

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

На правах рукописи



Авдеев Максим Викторович

**Транспортные свойства слоистых
гетероструктур
ферромагнетик/сверхпроводник во внешнем
магнитном поле**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре теоретической физики ФГАОУ ВПО
“Казанский (Приволжский) федеральный университет”.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор,
Прошин Юрий Николаевич
доктор физико-математических наук,
профессор,

Царевский Сергей Леонидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
Гарифуллин Ильгиз Абдулсаматович
кандидат физико-математических наук,
Пугач Наталия Григорьевна

Ведущая организация: Институт физики металлов Уро РАН

Защита состоится «24» мая 2012 г. в 14:40 на заседании дис-
сертационного совета Д.212.081.15 при ФГАОУ ВПО “Казанский (Приволж-
ский) федеральный университет” по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёв-
ская, 16а, ауд. 110

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке имени Н.И. Лобачевского
Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан «23» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

д. ф.-м. н., профессор



Ерёмин М. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время большой интерес представляет исследование гетероструктур, состоящих из чередующихся слоёв сверхпроводящего (S) и ферромагнитного (F) металлов, толщины которых лежат в нанометровом диапазоне (см. обзоры [1–5] и ссылки в них).

Во-первых, такие искусственно созданные системы уникальны тем, что в них сосуществуют два конкурирующих явления – сверхпроводимость и магнетизм. В однородных материалах сосуществование этих двух антагонистических явлений требует специальных, достаточно трудно выполнимых условий [1]. В искусственно созданных FS контактах, где сверхпроводящий и ферромагнитный порядки пространственно разделены, такое сосуществование становится возможным и приводит, благодаря *эффекту близости* [6], к наведению в F слоях сверхпроводящих корреляций. С другой стороны, наличие обменных полей существенно модифицирует сверхпроводящие свойства слоистых FS систем (т.н. магнитный эффект близости [5]). В таких системах возникает многообразие явлений, которые можно контролировать, меняя параметры FS контакта, например толщины S и F слоёв. Однако, с практической точки зрения, удобнее управлять свойствами таких слоистых FS систем с помощью внешних магнитных полей или прикладывая внешнее напряжение, или пропуская через FS структуры электрический ток [1–5].

Во-вторых, прогресс в области изготовления высококачественных FS контактов, а также богатая физика эффекта близости, делают эту область исследований весьма актуальной и перспективной для возможных приложений. Так, в конце 90-х годов прошлого века, была предложена модель спиновых переключателей на основе трехслойных FFS [7] и FSF [8, 9] систем, переключение которых осуществляется слабым внешним магнитным полем. Магнитное поле меняет направление вектора намагниченности \mathbf{M} одного из F слоев, в то время как намагниченность соседнего F слоя зафиксирована. В результате контакт может перейти из сверхпроводящего в резистивное состояние.

Это происходит из-за того, что критическая температура T_c такой системы зависит от взаимной ориентации векторов намагниченностей.

В тоже время вопрос о влиянии асимметричности таких трёхслойных FS структур на фазовые диаграммы в литературе остаётся недостаточно исследованным [10]. Асимметричность свойств может быть вызвана как различием в толщинах F слоёв d_f , так и различием в значениях параметров, характеризующих металлы. Важно отметить, что актуальность исследования свойств несимметричных FS систем обусловлена прежде всего тем, что такие системы могут быть более подходящими кандидатами для возможной практической реализации спинового переключателя на их основе.

Практически не затронутым в литературе остался и вопрос о распределении в FS структурах сверхпроводящих экранирующих токов, индуцируемых внешним магнитным полем. Однако это влияние необходимо учитывать при количественном описании модели спинового переключателя, поскольку состояние FS системы чувствительно к эффектам, возникающим от действия внешнего магнитного поля.

Таким образом, назрела необходимость построения микроскопической теории для описания свойств асимметричных трёхслойных FS структур, учитывающей влияние внешнего магнитного поля, при произвольной ориентации векторов намагниченностей в F слоях.

Цели диссертационной работы.

1. В рамках микроскопической теории вывести уравнения, определяющие критическую температуру T_c трёхслойных FSF и FFS структур, в присутствии внешнего магнитного поля, направленного параллельно плоскости контакта.
2. Исследовать распределение плотности сверхпроводящих экранирующих токов для двух- и трёхслойных FS систем.
3. Исследовать фазовые диаграммы асимметричных FSF и FFS структур

во внешнем магнитном поле. Определить степень влияния параметров системы на величину критической температуры перехода T_c контакта.

4. Создать программный комплекс для вычисления критических характеристик трёхслойных FSF и FFS систем.

Практическая значимость. Методика расчёта критических параметров трёхслойных FS структур, основанная на микроскопической теории, позволяет количественно выявить степень влияния на фазовые диаграммы асимметричных FS структур различных параметров, характеризующие контактирующие металлы, а также свойства границ FS контакта. Полученная система уравнений позволяет описывать зависимость критической температуры от величины внешнего магнитного поля, а также строить плотность распределения сверхпроводящих экранирующих токов, индуцируемых приложенным внешним магнитным полем. Разработанный программный комплекс “Proximity Effect” позволяет эффективно исследовать критические свойства трёхслойных FSF и FFS структур, а также находить для них оптимальные параметры, необходимые для устойчивой работы спинового переключателя тока. Следует также отметить, что данный программный продукт может быть задействован в учебном процессе, как комплекс программ для выполнения лабораторных работ по эффекту близости в FS структурах.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Микроскопическая теория сверхпроводящих FS контактов обобщена на случай внешнего магнитного поля. С учетом асимметрии FS структур и магнитного поля выведены уравнения для синглетной и триплетной компонент парной амплитуды в F и S слоях и граничные условия на границах FS и FF контактов.
2. Разработан программный комплекс “Proximity Effect”, с помощью которого исследовались фазовые диаграммы и критические характеристики

исследуемых FS структур в зависимости от различных параметров слоистых систем.

3. В рамках развитой теории выполнены расчёты распределения плотности сверхпроводящего экранирующего тока для двухслойных и трёхслойных FS структур во внешнем магнитном поле. Показано, что распределение плотности тока является сильно неоднородным как в S, так и в F областях и существенно зависит от толщины F слоев.
4. Найдено, что внешнее магнитное поле существенно влияет на зависимость критической температуры T_c от различных параметров FSF и FFS структур. Показано, что в случае несимметричных трёхслойных FS систем имеется более широкий диапазон параметров, при которых значение разности T_c между состояниями при антипараллельной и параллельной ориентациями намагниченностей в F слоях может иметь существенно большие значения, чем в случае аналогичных симметричных FS структур.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на российских и международных конференциях:

- Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 2008, 2011);
- 25th International Conference on Low Temperature Physics (Amsterdam, 2008);
- Международная зимняя школа физиков-теоретиков “Коуровка” (Новоуральск, 2008, 2010, 2012);
- Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (Санкт-Петербург, 2009, Сочи-Дагомыс, 2009, 2010, Кисловодск, 2010);
- XII Международная научно-практическая конференция “Нанотехнологии в промышленности” “NANOTECH’2011” (Казань, 2011);

Также основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре теоретической физики и итоговых конференциях Казанского (Приволжского) федерального университета.

Реализация результатов работы. Данные исследования проведены при поддержке

- Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-01521-а) “Несимметричные наноструктуры ферромагнетик/сверхпроводник: магнитные и транспортные свойства”;
- Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы” (грант № 2.1.1/2985) “Зондирующая сверхпроводящая спектроскопия новых наноматериалов на основе фундаментальной теории эффекта близости”;
- Министерства образования и науки РФ в рамках работ, проводимых по тематическому плану Казанского (Приволжского) федерального университета в 2009 – 2012 гг.

Публикации. Основные результаты данной диссертационной работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК (6 статей [A1-A6]), а также еще в 12 работах, опубликованных в сборниках статей и тезисов докладов различных конференций [A7-A18]. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ “Proximity Effect” [B1].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка работ автора по теме диссертации, спис-

ка цитируемой литературы, включающего 81 наименование, и Приложения. Работа изложена на 124 страницах и содержит 41 рисунок.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой (обзорной) главе вводится понятие эффекта близости. Рассмотрен механизм подавления сверхпроводимости ферромагнитным порядком (т.н. парамагнитный эффект). Учёт парамагнитного вклада в гамильтониан сверхпроводящего состояния определяется sd – обменным взаимодействием электронов проводимости с локализованными d -электронами, формирующими атомные магнитные моменты. В приближении среднего поля sd -обменный гамильтониан можно представить в виде [11, 12]

$$\hat{H}_{sd} = -\mathbf{I}\hat{\sigma}; \quad \mathbf{I} = -\sum_j J_{sd}(\mathbf{r} - \mathbf{R}_j)\langle\hat{\mathbf{S}}_j\rangle, \quad (1)$$

где $\hat{\mathbf{S}}_j$ – оператор локализованного спина, расположенного в узле решётки j , J_{sd} – обменный интеграл и $\hat{\sigma}$ – вектор, составленный из матриц Паули. Направление вектора \mathbf{I} соответствует вектору намагниченности \mathbf{M} ферромагнетика, а величина I определяет эффективное обменное поле. Таким образом, куперовские пары в магнитном сверхпроводнике подвергаются мощному воздействию обменного поля I , которое стремится выстроить спины электронов, составляющих пару, параллельно, что ведёт к разрушению сверхпроводимости, поскольку в сверхпроводящем состоянии куперовские пары образуют спин-синглетное состояние. Заметим, что триpletные корреляции, обсуждаемые ниже, при этом не разрушаются [13–16].

Далее рассматривается неоднородное сверхпроводящее состояние Ларкина, Овчинникова [17] и Фульде, Феррела [18] (ЛОФФ), при котором, в отли-

чие от БКШ состояния, куперовские пары имеет отличный от нуля суммарный импульс, что, в частности, приводит к осцилляциям параметра порядка (ПП). ЛОФФ состояние в однородном магнитном сверхпроводнике образуется в очень узкой области значений обменных полей. При обзоре экспериментальных и теоретических работ по эффекту близости в слоистых FS системах обсуждается возникновение в таких системах состояний типа ЛОФФ, рассматриваются различные причины немоногоного характера зависимости критической температуры T_c от толщин F слоёв. Здесь же обсуждается природа возвратной сверхпроводимости. Отдельное внимание уделено т.н. триплетной сверхпроводимости. Обсуждаются известные фазовые диаграммы для трехслойных FSF и FFS систем, полученные в работах [13, 16]. В заключении первой главы рассматривается модель спинового переключателя на основе трёхслойных FS систем [7–9].

Вторая глава посвящена обобщению микроскопической теории эффекта близости для слоистых FS систем на случай внешнего магнитного поля. Приводится вывод самосогласованного уравнения на ПП, из которого определяется критическая температура T_c

$$\Delta(\mathbf{r}) \ln t = \pi T_c \sum_{\omega > 0}^{\infty} \text{Sp} \left(\hat{F}(\mathbf{r}, \omega) - \frac{\Delta(\mathbf{r})}{\omega} \right). \quad (2)$$

Здесь $t = T_c/T_{cs}$, T_{cs} – температура перехода уединённого S слоя при $I = 0$, а суммирование происходит по мацубаровским частотам $\omega = \pi T_c(2n + 1)$ ($n = \pm 1, 2, 3, \dots$). Приведён детальный вывод уравнений для синглетной и триплетной компонент парной амплитуды $\hat{F}(\mathbf{r}, \omega)$, которые с учётом внешнего магнитного поля имеют вид

$$\left[|\omega| - iI\sigma_{\alpha\beta}^z - \frac{1}{2}D_{\alpha\beta} \left(\nabla - \frac{2\pi i}{\Phi_0} \mathbf{A} \right)^2 \right] F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}, \omega) = \delta_{\alpha\beta} \Delta(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где \mathbf{A} – векторный потенциал, Φ_0 – квант магнитного потока, $\Delta(\mathbf{r})$ – параметр порядка, α, β – спиновые индексы. В диссертации обсуждается вид и

комплексный характер матричного “коэффициента” диффузии $D_{\alpha,\beta}$

$$D_{\alpha\beta} = \frac{D_{s,f}}{1 - i2I\tau_f\sigma_{\alpha\beta}^z}, \quad (4)$$

где $D_{s,f}$ – обычный коэффициент диффузии (индексы s и f указывают на принадлежность к S и F металлам соответственно), а τ_f – время рассеяния на немагнитных примесях в F металле. Диагональные элементы $F_{11} = F_{22}^* = F_s$ соответствуют синглетной компоненте F_s , а недиагональные $F_{12} = -F_{21}^* = F_t$ – триплетной компоненте F_t . Заметим, если намагниченность в F области имеет произвольное направление, то решение уравнения (3) должно быть записано в виде $\hat{F}' = \hat{U}^\dagger \hat{F} \hat{U}$, где унитарная матрица \hat{U} обеспечивает преобразование $\hat{U}^\dagger \mathbf{I} \hat{\sigma} \hat{U} = I \hat{\sigma}_z$, что, фактически, является вращением в спиновом пространстве.

Далее приводятся граничные условия, учитывающие внешнее магнитное поле, для синглетной и триплетной компонент парной амплитуды на границе контактирующих металлов, которые на SF границе имеют вид

$$\frac{4}{\sigma_f v_F^f} \hat{U}^\dagger \hat{D}_f (2I\tau) \frac{d}{dx} \hat{F}_s^f \hat{U} + \frac{4}{\sigma_f v_F^s} \hat{U}^\dagger D_f \frac{d}{dx} \hat{F}_t^f \hat{U} = \frac{4}{\sigma_s v_F^s} D_s \frac{d}{dx} \hat{F}^s, \quad (5)$$

$$\frac{4}{\sigma_s v_F^s} D_s \frac{d}{dx} \hat{F}^s = \hat{F}^s - \hat{U}^\dagger \hat{F} \hat{U}.$$

Здесь $v_F^{s,f}$ и $\sigma_{s,f}$ – скорость Ферми и параметр прозрачности границы со стороны S и F металлов соответственно (см. обзор [1]). При этом

$$\hat{F}^{f,s} = \hat{F}_s^{f,s} + \hat{F}_t^{f,s}, \quad \hat{F}_s^{f,s} = \begin{pmatrix} F_{11}^{f,s} & 0 \\ 0 & F_{22}^{f,s} \end{pmatrix}, \quad \hat{F}_t^{f,s} = \begin{pmatrix} 0 & F_{12}^{f,s} \\ F_{21}^{f,s} & 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\hat{D}_f (2I\tau) = \begin{pmatrix} \frac{D_f}{1 - i2I\tau_f} & 0 \\ 0 & \frac{D_f}{1 + i2I\tau_f} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Граничные условия для плоского контакта ферромагнетик-ферромагне-

тик (F_1F_2) будут иметь аналогичный вид:

$$\begin{aligned} & \frac{4}{\sigma_{f2}v_F^{f2}}\hat{U}^\dagger\hat{D}_{f2}(2I\tau_2)\frac{d}{dx}\hat{F}_s^{f2}\hat{U} + \frac{4}{\sigma_{f2}v_F^{f2}}\hat{U}^\dagger D_{f2}\frac{d}{dx}\hat{F}_t^{f2}\hat{U} = \\ & = \frac{4}{\sigma_{f1}v_F^{f1}}\hat{D}_{f1}(2I\tau_1)\frac{d}{dx}\hat{F}_s^{f1} + \frac{4}{\sigma_{f1}v_F^{f1}}D_{f1}\frac{d}{dx}\hat{F}_t^{f1}, \\ & \frac{4}{\sigma_{f1}v_F^{f1}}\hat{D}_{f1}(2I\tau_1)\frac{d}{dx}\hat{F}_s^{f1} + \frac{4}{\sigma_{f1}v_F^{f1}}D_{f1}\frac{d}{dx}\hat{F}_t^{f1} = \hat{F}^{f1} - \hat{U}^\dagger\hat{F}^{f2}\hat{U}. \end{aligned} \quad (8)$$

Отсутствие потока парной амплитуды через внешние границы приводит к условию $\frac{d}{dx}\hat{F}^{s,f} = 0$.

В третьей главе исследуются транспортные свойства трёхслойных FSF и двухслойных FS систем во внешнем магнитном поле. Рассмотрен случай, когда рассеяние в обоих металлах S и F достаточно сильное. В этом “грязном” пределе для парной амплитуды формулируется краевая задача. Приводится решение уравнений (3) в одномодовом приближении [1, 4], суть которого заключается в следующей подстановке для парной амплитуды

$$F(\mathbf{r}, \omega) = \frac{\Delta(\mathbf{r})}{|\omega| + D_s(k_s^2 + Q_s^2)/2}, \quad Q_s^2 = \left(\frac{2\pi H}{\Phi_0}\right)^2 \frac{d_s^2}{12}. \quad (9)$$

Здесь d_s – толщина S слоя, а волновое число k_s определяется из граничных условий (5). В разделе 3.3 исследуется плотность распределения экранирующих сверхпроводящих токов для двухслойной FS и трёхслойной FSF систем, находящихся во внешнем магнитном поле, приложенном параллельно плоскости контакта. На рис. 1 приведена плотность распределения сверхпроводящего экранирующего тока j_s в двухслойной FS системе, при двух значениях относительных толщин F слоя $d_f/\xi_{s0} = 0.03$ (рис. 1a) и $d_f/\xi_{s0} = 0.2$ (рис. 1b) ($\xi_{s0} = v_F/2T_{cs}$ – длина когерентности в S металле). Величина приведённого магнитного поле $h = H/H_c$ (H_c – критическое поле уединённого S слоя) для обоих графиков равна $h = 0.2$. Важно отметить, что осцилляции плотности тока j_s в F слое наблюдаются при относительно небольших толщинах последнего. Так на рис. 1a в увеличенном масштабе показан фрагмент зависимости $j_s(x/\xi_{s0})$ в F области, где хорошо виден её немонотонный характер. Однако,

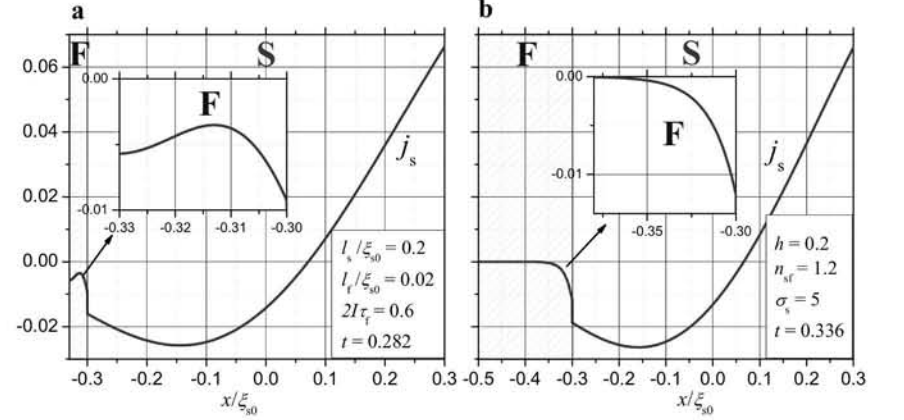


Рис. 1. Плотность распределения сверхпроводящего тока в двухслойной FS системе

при больших значениях толщин F слоя наблюдается монотонное затухание плотности тока j_s вглубь ферромагнитного металла, что хорошо видно на рис. 1b.

Аналогичные расчёты были проведены для трёхслойной симметричной системы FSF с детальным анализом двух состояний с параллельными (P) и антипараллельными (AP) направлениями намагниченностей F слоев.

В конце главы 3 на основе полученных выше результатов приводится обсуждение принципа работы модели спинового переключателя тока на базе симметричной FSF структуры в присутствии внешнего магнитного поля. Показывается, что его учет необходим для количественного описания спинового переключателя, приводятся и обсуждаются фазовые диаграммы состояний для такой системы.

Четвёртая глава посвящена изучению трёхслойных FSF и FFS систем во внешнем магнитном поле. Обсуждается влияние различных параметров системы на величину температуры перехода T_c , а также на значение разности $\Delta T_c = T_c^{AP} - T_c^P$. На рис. 2 приведены зависимости величины $\Delta t = \Delta T_c/T_{cs}$ от относительных толщин F слоёв для F_1SF_2 и F_1F_2S систем (все длины, относя-

щиеся к F металлам нормированы на длину спиновой жёсткости $a_f = v_F/2I$. Видно, что в случае, когда толщины F слоёв различны, наблюдается более

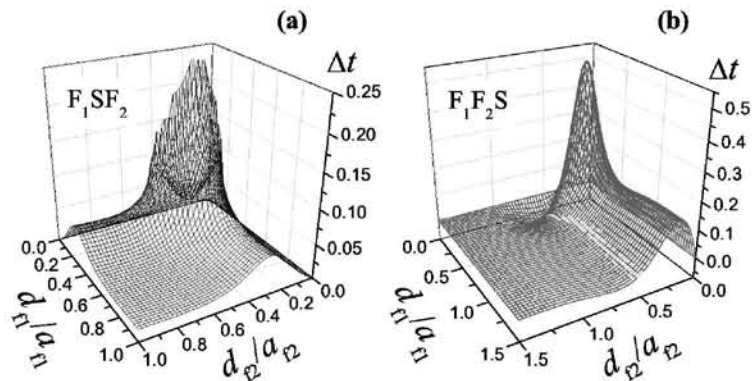


Рис. 2. Зависимость величины Δt от толщин F слоёв для FSF (a) и FFS (b) систем в отсутствие магнитного поля. Здесь $l_s/\xi_{s0} = 0.2$, $I_1/\pi T_{cs} = I_2/\pi T_{cs} = 10$, а другие параметры следующие: (a) $d_s/\xi_{s0} = 0.7$, $2I\tau_{f1} = 2I\tau_{f2} = 0.25$, $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = 0.8$, $\sigma_{f1} = \sigma_{f2} = 1.2$; (b) $d_s/\xi_{s0} = 0.6$, $\sigma_s = \sigma_{fs} = 2$, $2I\tau_{f1} = 2I\tau_{f2} = 0.3$, $\sigma_{f1} = \sigma_{f2} = 10$.

широкая область на фазовой диаграмме, где значение Δt значительно выше, чем в случае, когда $d_{f1} = d_{f2}$. Важно отметить, что эта особенность имеет место как для F_1SF_2 так и для F_1F_2S систем. Напомним, что для устойчивой работы спинового переключателя, важно, чтобы эта разность Δt имела наибольшее значение.

Исследуется вопрос о влиянии внешнего магнитного поля на фазовые диаграммы рассматриваемых FS систем. На рис. 3 приведён пример такого расчёта для несимметричной FSF системы. В частности, из рис. 3b видно, что магнитное поле не только монотонно понижает температуру перехода, но также может качественно менять характер зависимости $t(d_{f2})$. Так, если при $h = 0$ зависимость $t(d_{f2})$ имеет неглубокий минимум и далее выходит на плато, то при увеличении поля наблюдается появление возвратной сверхпроводимости. При дальнейшем же увеличении поля происходит монотонный спад $t(d_{f2})$ до нуля.

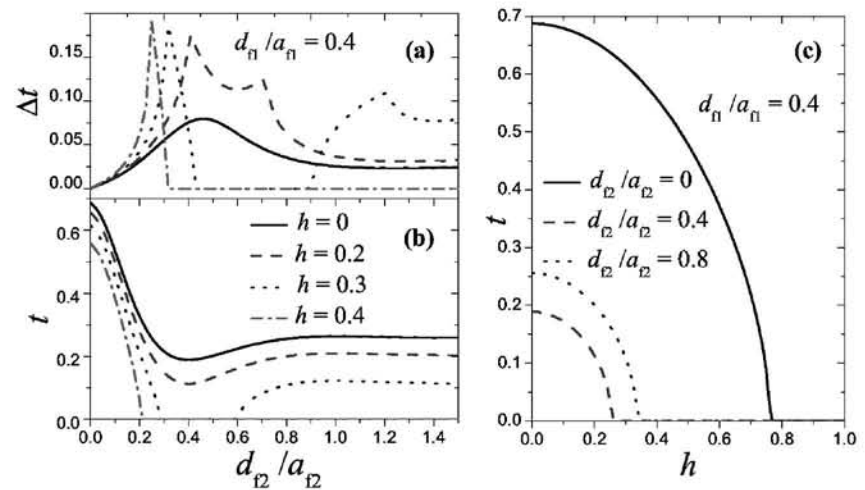


Рис. 3. Влияние магнитного поля на фазовые диаграммы FSF системы при фиксированной толщине F_1 слоя d_{f1} . Здесь $h = H/H_c$ – приведенное магнитное поле (H_c критическое поле уединённого S слоя). Значения остальных параметров соответствует рисунку 2a.

На рис. 4a, где изображена зависимость $t^P(d_{f1}/a_{f1})$, можно видеть, что увеличение приведённого магнитного поля h приводит к подавлению температуры перехода и к последующему возникновению своеобразной возвратной сверхпроводимости. Зависимость $t^{AP}(d_{f1}/a_{f1})$ (рис. 4b) аналогичным образом меняет свой характер при увеличении поля. На рис. 4c показана зависимость $t(\phi)$ при различных значениях h . Сама зависимость $t(\phi)$ является немонотонной и имеет минимум при $\phi_m \approx 90^\circ$. Увеличение поля h приводит к тому, что минимум в зависимости $t(\phi)$ становится более глубоким, т.е. приводит к возрастанию разности $\Delta t(\phi_m)$. Также подчеркнем, что в случае симметричных FSF систем в отсутствие внешнего магнитного поля наша теория приводит к известным результатам [13]. То же касается и FFS систем [16].

Проведено сравнение нашей теории с экспериментальными данными, полученными в работе [19], где исследовалась зависимость критической температуры T_c для трёхслойной системы FSF CuNi/Nb/CuNi от толщин ферромагнитных слоёв d_f и от взаимной ориентации векторов намагниченностей.

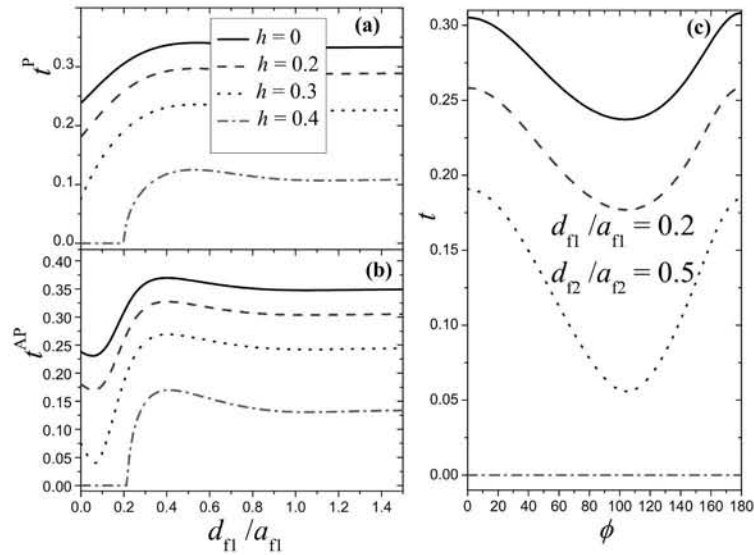


Рис. 4. Влияние магнитного поля на фазовые диаграммы FFS системы при фиксированной толщине F_2 слоя d_{F2} . Значения параметров соответствует рисунку 2b.

Проведенная подгонка зависимости критической температуры от толщины F слоёв привела к хорошему количественному согласию теории и эксперимента при разумных значениях параметров.

В Заключение сформулированы основные выводы и приведены основные результаты работы:

1. С помощью микроскопической теории, обобщенной с учетом внешнего магнитного поля, получены уравнения для парной амплитуды, в том числе и для структур с неколлинеарными намагниченностями. Получены граничные условия для синглетной и триплетной компонент парной амплитуды на границах ферромагнетик–сверхпроводник и ферромагнетик–ферромагнетик, справедливые в присутствии внешнего магнитного поля.
2. На основе развитой теории FS систем, разработаны методика и алго-

ритм расчёта фазовых диаграмм для FSF и FFS систем. Создан программный комплекс “Proximity Effect”, предназначенный для вычисления критических параметров таких структур в зависимости от различных параметров системы. Получено соответствующее свидетельство о регистрации программы для ЭВМ “Proximity Effect” [B1].

3. Рассчитаны фазовые диаграммы состояний для трёхслойных FSF и FFS систем. Показано, что асимметричность, связанная как с геометрией FS систем, так и с различием в значениях параметров, характеризующих F слои, приводит к более широкому диапазону параметров, внутри которого наблюдается более высокие значения разности T_c между состояниями с антипараллельной и параллельной ориентацией намагниченностей в F слоях. Это особенно важно для устойчивой работы спиновых переключателей на основе изученных в данной диссертационной работе FS систем.
4. Показано, что, управляя величиной внешнего параллельного магнитного поля, можно качественно изменять характер зависимости критической температуры от толщин F слоёв. Для FFS системы предсказано появление своеобразной уединённой возвратной сверхпроводимости при увеличении внешнего поля.

В Приложении описан программный комплекс Proximity Effect.

Цитированная литература

1. Изюмов, Ю. Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник / Ю. Изюмов, Ю. Прошин, М. Хусаинов // УФН. — 2002. — Т. 172, № 2. — С. 114–154.
2. Superconductor/ferromagnet/superconductor π -junctions / V. V. Ryazanov,

- V. A. Oboznov, A. S. Prokofiev et al. // *J. of Low Temp. Phys.* — 2004. — V. 136. — P. 385–400.
3. Golubov, A. A. The current-phase relation in josephson junctions / A. A. Golubov, M. Y. Kupriyanov, E. Il'ichev // *Rev. Mod. Phys.* — 2004. — V. 76. — P. 411–469.
 4. Buzdin, A. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures / A. Buzdin // *Rev. Mod. Phys.* — 2005. — V. 77, № 3. — P. 935–976.
 5. Proximity Effects in Ferromagnet/Superconductor Heterostructures / K. B. Efetov, I. A. Garifullin, A. F. Volkov, K. Westerhol // In *Magnetic Heterostructures*. Ed. by H. Zabel, S. D. Bader. — Springer: Berlin / Heidelberg, 2008. — V. 227 of Springer Tracts in Mod. Phys. — P. 251 – 290.
 6. de Gennes, P. G. Boundary effects in superconductors / P. G. de Gennes // *Rev. Mod. Phys.* — 1964. — Jan. — V. 36, № 1. — P. 225–237.
 7. Oh, S. A superconductive magnetoresistive memory element using controlled exchange interaction / S. Oh, D. Youm, M. Beasley // *Appl. Phys. Lett.* — 1997. — V. 71, № 16. — P. 2376–2378.
 8. Tagirov, L. R. Low-field superconducting spin switch based on a superconductor/ferromagnet multilayer / L. R. Tagirov // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — V. 83, № 10. — P. 2058–2061.
 9. Buzdin, A. I. Spin-orientation-dependent superconductivity in F/S/F structures / A. I. Buzdin, A. V. Vedyayev, N. V. Ryzhanova // *Europhys. Lett.* — 1999. — V. 48, № 6. — P. 686.
 10. Fauré, M. On the theory of ferromagnet/superconductor heterostructures / M. Fauré, A. Buzdin, D. Guskova // *Physica C: Supercond.* — 2007. — V. 454, № 1–2. — P. 61–69.
 11. Вонсовский, С.В. Магнетизм / С.В. Вонсовский. — М.: Наука, 1971. — 1032 с.
 12. Вонсовский, С.В. Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений / С.В. Вонсовский, Ю.Н. Изюмов, Э.З. Курмаев. — М.: Наука, 1977. — 383 с.
 13. Fominov, Y. V. Triplet proximity effect in FSF trilayers / Y. V. Fominov, A. A. Golubov, M. Y. Kupriyanov // *Письма в ЖЭТФ.* — 2003. — Т. 77, № 9. — С. 510–515.
 14. Bergeret, F. S. Odd triplet superconductivity and related phenomena in superconductor-ferromagnet structures / F. S. Bergeret, A. F. Volkov, K. B. Efetov // *Rev. Mod. Phys.* — 2005. — V. 77, № 4. — P. 1321–1373.
 15. Houzet, M. Long range triplet josephson effect through a ferromagnetic trilayer / M. Houzet, A. I. Buzdin // *Phys. Rev. B.* — 2007. — V. 76, № 6. — P. 060504.
 16. Superconducting triplet spin valve / Y. V. Fominov, A. A. Golubov, Т. У. Карминская и др. // *Письма в ЖЭТФ.* — 2010. — Т. 91, № 6. — С. 329–333.
 17. Ларкин, А. Неоднородное состояние сверхпроводников / А. Ларкин, Ю. Овчинников // *ЖЭТФ.* — 1964. — Т. 47, № 3. — С. 1136–1146.
 18. Fulde, P. Superconductivity in a strong spin-exchange field / P. Fulde, R. Ferrell // *Phys. Rev.* — 1964. — V. 135, № 3A. — P. A550–A563.
 19. Angular dependence of the superconducting transition temperature in ferromagnet-superconductor-ferromagnet trilayers / J. Zhu, I. N. Krivorotov, K. Halterman, O. T. Valls // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — V. 105, № 20. — P. 207002.

Список публикаций автора

- A1. The influence of a parallel magnetic field on critical temperature and inhomogeneous current distribution of a ferromagnet/superconductor structure / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // *Supercond. Sci. and Techn.* — 2010. — V. 23, № 10. — P. 105005.
- A2. Влияние магнитного поля на критическую температуру перехода слоистых гетероструктур ферромагнетик–сверхпроводник / М. В. Авдеев, Ю. Н. Прошин, М. Г. Хусаинов, С. Л. Царевский // *ФММ*. — 2011. — Т. 111, № 6. — С. 563–572.
- A3. Solitary re-entrant superconductivity in asymmetrical FSF structures [Electronic resource] / Y. Proshin, M. Avdeev, M. Khusainov, M. Khusainov // *JMMM*. — 2012. — doi://10.1016/j.jmmm.2012.02.070 — 4 p.
- A4. Inhomogeneous current distribution in a bimetal ferromagnet/superconductor film in a longitudinal magnetic field / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // *Solid State Phenomena*. — 2009. — V. 152. — P. 462–465.
- A5. Critical temperature of a ferromagnet/superconductor structures in a parallel magnetic field / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2009. — V. 150, № 5. — P. 052011.
- A6. Эффект близости в наноструктуре ферромагнитный металл/сверхпроводник в слабом магнитном поле / М. Авдеев, Ю. Прошин, М. Хусаинов, С. Царевский // *Учён. зап. Казан. гос. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки*. — 2007. — Т. 149, № 3. — С. 42–48.
- A7. Влияние магнитного поля на фазовые диаграммы трёхслойных наноструктур ферромагнетик-сверхпроводник [Электронный ресурс] / М. Авдеев, Ю. Прошин, С. Царевский, М. Хусаинов // *Докл. XII Междун. науч.-практ. конф. “Нанотехнологии в промышленности” “NANOTECH’2011”, Казань, 30.11 – 2.12.2011 г. – Казань. Казанская ярмарка, 2011. (CD-ROM). — 2011. — № 409. — С. 1–6.*
- A8. Critical temperature of a ferromagnet/superconductor structures in a parallel magnetic field / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // *25th Intern. Conf. on Low Temp. Phys., Amsterdam, Netherlands, August 6-13, 2008, Scientific Abstracts, (PB-Sa126)*. — 2008. — P. 164.
- A9. Inhomogeneous current distribution in a bimetal ferromagnet/superconductor film in a longitudinal magnetic field / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // *Moscow Intern. Symp. on Magn. (MISM’2008) 20-25 June, 2008, Moscow, Russia, Books of Abstracts*. — 2008. — № 23PO-1-1. — P. 416–417.
- A10. Эффект близости в би-пленке ферромагнитный металл/сверхпроводник в продольном магнитном поле / М.В. Авдеев, Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов, С.Л. Царевский // *Тез. докл. XXXII Междун. зимн. школы физиков-теоретиков “Коуровка-2008”, Новоуральск, 25.02 – 3.03.2008 г. – Екатеринбург. — 2008. — С. 155.*
- A11. Царевский, С. Эффект близости в наноструктуре ферромагнитный металл/сверхпроводник / С. Царевский, М. Авдеев, Ю. Прошин // *Обозр. прикл. и пром. матем. (ОППМ)*. — *Мат-лы. 8 Всеросс. симп. “ППМ”, Сочи-Адлер, 27.09 – 7.10.2007 г. — 2007. — Т. 14, в. 4. — С. 759.*
- A12. Критическое магнитное поле в би-пленке ферромагнетик/сверхпроводник / С. Царевский, М. Авдеев, Ю. Прошин, И. Сагдиев // *ОППМ*. — *Мат-лы. X Всеросс. Симп. “ППМ”, (осенняя открытая сессия) – Сочи-Дагамыс, 1.10 – 8.10.2009 г. — 2009. — Т. 16, в. 4. — С. 726*
- A13. Критическое магнитное поле в трехслойной нанопленке ферромагнетик/сверхпроводник/ферромагнетик / С. Царевский, М. Авдеев, Ю. Про-

шин, И. Сагдиев // ОППМ. – Мат-лы. XI Всеросс. Симп. “ППМ”, (осенняя открытая сессия) – Сочи-Дагомыс, 16.10 – 23.10.2010 г. – 2010. – Т. 17, в. 4. – С. 602-603

A14. Диаграммы фазовых состояний в трехслойной нанопленке ферромагнетик/сверхпроводник/ферромагнетик (F/S/F) в продольном магнитном поле / С. Царевский, М. Авдеев, И. Немлий, Ю. Прошин // ОППМ. – Мат-лы. XI Всеросс. Симп. “ППМ”, (весенняя сессия) – Кисловодск, 1.05 – 8.05.2010 г. – 2010. – Т. 17, в. 2. – С. 313–314

A15. Прошин, Ю.Н. Асимметричные гетероструктуры сверхпроводник-ферромагнетик / Ю.Н. Прошин, М.В. Авдеев, М.Г. Хусаинов // Тез. докл. XXXIII Междун. зимн. школы физиков-теоретиков “Коуровка-2010”, Новоуральск, 22.02 – 27.02.2010 г. – Екатеринбург. – 2010. – С. 64–65.

A16. Proximity effect for asymmetrical tree layered FS structures in external magnetic field / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // Moscow Intern. Symp. on Magn. (MISM'2011) 21-25 August, 2011, Moscow, Russia, Books of Abstracts. – 2011. – № 23PO-M-4. – P. 503.

A17. Гетероструктуры ферромагнетик-сверхпроводник во внешнем магнитном поле с учётом триплетной сверхпроводимости / М.В. Авдеев, С.Л. Царевский, М.Г. Хусаинов, Ю.Н. Прошин // Тез. докл. XXXIV Междун. зимн. школы физиков-теоретиков “Коуровка-2012”, Новоуральск, 26.02 – 3.03.2012 г. – Екатеринбург. – 2012. – С. 19.

A18. Прошин, Ю.Н. Переключатели тока на основе асимметричных трёхслойных наноструктур ферромагнетик-сверхпроводник / Ю.Н. Прошин, М.В. Авдеев, М.Г. Хусаинов, // Тез. докл. XXXIV Междун. зимн. школы физиков-теоретиков “Коуровка-2012”, Новоуральск, 26.02 – 3.03.2012 г. – Екатеринбург. – 2012. – С. 48.

Авторские свидетельства

B1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617907 “Proximity Effect” / М.В. Авдеев, Ю.Н. Прошин, С.Л. Царевский // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, заявка № 2011612453, дата поступления 8.04.2011, зарегистрировано 10.10.2011.