, описывающего динамику полосковой линии. Данные уравнения дополнены граничными условиями, следующими из непрерывности токов и напряжений на границах контакта и полосковой линии.

С помощью решения линейного волнового уравнения, описывающего полосковую линию, и с учетом малой ширины джозефсоновского перехода, исходная система двумерных уравнений преобразована к одномерному интегро-

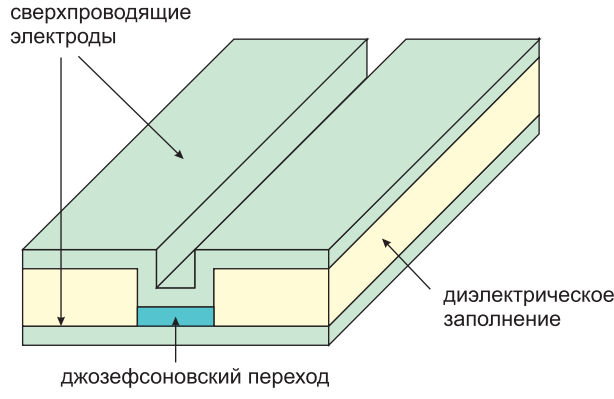


Рис. 1. Схематическое изображение распределенного джозефсоновского контакта, встроенного в полосковую линию.

дифференциальному уравнению вида

$$D(\omega, k)\theta_{k,\omega} + [\sin \theta(x, t)]_{k,\omega} = \tilde{j}_{k,\omega}. \quad (1)$$

где линейный оператор записывается следующим образом

$$D(\omega, k) = k^2 - \omega^2 + \frac{2\kappa}{\alpha w} \tanh(\kappa w'). \quad (2)$$

Здесь $\theta(x, t)$ — джозефсоновская разность фаз, w — ширина джозефсоновского контакта, w' — ширина полосковой линии.

Путем разложения линейного оператора $D(\omega, k)$ в бесконечное произведение и учета двух сомножителей данного произведения, интегро-дифференциальное уравнение (1) преобразовывается в квазистатическом приближении к эволюционному уравнению, используемому далее для численного моделирования исследуемой системы.

Исследованы дисперсионные характеристики линейных волн в распределенном джозефсоновском переходе, связанном с внешней полосковой линией. Исходя из условия черенковского синхронизма $\omega(k_r) = k_r u$ и условия резонансного возбуждения моды в кольцевом резонаторе $k_r \equiv k_m = 2\pi m/\ell$ получено неявное выражение для скоростей джозефсоновского вихря, при которых будут возникать черенковские ступени на ВАХ структуры. В явном виде резонансные скорости могут быть записаны в пределе большой скорости электромагнитной волны в полосковой линии:

$$u_m = \frac{\omega_m}{k_m}, \quad \omega_m^2 \equiv \omega^2(k_m) = 1 + \left(\frac{2\pi m}{\ell}\right)^2 + \frac{4\pi m}{w\ell} \tanh\left(\frac{2\pi m}{\ell} w'\right). \quad (3)$$

Проведено численное моделирование динамики джозефсоновского вихря в распределенном джозефсоновском переходе, связанном с полосковой линией. Пример профиля джозефсоновского вихря с черенковским излучением

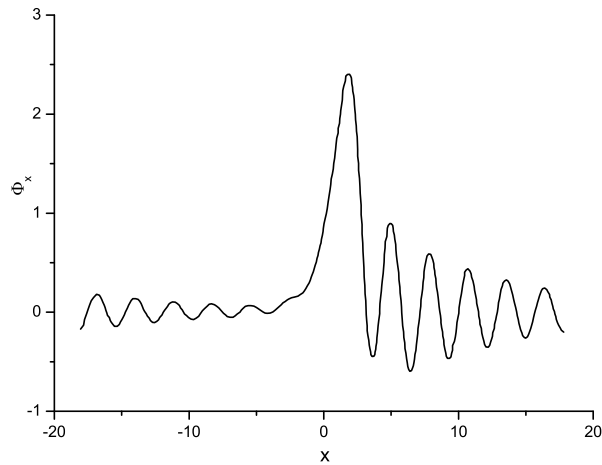


Рис. 2. Профиль джозефсоновского вихря с черенковским излучением.

показан на рис. 2. Видно, что вихрь имеет осциллирующий «хвост», появление которого связано с черенковским излучением.

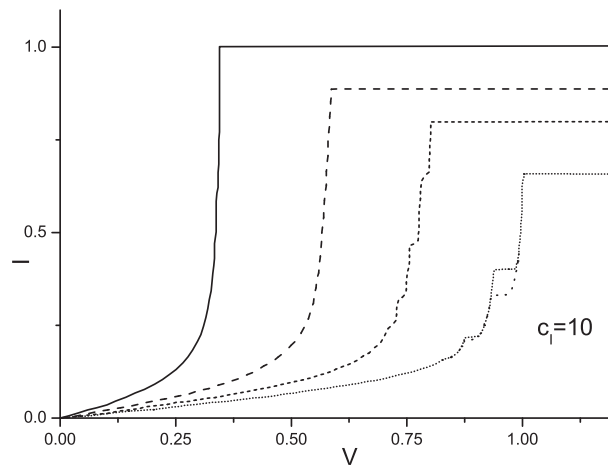


Рис. 3. Типичный вид вольт-амперных кривых распределенного джозефсоновского перехода, связанного с полосковой линией. Видны черенковские ступени и гистерезис одной из резонансных кривых.

Как и было предсказано путем анализа дисперсионных характеристик, на ВАХ структуры имеются ступени. Их положение находится в хорошем соответствии с выражением (3) для резонансных скоростей вихря. В работе исследованы зависимости ступеней на ВАХ от различных параметров системы, таких как скорость электромагнитной волны в полосковой линии, параметра затухания, отношения толщин джозефсоновского контакта и полосковой линии, и количества вихрей, захваченных в джозефсоновский переход. Типичный вид ВАХ с черенковскими ступенями показан на рис. 3.

Результаты первой главы опубликованы в статье [A1].

Во второй главе теоретически исследована устойчивость синфазного режима движения джозефсоновских вихрей в многослойном распределенном джозефсоновском контакте, электродинамически связанном с замедляющей

системой. Как и в главе 1, в качестве замедляющей системы выбрана по-

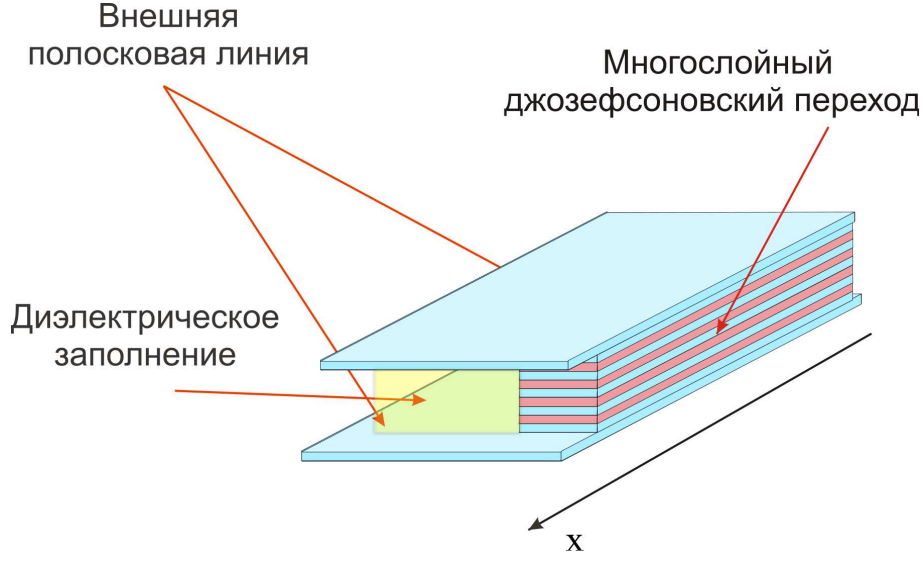


Рис. 4. Схематическое изображение джозефсоновской многослойной структуры, связанной с внешней полосковой линией

лосковая линия с диэлектрическим заполнением (рис. 4). Описание данной структуры построено на основе системы уравнений типа синус-Гордона, описывающих динамику джозефсоновских вихрей в многослойном длинном джозефсоновском контакте с учетом индуктивной связи между слоями [4, 5], дополненном «глобальной» связью за счет внешней полосковой линии

$$\sum_{m=1}^N K_{mn} \{ \partial_t^2 \theta_m + \gamma \partial_t \theta_m + \sin \theta_m - j_e + \hat{G} \sum_k \theta_k \} = \partial_x^2 \theta_n, \quad n = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где K_{mn} — матрица, описывающая взаимодействие соседних распределенных контактов многослойной структуры за счет проникновения магнитного поля через тонкие сверхпроводящие слои.

С помощью системы уравнений (4) в работе теоретически исследована устойчивость решения, описывающего синфазный режим движения джозефсоновских вихрей в многослойной структуре (рис. 5). Для исследования устойчивости мы искали решение системы (4) в виде $\theta_n(x, t) = \theta_0(x - ut) + \tilde{\theta}_n(x, t)$, где θ_0 — решение, описывающее синфазный режим, получая при этом систему линеаризованных уравнений для малых возмущений $\tilde{\theta}_n$

$$\sum_{m=1}^N K_{mn} \{ \partial_t^2 \tilde{\theta}_m + \gamma \partial_t \tilde{\theta}_m + \tilde{\theta}_m \cdot \cos \theta_0 + \hat{G} \sum_k \tilde{\theta}_k \} = \partial_x^2 \tilde{\theta}_n, \quad n = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Поскольку линейная система (5) содержит периодический множитель, ее решение может быть представлено в виде разложения по собственным модам

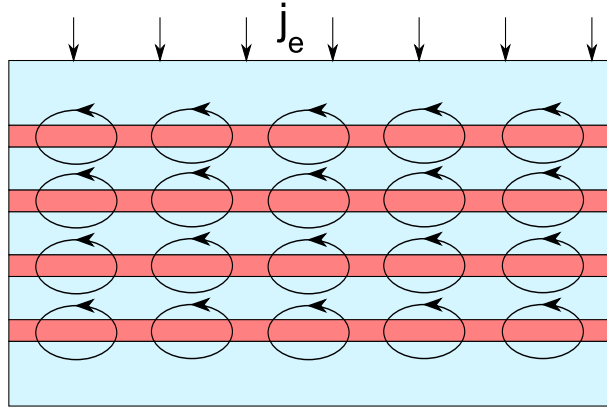


Рис. 5. Синфазный режим движения джозефсоновских вихрей в многослойном распределенном джозефсоновском переходе.

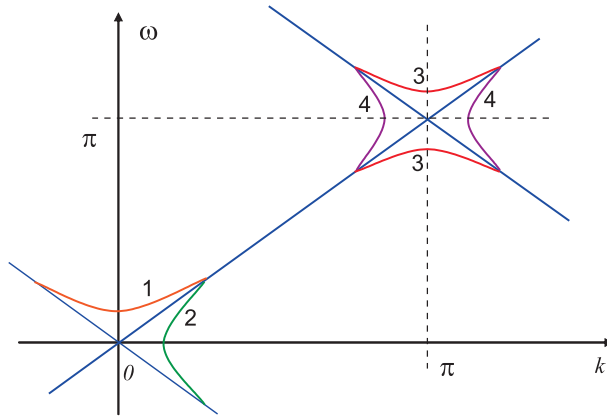


Рис. 6. Возможные варианты поведения дисперсионной характеристики линейных волн возмущений прямоугольной вихревой решетки. Цифрами обозначены варианты поведения дисперсионной кривой, соответствующие: 1 — длинноволновой устойчивости, 2 — длинноволновой неустойчивости, 3 — коротковолновой устойчивости, 4 — коротковолновой неустойчивости.

с определенными квазиимпульсами и квазичастотами, связанными дисперсионной зависимостью. Ввиду малости периодического множителя возмущения, испытываемые спектром из-за брэгговских резонансов, будут особенно заметны вблизи центра и краев зоны Бриллюэна, и могут быть вычислены во втором порядке по малому параметру $\mu \propto h^{-2}$, где h — безразмерное внешнее магнитное поле. На рис. 6 показаны возможные варианты расщепления спектра решений системы (5) в центре зоны Бриллюэна и на ее краях. Ход дисперсионной характеристики, обозначенный на рис. 5 цифрой 1, соответствует устойчивости синфазного режима по отношению к длинноволновым возмущениям. Поведение кривой, обозначенное цифрой 2, соответствует неустойчивости по отношению к длинноволновым возмущениям. Цифрой 3 обозначено расщепление дисперсионной кривой, соответствующее устойчивости по отношению к возмущениям с малой длиной волны, и цифрой 4 — ход кривой, соответствующий коротковолновой неустойчивости.

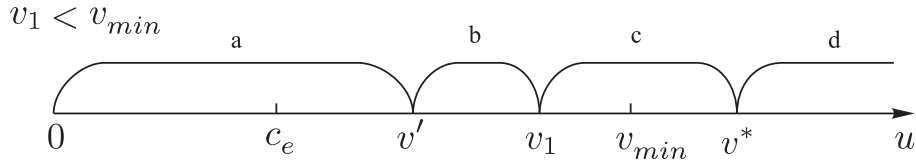


Рис. 7. Диаграмма устойчивости синфазного режима при $v_1 < v_{min}$. Буквами обозначены: а — область длинноволновой неустойчивости, b — область абсолютной устойчивости, с — область параметрической неустойчивости, d — область с подавленной параметрической неустойчивостью.

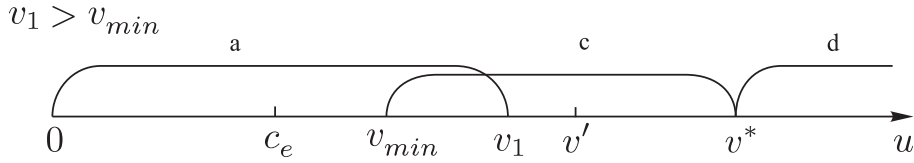


Рис. 8. Диаграмма устойчивости синфазного режима при $v_1 > v_{min}$. Обозначения различных областей устойчивости как на рис. 7

В результате исследования устойчивости установлено, что синфазный режим движения вихрей является устойчивым при условии, что внешняя электродинамическая система замедляет симметричную линейную моду в структуре настолько, что она становится самой медленной по сравнению с модами другой симметрии. Устойчивость синфазного режима при этом достигается в диапазоне скоростей вихревой решетки, определяемом параметрами системы (рис. 7).

В случае, когда скорость симметричной моды не является наименьшей, область устойчивости прямоугольной вихревой решетки исчезает (рис. 8). Кроме того, показано, что при больших скоростях синфазный режим приобретает устойчивость из-за подавления параметрической неустойчивости за счет затухания.

На основе выведенной системы проведен численный эксперимент, продемонстрировавший спонтанное установление синфазного режима движения вихрей в многослойной структуре с внешней замедляющей системой. Показано, что синфазный режим устанавливается с определенного значения внешнего тока. Продемонстрировано, что данный режим характеризуется большой амплитудой переменного электромагнитного поля, что делает его перспективным для построения генераторов электромагнитного излучения на многослойных распределенных переходах Джозефсона.

Результаты второй главы опубликованы в статьях [А2, А3] и трудах конференций [А6-А10].

В третьей главе выведена феноменологическая модель гидродинамического типа, описывающая динамику джозефсоновских вихрей в слоистых ВТСП, и учитывающей на равных основаниях линейные моды разной природы, такие как электромагнитные, плазменные, фононные, и другие моды.

Для вывода искомой системы слоистый сверхпроводник изначально рассматривался как анизотропная плазма. В качестве исходных уравнений использовались уравнения Максвелла, дополненные материальными уравнениями для частиц. Описание динамики сверхпроводящих и нормальных электронов построено на двухжидкостной гидродинамической модели. Учет собственных мод слоистого сверхпроводника проведен на примере фононных мод, при этом уравнения движения ионов записывались в адиабатическом приближении Борна-Оппенгеймера.

Для перехода от линейной системы уравнений в континуальном пределе к нелинейной системе, описывающей слоистую структуру, была проделана процедура дискретизации с одновременным восстановлением нелинейного члена, описывающего джозефсоновский сверхток. Дискретизация заключалась в замене в системе уравнений пространственных производных вдоль координаты, направленной поперек слоев, конечными разностями. В результате получилась искомая система уравнений.

$$\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} E_{xn} = -\frac{\Phi_0}{2\pi s^2} \frac{\partial}{\partial x} (\theta_n - \theta_{n-1}) + \frac{4\pi}{c} \frac{\lambda_{ab}^2}{s^2} \Delta_n j_{xn}^s - \frac{4\pi}{c} (j_{xn}^s + j_{xn}^n + j_{xn}^i), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} E_{zn} = \\ & = \frac{\Phi_0}{2\pi s} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \theta_n - \frac{4\pi \lambda_{ab}^2}{cs} \frac{\partial}{\partial x} (j_{xn+1}^s - j_{xn}^s) - \frac{4\pi}{c} (j_c \sin \theta_n + j_{zn}^n + j_{zn}^i - j_{ext}), \quad (7) \end{aligned}$$

$$\frac{4\pi \lambda_{ab}^2}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} j_{xn}^s = E_{xn} - \frac{sr_d^2}{d_s} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} D_{xn} + \frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial x} (D_{zn} - D_{zn-1}) \right), \quad (8)$$

$$\frac{\Phi_0}{2\pi cs} \frac{\partial}{\partial t} \theta_n = E_{zn} - \frac{sr_d^2}{d_s} \left(\frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial x} (D_{xn+1} - D_{xn}) + \frac{1}{s^2} \Delta_n D_{zn} \right), \quad (9)$$

$$\mathbf{D} = \hat{\varepsilon} \mathbf{E}, \quad \mathbf{j}^{n,i} = \frac{\partial}{\partial t} (\hat{\chi}_{n,i} \mathbf{E}), \quad \hat{\varepsilon} = \hat{I} + 4\pi \hat{\chi}_n + 4\pi \hat{\chi}_i. \quad (10)$$

Модель, представленная уравнениями (6), (7), (8), (9), (10), описывает взаимодействие джозефсоновских вихрей с электромагнитными волнами, плазмонами, фононами, и др., на равных основаниях. Данная система имеет необходимую симметрию по отношению к перестановке координат x и z , и описывает пространственную дисперсию, вызванную электронными и ионными степенями свободы в системе. Кроме того, данная система позволяет описывать влияние линейных волн любой природы на динамику джозефсоновских вихрей в слоистом сверхпроводнике, путем включения соответствующих восприимчивостей в выражение для диэлектрической проницаемости $\hat{\varepsilon}$. Например, как выяснилось, в недавно открытых сверхпроводниках на основе FeAs [6–8] магнитные степени свободы могут играть важную роль. Предложенный нами подход позволяет включить эти степени свободы в нашу общую схему.

Предложенная нами модель содержит в качестве предельных случаев теории, предложенные ранее для описания джозефсоновской динамики слоистых ВТСП, такие как модель с магнитной связью между слоями [4, 5], с зарядовой связью [9], модель, учитывающая квазичастичный ток вдоль слоев [10], инфракрасные фононы, поляризованные поперек слоев [11, 12], и т. д. Результаты работ [13, 14], в которых сделана попытка объединения моделей с магнитной и зарядовой связью, также воспроизводятся в рамках нашей модели. Кроме того, предложенная модель содержит дополнительные члены в уравнениях (8) и (9), содержащие $\partial/\partial x$, и отсутствующие в [13, 14]. Хотя эти члены и малы вдали от резонансов, их роль может быть существенной при приближении джозефсоновской частоты к частоте фонона или плазмона.

На основе предложенной модели проведено численное моделирование динамики решетки джозефсоновских вихрей в слоистых ВТСП. Продемонстрировано возбуждение мод Свихарта различной поперечной симметрии движущейся вихревой решеткой, и связанные с ним резонансы на ВАХ системы, перегруппировка вихрей в решетке, и эффект удвоения пространственного периода вихревой решетки. Показано возбуждение фононных и гибридных мод решеткой вихрей, и связанные с ними резонансы на ВАХ. Продемонстрировано, что зарядовая связь, несмотря на свою малость, существенно усложняет динамику решетки джозефсоновских вихрей в слоистых ВТСП, приводя к различию в скоростях движения вихревых цепочек в различных контактах структуры.

Результаты третьей главы опубликованы в статьях [A4, A5] и трудах конференций [A11-A18].

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Рассмотрена динамика джозефсоновского вихря в распределенном джозефсоновском контакте с пассивной областью. Показано, что наличие пассивной области приводит к тому, что уравнение, описывающее динамику такой системы, является нелокальным во времени и в пространстве. Путем численного эксперимента показано наличие ступеней на ВАХ рассматриваемой системы, обусловленных наличием черенковского излучения движущегося джозефсоновского вихря. Исследованы зависимости положений и амплитуд данных ступеней от параметров системы.
2. Проведено аналитическое исследование устойчивости прямоугольной решетки джозефсоновских вихрей в многослойной структуре из распределенных джозефсоновских контактов, электродинамически связанных с замедляющей системой в виде полосковой линии. Показано, что устойчивость прямоугольной вихревой решетки достигается при условии, что

скорость электромагнитной волны в пассивной области меньше характеристической скорости симметричной свихартовской моды в слоистой структуре.

3. Путем численного эксперимента показано, что при достаточном замедлении электромагнитной волны во внешней полосковой линии происходит спонтанное установление синфазного режима движения джозефсоновских вихрей в многослойной структуре из длинных контактов. Данный режим характеризуется большой амплитудой переменного электромагнитного поля и может быть использован для генерации электромагнитного излучения.
4. Предложена модель гидродинамического типа, описывающая совместно джозефсоновские вихри и линейные волны любой природы в слоистых сверхпроводниках. Данная модель объединяет описания, предложенные ранее в литературе, и может быть сведена к ним в предельных случаях. Численный расчет, выполненный на основе предложенной модели, продемонстрировал наличие ступеней на ВАХ, связанных с возбуждением волн Свихарта, фононных и гибридных мод решеткой джозефсоновских вихрей, движущейся под действием внешнего тока в слоистом сверхпроводнике.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Flytzanis N., Lazarides N., Chiginev A. et al. Dynamics of fluxons in narrow window junctions // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 4201.
- A2. Chiginev A. V., Kurin V. V. Instability of a rectangular vortex lattice in a stack of two long Josephson junctions // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66. P. 052510.
- A3. Chiginev A. V., Kurin V. V. In-phase vortex flow and superradiance in a Josephson superlattice embedded in a waveguide // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. P. 214523.
- A4. Курин В. В., Чигинев А. В. Взаимодействие оптических фононов и джозефсоновских вихрей в слоистых сверхпроводниках // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. С. 16–20.
- A5. Chiginev A. V., Kurin V. V. Interaction between optical phonons and Josephson vortices in layered superconductors // Supercond. Sci. Tech. 2007. Vol. 20. P. S34.

- A6. Kurin V. V., Chiginev A. V., Shereshevsky I. A. et al. Superradiation in Josephson superlattice coupled in a slow wave system // 8th International Superconductive Electronics Conference, Osaka, Japan, Extended Abstracts. Osaka, Japan: 2001. — June. Pp. 437–438.
- A7. Chiginev A. V., Kurin V. V. Vortex motion in multilayer Josephson structure coupled with external waveguide // Abstracts of Euroconference on the Physics and Applications of the Intrinsic Josephson Effect. Pommersfelden, Germany: 2002. — June.
- A8. Chiginev A. V., Kurin V. V. Moving vortex lattices in a stack of long Josephson junctions connected with a stripline: theory and simulation // 6th EU-CAS book of abstracts (2003). 2003.
- A9. Чигинев А. В. Синфазный режим движения джозефсоновских вихрей в многослойной сверхпроводящей структуре, соединенной с полосковой линией // Тезисы докладов конференции молодых ученых «Нелинейные волновые процессы» в рамках XII научной школы «Нелинейные волны – 2004». Н. Новгород: 2004. — февраль.
- A10. Kurin V. V., Chiginev A. V. Dynamic phase transitions in lattices of Josephson vortices moving in layered superconductors // “Frontiers of Nonlinear Physics”, Proceedings of the 2nd International Conference. N. Novgorod-St. Petersburg, Russia: 2004. — July.
- A11. Курин В. В., Чигинев А. В. Динамика джозефсоновских вихрей в слоистых сверхпроводниках // Труды XIII научной школы «Нелинейные волны - 2006». Н. Новгород: 2006. — март.
- A12. Курин В. В., Чигинев А. В. Взаимодействие оптических фононов и джозефсоновских вихрей в слоистых сверхпроводниках // Материалы X ежегодного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника». Н. Новгород: 2006. — март. С. 73–76.
- A13. Kurin V. V., Chiginev A. V. Role of Optical Phonons in Vortex Dynamics in High-Temperature Superconductors with Intrinsic Josephson Effect // Plasma-2006: 5-th International Symposium on the Intrinsic Josephson Effect in High-Tc superconductors, Programme and Abstracts. London: 2006. — July. Pp. 15–16.
- A14. Курин В. В., Чигинев А. В. Влияние оптических фононов на динамику джозефсоновских вихревых решеток в слоистых сверхпроводниках //

Труды Второй международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС-06». Звенигород: 2006. — октябрь. С. 176–177.

- A15. Chiginev A. V., Kurin V. V. Interaction between optical phonons and Josephson vortices in layered superconductors // Abstracts of the Applied Superconductivity Conference “ASC-2006”. Seattle: 2006. — August. P. 77.
- A16. Kurin V. V., Chiginev A. V. Vortex motion and wave excitation in layered superconductors with intrinsic Josephson effect // Proceedings of the International conference on Theoretical Physics “Dubna-Nano2008”. Dubna: 2008. — July.
- A17. Курин В. В., Чигинев А. В. Взаимодействие линейных волн и движущихся решеток джозефсоновских вихрей в слоистых сверхпроводниках // Труды Третьей международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС-08». Звенигород: 2008. — октябрь. С. 100–101.
- A18. Курин В. В., Чигинев А. В. Возбуждение линейных волн в слоистых сверхпроводниках движущимися решетками джозефсоновских вихрей // Материалы XIII ежегодного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника». Н. Новгород: 2009. — март. С. 157–158.

Цитированная литература

1. Бароне А., Патерно Д. Эффект Джозефсона: физика и применения, пер. с англ. Москва, Мир, 1984.
2. Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. Москва, 1985.
3. Ozyuzer L., Koshelev A. E., Kurter C. et al. Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors // Science. 2007. Vol. 318. P. 1291.
4. Sakai S., Bodin P., Pedersen N. F. Fluxons in thin-film superconductor-insulator superlattices // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73. P. 2411.
5. Bulaevskii L. N., Zamora M., Baeriswyl D. et al. Time-dependent equations for phase differences and a collective mode in Josephson-coupled layered superconductors // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. P. 12831.
6. Садовский М. В. Высокотемпературная сверхпроводимость в слоистых соединениях на основе железа // УФН. 2008. Т. 178. С. 1243.

7. Ивановский А. Л. Новые высокотемпературные сверхпроводники на основе оксиарсенидов редкоземельных и переходных металлов и родственных фаз: синтез, свойства и моделирование // УФН. 2008. Т. 178. С. 1273.
8. Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З. Новый класс высокотемпературных сверхпроводников в FeAs-системах // УФН. 2008. Т. 178. С. 1307.
9. Koyama T., Tachiki M. I-V characteristics of Josephson-coupled layered superconductors with longitudinal plasma excitations // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. P. 16183.
10. Koshelev A. E. Role of in-plane dissipation in dynamics of a Josephson vortex lattice in high-temperature superconductors // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62. P. R3616.
11. Helm C., Preis C., Forsthofer F. et al. Coupling between Phonons and Intrinsic Josephson Oscillations in Cuprate Superconductors // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 79. P. 737.
12. Helm C., Preis C., Walter C., Keller J. Theory for the coupling between longitudinal phonons and intrinsic Josephson oscillations in layered superconductors // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62. P. 6002.
13. Ju H. Kim, Pokharel J. Collective Josephson vortex dynamics in long Josephson junction stacks // Physica C. 2003. Vol. 384. P. 425.
14. Machida M., Sakai S. Unified theory for magnetic and electric field coupling in multistacked Josephson junctions // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. P. 144520.

ЧИГИНЕВ Александр Валерьевич

**РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВИЖУЩИХСЯ
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ВИХРЕЙ И СОБСТВЕННЫХ МОД
МАССИВОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОНТАКТОВ**

Автореферат

Подписано к печати 23.12.2010 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики Микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105