

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXV Международного симпозиума

9–12 марта 2021 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
2021

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33
Н-25

Нанозфизика и нанозлектроника. Труды XXV Международного симпозиума (Нижний Новгород, 9–12 марта 2021 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. — 521 с.

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;
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

В.В. Румянцев, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

Программный комитет

| | |
|-------------------------------|---|
| А.Ю. Аладышкин, к.ф.-м.н., | ИФМ РАН, Нижний Новгород |
| В.В. Бельков, д.ф.-м.н. | ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург |
| И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н. | ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка |
| В.А. Бушуев, д.ф.-м.н. | МГУ, Москва |
| В.А. Быков, д.т.н. | NT-MDT Spectrum Instruments, 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 |
| А.Б. Грановский, д.ф.-м.н. | МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва |
| 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, академик | ИФТТ РАН, Черногловка |
| 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. Рощупкин, д.ф.-м.н. | ИПТМ РАН, Черногловка |
| В.В. Рязанов, д.ф.-м.н. | ИФТТ РАН, Черногловка |
| 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, Черногловка |
| 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

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| М.В. Зорина, | ИФМ РАН, Н. Новгород |
| А.В. Иконников, к.ф.-м.н., | МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва |
| 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 |
| П.М. Марычев, к.ф.-м.н., | ИФМ РАН, Н. Новгород |
| А.А. Копасов, | ИФМ РАН, Н. Новгород |
| Е.А. Архипова, | ИФМ РАН, Н. Новгород |

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет
им. Н.И. Лобачевского, 2021
© Институт физики микроструктур
РАН, 2021

Низкодиссипативная динамика джозефсоновских вихрей

В.С. Столяров^{1,2*}, В. Ружицкий², И.А. Головчанский¹, Р. Оганнисян¹, Н. Купчинская¹, О.В. Скрябина^{1,3}, А.Г. Шишкин^{1,2}, В.В. Дремов¹, В.М. Краснов^{1,5}, А.А. Голубов^{1,6}, И.И. Соловьев^{2,4}, Д. Родичев^{7,1}.

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), пер. Институтский, 9, Долгопрудный, 141700.

² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, ул. Суцевская, 22, Москва, 127055.

³ Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, 142432

⁴ НИИЯФ МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234

⁵ Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova University Center, SE-10691, Stockholm, Sweden

⁶ Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute of Nanotechnology, 7500 AE Enschede, The Netherlands

⁷ Laboratoire de Physique et d'Etudes des Matériaux, LPEM, UMR-8213, ESPCI-Paris, PSL, CNRS, Sorbonne University, 75005 Paris, France

*vasiliy.stoliarov@gmail.com

Джозефсоновские вихри играют важную роль в сверхпроводящих устройствах квантовой электроники. Часто рассматриваемые как чисто концептуальные топологические объекты, 2π -фазовые сингулярности, их наблюдение и манипулирование являются сложной задачей. Мы показываем, что в планарных переходах сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник джозефсоновские вихри имеют специфический магнитный отпечаток, который мы обнаруживаем в экспериментах по магнитно-силовой микроскопии. Основываясь на этом открытии, мы демонстрируем возможность генерации джозефсоновского вихря и манипулирования им с помощью магнитного кантилевера, тем самым открывая путь для удаленного контроля и управления отдельными наноконпонентами сверхпроводящих квантовых схем.

Введение

Разнообразие доступных сверхчувствительных сверхпроводящих устройств, кубитов и архитектур для квантовых вычислений быстро растет. Ожидается, что сверхпроводящая квантовая электроника (SQE) в ближайшем будущем бросит вызов традиционным полупроводниковым устройствам. Джозефсоновские переходы (JJ) являются строительными блоками SQE; они состоят из двух сверхпроводящих контактов, соединенных коротким не-сверхпроводящим барьером. Свойства JJ зависят от геометрии перехода, используемых материалов, температуры, приложенных сверхтоков, магнитных полей и т. д. Эти параметры определяют квантовый фазовый портрет сверхпроводящих корреляций внутри и в окрестности JJ. Из-за пространственной когерентности сверхпроводящего конденсата квантовые фазовые портреты обычных s -волновых сверхпроводников могут содержать только 2π -фазовые особенности. Одиночные 2π -особенности, расположенные в сверхпроводящих электродах, связаны с вихрями Абрикосова, а расположенные внутри переходов – с джозефсоновскими вихрями. Целое число n джозефсоновских вихрей, присутствующих в JJ, связано с n -ой ветвью модуляции критического тока по типу фраунгофера в зависимости от магнитного поля $I_c(H)$. В отличие от

абрикосовских вихрей, которые были обнаружены методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии (СТМ/СТС) уже в 1989 г. благодаря их нормальным ядрам, исследование джозефсоновских вихрей (без нормального ядра) с помощью СТМ/СТС является более сложным. Сканирование СКВИДом было более успешно при изучении джозефсоновских вихрей и дало первые сильные доказательства. Хотя из-за сильного пиннинга и коротких пространственных масштабов в материалах с высокими T_c , эти работы не касались более общей проблемы локальной генерации, динамики и манипулирования джозефсоновскими вихрями внутри JJ. Планарные JJ очень перспективны как для фундаментальных исследований, так и для приложений, даже если они не так широко используются, как традиционные многослойные JJs типа сэндвич. Планарная геометрия обеспечивает большую гибкость при разработке новых типов устройств с большим количеством предполагаемых приложений, включая обнаружение одиночных фотонов, измерение магнитного потока, индуцированного атомными спинами. Планарные JJ могут быть изготовлены с помощью различных технологий и с различными барьерными материалами, включая нормальные металлы, ферромагнетики, двумерный электронный газ, графен и топологические изоляторы. Важно отметить, что латеральная

геометрия JJ делает их подходящими для исследований с помощью сканирующих зондовых микроскопов и спектроскопии, СКВИДа или магнитно-силовой микроскопии (МСМ). МСМ – удобный инструмент для исследования сверхпроводящих свойств в реальном пространстве с нанометровым разрешением, таких, как лондонская глубина проникновения, вихри Абрикосова, доменные структуры в ферромагнитных сверхпроводниках. Недавнее развитие методов на основе МСМ позволило изучить проскальзывания сверхпроводящей фазы.

Результаты

При помощи МСМ удалось изучить статические и динамические отклики джозефсоновских вихрей в планарный Nb/Cu/Nb переходах. Рис. 1 демонстрирует внешний вид устройства и схему эксперимента. В эксперименте магнитный кантилевер Со/Сг МСМ перемещался над устройством и исследовал его локальные магнитные свойства. Одновременно он индуцировал локальное сильно неоднородное осциллирующее магнитное поле, которое влияло на положение/наличие джозефсоновских вихрей внутри JJ, при этом локальный отклик выявляется на картах МСМ. Общий отклик устройства исследовалось путем измерения транспортных свойств перехода в зависимости от положения кантилевера, внешнего магнитного поля и тока смещения через переход. Одновременно мы обнаружили влияние динамики джозефсоновского вихря, вызванное колеблющимся кантилевером, на фазу и амплитуды колебаний иглы. Комплексный анализ взаимодействия иглы и устройства, а также численное моделирование, позволили однозначно определить особенности динамики джозефсоновского вихря в джозефсоновском переходе.

Выводы

Мы продемонстрировали способ удаленной генерации, обнаружения и манипулирования джозефсоновскими вихрями внутри планарных джозефсоновских контактов с использованием низкотемпературного метода МСМ. Локальные эксперименты МСМ были объединены с одновременными измерениями электронно-транспортных свойств. Нашим основным результатом является наблюдение особого отклика кантилевера при определенном наборе параметров (его положение, температура, внешнее поле и ток), что приводит к появлению колец/дуг на МСМ картах из-за фазовых падений в колебаниях кантилевера. Эти особенности идентифицируются как точки бифуркации между соседними джо-

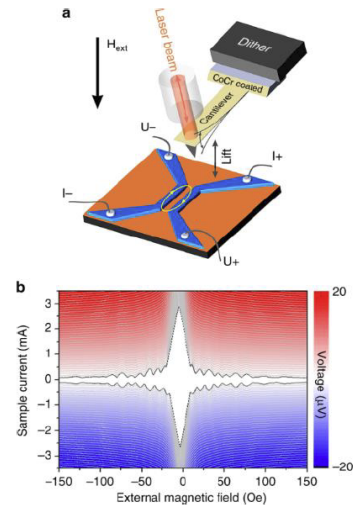


Рис. 1. (а) Схема устройства и эксперимента. (б) Измеренная зависимость критического тока JJ от магнитного поля

зефсоновскими состояниями, характеризующимися разным числом/положением джозефсоновских вихрей внутри перехода. Мы разработали модель, которая полностью подтверждает наши выводы. Это подтверждает важность обмена энергией зонд-устройство в точках бифуркации и демонстрирует, что МСМ может предоставить уникальную информацию о состоянии джозефсоновского вихря, значительно более богатую, чем традиционные измерения напряжения. Магнитный кантилевер может запускать и обнаруживать движение джозефсоновского вихря в переходе без необходимости использования транспортного тока или внешнего магнитного поля и, следовательно, может использоваться в качестве локального датчика динамики джозефсоновского вихря. Мы ожидаем, что наше открытие ускорит разработку новых основанных на МСМ методов локального бесконтактного контроля и контроля передовых сверхпроводящих устройств и квантовой электроники.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 20-72-10118.

Литература

1. Dremov V.V., Grebenchuk S.Y., Shishkin A.G., *et al.* // *Nat Commun* **10**, 4009 (2019).
2. Grebenchuk S.Yu., Hovhannisyan R.A., Dremov V.V., *et al.* // *Phys. Rev. Research* **2**, 023105 (2020).
3. Hovhannisyan R.A., Ruzhitskiy V.I., *et al.* Direct evidence of the Josephson vortex low-dissipative dynamics // *in preparation* (2021).