

На правах рукописи



Миронов Сергей Викторович

**НЕОДНОРОДНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ЭЛЕКТРОННЫЙ
ТРАНСПОРТ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ГИБРИДНЫХ
СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ,
НОРМАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

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 — 2013

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

- Научный руководитель: Мельников Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук
- Официальные оппоненты: Тагиров Ленар Рафгатович,
доктор физико-математических наук,
Казанский (Приволжский) федеральный университет, заведующий кафедрой
- Сатанин Аркадий Михайлович,
доктор физико-математических наук,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, профессор
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

Защита состоится 18 апреля 2013 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. 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 диссертации разослан 11 марта 2013 г.

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



К. П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Свойства сверхпроводящих материалов и гибридных систем на их основе привлекают интерес как теоретиков, так и экспериментаторов в течение последних 100 лет. Одним из фундаментальных свойств сверхпроводников является их способность переносить слабый электрический ток без диссипации энергии. Отсутствие джоулевых потерь в сверхпроводниках открывает широкие перспективы для их применения в микроэлектронике, где проблема организации эффективного отвода тепла является одним из наиболее существенных ограничений для уменьшения размеров элементов интегральных микросхем. В связи с этим, большое внимание уделяется изучению явлений, позволяющих осуществлять управление критической температурой и транспортными свойствами сверхпроводников.

В последнее время наблюдается растущий интерес к многослойным гибридным системам сверхпроводник (S) / ферромагнетик (F), в которых граница между слоями является частично или полностью прозрачной для электронов [1]. В отличие от систем сверхпроводник / нормальный металл (S/N), в которых сверхпроводящие корреляции затухают вглубь N области, в S/F системах корреляционная функция внутри F слоя, индуцированная за счет эффекта близости, кроме затухания, испытывает пространственные осцилляции в направлении поперек слоев [1, 2]. Механизм возникновения осцилляций аналогичен механизму образования состояний Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла (ЛОФФ). Формирование поперечных состояний ЛОФФ в бислоях S/F приводит к локальному увеличению электронной плотности состояний на уровне Ферми, формированию π -контактов и возникновению немонотонных зависимостей критической температуры и эффективной длины проникновения магнитного поля от толщины F слоя. При этом локальное увеличение плотности состояний сопровождается сменой направления мейснеровских токов, протекающих внутри ферромагнетика, на противоположное, что соответствует возникновению парамагнитному отклику на внешнее поле [3]. Описанный парамагнитный эффект Мейснера был также предсказан для спин-триплетных сверхпроводников [4] и для S/N контактов со спин-активной границей [5]. Вместе с тем, значительный интерес вызывает изучение вопроса об устойчивости состояний, демонстрирующих парамагнитный эффект Мейснера.

Также значительный интерес привлекают планарные гибридные S/F системы, в которых граница между S и F слоями является непрозрачной для электронов. В случае, когда F слой имеет доменное распределение намагниченности, неоднородное магнитное поле, создаваемое в пленке сверхпроводника, может приводить к возникновению сверхпроводимости на доменных стенках – явления, при котором сверхпроводимость существует в узких квазиодномерных областях, локализован-

ных вблизи доменных границ [6, 7, 8]. В таких системах представляется актуальным изучение флуктуационной проводимости Асламазова-Ларкина $\Delta\sigma$ [9]. Величина $\Delta\sigma$ является сингулярной при температурах T , близких к критической температуре T_c , причем соответствующий критический индекс определяется размерностью D сверхпроводящей системы: $\Delta\sigma \propto (T - T_c)^K$, где $K = D/2 - 2$. В отличие от однородных сверхпроводников, для которых величина K зависит от размерности всего образца, в системах с локализованной сверхпроводимостью данный критический индекс определяется лишь размерностью локализованных сверхпроводящих зародышей. В частности, флуктуационная проводимость толстой пленки сверхпроводника в продольном магнитном поле является анизотропной [10] и имеет двумерный характер вблизи T_c ($K = -1$) [11]. В перпендикулярном же магнитном поле из-за формирования краевых состояний поведение поправки $\Delta\sigma$ вблизи T_c является одномерным ($K = -3/2$) [12].

Другой пример локализованной сверхпроводимости реализуется в сверхпроводниках, содержащих плоскости двойникования (ПД), вблизи которых критическая температура T_c может локально превышать критическую температуру объемного сверхпроводника [13]. Хорошо известно, что абсолютно прозрачные для электронов ПД могут эффективно экранировать параллельное магнитное поле. При этом величина критического поля сверхпроводника с ПД превышает критическое поле сверхпроводника без дефектов [14]. Вместе с тем, вопрос о влиянии конечной прозрачности ПД на структуру сверхпроводящего состояния и критическое поле в сверхпроводниках первого рода остается до конца не решенным. Авторы работы [15] показали, что в случае слабо прозрачных ПД энергетически выгодным может стать асимметричное относительно ПД распределение параметра порядка. Однако позднее было показано, что такое состояние неустойчиво относительно формирования симметричного сверхпроводящего состояния, в котором параллельное магнитное поле может полностью проникать в область ПД [A2].

Возможность изменения проводимости путем прикладывания сравнительно слабых магнитных полей может быть реализована также и в нормальных (не сверхпроводящих) структурах, к которым относится, например, двумерный электронный газ (ДЭГ) с сильным беспорядком при низких температурах. На проводимость ДЭГ существенное влияние оказывают эффекты слабой локализации, чувствительные к перпендикулярной компоненте внешнего однородного магнитного поля [16]. При этом существенный интерес вызывает вопрос о поведении слаболокализационной поправки к проводимости ДЭГ $\Delta\sigma$ в пространственно неоднородных магнитных полях. Для частного случая слабого магнитного поля, создаваемого массивом замороженных в сверхпроводящую пленку вихрей, величина $\Delta\sigma$ оказалась пропорциональной модулю среднего поля [17, 18], тогда как для однородного поля $\Delta\sigma \propto H^2$. Другой интересной особенностью является необычная зависимость характерного времени дефазировки $\tau_H^{-1} \propto H_0^2$ от амплитуды поля H_0 для случайных знакопеременных профилей магнитного поля [19, 20]. Указанная зависимость величины τ_H^{-1} суще-

ственно отличается от линейной зависимости $\tau_H^{-1} \propto H$, характерной для однородного поля. Несмотря на перечисленные результаты, к настоящему времени общая картина слабой локализации в магнитных полях с произвольной амплитудой и пространственной конфигурацией не построена.

Степень разработанности темы исследования

Особенности эффекта близости в гибридных системах S/F теоретически изучались Ф.С. Бержеретом, А.Ф. Волковым, К.Б. Ефетовым, А.И. Буздиным, А.А. Голубовым, М.Ю. Куприяновым, Л.Л. Булаевским, Л.Р. Тагировым, А.С. Мельниковым, А.В. Самохваловым, Ю. Танакой, Я.В. Фоминовым и другими авторами. В частности, в работе [21] было показано, что сверхпроводящее состояние тонкой пленки сверхпроводника, покрывающей поверхность ферромагнитного цилиндра, может обладать ненулевым орбитальным моментом. В таком состоянии сверхпроводящий параметр порядка оказывается модулированным в направлении вдоль границы между сверхпроводником и ферромагнетиком. Однако для односвязных многослойных гибридных систем S/F вопрос о возможности формирования состояний, неоднородных в плоскости слоев, до сих пор остается открытым. Как было показано в работе [23], обсуждаемые в литературе состояния с продольной модуляцией корреляционной функции только внутри ферромагнетика [22, 24] противоречат граничным условиям Куприянова-Лукичева.

Экранировка магнитного поля сверхпроводниками первого и второго рода, содержащими плоскости двойникования (ПД), при температурах, близких к критической, теоретически и экспериментально изучалась в работах А.И. Буздина, И.Н. Хлюстикова, Т.М. Мишонова, Дж.О. Индекю, В.Б. Гешкенбейна, К.В. Самохина и других авторов. В частности, в работе [25] для сверхпроводников второго рода показано существование локализованных вблизи ПД состояний, которые являются неоднородными вдоль ПД. Такие состояния возникают из-за проникновения в область ПД внешнего параллельного магнитного поля, которое приводит к образованию цепочки бескоровых вихрей. Можно ожидать, что аналогичные вихревые состояния формируются и в сверхпроводниках первого рода со слабопрозрачными для электронов плоскостями двойникования, однако этот вопрос в литературе не рассмотрен.

Явление локализованной сверхпроводимости в гибридных системах сверхпроводник / ферромагнетик экспериментально и теоретически изучалось в работах А.И. Буздина, Л.Н. Булаевского, С.В. Панюкова, А.С. Мельникова, А.А. Фраермана, А.Ю. Аладьшкина, В.В. Мощалкова, З. Янга, Д.А. Рыжова и других авторов. В частности, в работе [26] изучались особенности протекания электрического тока через сверхпроводящий мостик, помещенный в магнитное поле ферромагнетика с доменной стенкой. Было показано, что в режиме локализованной сверхпроводимости электрический ток протекает преимущественно по квазиодномерному сверхпро-

водящему каналу, расположенному вблизи доменной границы. Вместе с тем, теоретическое описание транспортных характеристик таких каналов при температурах как выше, так и ниже критической до сих пор не построено.

Влияние пространственно неоднородных магнитных полей на слаболокализационную поправку к проводимости двумерного электронного газа теоретически и экспериментально изучалось в работах А.Л. Шеланкова, Дж. Раммера, С.Дж. Бендинга, К. вон Клицинга, К. Плуга, А.К. Гейма, К.-Б. Ванга и других авторов. В работах [17, 18, 20] выполнены аналитические расчеты слаболокализационной поправки к проводимости для некоторых модельных профилей магнитного поля (решетки магнитных трубок с фиксированным потоком; однородного поля со слабой модуляцией; профилей, описываемых гиперболическими функциями и др.). Вместе с тем, общая картина слабой локализации в неоднородных магнитных полях с произвольной пространственной конфигурацией до сих пор не построена.

Цели и задачи

Целями диссертационной работы являются:

- Исследование особенностей формирования состояний Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла в многослойных тонкопленочных системах сверхпроводник/ферромагнетик. Расчет пространственного масштаба экранировки внешнего магнитного поля и величины критического поля.
- Исследование особенностей проникновения магнитного поля в сверхпроводник первого рода, содержащий плоскости дробнирования с низкой электронной прозрачностью. Расчет зависимости критического термодинамического магнитного поля от температуры.
- Изучение зависимости флуктуационной проводимости гибридных систем, состоящих из пленки сверхпроводника и ферромагнетика с магнитными доменами, от температуры, амплитуды магнитного поля рассеяния и величины внешнего магнитного поля.
- Изучение поведения слаболокализационной поправки к проводимости двумерного электронного газа в пространственно неоднородных магнитных полях. Расчет магнетосопротивления гибридных систем двумерный электронный газ/ферромагнетик с одномерной доменной структурой.

Научная новизна

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

1. Предсказано, что в многослойных тонкопленочных системах на основе сверхпроводников и ферромагнетиков реализуется неустойчивость Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла (ЛОФФ), приводящая к формированию про-

филя параметра порядка с модуляцией в плоскости слоев. В отличие от предыдущих работ по этой тематике анализ неустойчивости ЛОФФ в плоскости слоев основаны на использовании корректных граничных условий Куприянова-Лукичева для уравнения Узаделя.

2. Показано, что уменьшение электронной прозрачности плоскостей двойникового в сверхпроводниках первого рода, помещенных во внешнее магнитное поле, приводит к формированию резких пространственных профилей магнитного поля с максимумом на плоскости двойникового и к увеличению критического термодинамического поля перехода в нормальное состояние. Предсказанные пространственно неоднородные состояния являются энергетически более выгодными по сравнению с состояниями, найденными в предыдущих работах.
3. Продемонстрировано, что флуктуационная проводимость тонкопленочных гибридных систем, состоящих из сверхпроводника и ферромагнетика с одномерной доменной структурой, является анизотропной в плоскости сверхпроводника. Проанализирована зависимость величины анизотропии от температуры и амплитуды магнитного поля рассеяния, создаваемого ферромагнетиком. Проведенный анализ позволил обобщить результаты, полученные ранее для пленки сверхпроводника в однородном магнитном поле, на случай существенно неоднородных магнитных полей, а также выявить особенности поведения флуктуационной проводимости, специфические для гибридных систем сверхпроводник / ферромагнетик.
4. Показано, что для гибридных систем, состоящих из двумерного электронного газа и ферромагнетика с одномерной доменной структурой, время электронной дефазировки и знак магнетосопротивления, обусловленного эффектом слабой локализации, определяются пространственными масштабами магнитного поля рассеяния, создаваемого ферромагнетиком. Полученные результаты позволили построить общую картину электронной дефазировки в неоднородных магнитных полях с произвольными характерными масштабами и амплитудой.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в следующем.

- Для тонкопленочных многослойных систем сверхпроводник/ферромагнетик найден новый тип сверхпроводящих состояний с неоднородным распределением параметра порядка в плоскости слоев. Формирование таких состояний препятствует смене знака мейснеровского отклика системы на внешнее магнитное поле.
- Предложен аналитический подход, позволяющий описать поведение флуктуационной проводимости пленки сверхпроводника, помещенной в пространственно неоднородное магнитное поле ферромагнетика с магнитными доменами.

- Для сверхпроводников первого рода, содержащих плоскости двойникования с низкой электронной прозрачностью, найден новый класс решений уравнения Гинзбурга-Ландау, соответствующих проникновению внешнего параллельного магнитного поля в область плоскости двойникования.
- Предложен аналитический подход, позволяющий описать влияние слабого магнитного поля с произвольной пространственной конфигурацией на время электронной дефазировки в двумерном электронном газе.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

- Одним из перспективных применений многослойных систем сверхпроводник / ферромагнетик в микроэлектронике является изготовление на их основе новых устройств (π -контактов и спиновых вентилях), позволяющих осуществлять эффективное управление электронным током. Учет возможности формирования продольного состояния Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла, предсказанной в диссертационной работе, имеет принципиальное значение при проектировании подобных устройств.
- Электронная прозрачность является ключевым феноменологическим параметром плоскостей двойникования, определяющим их влияние на магнитные и транспортные свойства сверхпроводника вблизи критической температуры. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных по изучению локализованной сверхпроводимости на плоскостях двойникования.
- Перспективным применением гибридных структур сверхпроводник / ферромагнетик с магнитными доменами, в которых может реализовываться локализованная сверхпроводимость, является создание на их основе перестраиваемых элементов для сверхпроводящей микроэлектроники. Проведенные расчеты флуктуационной проводимости данных систем позволяют предсказать их транспортные характеристики при температурах выше критической.
- Проведенные расчеты слаболокализационной поправки к проводимости двумерного электронного газа в пространственно неоднородных магнитных полях показывают, что двумерный электронный газ является чувствительным детектором магнитного поля, способным регистрировать микромасштабные поля с нулевым пространственным средним.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались теоретические методы основанные на аналитическом решении стационарного и нестационарного уравнений Гинзбурга-Ландау, уравнения Узаделя, а также уравнения для куперона.

Положения, выносимые на защиту

1. В тонкопленочных многослойных структурах сверхпроводник / ферромагнетик реализуется неустойчивость Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла (ЛОФФ), что приводит к формированию профиля параметра порядка, модулированного в плоскости слоев. Переключение между однородным в плоскости слоев состоянием и продольным состоянием ЛОФФ сопровождается исчезновением эффекта Мейснера и возникновением осцилляций критической температуры как функции перпендикулярной компоненты магнитного поля.
2. Уменьшение электронной прозрачности плоскостей двойникования в сверхпроводниках первого рода, помещенных во внешнее магнитное поле, приводит к формированию резких пространственных профилей магнитного поля с максимумом на плоскости двойникования и к увеличению критического термодинамического поля перехода в нормальное состояние.
3. Флуктуационная проводимость тонкопленочных гибридных систем, состоящих из сверхпроводника и ферромагнетика с одномерной доменной структурой, является анизотропной в плоскости сверхпроводника. Величина анизотропии зависит от температуры и амплитуды магнитного поля рассеяния, создаваемого ферромагнетиком.
4. Для гибридных систем, содержащих двумерный электронный газ и ферромагнетик с доменным распределением намагниченности, время электронной дефазировки и знак магнетосопротивления, обусловленного эффектом слабой локализации, определяются пространственными масштабами магнитного поля, создаваемого ферромагнетиком в области электронного газа.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов обеспечена оптимальным выбором физических моделей, учитывающих основные свойства исследуемых систем.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) в период с 2008 по 2012 год. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН, а также были представлены на международных конференциях "Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems" (Черноголовка, 2009), "NanoPeter-2010" (Санкт-Петербург, 2010), "MESO-2012" (Черноголовка, 2012), на международных симпозиумах "Нанозифика и наноэлектроника" (Нижний Новгород, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012), а также на научных школах "Нелинейные волны" (Нижний Новгород, 2008, 2010).

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы из 124 наименований. Общий объем - 110 страниц, в диссертации приведено 28 рисунков.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования и степень ее разработанности; сформулированы цели диссертационной работы; показана её научная новизна и значимость; приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изучению пространственной конфигурации основного состояния многослойных гибридных систем, содержащих сверхпроводник и ферромагнетик.

В разделе 1.1 показано, что в многослойных тонкопленочных сверхпроводящих системах с шириной, много меньшей лондоновской глубины проникновения магнитного поля λ , не могут реализовываться состояния, в которых интегральный отклик сверхпроводящего тока на магнитное поле является парамагнитным. Такие состояния с $\lambda^{-2} < 0$ оказываются неустойчивыми относительно возникновения модуляции параметра порядка в плоскости слоев (продольных состояний ЛОФФ).

В разделе 1.2 описан метод расчета критической температуры, критического магнитного поля и лондоновской глубины проникновения внешнего магнитного поля, основанный на решении уравнения Узаделя. Данный метод используется в последующих разделах для описания свойств грязных многослойных систем S/F.

В разделе 1.3 для гибридных систем S/F с эффектом близости изучены особенности формирования неоднородных состояний ЛОФФ с модуляцией параметра порядка в плоскости слоев. Предполагалось, что толщина S слоя d_s много меньше сверхпроводящей длины когерентности $\xi_{s0} = \sqrt{D_s/4\pi T_{c0}}$, так что параметр порядка в сверхпроводнике не зависит от координаты поперек слоев и имеет вид $\Delta(\mathbf{r}) = \Delta_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}_{\parallel})$ (здесь D_s – коэффициент диффузии в S слое, T_{c0} – критическая температура изолированной сверхпроводящей пленки, \mathbf{k} – вектор модуляции ЛОФФ, \mathbf{r}_{\parallel} – радиус-вектор в плоскости слоев). На основе решения линеаризованного уравнения Узаделя рассчитана зависимость критической температуры $T_c(k)$ возникновения неоднородного состояния с вектором модуляции \mathbf{k} для случая, когда коэффициент диффузии в F слое D_f достаточно большой ($D_f/D_s \gg h/T_{c0}$, где h – обменное поле в ферромагнетике) и толщина F слоя $d_f \sim \xi_f = \sqrt{D_f/h}$. Показано, что параметр магнитной экранировки λ^{-2} пропорционален производной $[\partial T_c / \partial (k^2)]|_{k=0}$, знак которой определяет устойчивость состояния с $k = 0$. Типичные зависимости $T_c(k)$ для различных значений d_s показаны на Рис. 1.

Для $d_s \gg (\sigma_f/\sigma_s)\xi_f$, где $\sigma_{s(f)}$ – проводимость S(F) слоя, зависимость $T_c(k)$ имеет максимум при $\mathbf{k} = 0$ (см. Рис. 1). В данной области параметров реализуется однородное в плоскости слоев состояние, для которого $\lambda^{-2} > 0$. С уменьшением толщины S слоя величина λ^{-2} также уменьшается и может обратиться в ноль при некотором критическом значении толщины d_s . В этом случае максимум функции $T_c(k)$ смеща-

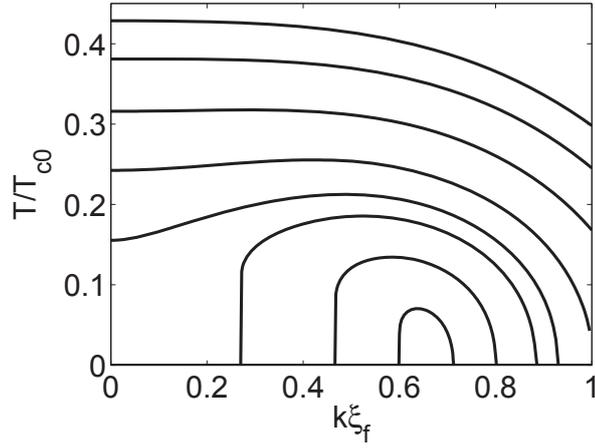


Рис. 1. Зависимости критической температуры бислоя S/F от модуля вектора модуляции ЛОФФ $T_c(k)$ для $\xi_{s0} = 0, 1\xi_f$; $d_f = 1, 2\xi_f$ и различных значений толщины d_s сверхпроводящего слоя. Был выбран следующий набор значений параметра (d_s/ξ_f) (σ_s/σ_f): 0,13; 0,125; 0,12; 0,1165; 0,1148; 0,114; 0,113; 0,1125. Увеличение толщины d_s соответствует увеличению максимума критической температуры T_c .

ется в область $k \neq 0$, и система переключается из однородного в плоскости слоев состояния в модулированное состояние ЛОФФ. Заметим, что в состоянии ЛОФФ мейснеровский отклик системы на параллельную компоненту внешнего магнитного поля H_{\parallel} является диамагнитным. При этом зависимость величины T_c от перпендикулярной компоненты магнитного поля H_{\perp} имеет осцилляторный характер.

В разделе 1.4 продемонстрировано, что добавление в систему слоя нормального металла с большим коэффициентом диффузии может привести к формированию состояний ЛОФФ при температурах, близких к T_{c0} . Также показано, что в гибридных системах S/F/F', состоящих из пленки сверхпроводника и ферромагнитного бислоя с неколлинеарными магнитными моментами, переключения между однородным в плоскости слоев состоянием и продольным состоянием ЛОФФ могут осуществляться контролируемым образом посредством изменения толщины S слоя и угла между векторами намагниченности в F/F' бислое.

Вторая глава посвящена изучению особенностей экранировки магнитного поля сверхпроводниками первого рода с плоскостями двойникования.

В разделе 2.1 описана феноменологическая модель Гинзбурга-Ландау, используемая для расчета зависимости критической температуры образования сверхпроводимости на уединенной плоскости двойникования (ПД) от магнитного поля, направленного параллельно ПД.

В разделе 2.2 произведен расчет зависимости критического термодинамического магнитного поля от температуры T для сверхпроводника первого рода с параметром Гинзбурга-Ландау $\kappa \ll 1$, содержащего уединенную ПД (плоскость $z = 0$). Предполагалось, что ПД обладает низкой электронной прозрачностью, и внешнее магнитное поле H параллельно ПД.

Показано, что параллельное магнитное поле может полностью проникать в область ПД в виде цепочки бескорневых вихрей джозефсоновского типа. Это приводит к формированию в сверхпроводнике резких профилей магнитного поля с максимумом на ПД (профили модуля параметра порядка и магнитного поля вблизи ПД схематично показаны на Рис. 2). Учет проникновения параллельного поля в область ПД приводит к увеличению критического термодинамического поля образования локализованных сверхпроводящих состояний. Результирующая фазовая диаграмма сверхпроводника в осях магнитное поле h – температура t показана на Рис. 2. Здесь $t = (T - T_c) / (T_s - T_c)$, T_c – критическая температура объемного сверхпроводника, T_s – критическая температура сверхпроводимости на ПД, $h = H/H_c(t = -1)$, $H_c(t)$ – критическое поле разрушения объемной сверхпроводимости.

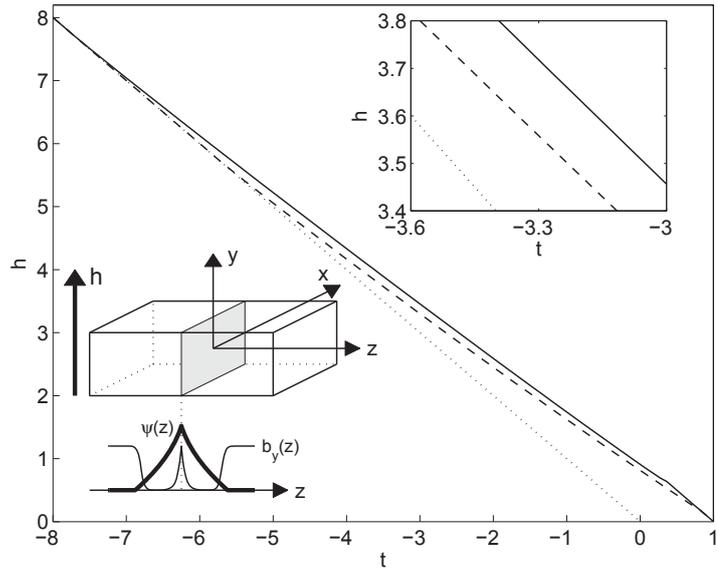


Рис. 2. Фазовая диаграмма сверхпроводника первого рода (олова) с абсолютно непрозрачной для электронов плоскостью двойникового (ПД) в параллельном магнитном поле (сплошная кривая). Пунктиром показана диаграмма, рассчитанная без учета проникновения поля в область ПД; точечная кривая – диаграмме объемного сверхпроводника. На вставке показан увеличенный фрагмент данных зависимостей.

В **третьей главе** представлены результаты исследования флуктуационной проводимости сверхпроводящей пленки, помещенной в перпендикулярное неоднородное магнитное поле, создаваемое ферромагнетиком с доменной структурой.

В разделе 3.1 описан метод расчета тензора флуктуационной проводимости при температурах T выше критической температуры T_c , основанный на решении нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау.

В разделе 3.2 показано, что флуктуационная проводимость Асламазова-Ларкина $\Delta\sigma$ гибридной структуры, состоящей из пленки сверхпроводника и ферромагнетика с одномерной доменной структурой намагниченности, является существенно анизотропной. Величина анизотропии сильно зависит как от температуры, так и от соотношения между шириной доменов d и магнитной длиной $L_{H_0} = \sqrt{\Phi_0/H_0}$, где H_0 – амплитудное значение магнитного поля рассеяния, Φ_0 – квант магнитного потока.

При $L_{H_0} \gg d$ температурная зависимость поправки $\Delta\sigma$ соответствует двумерным флуктуациям: $\Delta\sigma \propto (T - T_c)^{-1}$. В то же время тензор проводимости является слабоанизотропным: соотношение между компонентами проводимости вдоль доменных стенок σ^{\parallel} и поперек них σ^{\perp} имеет вид: $\sigma^{\parallel}/\sigma^{\perp} = 1 - (2\pi^2/15)(d/L_{H_0})^4(\Delta\sigma_0/\sigma_N)$, где σ_N – друдевская проводимость нормальных электронов, $\Delta\sigma_0$ – поправка Асламазова-Ларкина к проводимости изолированной пленки сверхпроводника.

При $L_{H_0} \ll d$ температурные зависимости компонент поправки $\Delta\sigma$ вдоль и поперек доменных стенок существенно отличаются друг от друга. Для $\epsilon_{DW} \gg \xi_0^2 (dL_{H_0}^2)^{-2/3}$ тензор флуктуационной проводимости является изотропным. Здесь $\epsilon_{DW} = (T - T_d)/T_{c0}$, T_d – критическая температура сверхпроводимости на доменных стенках, T_{c0} – критическая температура изолированной пленки сверхпроводника, ξ_0 – длина когерентности в сверхпроводнике. В области температур $\xi_0^2/d^2 \ll \epsilon_{DW} \ll \xi_0^2 (dL_{H_0}^2)^{-2/3}$ компонента флуктуационной проводимости поперек доменных границ не сингулярна вблизи критической температуры сверхпроводимости на доменных стенках, в то время как компонента вдоль доменных границ демонстрирует кроссовер к одномерной зависимости $\epsilon_{DW}^{-3/2}$. В результате в этом температурном диапазоне поправка $\Delta\sigma$ становится анизотропной. Области параметров, соответствующие различным температурным зависимостям компоненты флуктуационной проводимости вдоль доменных стенок, показаны на Рис. 3. Наконец, при $\epsilon_{DW} \ll \xi_0^2/d^2$ компонента поправки $\Delta\sigma$ поперек доменных стенок проявляет кроссовер к сингулярности вида $\Delta\sigma^{\perp} \propto \epsilon_{DW}^{-1/2}$.

В промежуточном случае, когда $L_{H_0} \approx d$, реализуется необычная зависимость флуктуационной проводимости от амплитуды магнитного поля рассеяния H_0 : при одновременном изменении температуры и магнитного поля H_0 таким образом, что отличие температуры системы от критической температуры сверхпроводящего фазового перехода остается постоянным, зависимость компоненты проводимости вдоль доменных границ имеет минимум при $H_0 \sim \Phi_0/d^2$, в то время как поперечная компонента проводимости является монотонно возрастающей функцией H_0 .

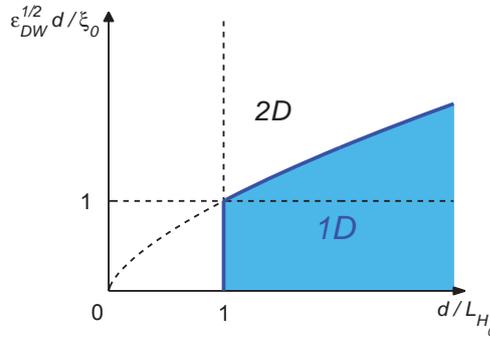


Рис. 3. Диаграмма различных температурных режимов для флуктуационной проводимости вдоль доменных стенок в гибридных планарных S/F системах на плоскости ключевых параметров. В белой области сингулярность флуктуационной проводимости имеет двумерный характер, в то время как в темной области она становится одномерной из-за локального увеличения флуктуаций вблизи доменных границ.

В **четвертой главе** проведен анализ влияния пространственно неоднородного магнитного поля на явления слабой локализации в двумерном электронном газе.

В разделе 4.1 описан метод расчета слаболокализационной поправки к кондактансу двумерного электронного газа (ДЭГ), основанный на решении уравнения для куперона. Также на качественном уровне рассмотрены отличия механизмов электронной дефазировки в неоднородном магнитном поле от случая однородного поля.

В разделе 4.2 рассмотрены приближенные методы, которые могут быть использованы для описания режимов электронной дефазировки при различных параметрах ДЭГ и характеристиках неоднородного магнитного поля. Показано, что в присутствии неоднородного магнитного поля слаболокализационная поправка к кондактансу ДЭГ определяется соотношением между тремя масштабами: (а) длиной дефазировки L_φ , которая увеличивается при понижении температуры; (б) масштабом неоднородности магнитного поля d ; (в) магнитной длиной $L_{H_0} = \sqrt{\Phi_0/H_0}$, где H_0 – амплитуда неоднородного магнитного поля. Также показано, что если $d \gg L_{H_0}$ или $d > L_\varphi$, то слаболокализационная поправка к кондактансу может быть рассчитана в рамках локального (адиабатического) приближения. Это означает, что проводимость в каждой точке образца зависит от локального магнитного поля.

В разделе 4.3 рассмотрены особенности эффекта слабой локализации в слабых неоднородных магнитных полях, направленных по нормали к плоскости ДЭГ.

В частности, в разделе 4.3.1 получено аналитическое выражение для слаболокализационной поправки к кондактансу ДЭГ в слабом неоднородном магнитном поле с произвольной пространственной конфигурацией. Критерием малости магнитного поля является малость магнитного потока через любую замкнутую квазиклассиче-

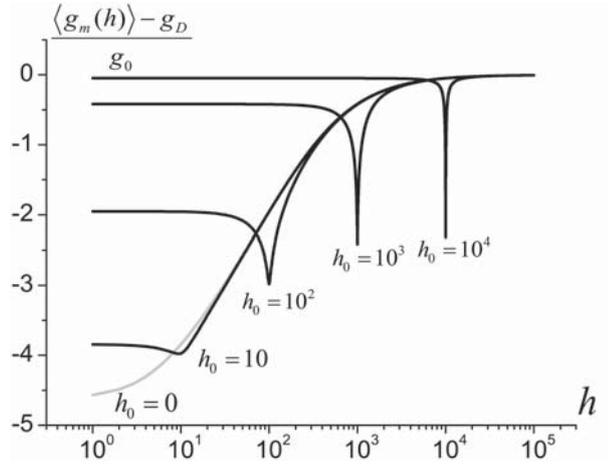


Рис. 4. Зависимости усредненного кондактанса ДЭГ $\langle g_m \rangle$ от величины внешнего однородного магнитного поля $h = 4\pi H L_\varphi^2 / \Phi_0$ при различных амплитудах периодического поля $h_0 = 4\pi H_0 L_\varphi^2 / \Phi_0$ и при $L_\varphi / l = 10$ (l – длина свободного пробега) для магнитного поля в форме меандра. Здесь g_D – друдевский кондактанс ДЭГ, $g_0 = e^2 / 2\pi^2 \hbar$.

чины критического термодинамического магнитного поля сверхпроводника от температуры для различных значений электронной прозрачности плоскостей двойникования.

3. Исследована флуктуационная проводимость гибридных систем, состоящих из пленки сверхпроводника и ферромагнетика с одномерной доменной структурой. Показано, что тензор флуктуационной проводимости Асламазова-Ларкина является анизотропным в плоскости сверхпроводника. Также показано существование кроссоверов на зависимостях флуктуационной проводимости от температуры вблизи фазового перехода в состояние со сверхпроводимостью на доменных границах.
4. Рассчитана слаболокализационная поправка к проводимости двумерного электронного газа в слабых неоднородных магнитных полях с произвольной пространственной конфигурацией. Для гибридных систем, содержащих двумерный электронный газ и ферромагнетик с доменным распределением намагниченности, показано, что время электронной дефазировки и знак магнетосопротивления, обусловленного эффектом слабой локализации, определяются пространственными масштабами магнитного поля, создаваемого ферромагнетиком в области электронного газа.

Список литературы

- [1] Buzdin, A. I. Proximity effect in superconductor-ferromagnet heterostructures / A. I. Buzdin // *Rev. Mod. Phys.* - 2005. - V. 77. - P. 935-976.
- [2] Golubov, A. A. The current-phase relation in Josephson junctions / A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov and E. Il'ichev // *Rev. Mod. Phys.* - 2004. - V. 76. - P. 411-469.
- [3] Bergeret, F. S. Josephson current in superconductor-ferromagnet structures with a nonhomogeneous magnetization / F. S. Bergeret, A. F. Volkov and K. B. Efetov // *Phys. Rev. B.* - 2001. - V. 64. - P. 134506(11).
- [4] Asano, Y. Unconventional surface impedance of a normal-metal film covering a spin-triplet superconductor due to odd-frequency Cooper pairs / Y. Asano, A. A. Golubov, Y. V. Fominov and Y. Tanaka // *Phys. Rev. Lett.* - 2011. - V. 107. - P. 087001(4).
- [5] Yokoyama, T. Anomalous Meissner effect in a normal-metal-superconductor junction with a spin-active interface / T. Yokoyama, Y. Tanaka and N. Nagaosa // *Phys. Rev. Lett.* - 2011. - V. 106. - P. 246601(4).
- [6] Buzdin, A. I. Existence of superconducting domain walls in ferromagnets / A. I. Buzdin, L. N. Bulaevskii, S. V. Panyukov // *ЖЭТФ* - 1984. - V. 60. - P. 174-179.
- [7] 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(4).
- [8] Yang, Z. Domain-wall superconductivity in superconductor-ferromagnet hybrids / Z. Yang, M. Lange, A. Volodin, R. Szymczak and V. V. Moshchalkov // *Nature Materials.* - 2004. - V. 3. - P. 793-798.
- [9] Варламов, А. А. Теория флуктуаций в сверхпроводниках / А. А. Варламов, А. И. Ларкин. - М.: Добросвет, КДУ, 2007. - 557 с.
- [10] Thompson, R. S. Microwave and fluctuation resistance of superconducting alloy films / R. S. Thompson // *Phys. Rev. B.* - 1971. - V. 3. - P. 1617-1624.
- [11] Schmidt, H. The onset of surface superconductivity / H. Schmidt and H.J. Mikeska // *J. Low Temp. Phys.* - 1970. - V. 3. - P. 123-135.
- [12] Зюзин, А. А. О сопротивлении тонких пленок с краевой сверхпроводимостью в сильных магнитных полях / А. А. Зюзин, А. Ю. Зюзин // *Письма в ЖЭТФ.* - 2007. - Т. 86. - С. 60-64.
- [13] Хлюстикова, И. Н. Локализованная сверхпроводимость в двойниковых металлических кристаллах / И. Н. Хлюстикова, А. И. Бuzдин // *УФН.* - 1988. - Т. 155. - С. 47-88.

- [14] Буздин, А. И. Фазовая диаграмма сверхпроводимости, локализованной вблизи плоскости двойникования / А. И. Буздин, И. Н. Хлюстикова // Письма в ЖЭТФ. - 1984. - Т. 40. - С. 140-142.
- [15] Clarysse, F. Interfacial phase transitions in twinning-plane superconductors / F. Clarysse and J. O. Indekeu // Phys. Rev. B. - 2002. - V. 65. - P. 094515(11).
- [16] Chakravarty, S. Weak localization: The quasiclassical theory of electrons in a random potential / S. Chakravarty and A. Schmid // Phys. Rep. - 1986. - V. 140. - P. 193-236.
- [17] Rammer, J. Weak localization in inhomogeneous magnetic fields / J. Rammer and A. L. Shelankov // Phys. Rev. B. - 1987. - V. 36. - P. 3135-3146.
- [18] Bending, S. J. Complete numerical description of nonlocal quantum diffusion in an array of magnetic-flux vortices / S. J. Bending // Phys. Rev. B. - 1994. - V. 50. - P. 17621-17624.
- [19] Gusev, G. M. Quantum interference effects in a strongly fluctuating magnetic field / G. M. Gusev, U. Gennser, X. Kleber, D. K. Maude, J. C. Portal, D. I. Lubyshev, P. Basmaji, M. de P. A. Silva, J. C. Rossi and Y. V. Nastaushev // Phys. Rev. B. - 1996. - V. 53. - P. 13641-13644.
- [20] Wang, X.-B. Dephasing time of disordered two-dimensional electron gas in modulated magnetic fields / X.-B. Wang // Phys. Rev. B. - 2002. - V. 65. - P. 115303(7).
- [21] Samokhvalov, A. V. Vortex states induced by proximity effect in hybrid ferromagnet-superconductor systems / A. V. Samokhvalov, A. S. Mel'nikov and A. I. Buzdin // Phys. Rev. B. - 2007. - V. 76. - P. 184519(7).
- [22] Изюмов, Ю. А. Мультикритическое поведение фазовых диаграмм слоистых структур ферромагнетик-сверхпроводник / Ю. А. Изюмов, Ю. Н. Прошин, М. Г. Хусаинов // Письма в ЖЭТФ. - 2000. - Т. 71. - С. 202-209.
- [23] Фоминов, Я. В. Комментарий к обзору Ю.А. Изюмова, Ю.Н. Прошина, М.Г. Хусаинова "Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник" / Я. В. Фоминов, М. Ю. Куприянов, М. В. Фейгельман // УФН. - 2003. - Т. 173. - С. 113-115.
- [24] Изюмов, Ю. А. Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник / Ю. А. Изюмов, Ю. Н. Прошин, М. Г. Хусаинов // УФН. - 2002. - Т. 172. - С. 113-154.
- [25] Самохин, К. В. Сверхпроводящая плоскость двойникования в магнитном поле / К. В. Самохин // ЖЭТФ. - 1994. - Т. 105. - С. 1684-1693.

- [26] Werner, R. Domain-wall and reverse-domain superconducting states of a Pb thin-film bridge on a ferromagnetic $BaFe_{12}O_{19}$ single crystal / R. Werner, A. Yu. Aladyshkin, S. Guenon, J. Fritzsche, I. M. Nefedov, V. V. Moshchalkov, R. Kleiner and D. Koelle // Phys. Rev. B. - 2011. - V. 84. - P. 020505(4).

Список публикаций автора по теме диссертации

- (A1) Mel'nikov, A. S. Dephasing time and magnetoresistance of two-dimensional electron gas in spatially modulated magnetic fields / A. S. Mel'nikov, S. V. Mironov and S. V. Sharov // Phys. Rev. B. – 2010. – V. 81. – P. 115308(11).
- (A1) Mironov, S. V. Penetration of the magnetic field into the twinning plane in type-I and -II superconductors / S. V. Mironov and A. Buzdin // Phys. Rev. B. – 2012. – V. 86. – P. 064511(5).
- (A3) Mironov, S. V. Anisotropy and effective dimensionality crossover of the fluctuation conductivity of hybrid superconductor/ferromagnet structures / S. V. Mironov and A. S. Mel'nikov // Phys. Rev. B. – 2012. – V. 86. – P. 134505(10).
- (A4) Mironov, S. Vanishing Meissner effect as a Hallmark of in-Plane Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov Instability in Superconductor - Ferromagnet Layered Systems / S. Mironov, A. Mel'nikov and A. Buzdin // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V. 109. – P. 237002 (5).

Миронов Сергей Викторович

**НЕОДНОРОДНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ
В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ, НОРМАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И
ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати 21 февраля 2013 г.
Тираж 100 экз.

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