

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XXI Международного
симпозиума**

13–16 марта 2017 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2017

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33
Н-25

Труды XXI Международного симпозиума «Нанозфизика и нанозлектроника». (Нижний Новгород, Н-25 13–16 марта 2017 г.) В 2 т. Том I. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2017. — 451 с.
ISBN 978-5-91326-371-1

Организаторы

Федеральное агентство научных организаций РФ
Отделение физических наук РАН
Научный совет РАН по физике полупроводников
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Институт физики микроструктур РАН
Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу»

Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

Учёный секретарь Симпозиума

А.В. Новиков, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

Программный комитет

В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	ЗАО «НТ-МДТ», Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М.Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, чл.-корр. РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН,	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рошупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черноголовка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черноголовка
Н.Н. Салащенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н.Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черноголовка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород

Организационный комитет

Н.А. Байдакова,	ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Г. Беллюстина,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.А. Девятайкина,	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина,	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.А. Камелин,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев,	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.А. Татарский,	ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-371-1

ББК 22.37; 22.33

Симпозиум проводится при поддержке



Российской академии наук
<http://ras.ru>



Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
www.unn.ru



Российского фонда фундаментальных
исследований,
www.rfbr.ru



Федерального агентства научных организаций
<http://fano.gov.ru>



Группы компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс,
www.ntmdt-si.ru



ЗАО «Научное и технологическое оборудование»,
www.semiteq.org



ЗАО ОПТЭК
www.optec.ru



ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ»
www.z-proton.ru



ЦТС «НАУКА»
www.cts-nauka.ru



WITec GmbH (www.witec.de)
Официальное представительство в России
LOT-QuantumDesign in Russia



ООО «ЭрисКом»
www.ErisCom.ru



ООО «Серния»
<http://sernia.ru/>



ООО «ТОКИО БОЭКИ (РУС)»
www.tokyo-boeki.ru



ООО «Группа Ай-Эм-Си»
<http://imc-systems.ru/>



ООО «Промэнерголаб»
www.czl.ru

Многозначные ток-фазовые зависимости в области 0- π перехода в джозефсоновских SIsFS контактах

С.В. Бакурский^{1-3,§}, И.И. Соловьев^{1,3}, Н.В. Кленов^{2,4}, М.Ю. Куприянов¹⁻³, А.А. Голубов^{2,5}

1 МГУ имени М.В. Ломоносова, НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 2.

2 МФТИ ГУ, 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

3 Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, Ленинский проспект, 4.

4 МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 2.

5 Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute for Nanotechnology, University of Twente, 7500 AE Enschede, The Netherlands

§ r4zz@mail.ru

Мы исследовали ток-фазовые соотношения в джозефсоновском SIsFS переходе со сложной прослойкой изолятор-сверхпроводник-ферромагнетик в области 0 – π перехода. Мы продемонстрировали сильное влияние второй гармоники ток-фазовой зависимости магнитной части контакта на свойства полной системы. Так показано то, что 0- π переход в SIsFS структуре происходит при сохранении величины критического тока на уровне критического тока туннельного контакта, в результате чего он оказывается скрыт от ряда экспериментальных подходов. В работе показано, что в системе появляются гистерезисные ток-фазовые соотношения с несколькими независимыми ветвями решения. Более того, в частных случаях различные решения являются топологически защищенными, что открывает новые возможные применения для таких структур.

Введение

Джозефсоновские SIsFS структуры в настоящее время являются одним из наиболее перспективных элементов для использования в сверхпроводящей электронике. Наличие сверхпроводящего s-слоя в области слабой связи, позволяет сохранить преимущества как туннельного слоя I, обеспечивающего высокое характерное напряжение и быстродействие контакта, так сохранить эффект от магнитного слоя F, благодаря которому в структуре возможна реализация π -состояния [1-4].

Особый интерес представляет необычное поведение системы в области 0- π перехода. В обычных SFS структурах он протекает за счет непрерывного изменения критического тока SFS контакта, в результате чего на токовых зависимостях (от температуры или толщины F слоя) возникает заметная область пониженных критических токов. В SIsFS переходе в туннельном режиме область слабой связи локализована на диэлектрическом слое, в результате чего 0- π переход происходит через сложные состояния с неоднозначными ток-фазовыми зависимостями (ТФЗ). Классификация и исследование свойств промежуточных состояний и является целью данной работы.

Две модели SIsFS контакта

Система описана в рамках двух взаимодополняющих подходов: микроскопического и феноменологического. Первый основан на самосогласованном решении уравнений Узалея с граничными условиями Куприянова-Лукичева. Этот подход позволяет рассчитать ток-фазовые зависимости исходя из микроскопических соображений, однако в связи с необходимостью самосогласованно определять фазу промежуточного s-электрода, он требует значительного расчетного времени. Кроме того, данный метод позволяет получить только одно решение при проведении единственного расчета в зависимости от затравочных значений итерационных циклов, что грозит потерей решений при проведении расчетов для состояний с многозначными ток-фазовыми зависимостями.

Феноменологический подход основан на модели сосредоточенных элементов. Система представляется как последовательное соединение туннельного джозефсоновского контакта с синусоидальной ток-фазовой зависимостью $I_{SIS} = I_{CI} \sin(\varphi)$, в то время как ТФЗ ферромагнитного контакта включает в себя вклад от второй гармоники $I_{SFS} = A \sin(\varphi) + B \sin(2\varphi)$. Решение уравнения на равенство тока через оба контакта позволяет получить ток-фазовую зависи-

мость полной системы. При этом ТФЗ составных элементов однозначны и могут быть эффективно рассчитаны в рамках микроскопического подхода. Подобный метод применим при значительной толщине центрального сверхпроводящего слоя превышающей несколько длин когерентности [4]. Использование такого подхода позволяет не только получить все возможные решения в рамках одного вычисления, но и также получить информацию о неустойчивых решениях задачи, которая необходима для понимания эволюции устойчивых состояний в системе.

Многозначные ТФЗ

На Рис. 1 представлена типичная ток-фазовая зависимость SISFS структуры в области 0- π перехода, рассчитанная для толщины s-слоя $d_s=5\xi_s$ и F слоя $d_F=0.46\xi_F$ с обменным полем $H=10 \text{ кТл}$ при температуре $T=0.2 T_C$. Окружностями продемонстрированы результаты микроскопического расчета, в то время как сплошной линией показаны решения в рамках феноменологического подхода. Пунктиром продемонстрированы неустойчивые по фазе промежуточной сверхпроводящей области решения.

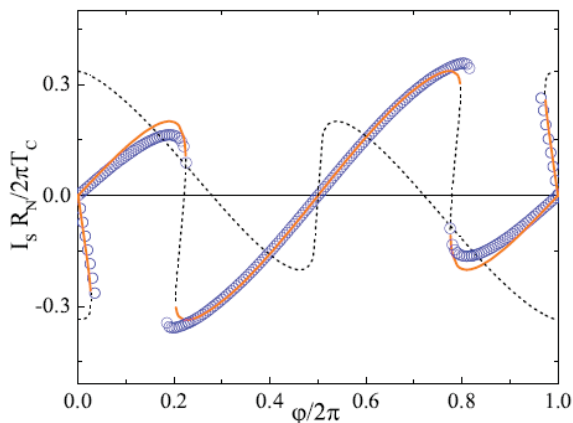


Рис. 1. Многозначная ток-фазовая зависимость джозефсоновской SISFS структуры в области 0- π перехода. Окружностями показаны результаты микроскопического моделирования, сплошными линиями – устойчивые решения феноменологического подхода, пунктиром – неустойчивые решения

На Рис. 1 хорошо виден гистерезисный характер ток-фазовой зависимости в окрестности фаз $\phi=0.2$ и $\phi=0.8$. Гистерезисы при этом разделяют ток-фазовую зависимость на две ветви, переход между которыми возможен за счет проскальзывания фазы.

В окрестности фазы $\phi=0$ также существует и другое устойчивое решение. Это решение появляется при трансформации неустойчивой ветви, соответствующей фазе π на центральном сверхпроводящем слое. Это метастабильное состояние не является основным, однако, в ряде случаев быть реализовано.

Изучение многозначных ток-фазовых зависимостей показало, что критический ток такой системы в области 0- π перехода связан с отношением второй гармоники ТФЗ SFS контакта к критическому току туннельного контакта B/I_{C1} .

Если эта величина меньше единицы, то критический ток в области перехода линейно уменьшается до минимального значения $I_C=B$. Однако при больших B , величина критического тока полной системы остается постоянной в любой точке 0- π перехода. Это приводит к тому, что измерение критического тока структуры (в зависимости от температуры или толщины магнитного слоя) не позволяет гарантированно выявить 0- π переход. Эта задача требует фазово-чувствительных методов исследования [5].

Авторы благодарны В.В. Рязанову за плодотворные обсуждения при подготовке данной работы. Работа частично поддержана грантами РФФИ-17-52-560003Iran-a, 16-29-09515-ofi-m, РНФ проект No. 15-12-30030, а также Минобрнауки РФ, грант МК-5813.2016.2 и программа повышения конкурентоспособности НИТУ "МИСиС" (проект № K2-2016-051)

Литература

1. T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov et al. // Appl. Phys. Lett. 100, 222601 (2012).
2. S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev et al. // Appl. Phys. Lett. 102, 192603 (2013).
3. S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev et al. // Phys. Rev. B 88, 144519 (2013).
4. N. Ruppelt, H. Sickinger, R. Menditto et al. // Appl. Phys. Lett., 106, 022602 (2015).
5. S. M. Frolov, D. J. Van Harlingen, V. A. Oboznov et al. // Phys. Rev. B 70, 144505, (2004)

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Материалы XXI Международного симпозиума

Нижний Новгород, 13–16 марта 2017 г.

Том 1: секции 1, 2, 4, 5

Институт физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105, Россия
Тел.: (831) 417-94-80 +101, (831) 417-94-76 +520, факс: (831) 417-94-74
e-mail: symp@nanosymp.ru

Формат 60×90 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Гарнитура «Times».
Уч.-изд. л. 52,6. Усл. п. л. 54,8. Заказ № 96. Тираж 250.

Издательство ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Тел. (831) 465-78-25

Подготовка оригинал-макета к печати *М.Л. Тимошенко, В.В. Шеина,
О.И. Гайкович, Е.Е. Шуманова*

Отпечатано в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37
Тел. (831) 433-83-25