

Савинов Денис Александрович

**ВИХРЕВЫЕ СОСТОЯНИЯ  
В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ АНИЗОТРОПНЫХ  
СВЕРХПРОВОДНИКОВ  
И ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ  
СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОМАГНЕТИК**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Нижний Новгород — 2012

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

- Научный руководитель: доктор физико–математических наук  
Мельников Александр Сергеевич
- Официальные оппоненты: Рахманов Александр Леонидович,  
доктор физико–математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук
- Максимова Галина Михайловна,  
кандидат физико–математических наук,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

Защита состоится 13 декабря 2012 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново, ул. Академическая, д.7).

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

Автореферат диссертации разослан 12 ноября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.098.01  
доктор физико–математических  
наук, профессор

К. П. Гайкович

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Исследование вопроса о сосуществовании магнитного и сверхпроводящего порядков в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик (S/F) привлекает к себе большое внимание на протяжении последних десятилетий. Выделяют два основных механизма взаимодействия сверхпроводящего параметра порядка с магнитной подсистемой – электромагнитный (орбитальный) и обменный. Если ферромагнетик и сверхпроводник разделены тонкой диэлектрической прослойкой, то эффект близости подавлен и единственным фактором, определяющим взаимодействие рассматриваемых подсистем является магнитное поле, создаваемое распределением намагниченности в ферромагнетике. Именно о таких S/F гетероструктурах будет идти речь далее.

Значительная часть экспериментальных и теоретических исследований гибридных S/F систем связана с анализом влияния ферромагнитных доменных структур на сверхпроводящую критическую температуру  $T_c$  магнито-связанных S/F бислоев [1, 2, 3, 4], которые представляют собой тонкую сверхпроводящую пленку с нанесенной на нее пленкой ферромагнетика, разделенные тонкой изолирующей прослойкой. Такие двухслойные S/F системы являются весьма перспективным объектом для изучения сверхпроводящих свойств: доменная структура ферромагнетика может являться источником мелкомасштабных магнитных полей рассеяния в сверхпроводнике. Критическая температура  $T_c$  гибридных S/F бислоев может обладать необычной зависимостью от внешнего магнитного поля  $H$ , приложенного перпендикулярно плоскости бислоя. В частности, экспериментальные данные по изучению кривой фазового перехода в сверхпроводящее состояние S/F бислоев с двумерными доменами в ферромагнитной пленке в однородном внешнем магнитном поле  $H$  свидетельствуют о нелинейной зависимости  $T_c(H)$  [1]. Это приводит к расширению диапазона значений  $H$ , в котором возможно зарождение локализованной сверхпроводимости, по сравнению со случаем тонкой пленки во внешнем перпендикулярном поле  $H$ , когда функция  $T_c(H)$  является линейной. Экспериментальные исследования гибридных S/F бислоев могут демонстрировать также и осцилляционное поведение линии фазового перехода  $T_c(H)$  [5], что связано с формированием в сверхпроводящем слое вихревых состояний параметра порядка, локализованных вблизи замкнутого контура (сверхпроводящего канала), на котором магнитное поле обращается в нуль, а циркуляция градиента фазы волновой функции куперовских пар вокруг данного контура кратна  $2\pi$ . В ряде случаев сверхпроводящие каналы, формирующиеся в S/F бислоях с доменной структурой, незамкнуты и оказываются ориентированными вдоль доменных стенок [1, 4]. Изучение структуры и формы сверхпроводящих каналов представляется важным для экспериментального исследования транспорт-

ных характеристик реальных S/F бислоев.

Осцилляции зависимости  $T_c(H)$  возможны и в гибридных S/F системах другого типа, представляющих собой сверхпроводящие пленки с ансамблем магнитных наночастиц или аксиально-симметричные мезоскопические S/F структуры [6, 7]. Изучение таких гетероструктур особенно важно с точки зрения их применения в современной электронике – создания систем с контролируемым пиннингом (состоянием с неподвижными вихревыми нитями).

Исследование самих вихревых нитей, их структуры и свойств, является важнейшей задачей физики сверхпроводимости, поскольку позволяет получить ряд основных параметров смешанного состояния сверхпроводников второго рода, таких как критические магнитные поля, кривые намагничивания, транспортные характеристики. Большое влияние на строение вихревых линий и их взаимодействие может оказывать анизотропия магнитных свойств конкретной сверхпроводящей системы. В ряде случаев анизотропия приводит к притяжению вихрей и, как следствие, к образованию вихревых цепочек [8, 9, 10]. Экспериментальным подтверждением существования цепочек вихрей являются результаты, полученные методами декорирования, сканирующей туннельной микроскопии и Лоренц-микроскопии. В тонких пленках анизотропных сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле, межвихревое взаимодействие сильно модифицировано: минимальной энергией обладают связанные состояния из небольшого числа вихрей – вихревые кластеры. В работе [11] рассчитаны энергии вихревых кластеров, а также получено экспериментальное подтверждение существования таких необычных вихревых конфигураций. Для теоретического анализа особенностей межвихревого взаимодействия авторы работы [11] ограничились случаем прямых вихрей, наклоненных относительно оси анизотропии. Однако, равновесная форма вихревых нитей в сверхпроводящей пленке может быть сильно искривлена [12, 13]. Учет искривления вихревых линий в пленках может приводить к усилению эффекта межвихревого притяжения, а также к особенностям профилей магнитных полей рассеяния изолированных вихревых нитей. Теоретический анализ распределений магнитных полей рассеяния образца может быть полезен для интерпретации экспериментальных результатов по визуализации вихрей, основанной на современных методиках, таких как магнито-силовая микроскопия или микроскопия Холла.

### **Степень разработанности темы исследования**

Возникновение локализованной сверхпроводимости в магнито-связанных S/F бислоях теоретически исследовалось в работах следующих авторов: А. И. Буздина, А. С. Мельникова, А. Ю. Аладышкина, А. А. Фраермана, Д. А. Рыжова, В. В. Мосцалкова и А. В. Соколова. В частности, в статьях [2, 3] изучена зависимость критической температуры  $T_c$  от внешнего перпендикулярного магнитного поля  $H$

для случая, когда поле рассеяния ферромагнитной подсистемы в плоскости латерально неограниченной сверхпроводящей пленки модулировано в одном направлении. Можно предположить, что в случае сверхпроводящей пленки, ограниченной в латеральном направлении, линия фазового перехода  $T_c(H)$  будет модифицирована вследствие того, что сверхпроводящий зародыш должен возникать не только вблизи доменных стенок, но также и вблизи границ сверхпроводник/вакуум. Этот и многие другие вопросы, связанные с особенностями зарождения сверхпроводящего параметра порядка вблизи пересечения доменных стенок между собой или с границами сверхпроводник/вакуум, не нашли в научной литературе должного отражения.

В упомянутых выше работах [2, 3] рассматривалась сверхпроводящая пленка настолько малой толщины  $D$ , что влиянием параллельной компоненты поля ферромагнетика на  $T_c$  полностью пренебрегалось. Однако изготовление столь тонких пленок представляет собой весьма сложную задачу с практической точки зрения. Типичные толщины  $D$  сверхпроводящих пластин, используемых в экспериментах, оказываются порядка длины когерентности  $\xi \simeq 10^{-7} - 10^{-5}$  см. Следует ожидать, что при теоретическом анализе сверхпроводящих свойств таких пленок необходимо учитывать влияние параллельной компоненты магнитного поля на  $T_c$ , которая приводит к подавлению эффектов, вызванных неоднородностью перпендикулярной составляющей полного магнитного поля в плоскости сверхпроводящей пленки. В работе [14] частично изучены поправки к линии фазового перехода  $T_c(H)$ , связанные с конечной толщиной пленки  $D$ . Данные поправки найдены для случая гибридных S/F бислоев с одномерным распределением перпендикулярной компоненты поля ферромагнетика в плоскости сверхпроводящей пленки. Поля рассеяния реальных ферромагнетиков, содержащих доменную структуру, могут иметь более сложное распределение – линии нулей перпендикулярной компоненты полного магнитного поля в тонкой сверхпроводящей пленке могут представлять собой замкнутые контура [5]. Влияние конечной толщины сверхпроводящих пленок на зависимость  $T_c(H)$  для таких гетероструктур не было рассмотрено до настоящего времени.

Формированию многоквантовых вихревых состояний и появлению осцилляций на зависимости  $T_c(H)$  в гибридных S/F системах, представляющих собой сверхпроводящие пленки с ансамблем магнитных наночастиц, или аксиально-симметричные мезоскопические S/F структуры, уделено много внимания в статьях таких авторов, как И. К. Марморкос, Ф. М. Питерс, М. В. Милошевич, А. С. Мельников, А. Ю. Аладышкин, Д. А. Рыжов, С. Л. Ченг, Х. А. Фертиг, С. В. Ямпольский и В. В. Мосщалков. Их работы главным образом основаны на теоретическом исследовании гибридных S/F структур, содержащих в качестве сверхпроводящей подсистемы пленку (или мезоскопический диск) толщины  $D \rightarrow 0$ . Поэтому влиянием параллельной компоненты магнитного поля на  $T_c$  полностью пренебрегалось. В частности, в работе [15] изучено влияние многоквантовых вихревых структур на зависимость  $T_c(H)$  сверхпроводящей пленки, находящейся в поле одной магнитной частицы – магнитного диполя. Вопрос о влиянии конечной толщины  $D$  на линию  $T_c(H)$  остал-

ся без внимания.

Особенности формы вихревых линий и их взаимодействия в анизотропных сверхпроводниках и пленках теоретически исследованы в работах следующих авторов: А. В. Балацкого, Л. И. Бурлачкова, Л. П. Горькова, А. И. Буздина, А. Ю. Симонова, А. М. Гришина, А. Ю. Мартынович, С. В. Ямпольского, В. Г. Когана, Н. Накагавы, С. Л. Тиёмана, Э. Х. Брандта, А. С. Мельникова и А. В. Самохвалова. В частности, в работе [11] проведены расчеты потенциала межвихревого взаимодействия и энергии кластеров из нескольких вихрей в тонких пленках сильно анизотропных (слоистых) сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле. Вопрос об особенностях межвихревого взаимодействия в пленках сверхпроводников с достаточно малой степенью анизотропии ранее не рассматривался. Также важным вопросом является изучение взаимного влияния межвихревого взаимодействия и равновесной формы вихревых нитей в тонких пленках анизотропных сверхпроводников.

Особенности магнитных полей рассеяния вихревых линий в сверхпроводящих пленках исследованы в работах таких авторов, как А. Н. Григоренко, С. Дж. Бендинг, Дж. Р. Клем, А. Тономура, К. А. Молер и О. М. Аусландер. В частности, в статьях [16, 17, 18, 19] наблюдались изображения вихревых нитей для слоистых сверхпроводящих образцов, помещенных в наклонное магнитное поле. Обнаружены необычные образы коров вихрей, несущие магнитный поток, меньший одного кванта потока  $\Phi_0$ . Данные образы были интерпретированы с теоретической точки зрения на основе модели, предложенной в работе [20]. Образы изолированных вихрей наблюдались и в пленках сверхпроводников с достаточно малой степенью анизотропии, когда форма любой вихревой нити может быть описана в приближении упругой струны [21]. Теоретический расчет профиля магнитных полей рассеяния искривленных вихревых нитей в таких пленках до сих пор проведен не был.

## Цели и задачи

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование особенностей возникновения локализованной сверхпроводимости в гибридных S/F структурах и вихревого состояния тонких пленок анизотропных сверхпроводников во внешних магнитных полях. Для достижения поставленной цели рассмотрены следующие задачи:

- Анализ влияния конечной толщины пленки на критическую температуру локализованной сверхпроводимости и фазовые переходы между различными вихревыми состояниями в модельной системе "сверхпроводящая пленка–магнитный диполь".
- Исследование фазовой диаграммы внешнее магнитное поле  $H$  – температура  $T$  для гибридной S/F системы, состоящей из сверхпроводящего полупространства и магнитной наночастицы.

- Изучение особенностей зарождения локализованной сверхпроводимости в гибридном S/F бислое, содержащем доменную стенку и границу сверхпроводник/вакуум (две доменные стенки) произвольной ориентации по отношению друг к другу.
- Анализ особенностей межвихревого взаимодействия в пленках анизотропных сверхпроводников с учетом искривления вихревых линий.
- Исследование магнитных полей рассеяния равновесных вихревых нитей в пленках анизотропных сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле.

### **Научная новизна**

1. Для модельной системы "сверхпроводящая пленка–магнитный диполь" аналитически исследована поправка к критической температуре  $T_c$ , связанная с конечной толщиной пленки  $D$ . Изучена модификация зависимости  $T_c$  от внешнего магнитного поля  $H$  при увеличении  $D$ . Найден критерий на максимальную толщину  $D$ , при котором влияние параллельной компоненты поля ферромагнетика на  $T_c$  становится пренебрежимо малым по сравнению с воздействием перпендикулярной составляющей магнитного поля.
2. Аналитически исследованы угловая зависимость сверхпроводящей критической температуры  $T_c$ , особенности фазовой диаграммы на плоскости внешнее магнитное поле  $H$  – температура  $T$  и пространственная структура параметра порядка в гибридном S/F бислое, содержащем одну доменную стенку, пересекающую границу сверхпроводник/вакуум (две пересекающиеся доменные стенки).
3. Для тонких пленок анизотропных сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле, рассчитаны потенциал парного межвихревого взаимодействия и энергия вихревых цепочек конечного размера (вихревых кластеров) с учетом кривизны вихревых нитей в пленке.
4. Исследованы профили магнитных полей рассеяния искривленных вихревых линий в тонких пленках анизотропных сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- Результаты теоретического анализа особенностей возникновения локализованной сверхпроводимости в рассматриваемых гибридных S/F системах важны

для дальнейших исследований термодинамических и транспортных характеристик подобных гетероструктур, а также возможного их применения в микроэлектронике.

- Результаты теоретического исследования формы вихрей и их взаимодействия в пленках анизотропных сверхпроводников в наклонных магнитных полях могут быть применены для определения термодинамических и транспортных характеристик смешанного состояния тонкопленочных сверхпроводящих образцов.
- Результаты теоретического исследования магнитных полей рассеяния равновесных вихревых линий в тонких пленках анизотропных сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле, представляют интерес с точки зрения экспериментальной визуализации отдельных вихрей, вихревых кластеров или решеток вихрей, основанной на современных методах, таких как магнитосиловая микроскопия или микроскопия Холла.

### **Методология и методы исследования**

При решении поставленных задач использовался теоретический анализ: феноменологическая теория Гинзбурга–Ландау, методы теории возмущений, метод пробных функций, феноменологическая модель Лондонов, а также численные методы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. При увеличении толщины пленки  $D$  в модельной системе "сверхпроводящая пленка–магнитный диполь" сужается область значений внешнего магнитного поля  $H$ , в которой наблюдается эффект Литтла–Паркса. В пределе  $D \rightarrow \infty$  осцилляции критической температуры  $T_c$  полностью отсутствуют.
2. Пересечение сверхпроводящих каналов, формирующихся в гибридном S/F биллое вдоль плоских границ сверхпроводник/вакуум и доменных стенок, приводит к увеличению критической температуры  $T_c$  сверхпроводимости, локализованной вблизи точек пересечения.
3. Для тонких сверхпроводящих пленок в наклонных магнитных полях профиль перпендикулярной компоненты поля рассеяния искривленной вихревой линии содержит два резких максимума.
4. Потенциал парного межвихревого взаимодействия в анизотропных сверхпроводящих пленках имеет минимум в конечной области углов наклона внешнего магнитного поля относительно нормали к плоскости пленки. Равновесные конфигурации искривленных вихрей в тонкопленочных образцах, помещенных в наклонное магнитное поле, могут состоять из вихревых цепочек конечного размера.

## Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов обеспечена оптимальным выбором физических моделей, учитывающих основные свойства исследуемых систем, и результатами численных расчетов.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) в период с 2007 по 2012 год. Основные положения и результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на семинарах ИФМ РАН, а также были представлены на Нижегородских сессиях молодых ученых (2009, 2010 гг. – Нижегородская область), международных симпозиумах "Нанозифика и наноэлектроника" (2009, 2010, 2011, 2012 гг. – Нижегородская область), международной конференции "Mesoscopic and strongly correlated electron systems – Nanoscale superconductivity and magnetism" (2006 г. – Черногоровка), международной конференции "Schegolev Memorial Conference – Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems" (2009 г. – Черногоровка), всероссийской конференции молодых ученых имени Ю. В. Дубровского "Микро-, нанотехнологии и их применение" (2010 г. – Черногоровка), международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" (2011 г. – Звенигород), международной конференции "Mesoscopic and strongly correlated electron systems – Non-equilibrium and coherent phenomenon at nanoscale" (2012 г. – Черногоровка).

## Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, списка работ автора по теме диссертации, списка цитируемой литературы (149 работ). Общий объем диссертации – 116 страниц, включая 24 рисунка.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана её научная новизна и значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, указаны сведения о личном вкладе соискателя, апробации работы и публикациях.

**Глава 1** посвящена исследованию влияния конечной толщины  $D$  латерально неограниченных сверхпроводящих пленок на линию фазового перехода  $T_c(H)$  гибридных S/F структур, помещенных во внешнее перпендикулярное магнитное поле  $H$ .

В разделе 1.1 представлены общие формулы, позволяющие феноменологически описать зарождение сверхпроводимости в магнито-связанных S/F системах. Приведен обзор недавних теоретических исследований, посвященных изучению сверхпроводящей критической температуры  $T_c$  идеально тонкой пленки, находящейся в неоднородном поле рассеяния ферромагнитной подложки.

В разделе 1.2 на основе теории Гинзбурга–Ландау изучено влияние конечной толщины  $D$  латерально неограниченных сверхпроводящих пленок на зарождение локализованной сверхпроводимости в гибридных S/F бислоях с аксиально-симметричным распределением поля рассеяния ферромагнитной подсистемы  $\mathbf{b}(r, z) = \mathbf{z}_0 b_z(r, z) + \mathbf{r}_0 b_r(r, z)$ , где компоненты  $b_z(r, z)$  и  $b_r(r, z)$  поля  $\mathbf{b}(r, z)$  определены для перпендикулярного ( $z$ ) и радиального ( $r$ ) направлений относительно плоскости сверхпроводящей пленки, соответственно. Найдена поправка к критической температуре сверхпроводящего параметра порядка, локализованного в окрестности кольца радиуса  $r_0$ , на котором перпендикулярная компонента полного магнитного поля обращается в нуль:  $H + b_z(r_0, 0) = 0$ . Предполагая толщину  $D$  достаточно малой по сравнению с характерной длиной  $\ell_z = \Phi_0/[r_0 \partial b_z / \partial r|_{(r_0, 0)}]$ , определяющей изменение параметра порядка по толщине пленки, аналитически получено выражение для сдвига критической температуры  $T_c$ :

$$1 - T_c/T_{c0} \simeq \min_m \left[ \Delta_m + \xi_0^2 \Delta \varepsilon_m^{(1)} \right], \quad (1)$$

в котором поправка  $\Delta \varepsilon_m^{(1)}$  имеет вид:

$$\Delta \varepsilon_m^{(1)} = \frac{\pi D^2}{6r_0 \Phi_0} \cdot \left\{ \frac{2\pi r_0 b_r^2(r_0, 0)}{\Phi_0} - \left[ \frac{\Phi(r_0, 0)}{\Phi_0} + m \right] \frac{\partial b_r}{\partial z} \Big|_{(r_0, 0)} \right\},$$

где  $\Phi_0 = \pi \hbar c / |e|$  – квант магнитного потока,  $T_{c0}$  – критическая температура сверхпроводящей пленки в отсутствие магнитного поля,  $m$  – целое число, называемое завихренностью,  $\xi_0 = \xi(0)$  – длина когерентности при  $T = 0$ ,  $\Phi = 2\pi r [Hr/2 + a(r, z)]$  – магнитный поток через кольцо радиуса  $r$ ,  $a(r, z)$  – векторный потенциал поля рассеяния ферромагнетика  $\mathbf{b}(r, z)$ ,  $\Delta_m$  определяет  $T_c$  сверхпроводящего зародыша, локализованного в окрестности кольца радиуса  $r_0$ , для случая  $D = 0$ . В диссертации показано, что формула (1) хорошо описывает зависимость  $T_c(H)$  в диапазоне внешних полей  $H$ :  $-\max b_z < H < -\min b_z$ .

Для исследования деталей зарождения локализованной сверхпроводимости рассмотрен модельный пример аксиально-симметричного распределения ферромагнетика – поле магнитного диполя с моментом  $\mathbf{m} = m_0 \mathbf{z}_0$ , расположенного на заданной высоте  $h$  относительно центральной плоскости сверхпроводящей пленки  $z = 0$ . На основе формулы (1) мы рассчитали линии фазового перехода  $T_c(H)$  для сверхпроводящих пленок с толщинами  $D = 0$ ,  $D = 0.15h$  и  $D = 0.3h$ , которые представлены на Рис. 1. Характерные осцилляции на зависимостях  $T_c(H)$  являются следствием фазовых переходов между состояниями с разной завихренностью  $m$ . Такие осцилляции часто называю осцилляциями Литтла–Паркса, поскольку они подобны хорошо изученным колебаниям критической температуры  $T_c$  в тонкостенном сверхпроводящем цилиндре, помещенном в продольное магнитное поле [22].

Из Рис. 1 видно, что учет толщины сверхпроводящей пленки  $D$  приводит к уменьшению области значений поля  $H$ , в которой происходит эффект Литтла–Паркса [22].

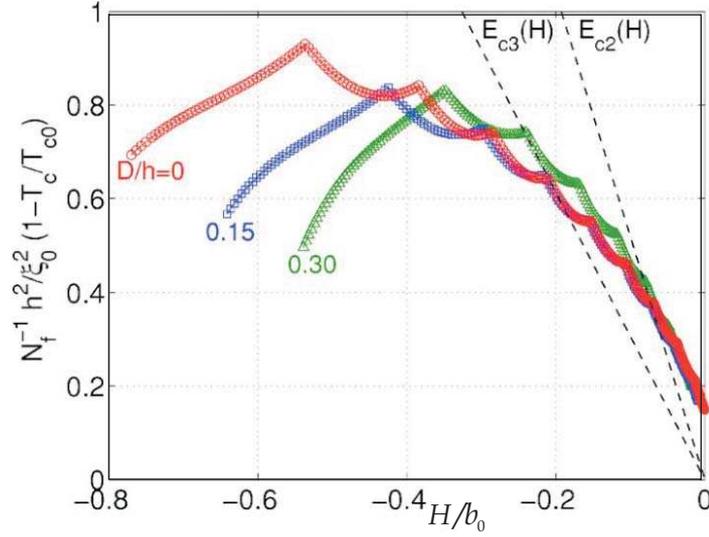


Рис. 1. Линии фазового перехода  $T_c(H)$  для числа  $N_f = 10$  и  $D = 0$  ( $\circ$ ),  $D/h = 0.15$  ( $\square$ ), and  $D/h = 0.3$  ( $\triangle$ ), построенные на основе уравнения (1). Штриховые линии  $E_{c2}(H)$  и  $E_{c3}(H)$  отвечают зависимостям  $(1 - T_c/T_{c0}) = |H|/H_{c2}^{(0)}$  и  $(1 - T_c/T_{c0}) = 0.59|H|/H_{c2}^{(0)}$ , соответственно.  $b_0 = 2m_0/h$ ,  $N_f = 4\pi m_0/(3\sqrt{3}h\Phi_0)$  – безразмерный поток через область, соответствующую положительному полю  $b_z(r, 0)$ .

Вследствие этого состояния, отвечающие большим  $|m|$  становятся невыгодными для локализованного зарождения сверхпроводимости при увеличении  $D$  (см. Рис. 1). В диссертации выяснено, что в предельном случае сверхпроводящего полупространства (когда  $D \rightarrow \infty$ ) осцилляции критической температуры  $T_c$  полностью подавлены, а зависимость  $T_c(H)$  описывается степенным законом:  $1 - T_c/T_{c0} \simeq |H|^{8/9}$ .

Во **Второй главе** исследованы особенности возникновения локализованной сверхпроводимости в гибридном S/F бислое, содержащем две плоские границы (доменные стенки и/или границы сверхпроводники/вакуум) произвольной ориентации по отношению друг к другу.

Раздел 2.1 посвящен обзору литературы, в котором анализируется появление локализованных сверхпроводящих мод вблизи уединенных плоских границ различного типа, а также формирование локализованного зародыша в угле сверхпроводящего клина.

В разделе 2.2 поставлена проблема исследования и представлены основные положения теории Гинзбурга–Ландау, необходимые для дальнейшего анализа зарож-

дения локализованной сверхпроводимости в рассматриваемом S/F бислое.

В разделе 2.3 изучено формирование сверхпроводящих мод, возникающих между параллельными границами различного типа. Показано, что для доменной стенки и параллельной ей границы сверхпроводник/вакуум (двух параллельных доменных стенок) энергетически выгодный зародыш сверхпроводящей фазы может появляться на конечном расстоянии  $L \simeq \sqrt{\Phi_0/(2\pi B_0)}$  между соответствующими границами, что приводит к повышению сверхпроводящей критической температуры  $T_c$  по сравнению со случаем изолированных границ. Здесь  $B_0$  – амплитуда поля рассеяния ферромагнитной подсистемы в сверхпроводящей пленке толщиной  $D$ . Расчеты сделаны в предположении  $D \rightarrow 0$ , а также при условии, что толщина ферромагнетика  $D_f$  существенно превосходит ширину доменов  $W$ . В таком приближении поле рассеяния одной доменной стенки имеет вид:  $\mathbf{b}(\mathbf{r}) = \mathbf{z}_0 b_z(\mathbf{r}) = \mathbf{z}_0 B_0 \text{sign}(\tilde{x})$ , где  $\mathbf{z}_0$  – единичный вектор вдоль оси  $z$ , ориентированной перпендикулярно плоскости рассматриваемого бислоя, ось  $\tilde{x}$  выбрана вдоль нормали к данной доменной границе.

В разделе 2.4 изучены эффекты гибридизации сверхпроводящих мод, распространяющихся вдоль границы сверхпроводник/вакуум и доменной стенки (двух доменных стенок), пересекающихся под углами  $\varphi_0 \ll \pi/2$ . Обнаружено, что наиболее выгодные условия для зарождения сверхпроводимости будут реализованы на расстоянии порядка  $L_B/\varphi_0$  от точки пересечения рассматриваемых границ. Это приводит к неожиданному поведению зависимости критического поля зарождения  $B_0^* = B_0/(1 - T_c/T_{c0})$  от угла  $\varphi_0$ :  $B_0^*(\varphi_0)$  монотонно возрастает при  $\varphi_0 \rightarrow 0$  и оказывается неаналитической в точке  $\varphi_0 = 0$ , в которой данная функция испытывает резкий скачок к значению  $H_{c3}$  ( $H_{c2}$ ) для случая доменной стенки, пересекающей границу образца (для случая двух пересекающихся доменных стенок). Здесь  $H_{c3} = 1.695 H_{c2}$  – критическое поле поверхностной сверхпроводимости [23]. Типичный график зависимости  $B_0^*(\varphi_0)$  в пределе  $\varphi_0 \rightarrow 0$  представлен на Рис. 2 штрих-пунктирной линией (1) для случая доменной стенки, пересекающей границу сверхпроводник/вакуум.

В разделе 2.5 показано, что для двух границ образца и/или доменных стенок, пересекающихся под углами  $\varphi_0 \simeq \pi/2$ , равновесная структура сверхпроводящего параметра порядка сильно зависит от распределения вихревых особенностей, располагающихся вдоль определенных направлений. Это является следствием интерференции сверхпроводящих мод, распространяющихся вдоль соответствующих границ. К решению данной задачи развит вариационный подход, на основе которого получена зависимость  $B_0^*(\varphi_0)$ , а также изучена фазовая диаграмма рассматриваемого S/F бислоя на плоскости внешнее магнитное поле  $H$  – температура  $T$ . Для частного случая доменной стенки, пересекающей границу сверхпроводник/вакуум, типичный график зависимости  $B_0^*(\varphi_0)$  представлен на Рис. 2 штрих-пунктирной линией (3). Полученные аналитические результаты находятся в хорошем согласии с результатами численных расчетов.

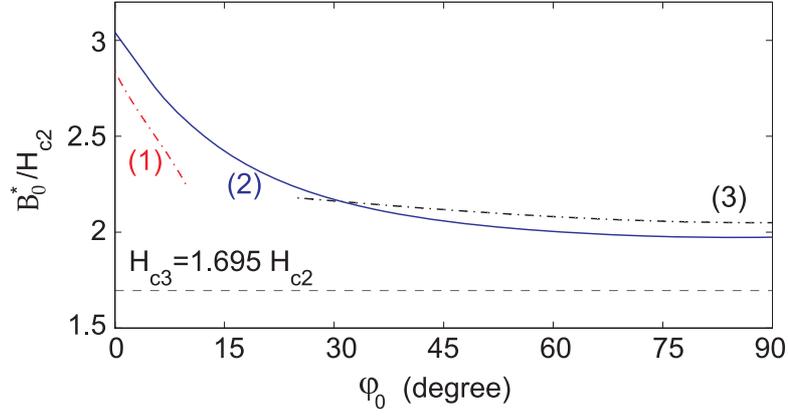


Рис. 2. Критическая амплитуда  $B_0^*$  магнитного поля рассеяния доменов ферромагнетика, соответствующая зарождению локализованной сверхпроводимости в гибридном S/F бислое, как функция угла наклона  $\varphi_0$  доменной стенки к границе сверхпроводящего слоя  $\Gamma_{s/v}$ . Штрих-пунктирные линии (1) и (3) получены в рамках вариационного анализа, выполненного в пределе малых и больших углов  $\varphi_0$ , соответственно. Зависимость  $B_0^*(\varphi_0)$ , найденная в результате численного решения нестационарных уравнений Гинзбурга–Ландау в квадратной пленке  $20\xi_0 \times 20\xi_0$ , представлена сплошной линией (2).

В **Третьей главе** проведен феноменологический анализ смешанного состояния сверхпроводящих пленок с различной степенью анизотропии, помещенных в наклонное магнитное поле.

В разделе 3.1 обсуждаются основные свойства вихрей в изотропных сверхпроводниках и сверхпроводящих пленках. Представлен обзор работ по изучению особенностей межвихревого взаимодействия в анизотропных сверхпроводящих системах. В данном разделе обсуждаются основные результаты недавних теоретических работ, касательно энергетически выгодной формы вихревой нити в пленках. Также представлены результаты некоторых экспериментальных работ по визуализации искривленных вихревых линий и необычных вихревых конфигураций в тонких пленках анизотропных сверхпроводников.

В разделе 3.2 развит приближенный подход, позволяющий описать равновесную форму изолированной вихревой линии в сверхпроводящей пленке с произвольной ориентацией оси анизотропии  $\mathbf{s}$  в широком интервале значений внешнего параллельного поля  $H_a$ , вплоть до первого критического поля проникновения параллельных вихрей.

В разделе 3.3 рассчитан потенциал межвихревого взаимодействия в тонких плен-

ках анизотропных сверхпроводников, помещенных в наклонное магнитное поле. Расчеты проведены с учетом искривления вихревых линий в пленке. Показано, что в конечной области углов наклона внешнего поля относительно нормали к плоскости пленки рассчитанный потенциал может иметь минимум. Типичные графики энергии взаимодействия двух искривленных вихревых линий от межвихревого расстояния  $R$  представлены на Рис. 3 для сверхпроводящей пленки толщиной  $D = 3\lambda_{ab}$  с параметром анизотропии  $\Gamma = \lambda_c/\lambda_{ab} = 27$ , где  $\lambda_c$  и  $\lambda_{ab}$  – лондоновские длины экранирования магнитного поля токами, текущими параллельно и перпендикулярно оси анизотропии  $c$ , соответственно. Также в данном разделе изучено взаимное влияние энергии

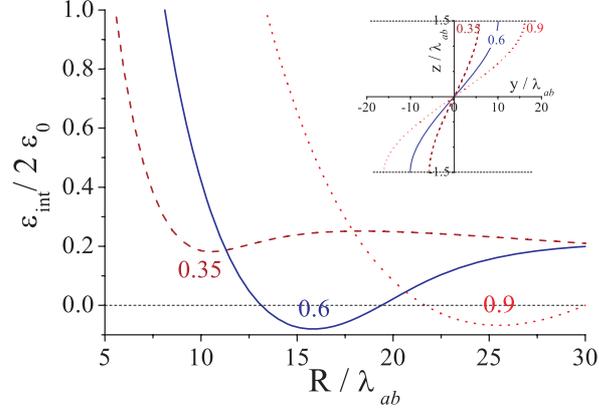


Рис. 3. Типичные графики энергии взаимодействия двух искривленных вихревых линий в расчете на одну линию в зависимости от межвихревого расстояния  $R$  в пленке анизотропного сверхпроводника толщиной  $D = 3\lambda_{ab}$  с параметром анизотропии  $\Gamma = 27$ . Числа около кривых определяют значение отношения  $H_a/H_{ab}$ . Форма вихревых линий схематически представлена на вставках,  $\epsilon_0 = \Phi_0^2/(16\pi^3\lambda_{ab})$ .

взаимодействия вихрей и их равновесной формы друг на друга. Найдены энергии кластеров, состоящих из нескольких вихрей, и рассчитаны равновесные вихревые конфигурации, соответствующие кластеру с минимальной энергией.

В разделе 3.4 исследованы магнитные поля рассеяния искривленных вихревых нитей в пленках анизотропных сверхпроводников. Показано, для достаточно тонких пленок профиль перпендикулярной компоненты  $(b_v)_z$  поля рассеяния индивидуального вихря может иметь два резких максимума. На Рис. 4 представлены типичные профили  $(b_v)_z(y)$  для изолированной вихревой линии в сверхпроводящей пленке толщиной  $D = 0.5\lambda_{ab}$  с параметром анизотропии  $\Gamma$  для трех разных значений параллельного поля  $H_a$ :  $H_a = 23.5 H_{ab}$ ,  $H_a = 30 H_{ab}$  и  $H_a = 32 H_{ab}$ , где  $H_{ab}$  – первое критическое поле для пленки с толщиной  $D \gg \lambda_{ab}$ . Из рисунка видно, что два на-

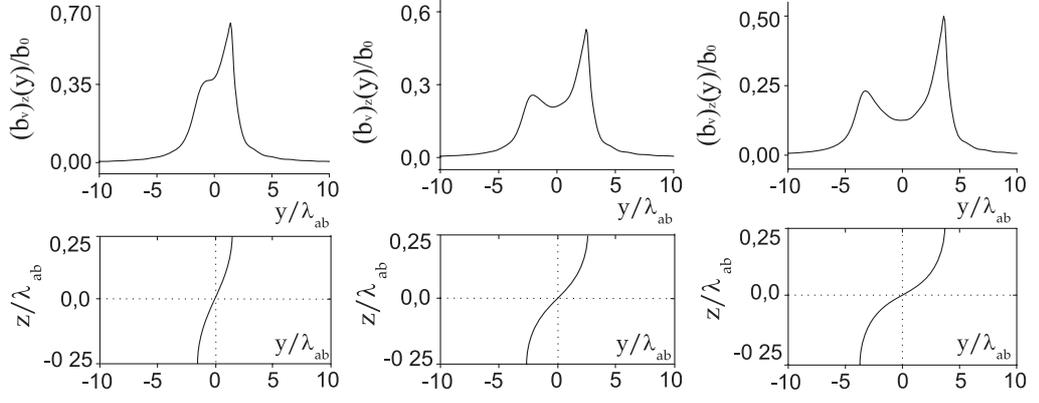


Рис. 4. Типичные графики профилей вихревого поля рассеяния и вихревых линий для  $H_a = 23.5 H_{ab}$  (левый столбец),  $H_a = 30 H_{ab}$  (средний столбец),  $H_a = 32 H_{ab}$  (правый столбец). Сверху: Компонента  $(b_v)_z$  магнитного поля рассеяния изолированной вихревой нити в зависимости от латеральной координаты  $y$  на высоте  $h = 0.1\lambda_{ab}$  над плоскостью пленки. Снизу: форма изолированной вихревой линии. Толщина пленки  $D = 0.5\lambda_{ab}$ , параметр анизотропии  $\Gamma = 10$ ,  $b_0 = \Phi_0/(2\pi\lambda_{ab}^2)$ .

блюдаемых пика могут быть разрешены тем лучше, чем более полого ведет себя кор вихря в толще пленки, что достигается в достаточно больших параллельных полях  $H_a$ . Обнаружено, что меньший пик будет постепенно исчезать при увеличении толщины  $D$  или высоты сканирования  $h$  над пленкой. Критическая толщина пленки  $D_c$ , при которой меньший пик еще заметен при  $h = 0$ , оказывается  $\simeq 2\lambda_{ab}$ . Полученные результаты обсуждаются в контексте современных экспериментов по визуализации вихрей в высокотемпературных сверхпроводниках, основанных на современных методиках, таких как магнито-силовая микроскопия или микроскопия Холла.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, которые открывают возможности для дальнейшей экспериментальной работы. В частности, можно выделить следующие задачи:

- Для дальнейшего исследования особенностей межвихревого взаимодействия в тонких пленках анизотропных сверхпроводников представляется интересным постановка эксперимента, позволяющего визуализировать предсказанные в данной диссертации нетривиальные вихревые распределения с помощью таких экспериментальных методик, как техника декорирования, сканирующая туннельная микроскопия и Лоренц-микроскопия.

- Значительный интерес представляет экспериментальное исследование профилей магнитных полей рассеяния вихрей в пленках сверхпроводников с различной степенью анизотропии, помещенных в наклонное магнитное поле. Данное исследование может быть выполнено с помощью современных методов визуализации магнитного поля, таких как магнито-силовая микроскопия или микроскопия Холла.

## Список литературы

- [1] Lange, M. Phase diagram of a superconductor-ferromagnet bilayer / M. Lange, M. J. Bael, and V. V. Moshchalkov // *Phys. Rev. B* – 2003. – V. 68. – P. 174522.
- [2] Buzdin, A. I. Domain wall superconductivity in ferromagnetic superconductors / A. I. Buzdin and A. S. Mel'nikov // *Phys. Rev. B* – 2003. – V. 67. – P. 020503.
- [3] Aladyshkin, A. Yu. Domain-wall superconductivity in hybrid superconductor-ferromagnet structures / A. Yu. Aladyshkin, A. I. Buzdin, A. A. Fraerman, A. S. Mel'nikov, D. A. Ryzhov, and A. V. Sokolov // *Phys. Rev. B* – 2003. – V. 68. – P. 184508.
- [4] Yang, A. Yu. Domain-wall superconductivity in superconductor-ferromagnet hybrids / Z. Yang, M. Lange, A. Volodin, R. Szymczak, and V. Moshchalkov // *Nat. Mater.* – 2004. – V. 3. – P. 793.
- [5] Schildermans, N. Different regimes of nucleation of superconductivity in mesoscopic superconductor/ferromagnet hybrids / N. Schildermans, A. Yu. Aladyshkin, A. V. Silhanek, Van de Vondel J., and V. V. Moshchalkov // *Phys. Rev. B* – 2008. – V. 77. – P. 214519.
- [6] Otani, Y. Magnetostatic interaction between magnetic arrays in superconducting thin films / Y. Otani, B. Pannetier, J. P. Noziferes, D. Givord // *Journ. Magn. Magn. Mater.* – 1993. – V. 126. – P. 622.
- [7] Golubovic, D. S. Nucleation of superconductivity in an Al mesoscopic disk with magnetic dot / D. S. Golubovic, W. V. Pogosov, M. Morelle, and V. V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – V. 83. – P. 1593–1598.
- [8] Buzdin, A. I. Penetration of inclined vortices into layered superconductors bilayer / A. I. Buzdin and A. Yu. Simonov // *JETP* – 1990. – V. 51. – P. 168.
- [9] Grishin, A. M. Magnetic field inversion and vortex chains in anisotropic superconductors / A. M. Grishin, A. Yu. Martynovich, and S. V. Yampol'skii // *JETP* – 1990. – V. 97. – P. 1930.

- [10] Kogan, V. G. Interaction of vortices in uniaxial superconductors / V. G. Kogan, N. Nakagawa, and S. L. Thiemann // Phys. Rev. B – 1990. – V. 42. – P. 2631.
- [11] Buzdin, A. I. Crossover between magnetic vortex attraction and repulsion in thin films of layered superconductor / A. I. Buzdin, A. S. Mel'nikov, A. V. Samokhvalov, T. Akashi, T. Masui, T. Matsuda, S. Tajima, H. Tadatomo, and A. Tonomura // Phys. Rev. B – 2009. – V. 79. – P. 094510.
- [12] Brandt, E. H. Tilted and curved vortices in anisotropic superconducting films / E. H. Brandt // Phys. Rev. B – 1993. – V. 48. – P. 6699.
- [13] Мартынович, А. Ю. Магнитные вихри в пластинах слоистых сверхпроводников / А. Ю. Мартынович // ЖЭТФ – 1994. – Т. 105. – С. 912.
- [14] Aladyshkin, A. Yu. Thin-film superconductor-ferromagnet hybrids: Competition between nucleation of superconductivity at domain walls and domain's centers / A. Yu. Aladyshkin and V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B – 2006. – V. 74. – P. 064503.
- [15] Aladyshkin, A. Yu. The Little-Parks effect and multiquanta vortices in a hybrid superconductor-ferromagnet system / A. Yu. Aladyshkin, A. S. Mel'nikov, and D. A. Ryzhov // J. Phys.: Condens. Matter – 2003. – V. 15. – P. 65917.
- [16] Grigorenko, A. N. Visualization of interacting crossing vortex lattices in the presence of quenched disorder / A. N. Grigorenko, S. J. Bending, A. E. Koshelev, J. R. Clem, T. Tamegai, and S. Ooi // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 89. – P. 217003.
- [17] Beleggia, M. Model of superconducting vortices in layered materials for the interpretation of transmission electron microscopy images / M. Beleggia, G. Pozzi, A. Tonomura, H. Kasai, T. Matsuda, K. Harada, T. Akashi, T. Masui, and S. Tajima // Phys. Rev. B – 2004. – V. 70. – P. 184518.
- [18] Guikema, J. W. Two-dimensional vortex behavior in highly underdoped  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  observed by scanning Hall probe microscopy / J. W. Guikema, H. Bluhm, D. A. Bonn, R. Liang, W. N. Hardy, and K. A. Moler // Phys. Rev. B – 2008. – V. 77. – P. 104515.
- [19] Luan, L. Magnetic force microscopy study of interlayer kinks in individual vortices in the underdoped cuprate superconductor  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  / L. Luan, O. M. Auslaender, D. A. Bonn, R. Liang, W. N. Hardy, and K. A. Moler // Phys. Rev. B – 2009. – V. 79. – P. 214530.
- [20] Benkraouda, M. Instability of a tilted vortex line in magnetically coupled layered superconductors / M. Benkraouda and J. R. Clem // Phys. Rev. B – 1996. – V. 53. – P. 438.

- [21] Auslaender, O. M. Mechanics of individual isolated vortices in a cuprate superconductor / O. M. Auslaender, L. Luan, E. W. J. Straver, J. E. Hoffman, N. C. Koshnick, E. Zeldov, D. A. Bonn, R. Liang, W. N. Hardy, and K. A. Moler // *Nature Physics* – 2009. – V. 5. – P. 35.
- [22] Little, W. A. Observation of quantum periodicity in the transition temperature of a superconducting cylinder / W. A. Little and R. D. Parks // *Phys. Rev. Lett.* – 1962. – V. 9. – P. 9.
- [23] Saint-James, D. Onset of superconductivity in decreasing Geds / D. Saint-James and P. G. de Gennes // *Phys. Rev. Lett.* – 1963. – V. 7. – P. 306.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

- (A1) Ryzhov D. A. Influence of the stray field of a magnetic dot on the nucleation of superconductivity in thick films / D. A. Ryzhov, A. V. Samokhvalov, D. A. Savinov, and A. S. Mel'nikov // *Mesoscopic and strongly correlated electron systems – Nanoscale superconductivity and magnetism: Chernogolovka, 2006.* – P. 43.
- (A2) Aladyshkin A. Yu. Localized superconductivity and Little–Parks effect in superconductor/ferromagnet hybrids / A. Yu. Aladyshkin, D. A. Ryzhov, A. V. Samokhvalov, D. A. Savinov, A. S. Mel'nikov, and V. V. Moshchalkov // *Physical Review B* – 2007. – V. 75. – P. 184519-1–184519-9.
- (A3) Мельников А. С. О форме вихревых линий в пленках анизотропных сверхпроводников / А. С. Мельников и Д. А. Савинов // *Сборник тезисов XIII международного симпозиума "Нанозлектроника и Нанозлектроника": Нижний Новгород, 2009.* – С. 541–542.
- (A4) Савинов Д. А. О форме вихревых линий в пленках анизотропных сверхпроводников / Д. А. Савинов и А. С. Мельников // *Сборник тезисов докладов 14-ой Нижегородской сессии молодых ученых: Нижний Новгород, 2009.* – С. 52–53.
- (A5) Savinov D. A. Structure and interaction of curved vortices in anisotropic superconducting films / D. A. Savinov and A. S. Mel'nikov // *Schegolev Memorial Conference – Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems: Chernogolovka, 2009.* – P. 79.
- (A6) Samokhvalov A. V. Vortex clusters and multiquanta flux lattices in thin films of anisotropic superconductors / A. V. Samokhvalov, D. A. Savinov, A. S. Mel'nikov, and A. I. Buzdin, *Physical Review B* – 2010. – V. 82. – P. 104511.
- (A7) Савинов Д. А. Вихревые молекулы в тонких пленках анизотропных сверхпроводников / Д. А. Савинов и А. С. Мельников // *Сборник тезисов докладов 15-ой Нижегородской сессии молодых ученых: Нижний Новгород, 2010.* – С. 84.

- (A8) Мельников А. С. Вихревые молекулы в тонких пленках анизотропных сверхпроводников / А. С. Мельников и Д. А. Савинов // Сборник тезисов XIV международного симпозиума "Нанозлектроника и Нанозлектроника": Нижний Новгород, 2010. – Т. 1. – С. 291.
- (A9) Самохвалов А. В. Вихревые молекулы в тонких пленках анизотропных сверхпроводников / А. В. Самохвалов, Д. А. Савинов, А. С. Мельников и А. И. Буздин // Сборник тезисов 4-ой Всероссийской конференции молодых ученых имени Ю. В. Дубровского "Микро-, нанотехнологии и их применение": Черноголовка, 2010. – С. 28.
- (A10) Савинов Д. А. Равновесная структура вихревых линий в тонких пленках анизотропных сверхпроводников // Сборник тезисов XV международного симпозиума "Нанозлектроника и Нанозлектроника": Нижний Новгород, 2011. – Т. 1. – С. 301.
- (A11) Путилов А. В. Локализованная сверхпроводимость и критические токи в мезоскопических планарных структурах сверхпроводник-ферромагнетик / А. В. Путилов, С. В. Миронов, Д. А. Савинов, И. М. Нефёдов, И. А. Шерешевский и А. Ю. Аладышкин // Сборник тезисов XV международного симпозиума "Нанозлектроника и Нанозлектроника": Нижний Новгород, 2011. – Т. 1. – С. 296.
- (A12) Savinov D. A. Magnetic field imaging of curved vortex lines in thin films of anisotropic superconductors // IV International conference "Fundamental Problems of High Temperature Superconductivity": Zvenigorod, 2011. – P. 137.
- (A13) Savinov D. A. Magnetic field imaging of curved vortex lines in thin films of anisotropic superconductors // Superconductor Science and Technology – 2012. – V. 25. – P. 015003.
- (A14) Aladyshkin A. Yu. Hybridization and interference effects for localized superconducting states in strong magnetic field / A. Yu. Aladyshkin A. S. Mel'nikov, I. M. Nefedov, D. A. Savinov, M. A. Silaev, and I. A. Shereshevskii // Physical Review B – 2012. – V. 85 – P. 184528.
- (A15) Аладышкин А. Ю. Локализованная сверхпроводимость вблизи доменной стенки, пересекающей границу образца / А. Ю. Аладышкин, А. С. Мельников, И. М. Нефедов, Д. А. Савинов, М. А. Силаев и И. А. Шерешевский // Сборник тезисов XVI международного симпозиума "Нанозлектроника и Нанозлектроника": Нижний Новгород, 2012. – Т. 1. – С. 74.
- (A16) Савинов Д. А. Магнитная визуализация искривленных вихревых нитей в тонких пленках анизотропных сверхпроводников // Сборник тезисов XVI международного симпозиума "Нанозлектроника и Нанозлектроника": Нижний Новгород, 2012. – Т. 1. – С. 76.

Савинов Денис Александрович

**ВИХРЕВЫЕ СОСТОЯНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ  
АНИЗОТРОПНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ  
И ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ  
СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОМАГНЕТИК**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати 30 октября 2012 г.  
Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института физики микроструктур Российской академии наук,  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105