

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

## **Труды XXIII Международного симпозиума**

*11–14 марта 2019 г., Нижний Новгород*

*Том 1*

*Секции 1, 2, 4, 5*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
2019

УДК 538.9  
ББК 22.37; 22.33  
Н-25

**Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXIII Международного симпозиума** (Нижний Новгород, 11–14 марта 2019 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2019. — 544 с.  
ISBN 978-5-91326-499-2

**Организаторы**

Отделение физических наук РАН  
Научный совет РАН по физике полупроводников  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред  
Институт физики микроструктур РАН — филиал ФИЦ Институт прикладной физики 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**

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, Санкт-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, чл.-корр. РАН	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. Роцупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салашенко, 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**

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., 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. Марьчев, ИФМ РАН, Н. Новгород  
А.А. Копасов, ИФМ РАН, Н. Новгород  
Е.А. Архипова, ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-499-2

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет  
им. Н.И. Лобачевского, 2019  
© Институт физики микроструктур  
РАН, 2019

# Аномальное магнитосопротивление системы Ni-нанопровод/сверхпроводник

О.В. Скрябина<sup>1,2,\*</sup>, С.К. Козлов<sup>2,3</sup>, С.В. Егоров<sup>1</sup>, А.А. Клименко<sup>3</sup>, В.В. Рязанов<sup>1,2</sup>, С.В. Бакурский<sup>2,3</sup>, М.Ю. Куприянов<sup>2,3</sup>, Н.В. Кленов<sup>2,3</sup>, И.И. Соловьев<sup>2,3</sup>, А.А. Голубов<sup>2</sup>, К.С. Напольский<sup>2,3</sup>, И.А. Головчанский<sup>2</sup>, Д.Ю. Родичев<sup>2,4</sup>, В.С. Столяров<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела РАН, ул. Академика Осипяна, Черноголовка, 142432.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, Институтский пер. Долгопрудный, 141700.

<sup>3</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991.

<sup>4</sup> Laboratoire de Physique et d'Etudes des Materiaux, LPEM, UMR-8213, ESPCI-Paris, PSL, CNRS, Sorbonne University, 75005 Paris, France

\*oskrya@gmail.com

Изготовлены наноструктуры, состоящие из Ni-нанопровода и Nb-электродов с высоким качеством поверхности раздела Nb/Ni. Изучено влияние вихревого сверхпроводящего смешанного состояния в Nb на магнитосопротивление Ni нанопровода. Показано, что электроды Nb работают как сверхпроводящие шунты. В результате обычное анизотропное магнитосопротивление ферромагнитных нанопроволок дополняется сильной растущей гистерезисной и пилообразной зависимостью от магнитного поля. Эти явления связаны с проникновением/выходом отдельных абрикосовских вихрей.

## Введение

Электрические и магнитные транспортные свойства одиночных ферромагнитных (F) нанопроводов (NW) представляют большой интерес благодаря их квазиодномерным свойствам и эффектам квантового удержания. Это делает ферромагнитные NW перспективными для применения в различных функциональных наноструктурах, включая сверхпроводящие фазовые инверторы, спиновые затворы и элементы магнитной памяти [1,2].

В данной работе мы изучаем магнитосопротивление в системе S/F-NW на основе Ni-NW и ниобия (Nb) в магнитном поле, ориентированном вдоль длинной оси NW.

## Результаты и обсуждение

Никелевые нанопровода были изготовлены методами темплатного электроосаждения с помощью трековых мембран из оксида алюминия. Данные просвечивающей микроскопии демонстрируют поликристаллическую структуру с размером зерен сопоставимым с диаметром нанопроводов.

На основе единичных нанопроводов были изготовлены структуры для 4-зондовых транспортных измерений. Процесс изготовления контактов включал в себя электронную литографию, а также магнетронное напыление сверхпроводящего ниобия с предварительной предочисткой нанопроводов в едином вакуумном цикле. На рис.1 показана структура с расстоянием между внутренними (потенци-

альными) электродами  $L = 380$  нм и диаметром нанопровода  $d = 107$  нм.

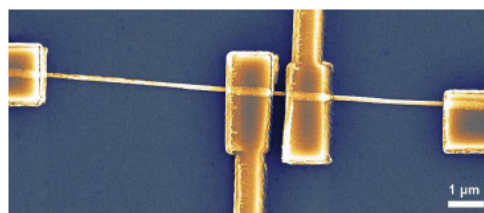


Рис. 1. SEM – изображения структуры Nb/Ni-NW/Nb.

Поток тока в перекрывающихся областях Nb/Ni сильно зависит от нормального или сверхпроводящего состояния Nb-слоя. В нормальном состоянии ниобия распределение тока можно найти из решения уравнения Лапласа для скалярного потенциала. Ниже критической температуры, при которой сверхпроводящие корреляции в Nb начинают влиять на сопротивление вблизи границы раздела Nb/Ni, плотность тока существенно перераспределяется. В окрестности границы раздела Nb/Ni нормальный ток преобразуется в сверхток. Это преобразование происходит в узкой перекрывающейся области, где ток течет вдоль NW внутри сверхпроводящего Nb, который работает как сверхпроводящий шунт. В центральной части Ni-NW нормального тока нет. Наконец, обратное преобразование из сверхтока в нормальный ток происходит на выходной кромке перекрывающейся области. В результате краевые области дают существенный вклад в сопротивление границы раздела, поскольку в них одновременно существуют как нормальный, так и сверхток.

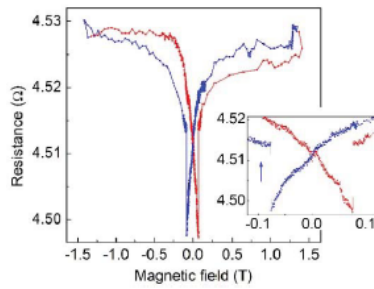


Рис. 2. Зависимость  $R(H)$  при  $T = 10$  К.  
На вставке показано перемещение NiNW  
при поле  $\pm 0.076$  Т

Быстрое преобразование на краях перекрывающихся областей нормального тока, протекающего в Ni-NW, в сверхток в Nb-шунте имеет важные последствия для магнитотранспортных свойств устройства. Когда Nb-электроды находятся в нормальном состоянии ( $T > T_C$ ) магнитное поле равномерно входит в образец,  $R(H)$  имеет вид как при обычном AMR (рис. 2). При циклировании магнитного поля  $R(H)$  демонстрирует гистерезис из-за перемещения Ni-NW при коэрцитивном поле  $H_c = 0.076$  Тл.

При  $T = 4.2$  К, когда сверхпроводящие корреляции от Nb присутствуют на границе раздела Nb/Ni,  $T < T_C$ , магниторезистивное поведение структуры резко меняется,  $R(H)$  быстро и почти линейно растет от  $R = 3,33$  Ом до  $R = 3,37$  Ом (рис. 3). При этом кривая имеет пилообразную форму с периодическими и примерно равными по амплитуде скачками сопротивления. Эти скачки связаны с входом/выходом абрикосовских вихрей в структуру. Когда приложенное магнитное поле превышает первое критическое поле  $H_{c1}$  Nb, смешанное сверхпроводящее состояние с вихрями Абрикосова становится энергетически выгодным.

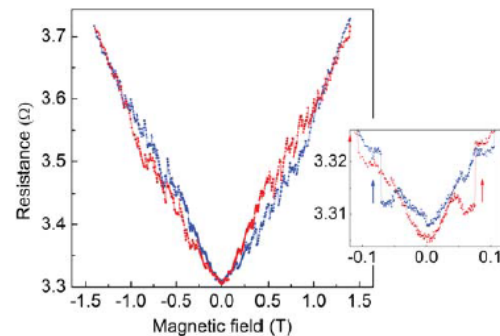


Рис. 3. Зависимость  $R(H)$  при  $T = 4.2$  К. Скачки сопротивления соответствуют входу/выходу абрикосовских вихрей

Поскольку токи мейснеровского экранирования  $j_s$  также увеличиваются с увеличением магнитного поля, они ослабляют сверхпроводящий порядок на краях Nb и способствуют проникновению вихрей. Самая слабая краевая область, из которой могут проникать вихри, расположена вблизи границы раздела Nb/Ni, где сверхпроводящий порядок дополнительно подавляется обратной близостью от Ni-NW.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-02-00981А и РФФ 18-72-10118.

## Литература

1. A.K. Feofanov, V.A. Oboznov, V.V. Bol'ginov, J. Lisenfeld, S. Poletto, V.V. Ryazanov, A.N. Rosolenko, M. Khabipov, D. Balashov, A.B. Zorin, P.N. Dmitriev, V.P. Koshelets and A. V. Ustinov // Nature Physics 6, 593 (2010).
2. I.I. Soloviev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, M.Yu. Kupriyanov, A.L. Gudkov and A.S. Sidorenko // Beilstein Journal of Nanotechnology, 8, 2689 (2017).