

На правах рукописи



Беспалов Антон Андреевич

**Вихревые конфигурации и подвижность
вихревых линий в анизотропных и магнитных
сверхпроводниках**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН), Нижний Новгород

Научный руководитель: Мельников Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Минеев Владимир Петрович,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
Института теоретической физики им.
Л.Д. Ландау РАН

Сатанин Аркадий Михайлович,
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры теорети-
ческой физики Нижегородского государ-
ственного университета им. Н.И. Лоба-
чевского

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д. В. Скобель-
цына Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова

Защита состоится « » декабря 2014 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород.

Автореферат разослан « » 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Гайкович К. П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Наличие конечного электросопротивления у сверхпроводников второго рода в вихревом состоянии связано с движением вихревых линий. Транспортный ток, протекающий по сверхпроводнику, приводит вихри в движение посредством так называемой силы Лоренца, равной

$$\mathbf{F}_L = \frac{\Phi_0}{cB_0} \mathbf{j}_{\text{tr}} \times \mathbf{B}_0. \quad (1)$$

Здесь Φ_0 — квант магнитного потока, c — скорость света, \mathbf{B}_0 — среднее магнитное поле в сверхпроводнике, а \mathbf{j}_{tr} — плотность транспортного тока. В режиме стационарного течения вихрей эта сила уравновешена силой вязкого трения, равной $-\eta \mathbf{V}_L$, где \mathbf{V}_L — скорость движения вихрей, а η — коэффициент вязкости. Проводимость материала σ в вихревом состоянии определяется именно этим коэффициентом:

$$\sigma = \frac{c^2 \eta}{B_0 \Phi_0}. \quad (2)$$

Следует отметить, что реальные вольт-амперные характеристики сверхпроводников второго рода не являются линейными. По сверхпроводнику может без диссипации протекать ток с плотностью, не превосходящей некоторое критическое значение. Причина этого явления заключается в том, что в сверхпроводнике имеются дефекты, способные притягивать вихри — так называемые центры пиннинга. Вихри, захваченные дефектами, остаются неподвижными при протекании малого тока по сверхпроводнику и, следовательно, не дают вклада в диссипацию. Имплантация искусственных протяжённых центров пиннинга в сверхпроводник может привести к очень сильному увеличению критического тока, если вихри ориентированы вдоль дефектов (см., например, [1]).

Таким образом, для количественной интерпретации экспериментальных данных по электросопротивлению сверхпроводников второго рода требуются теоретические оценки силы пиннинга и вязкости η . В частности, особенно актуальной является задача о расчёте тензоров вязкости $\hat{\eta}$ и проводимости $\hat{\sigma}$ в анизотропном случае в связи с возможностью применения результатов таких расчётов к высокотемпературным купратным сверхпроводникам и недавно открытым слоистым сверхпроводникам на основе железа [2], обладающим сильной анизотропией.

Представляет интерес также анализ статических и динамических свойств вихрей в более сложных структурах, таких как гибридные системы сверхпроводник-ферромагнетик (SF). Несмотря на то, что подобные системы исследуются уже на протяжении нескольких десятилетий, в них по-прежнему

обнаруживаются новые и необычные явления. За последние 14 лет было открыто несколько удивительных материалов, в которых сверхпроводимость и ферромагнетизм сосуществуют в объёме образца: UGe_2 [3] (критическая температура $T_c = 0.7$ K), URhGe [4] ($T_c = 0.25$ K), UCoGe [5] ($T_c = 0.8$ K) и допированный EuFe_2As_2 [6] ($T_c = 25$ K). Считается, что сверхпроводимость в этих материалах имеет спин-триплетную природу. Другое интересное свойство ферромагнитных сверхпроводников заключается в неполном вытеснении слабого переменного магнитного поля, что можно объяснить тем, что материал находится в спонтанном вихревом состоянии даже в отсутствии внешних полей. Наличие вихрей должно отразиться на динамике магнитных моментов в ферромагнитном сверхпроводнике: так, следует ожидать, что спектр спиновых волн (магнонов) в материале будет модифицирован за счёт их рассеяния на абрикосовских вихрях. В свою очередь, наличие магнитных моментов отражается и на динамике вихрей. Так, черенковская генерация магнонов движущимися вихрями должна привести к увеличению коэффициента вязкости η [7]. Заметим, что данные явления могут иметь место не только в ферромагнитных сверхпроводниках, но и в активно исследуемых в последние годы сверхрешётках сверхпроводник-ферромагнетик — см. работу [8] и ссылки в ней.

Степень разработанности темы исследования

Обзор существующих теорий коллективного пиннинга, учитывающих наличие в сверхпроводнике большого количества взаимодействующих вихрей и дефектов, приведён в статье [9]. Существенно, что в качестве входных данных эти теории требуют знания потенциала взаимодействия одного вихря с дефектом. Известно, что способность системы дефектов пиннинговать вихри определяется не только глубиной потенциала пиннинга вихря, но и формой этого потенциала в целом [10]. Таким образом, детальное исследование взаимодействия одного вихря с одним дефектом является весьма важной задачей. Потенциал пиннинга вихря на изоляторных цилиндрических дефектах разного размера и с разной формой поперечного сечения был вычислен в лондоновском приближении в ряде работ [11–14]. Данный подход позволяет рассматривать дефекты с достаточно большим размером поперечного сечения D : $D \gg \xi$. При $D \lesssim \xi$ задача может быть решена с использованием теории Гинзбурга-Ландау [15–17]. Вследствие нелинейности этого уравнения его решение довольно сложно, особенно когда система не обладает цилиндрической симметрией. По этой причине ранее данное уравнение преимущественно решалось численно. Точные выражения для потенциала пиннинга и тока депиннинга в случае $D \lesssim \xi$ до сих пор отсутствовали.

Для вычисления вязкости вихря η было предложено два теоретических подхода. Первый метод, описанный Бардином и Стефеном [18], основан на использовании теории Лондонов и модельного ступенькообразного профиля

параметра порядка в вихре. Как правило, данный метод даёт верную оценку для η по порядку величины. Второй, более строгий подход к вычислению вязкости основан на нестационарном уравнении Гинзбурга-Ландау [19]. С использованием этого подхода вязкость вихря в изотропном сверхпроводнике вычислялась в работах авторов А. Schmid, Л. П. Горькова, Н. Б. Копнина, С.-R. Hu, R. S. Thompson, М. Ю. Куприянова и К. К. Лихарева [20–23].

В работах [24, 25] теоретически исследовалась вязкость вихря в анизотропном случае. Было показано, что процедура вычисления $\hat{\eta}$ значительно упрощается в грязных одноосных сверхпроводниках, в которых отношение $s_0 \equiv m_c \sigma_c / m_{ab} \sigma_{ab}$ равно единице. Здесь m_c и m_{ab} — массы куперовской пары, а σ_c и σ_{ab} — нормальные проводимости в направлении оси анизотропии c и в перпендикулярной плоскости ab . Условие $s_0 = 1$ позволяет свести анизотропную задачу к изотропной путём масштабного преобразования [25]. Такое упрощение невозможно в случае $s_0 \neq 1$, когда имеется несоответствие анизотропий нормальной проводимости и массы куперовской пары. Ситуация, когда $s_0 \neq 1$, теоретически возможна в числом пределе [19], и, по-видимому, наблюдалась экспериментально в сверхпроводниках на основе железа [2], некоторые из которых обладают сильной анизотропией нормальной проводимости при умеренной анизотропии верхнего критического поля. В работе [24] были проведены вычисления вязкости η в сверхпроводнике с параметром $s_0 \neq 1$, однако в расчётах использовался модельный ступенькообразный профиль параметра порядка в вихре. Для количественного сравнения теоретических предсказаний с экспериментом, безусловно, требуется провести соответствующие вычисления на основе более реалистичной модели вихря.

Спектр спиновых волн в ферромагнитных сверхпроводниках исследовался теоретически в работах [26, 27]. Было показано, что частота магнонов ω в мейснеровском состоянии зависит от модуля волнового вектора q немонотонным образом. Отметим, что в случае ферромагнитного сверхпроводника реалистичная модель должна учитывать, что образец находится не в мейснеровском, а в спонтанном вихревом состоянии. Спектр магнонов в присутствии вихрей исследовался в работе [26] в длинноволновом пределе: $\lambda_w \gg a_v$, где λ_w — длина волны, а a_v — межвихревое расстояние. Противоположный предельный случай, $\lambda_w \lesssim a_v$, ранее не рассматривался.

Влияние магнетизма на динамику вихрей в магнитных сверхпроводниках анализировалось группой авторов Л. Н. Булаевским, М. Hruška, М. Р. Maley, А. Shekhter, С. D. Batista, S.-Z. Lin (см. работу [7] и ссылки в ней). Было показано, что в таких сверхпроводниках имеется дополнительный вклад в вязкость η , связанный с излучением магнонов движущимися вихрями. Увеличение вязкости отражается на вольт-амперной характеристике образца, что позволяет извлекать информацию о спектре спиновых волн из этой характеристики.

В работе [28] было предсказано возникновение притяжения между вихря и формирование вихревых кластеров в материалах с достаточно большой магнитной восприимчивостью. При этом, однако, не было исследовано влияние пространственной дисперсии магнитной восприимчивости на взаимодействие между вихрями. Можно ожидать, что эффекты, связанные с пространственной дисперсией, будут сильны в системах, в которых характерная магнитная длина (толщина доменной стенки) порядка лондоновской длины.

Следует также отметить, что в предшествующих работах преимущественно рассматривались антиферромагнитные материалы. Вопрос о том, как излучение спиновых волн вихрями в ферромагнитных сверхпроводниках отразится на измеряемых характеристиках, остаётся открытым.

Цель и задачи работы

Настоящая диссертация посвящена исследованию статических и динамических характеристик абрикосовских вихрей в анизотропных сверхпроводниках и структурах сверхпроводник-ферромагнетик. Для заполнения описанных выше пробелов в теории были решены следующие задачи:

- расчёт потенциала пиннинга вихря на цилиндрическом дефекте с размером сечения, много меньшим длины когерентности;
- расчёт тензора вязкости $\hat{\eta}$ в анизотропном сверхпроводнике с использованием реалистичной модели вихря;
- определение спектра магнонов в ферромагнитном сверхпроводнике с длиной волны порядка расстояния между вихрями;
- исследование влияния магнитной подсистемы на динамику вихрей, вольт-амперную характеристику и поверхностный импеданс ферромагнитного сверхпроводника и сверхрешётки сверхпроводник-ферромагнетик;
- исследование взаимодействия вихрей в ферромагнитных сверхпроводниках и сверхрешётках сверхпроводник-ферромагнетик с сильной пространственной дисперсией магнитной восприимчивости.

Научная новизна работы

Научная новизна работы определяется оригинальностью полученных результатов и заключается в следующем:

- предложен новый метод расчёта потенциала пиннинга вихря на малом цилиндрическом изоляторном дефекте (полости) с произвольным поперечным сечением в приближении теории Гинзбурга-Ландау. Впервые получены асимптотически точные выражения (в пределе малого дефекта) в приближении теории Гинзбурга-Ландау для потенциала пиннинга

в случае полости с эллиптическим сечением и для тока депиннинга в случае полости в форме кругового цилиндра;

- в приближении нестационарной теории Гинзбурга-Ландау получен ряд новых асимптотически точных выражений для тензора вязкости вихря $\hat{\eta}$ в анизотропном сверхпроводнике с несоответствием анизотропий нормальной проводимости и массы куперовской пары ($m_{ab}\sigma_{ab}/m_c\sigma_c \neq 1$). Впервые показано, что в чистом сверхпроводнике, когда внутреннее магнитное поле много меньше верхнего критического поля, анизотропия вязкости может существенно зависеть от температуры даже в небольшом температурном окне вблизи T_c , где применима нестационарная теория Гинзбурга-Ландау;
- предсказано, что в ферромагнитном сверхпроводнике с решёткой вихрей спектр магнонов будет иметь зонную структуру. Впервые произведён расчёт зонного спектра магнонов в ферромагнитном сверхпроводнике;
- вычислена сила, действующая со стороны магнитных моментов на движущиеся абрикосовские вихри в ферромагнитных сверхпроводниках и сверхрешётках ферромагнетик-сверхпроводник (FS) в случаях, когда по образцу протекает постоянный или слабый переменный ток. Показано, что в ситуации, когда вихри излучают спиновые волны, на вольт-амперной характеристике ферромагнитного сверхпроводника и на зависимостях поверхностного импеданса от частоты и магнитного поля должны появиться наблюдаемые резонансные особенности. В предшествующих работах подобные детальные расчёты производились лишь для случая антиферромагнитного сверхпроводника;
- впервые показано, что в гибридной структуре сверхпроводник-ферромагнетик (SF сверхрешётке или ферромагнитном сверхпроводнике) с большим параметром Гинзбурга-Ландау ($\kappa \gg 1$) сильная пространственная дисперсия магнитной восприимчивости может привести к появлению пространственных осцилляций магнитного поля вихря и к притяжению вихрей на некоторых расстояниях. Исследована фазовая диаграмма таких систем. В предшествующих работах отсутствовал корректный расчёт потенциала взаимодействия между вихрями в SF системах с учётом пространственной дисперсии магнитной восприимчивости.

Теоретическая и практическая значимость работы

Знание потенциала взаимодействия одного вихря с дефектом необходимо для расчёта силы пиннинга и критического тока в системе, содержащей

большое количество вихрей и дефектов [10]. Кроме того, расчёты потенциала пиннинга в случае малого дефекта будут полезны при моделировании систем, в которых имеет место так называемый рэтчет-эффект [29], заключающийся в несимметричном движении вихрей в анизотропном потенциале под действием переменного тока.

Расчёт тензора вязкости $\hat{\eta}$ будет полезен для интерпретации экспериментальных данных по электросопротивлению анизотропных сверхпроводников.

Результаты расчёта спектра спиновых волн в ферромагнитном сверхпроводнике в смешанном состоянии могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных по коэффициенту отражения микроволнового излучения от образца и интенсивности рассеяния нейтронов.

Результаты расчёта силы, действующей со стороны магнитных моментов на движущиеся вихри в SF системах, могут быть применены для извлечения информации о спектре магнонов в системе из вольт-амперной характеристики образца и из данных по поверхностному импедансу.

Результаты расчёта силы взаимодействия между вихрями в средах с сильной пространственной дисперсией магнитной восприимчивости представляют фундаментальный интерес и, кроме того, могут быть использованы для создания искусственных SF систем с управляемыми магнитными свойствами.

Методология и методы исследования

В работе использованы такие феноменологические подходы, как обычная и нестационарная теория Гинзбурга-Ландау, теория Лондонов, а также уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта. Все эти подходы имеют микроскопическое обоснование. Вычисления проведены преимущественно аналитически, с привлечением численного счёта при необходимости.

Положения, выносимые на защиту

- 1) В рамках теории Гинзбурга-Ландау расчёт потенциала взаимодействия абрикосовского вихря с цилиндрическим изоляторным дефектом, характерный размер сечения которого много меньше длины когерентности, может быть выполнен по теории возмущений и сводится к решению внешней краевой задачи для уравнения Лапласа.
- 2) Анизотропия сопротивления чистого анизотропного сверхпроводника с критической температурой T_c в вихревом состоянии может существенно зависеть от температуры T даже в небольшом температурном окне $T_c - T \ll T_c$.
- 3) Спектр спиновых волн в ферромагнитном сверхпроводнике с идеальной решёткой вихрей имеет зонную структуру. Щели между соседними зонами спектра магнонов должны проявлять себя в виде максимумов на зависимости микроволнового коэффициента отражения от частоты.
- 4) На вольтамперных характеристиках гибридных систем сверхпроводник-ферромагнетик и на зависимостях поверхностного импеданса от частоты и магнитного поля должны наблюдаться резонансные особенности, связанные

с черенковской генерацией магнонов движущимися абрикосовскими вихрями. 5) В сверхрешётках, составленных из сверхпроводящих слоёв с большим параметром Гинзбурга-Ландау и ферромагнитных слоёв с сильной пространственной дисперсией магнитной восприимчивости, сверхпроводящая электродинамика может стать сильно нелокальной. В таких системах поле абрикосовских вихрей может испытывать пространственные осцилляции, при этом фазовый переход из мейснеровского в вихревое состояние будет фазовым переходом первого рода. Если образец имеет форму пластины, в нём должно наблюдаться промежуточное вихревое состояние.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечена выбором моделей, отражающих основные особенности исследуемых систем. Кроме того, частные следствия из полученных результатов хорошо согласуются с выводами, приведёнными в предшествующих работах.

Результаты работы докладывались на семинарах Института Физики Микроструктур РАН (Нижний Новгород) и Университета Бордо 1 (Бордо, Франция), а также на международных конференциях: “Нанозлектроника” (2011-2014 гг., Нижний Новгород), “Dubna-Nano2012” (2012 г., Дубна), “Vortex VIII” (2013 г., Родос, Греция), “Condensed Matter in Paris 2014” (2014 г., Париж, Франция).

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора, шести приложений и библиографии. Общий объем диссертации — 131 страница, включая 20 рисунков и 5 таблиц. Библиография включает 168 наименований на 15 страницах.

Во введении описывается состояние исследований по теме диссертации на момент её написания, обосновывается актуальность выбранной темы, раскрывается новизна и значимость работы, приводятся выносимые на защиту положения и план диссертации.

В первой главе рассмотрена задача о пиннинге одного вихря на цилиндрической полости или изоляторной области. В разделе 1.1 приведена постановка задачи и математическая модель: в данной главе используются феноменологические уравнения Лондонов и Гинзбурга-Ландау. Также приведён подробный обзор предшествующих теоретических работ.

В разделе 1.2 задача проанализирована в приближении теории Гинзбурга-Ландау. Описан метод расчёта потенциала взаимодействия вихря с цилиндрической полостью (изоляторной областью), размер сечения D которой много меньше длины когерентности ξ . Показано, что потенциал пиннинга состоит из двух компонент: первый вклад связан с подавлением параметра порядка внут-

ри дефекта, а второй вклад — с искажением вихря в окрестности дефекта. Обе компоненты, вообще говоря, одного порядка величины. В пределе $D \ll \xi$ определён потенциал пиннинга в случае, когда полость имеет форму эллиптического цилиндра. Для полости в форме кругового цилиндра определена также плотность тока депиннинга j_d . Кроме того, показано, что в присутствии транспортного тока с плотностью, меньшей j_d , возможно формирование метастабильного связанного состояния, в котором центр вихря находится вне полости — см. рис. 1.

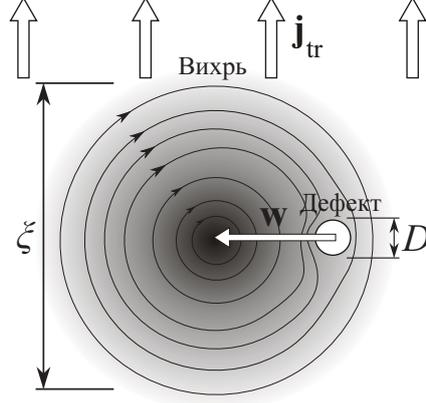


Рис. 1. Связанное состояние вихря и дефекта: модуль вектора смещения вихря \mathbf{w} может быть порядка длины когерентности.

В разделе 1.3 потенциал пиннинга в случае $\xi \ll D \ll \lambda$ исследован в приближении теории Лондонов. Получена исправленная формулировка метода конформных преобразований, предложенного в работе [13] для определения поля вихря. Вычислен потенциал пиннинга для полости в форме эллиптического цилиндра.

Результаты первой главы опубликованы в работах [A2, B2, B3].

Во второй главе в приближении нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау рассмотрена динамика изолированного вихря в анизотропном одноосном сверхпроводнике. В разделе 2.2 приведены исходные уравнения для тензора вязкости вихря $\hat{\eta}$ и электрического потенциала Φ , индуцированного вихрём, движущимся с постоянной скоростью \mathbf{V}_L под действием транспортного тока. В разделах 2.3 и 2.4 тензор вязкости вычислен в двух предельных случаях:

$$(i) l_{Eab} \ll \xi_{ab}, l_{Ec} \ll \xi_c \quad \text{и} \quad (ii) l_{Ec} \gg \xi_c, l_{Eab} \lesssim \xi_{ab}, \cos^2 \varphi_0 \ll \frac{\sigma_c l_{Eab}^2}{\sigma_{ab} \xi_{ab}^2}.$$

Здесь φ_0 — угол между осью анизотропии и осью вихря, ξ_c и ξ_{ab} — длины когерентности, а l_{Ec} и l_{Eab} — динамические длины экранирования электрического поля в направлении оси анизотропии c и в перпендикулярной плоскости ab ,

соответственно. В разделе 2.5 получена вариационная формулировка задачи об определении тензора вязкости вихря:

$$\mathbf{V}_L \hat{\eta} \mathbf{V}_L = \min_{\Phi} \int_{z=0} W_d[\Phi] d^2 \rho, \quad (3)$$

где W_d — диссипативная функция, а плоскость $z = 0$ перпендикулярна к вихрю. С помощью прямого вариационного метода получены приближённые выражения для тензора $\hat{\eta}$, применимые при произвольных параметрах задачи. В разделе 2.6 в приближении нестационарных уравнений Гинзбурга-Ландау для сверхпроводника с конечной щелью [19] показано, что анизотропия сопротивления сверхпроводника с параметром $s_0 = m_c \sigma_c / m_{ab} \sigma_{ab}$, не равным единице, может существенно зависеть от температуры T даже в небольшом температурном окне $T_c - T \ll T_c$.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A1, B1]

В третьей главе с использованием уравнений Лондонов и Ландау-Лифшица-Гильберта проанализирована совместная динамика намагниченности и вихрей в ферромагнитных сверхпроводниках и сверхрешётках ферромагнетик(F) - сверхпроводник(S). В разделе 3.2 приведена математическая модель и получены линеаризованные уравнения для намагниченности и магнитного поля в случае, когда материал обладает сильной магнитокристаллической анизотропией типа лёгкая ось, свойственной урановым ферромагнитным сверхпроводникам. В разделе 3.3 исследован спектр спиновых волн в ферромагнитном сверхпроводнике в присутствии идеальной вихревой решётки. Показано, что данный спектр имеет зонную структуру. Проведён аналитический (в приближении слабой связи) и численный расчёт спектра. Некоторые результаты расчётов приведены на рис. 2 и 3. В подразделе 3.3.3 проведён симметричный анализ задачи. Показано, что при некоторых значениях квазиволнового вектора спиновой волны \mathbf{q} система допускает нетривиальные группы симметрии. В частности, в случае треугольной вихревой решётки, когда первая зона Бриллюэна является шестиугольником, задача допускает группы, изоморфные C_{6v} и C_{3v} в центре и углах первой зоны Бриллюэна, соответственно. Среди неприводимых представлений данных групп имеются двумерные, вследствие чего магنونные спектры в некоторых соседних зонах должны иметь точки касания. В подразделе 3.3.4 оценена скорость затухания магنونных мод за счёт диссипации. В подразделе 3.3.5 исследован коэффициент отражения электромагнитной волны от ферромагнитного сверхпроводника в смешанном состоянии в геометрии, когда вихри параллельны границе образца. Показано, что электромагнитная волна полностью отражается, когда её частота ω лежит внутри щели магنونного спектра. Кроме того, обнаружено, что возможна полная трансформация (с нулевым отражением) электромагнитной волны в спиновую волну, когда частота ω лежит вне щели магنونно-

го спектра. Таким образом, наличие зонной структуры у спектра магнонов в ферромагнитном сверхпроводнике может быть подтверждено экспериментально путём снятия частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от образца.

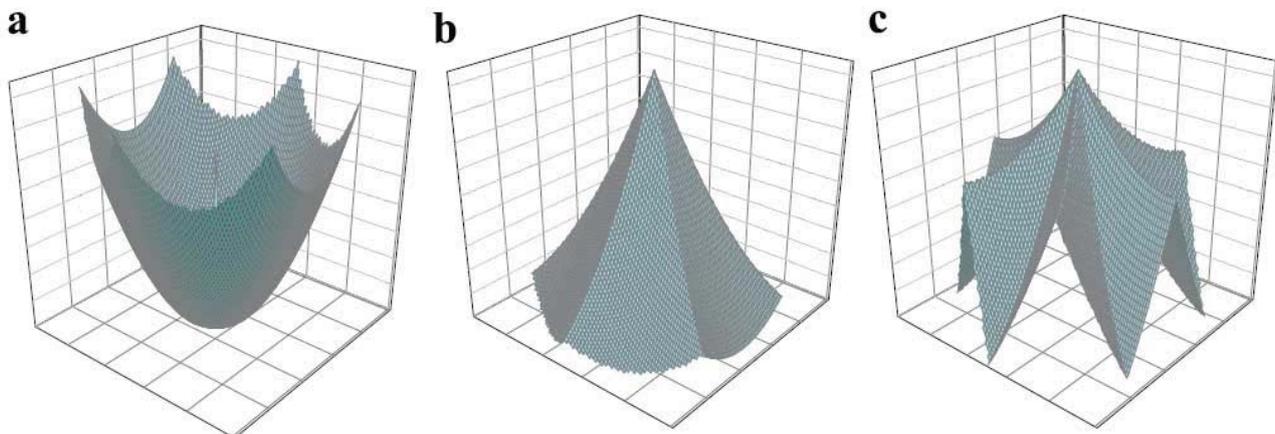


Рис. 2. Спектры магнонов, распространяющихся поперёк оси лёгкого намагничивания в ферромагнитном сверхпроводнике с идеальной треугольной вихревой решёткой. Внутреннее поле B_0 в материале порядка $100\Phi_0/\lambda^2$ (использованы параметры UCoGe). По вертикали отложена частота, в горизонтальной плоскости — квазиволновой вектор, лежащий в первой зоне Бриллюэна для вихревой решётки. Изображения (a), (b) и (c) соответствуют первой, второй и третьей зоне спектра.

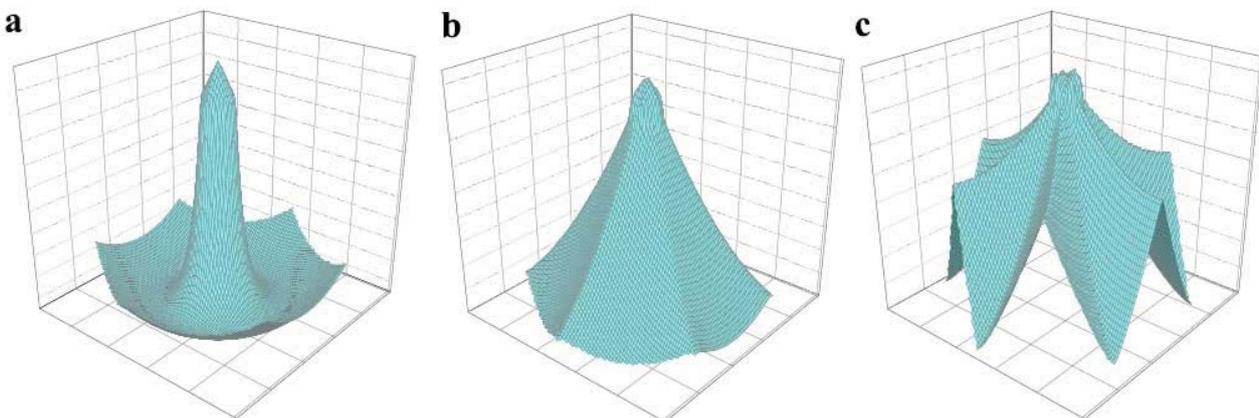


Рис. 3. Спектры магнонов в ферромагнитном сверхпроводнике, аналогичные изображённым на рис. 2, но при меньшем внутреннем поле: $B_0 \sim 10\Phi_0/\lambda^2$.

В разделе 3.4 исследовано влияние магнонов на динамику вихрей. В подразделе 3.4.2 рассмотрен случай постоянного транспортного тока, приводящего в движение вихри. Показано, что вихри излучают магноны по черенковскому механизму, когда скорость их движения V_L превышает некоторое пороговое значение V_{th} , которое даётся формулой

$$V_{th} = 2\omega_F L \quad (4)$$

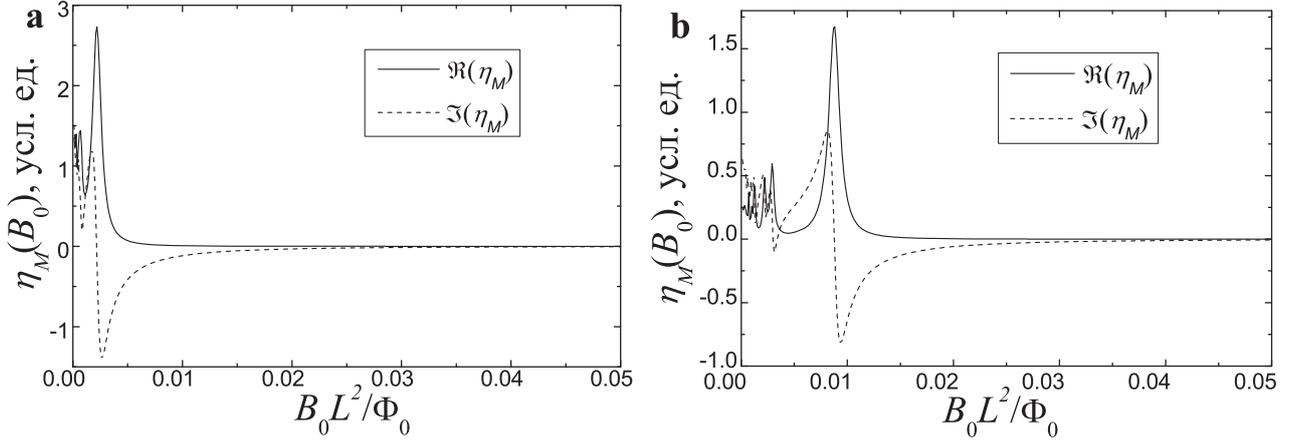


Рис. 4. Зависимости η_M от внутреннего поля B_0 при $\omega = 1.1\omega_F$ (a) и $\omega = 1.4\omega_F$ (b).

при $L > \xi$, где ω_F — частота ферромагнитного резонанса, а L — толщина блоховской доменной стенки в материале. Генерация магнонов сопровождается возникновением тормозящей силы \mathbf{f}_M , действующей на вихри со стороны магнитных моментов. В случае, когда движущаяся вихревая решётка близка к идеальной, сила \mathbf{f}_M приводит к появлению на вольт-амперной характеристике образца серии пиков по току, связанных с черенковскими резонансами. Если в вихревой решётке имеется существенный беспорядок, следует ожидать появление ступенькообразной особенности на вольт-амперной характеристике. В подразделе 3.4.3 рассмотрено движение вихрей в ферромагнитном сверхпроводнике под действием переменного тока с частотой ω . Если амплитуда тока достаточно мала, сила \mathbf{f}_M может быть представлена в виде

$$\mathbf{f}_M = i\omega\eta_M\mathbf{R}e^{-i\omega t} - i\omega\eta_M^*\mathbf{R}^*e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где η_M — комплексный коэффициент вязкости, а \mathbf{R} — амплитуда колебания вихрей. При $\omega < \omega_F$ генерации магнонов не происходит, и величина η_M чисто мнимая. При $\omega > \omega_F$ действительная часть вязкости становится существенной. Результаты расчёта зависимости η_M от внутреннего магнитного поля для идеальной вихревой решётки представлены на рис. 4. На графиках имеется серия пиков ($\Re(\eta_M)$) и N-образных особенностей ($\Im(\eta_M)$), соответствующих резонансам $\omega = \omega_M(\mathbf{G})$, где \mathbf{G} — вектор решётки, обратной к решётке вихрей, а функция $\omega_M(\mathbf{q})$ описывает спектр магнонов. Если решётка вихрей сильно неидеальная, вязкость η_M имеет резонанс только при $\omega = \omega_F$ при произвольном магнитном поле. В подразделе 3.4.4 предложена экспериментальная процедура для определения магнитной добавки к вязкости вихря: показано, что при определённой геометрии эксперимента величина η_M может быть извлечена из данных по поверхностному импедансу ферромагнитного сверхпроводника. В подразделе 3.4.5 проведено обобщение результатов по расчёту силы \mathbf{f}_M на случай свёрхрешёток ферромагнетик-сверхпроводник.

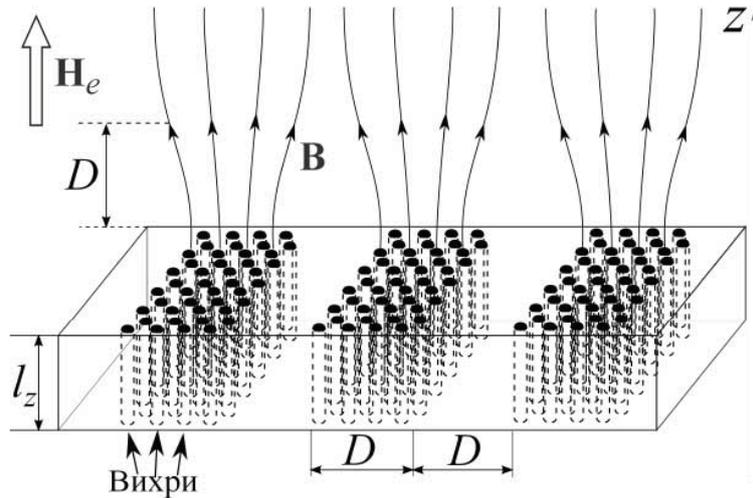


Рис. 5. Схематичное изображение доменной страйп-структуры промежуточного состояния гибридной SF системы.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A3, A4, A5, B4, B5, B6].

В четвёртой главе в лондоновском приближении исследованы магнитные свойства гибридной SF системы (SF сверхрешётки или ферромагнитного сверхпроводника) с сильной пространственной дисперсией магнитной восприимчивости. В разделе 4.2 показано, что такая пространственная дисперсия приводит к нелокальной связи между плотностью тока (включающим ток намагничённости) и векторным потенциалом. Если длина магнитной нелокальности, совпадающая с толщиной блоховской стенки L , достаточно велика, поле изолированного вихря в SF системе может испытывать пространственные осцилляции. В этом случае взаимодействие между двумя вихрями становится притягивающим на некоторых расстояниях.

В разделе 4.3 рассмотрено вихревое состояние гибридной SF системы. Получены зависимости магнитного поля в образце от приложенного поля. Показано, что в условиях притяжения вихрями переход из мейснеровского состояния в вихревое является фазовым переходом первого рода. Если образец имеет форму пластины, и внешнее поле приложено перпендикулярно к пластине, в образце должно реализоваться промежуточное вихревое состояние с сосуществующими доменами вихревой и мейснеровской фазы. При некоторых условиях может образоваться страйп-структура, показанная на рис. 5. Показано, что в такой структуре характерный размер доменов D пропорционален квадратному корню из толщины образца.

Результаты четвёртой главы опубликованы в работе [B7].

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

- В рамках теории Гинзбурга-Ландау развит новый аналитический метод

определения энергии взаимодействия вихря с цилиндрическим изоляторным дефектом, размер сечения которого много меньше длины когерентности ξ . Определён потенциал пиннинга для дефекта с эллиптическим поперечным сечением. Показано, что в присутствии слабого транспортного тока может образоваться метастабильное связанное состояние, в котором вихрь смещён относительно дефекта на расстояние порядка ξ .

- В приближении нестационарной теории Гинзбурга-Ландау аналитически и численно рассчитан тензор вязкости вихря $\hat{\eta}$ в одноосных сверхпроводниках с несоответствием анизотропий нормальной проводимости и массы куперовской пары ($s_0 = m_c \sigma_c / m_{ab} \sigma_{ab} \neq 1$). Показано, что в таких сверхпроводниках анизотропия проводимости может сильно зависеть от температуры даже в области $T_c - T \ll T_c$.
- Показано, что спектр спиновых волн в ферромагнитном сверхпроводнике в смешанном состоянии имеет зонную структуру. Спектр рассчитан аналитически и численно в приближении уравнений Лондонов и Ландау-Лифшица. Исследовано влияние щелей спектра магнонов на микроволновый коэффициент отражения ферромагнитного сверхпроводника.
- С использованием уравнений Лондонов и Ландау-Лифшица-Гильберта получены уравнения движения вихрей в гибридных SF системах с учётом силы \mathbf{f}_M , действующей на вихри со стороны магнитных моментов. Рассмотрены случаи постоянного и гармонического вынуждающего транспортного тока, идеальной и сильно неидеальной вихревой решётки. Показано, что сила \mathbf{f}_M приводит к появлению резонансных особенностей, связанных с генерацией магнонов, на вольт-амперной характеристике образца и на зависимости поверхностного импеданса от частоты и магнитного поля.
- Показано, что в SF системах с большим масштабом магнитной нелокальности происходит качественное изменение структуры поля вихря. В частности, на некотором расстоянии от оси вихря поле меняет направление на противоположное. Продемонстрировано, что в условиях, когда поле вихря меняет направление, фазовый переход при нижнем критическом поле является переходом первого рода, при этом в образце в виде пластины должно наблюдаться промежуточное вихревое состояние (см. рис. 5).

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Beshpalov, A. A. Mismatch of conductivity anisotropy in the mixed and normal states of type-II superconductors / A. A. Beshpalov, A. S. Mel'nikov // Phys. Rev. B. — 2012. — May. — Vol. 85. — P. 174502.
- A2. Beshpalov, A. A. Abrikosov vortex pinning on a cylindrical cavity inside the vortex core: formation of a bound state and depinning / A. A. Beshpalov, A. S. Mel'nikov // Supercond. Sci. Technol. — 2013. — Vol. 26, no. 8. — P. 085014.
- A3. Beshpalov, A. A. Band structure of magnetic excitations in the vortex phase of a ferromagnetic superconductor / A. A. Beshpalov, A. I. Buzdin // Phys. Rev. B. — 2013. — Mar. — Vol. 87. — P. 094509.
- A4. Beshpalov, A. A. Magnon radiation by moving Abrikosov vortices in ferromagnetic superconductors and superconductor-ferromagnet multilayers / A. A. Beshpalov, A. S. Mel'nikov, A. I. Buzdin // Phys. Rev. B. — 2014. — Feb. — Vol. 89. — P. 054516.
- A5. Beshpalov, A.A. Microwave and dc response of an Abrikosov vortex lattice in ferromagnetic superconductors / A.A. Beshpalov, A.S. Mel'nikov, A.I. Buzdin // Physica C: Superconductivity. — 2014. — Vol. 503, no. 0. — P. 98 – 100.
- B1. Беспалов, А. А. Анизотропия сопротивления вихревого состояния сверхпроводника / А. А. Беспалов, А. С. Мельников // Нанопизика и наноэлектроника: Труды XV межд. симпозиума. — Т. 1. — Н. Новгород: ИФМ РАН, 2011. — С. 274–275.
- B2. Беспалов, А. А. Пиннинг абрикосовского вихря на малой цилиндрической полости / А. А. Беспалов, А. С. Мельников // Нанопизика и наноэлектроника: Труды XVI межд. симпозиума. — Т. 1. — Н. Новгород: ИФМ РАН, 2012. — С. 7–8.
- B3. Beshpalov, A. A. Pinning of an Abrikosov vortex on a small cylindrical cavity / A. A. Beshpalov, A. S. Mel'nikov // Dubna-Nano2012: Book of Abstracts of the International Conference on Theoretical Physics. — Dubna: JINR, 2012. — P. 26.
- B4. Беспалов, А. А. Зонный спектр магнонов в ферромагнитном сверхпроводнике в смешанном состоянии / А. А. Беспалов, А. И. Буздин // Нанопизика и наноэлектроника: Труды XVII межд. симпозиума. — Т. 1. — Н. Новгород: ИФМ РАН, 2013. — С. 13–14.

- B5. Beshpalov, A. A. Spin wave excitation by a moving vortex lattice in ferromagnetic superconductors and SF bilayers / A. A. Beshpalov, A. I. Buzdin // Eighth International Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors: Abstract Book. — Leuven, Belgium: KU Leuven, 2013. — P. 105.
- B6. Беспалов, А. А. Излучение магнонов движущимися абрикосовскими вихрями в ферромагнитных сверхпроводниках и сверхрешётках сверхпроводник/ферромагнетик / А. А. Беспалов, А. С. Мельников, А. И. Буздин // Нанопизика и наноэлектроника: Труды XVIII межд. симпозиума. — Т. 1. — Н. Новгород: ИФМ РАН, 2014. — С. 11–12.
- B7. Беспалов, А. А. Комплексная лондоновская длина и притяжение вихрей в структурах ферромагнетик/сверхпроводник / А. А. Беспалов, А. И. Буздин // Нанопизика и наноэлектроника: Труды XVIII межд. симпозиума. — Т. 1. — Н. Новгород: ИФМ РАН, 2014. — С. 13–14.

Список цитированной литературы

- Goyal, A. Irradiation-free, columnar defects comprised of self-assembled nanodots and nanorods resulting in strongly enhanced flux-pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films / A. Goyal, S. Kang, K. J. Leonard et al. // *Supercond. Sci. Technol.* — 2005. — Vol. 18, no. 11. — P. 1533.
- Stewart, G. R. Superconductivity in iron compounds / G. R. Stewart // *Rev. Mod. Phys.* — 2011. — Dec. — Vol. 83. — P. 1589–1652.
- Saxena, S. S. Superconductivity on the border of itinerant-electron ferromagnetism in UGe_2 / S. S. Saxena, P. Agarwal, K. Ahilan et al. // *Nature (London)*. — 2000. — Vol. 406. — P. 587–592.
- Aoki, Dai. Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in URhGe / Dai Aoki, Andrew Huxley, Daniel Ressouche, Eric Braithwaite et al. // *Nature (London)*. — 2001. — Vol. 413. — P. 613–616.
- Huy, N. T. Superconductivity on the Border of Weak Itinerant Ferromagnetism in UCoGe / N. T. Huy, A. Gasparini, D. E. de Nijs et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Aug. — Vol. 99. — P. 067006.
- Nandi, S. Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in P-doped EuFe_2As_2 / S. Nandi, W. T. Jin, Y. Xiao et al. // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Jan. — Vol. 89. — P. 014512.
- Bulaevskii, Lev N. Polaron-like vortices, dissociation transition, and self-induced pinning in magnetic superconductors / Lev N. Bulaevskii, Shi-Zeng Lin // *Sov. Phys.-JETP.* — 2013. — Sep. — Vol. 144. — P. 475.

8. Uribe-Laverde, M. A. Depth profile of the ferromagnetic order in a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ superlattice on a LSAT substrate: A polarized neutron reflectometry study / M. A. Uribe-Laverde, D. K. Satapathy, I. Marozau et al. // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Mar. — Vol. 87. — P. 115105.
9. Blatter, G. Vortices in high-temperature superconductors / G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein et al. // *Rev. Mod. Phys.* — 1994. — Oct. — Vol. 66. — P. 1125–1388.
10. Campbell, A.M. Flux vortices and transport currents in type II superconductors / A.M. Campbell, J.E. Evetts // *Adv. Phys.* — 1972. — Vol. 21, no. 90. — P. 199–428.
11. Мкртчян, Г. С. Взаимодействие между полостью и вихрем в сверхпроводнике второго рода / Г. С. Мкртчян, В. В. Шмидт // *ЖЭТФ.* — 1971. — Т. 61. — С. 367.
12. Khalfin, I. B. Relaxation of magnetic flux in a superconductor with a system of columnar defects / I. B. Khalfin, B. Ya. Shapiro // *Physica C.* — 1993. — Vol. 207, no. 3–4. — P. 359–365.
13. Buzdin, A. Electromagnetic pinning of vortices on different types of defects / A. Buzdin, M. Daumens // *Physica C.* — 1998. — Vol. 294. — P. 257 – 269.
14. Nordborg, H. Interaction between a vortex and a columnar defect in the London approximation / H. Nordborg, V. M. Vinokur // *Phys. Rev. B.* — 2000. — Nov. — Vol. 62. — P. 12408–12412.
15. Maurer, S. M. Numerical calculation of the vortex-columnar-defect interaction and critical currents in extreme type-II superconductors - a two-dimensional model based on the Ginzburg-Landau approximation / S. M. Maurer, N. C. Yeh, T. A. Tombrello // *J. Phys. Cond. Mat.* — 1998. — Vol. 10, no. 33. — P. 7429.
16. Priour, D. J. Deformation and depinning of superconducting vortices from artificial defects: A Ginzburg-Landau study / D. J. Priour, H. A. Fertig // *Phys. Rev. B.* — 2003. — Feb. — Vol. 67. — P. 054504.
17. Rosenstein, B. Maximal persistent current in a type-II superconductor with an artificial pinning array at the matching magnetic field / B. Rosenstein, I. Shapiro, B. Ya. Shapiro // *Phys. Rev. B.* — 2010. — Feb. — Vol. 81. — P. 064507.
18. Bardeen, John. Theory of the Motion of Vortices in Superconductors / John Bardeen, M. J. Stephen // *Phys. Rev.* — 1965. — Nov. — Vol. 140. — P. A1197–A1207.
19. Kopnin, N.B. Theory of Nonequilibrium Superconductivity / N.B. Kopnin.

- International Series of Monographs on Physics. — Clarendon Press, 2001. — 328 p.
20. Schmid, A. A time-dependent Ginzburg-Landau equation and its application to the resistivity in the mixed state / A. Schmid // *Phys. Kond. Materie.* — 1966. — Vol. 5. — P. 302–317.
 21. Горьков, Л. П. Вязкое течение вихрей в сверхпроводниках с парамагнитными примесями / Л. П. Горьков, Н. Б. Копнин // *ЖЭТФ.* — 1971. — Т. 60, № 6. — С. 2331–2343.
 22. Hu, Chia-Ren. Dynamic Structure of Vortices in Superconductors. II. $H \ll H_{c2}$ / Chia-Ren Hu, Richard S. Thompson // *Phys. Rev. B.* — 1972. — Jul. — Vol. 6. — P. 110–120.
 23. Куприянов, М. Ю. О вязком движении вихрей в сверхпроводниках второго рода / М. Ю. Куприянов, К. К. Лихарев // *Письма в ЖЭТФ.* — 1972. — Т. 15. — С. 349–353.
 24. Генкин, В. М. Движение абрикосовских вихрей в анизотропных сверхпроводниках / В. М. Генкин, А. С. Мельников // *ЖЭТФ.* — 1989. — Т. 95. — С. 2170–2174.
 25. Ivlev, V. I. Flux-Flow Conductivity in Anisotropic and Layered High- T_c Superconductors / V. I. Ivlev, N. B. Kopnin // *Europhys. Lett.* — 1991. — Vol. 15, no. 3. — P. 349.
 26. Ng, T. K. Spin and vortex dynamics and electromagnetic propagation in the spontaneous vortex phase / T. K. Ng, C. M. Varma // *Phys. Rev. B.* — 1998. — Nov. — Vol. 58. — P. 11624–11630.
 27. Braude, V. Excitation of Spin Waves in Superconducting Ferromagnets / V. Braude, E. B. Sonin // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Sep. — Vol. 93. — P. 117001.
 28. Lin, Shi-Zeng. Vortex dynamics in ferromagnetic superconductors: Vortex clusters, domain walls, and enhanced viscosity / Shi-Zeng Lin, Lev N. Bulaevskii, Cristian D. Batista // *Phys. Rev. B.* — 2012. — Nov. — Vol. 86. — P. 180506.
 29. Jin, B. B. High-frequency vortex ratchet effect in a superconducting film with a nanoengineered array of asymmetric pinning sites / B. B. Jin, B. Y. Zhu, R. Wördenweber et al. // *Phys. Rev. B.* — 2010. — May. — Vol. 81. — P. 174505.

Беспалов Антон Андреевич

**Вихревые конфигурации и подвижность вихревых линий в
анизотропных и магнитных сверхпроводниках**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Подписано к печати 23.10.2014 г.
Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физики микроструктур
Российской академии наук
607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново,
ул. Академическая, д. 7