

# **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 «Нанозеллектроника».** (Нижний Новгород, Н-25 13–16 марта 2017 г.) В 2 т. Том I. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 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, Черногоровка
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, Черногоровка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногоровка
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, Черногоровка
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

© Нижегородский госуниверситет  
им. Н.И. Лобачевского, 2017  
© Институт физики микроструктур РАН, 2017

# Квантовые осцилляции модуля параметра порядка в квазиодномерных сверхпроводниках

К.Ю. Арутюнов<sup>1,2,\*</sup>, J.S. Lehtinen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики, Московский институт электроники и математики, ул. Мясницкая 20, Москва, 101000, Россия.

<sup>2</sup> Институт физических проблем РАН, ул. Косыгина, д. 2, Москва, 119334, Россия.

<sup>3</sup> VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., Centre for Metrology MIKES, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

\*karutyunov@hse.ru

Экспериментально исследовались вольт-амперные характеристики туннельных контактов сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (С1-И-С2), где сверхпроводящий электрод С2 представлял из себя тонкий нанопровод. Обнаруженное размытие щелевых особенностей интерпретируется как проявление эффекта квантовых флуктуаций модуля параметра порядка. Практическим результатом работы является установление границ применимости в наноэлектронных устройствах сверхпроводящих элементов сверхмалых размеров.

## Введение

В последнее время проявился интерес к изучению квазиодномерной сверхпроводимости [1]. Спецификой таких систем является яркое проявление флуктуационных эффектов, которые влияют как на транспортные [2], так и —термодинамические свойства [3]. При рассмотрении флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка  $\Delta = |\Delta|e^{i\phi}$ , являющегося комплексной величиной, необходимо различать флуктуации фазы  $\phi$  и модуля  $|\Delta|$ . Первый эффект, проскальзывание фазы, активно изучается в настоящее время. Однако дуальный эффект, флуктуации модуля параметра порядка, является малоизученной областью. Целью работы является исследование этого интригующего явления.

## Методика эксперимента

Наноструктуры изготавливались методом взрывной электроннолучевой литографии и направленного вакуумного напыления. Было изготовлено несколько многотерминальных туннельных С1-И-С2 структур, где сверхпроводящий контакт С1 – «массивный» алюминий, изолятор И – тонкий слой оксида алюминия, а электроды С2 представляли из себя тонкие титановые нанопровода (Рисунок 1). Предварительные исследования показали, что в титановых каналах при сечениях менее 40 нм форма сверхпроводящего перехода  $R(T)$  сильно уширена за счет вклада квантовых флуктуаций фазы параметра порядка — квантовых проскальзываний

фазы [4]. Структуры, изученные в настоящей работе, были изготовлены таким образом, чтоб эффективный диаметр (корень из сечения) тонких нанопроводов С2 находился именно в той области, где квантовые флуктуации должны отчетливо проявляться. Все измерения проводились при сверхнизких температурах <100 мК, много меньших критических температур как алюминия ( $T_c \sim 1,4$  К), так и титана ( $T_c \sim 0,4$  К). Рабочей гипотезой было предположение, что за счет флуктуаций модуля параметра порядка, вольт-амперные характеристики (ВАХ) будут размываться в области щелевых смещений  $eV = |\Delta_1| + |\Delta_2|$  на величину, пропорциональную амплитуде флуктуаций параметра порядка в титановом нанопроводе.

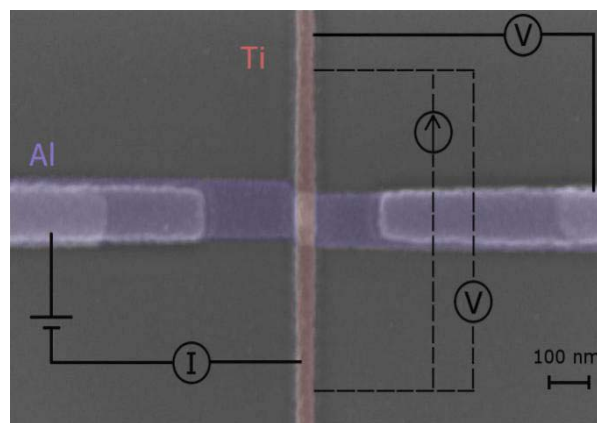


Рис. 1. Электронная микрофотография структуры и схема измерений

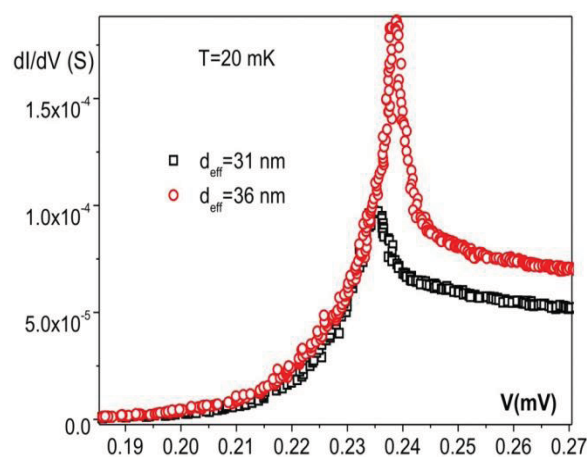
## Результаты и обсуждение

ВАХ С1-И-С2 структур с эффективным диаметром титанового электрода С2 более 40 нм продемонстрировали типичные зависимости для массивных сверхпроводников: резкая щелевая особенность при смещениях  $eV = |\Delta_1| + |\Delta_2|$  [5]. С уменьшением диаметра титанового контакта С2 форма ВАХ качественно меняется. Фрагменты двух ВАХ с использованием приведены на Рисунке 2. Прослеживаются два эффекта: чем меньше диаметр нанопровода С2, тем (1) меньше сверхпроводящая щель титана  $\Delta_2$ , и (2) тем больше размытие щелевой особенности. Причина первого явления не вполне понятна, хотя, сам по себе, эффект зависимости критической температуры от характерного масштаба низкоразмерного сверхпроводника известен давно [6]. Что касается размытия щелевой особенности ВАХ, то мы его интерпретируем как проявление эффекта квантовых флуктуаций модуля параметра порядка. Использование «классического» выражения для формы ВАХ туннельного С1-И-С2 контакта, например [5], с гауссовым размытием щели для одного из сверхпроводников дает качественно удовлетворительное согласие с экспериментом, хотя количественное согласие оставляет желать лучшего. По всей видимости, модель явления должна учитывать влияние квантовых флуктуаций не только на фазу и модуль параметра порядка, но также — на плотность состояния сверхпроводника. Хочется верить, что наши эксперименты послужат стимулом для дальнейших исследований, в том числе — теоретических.

## Благодарности

В работе использованы материалы проекта № 16-05-0029 «Макроскопические квантовые явления при низких температурах» в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

(НИУ ВШЭ и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.



**Рис. 2.** ВАХ двух С1-И-С2 структур, где сверхпроводящий контакт С1 – «массивный» алюминий, И – оксид алюминия, электроды С2 – тонкие титановые нанопровода с диаметром 31 нм и 36 нм, соответственно

## Литература

1. Arutyunov K.Y., Golubev D.S., and Zaikin A.D. // Phys. Rep., V. 464, 1 (2008).
2. Giordano N. // Phys. Rev. Lett., V. 61, 2137 (1988).
3. Arutyunov K.Y., Hongisto T.T., Lehtinen J.S., Leino L., Vasiliev A. // Sci. Rep. V. 2, 213 (2012).
4. Lehtinen J.S., Zakharov K. and Arutyunov K.Y. // Phys. Rev. B, V. 85, 094508 (2012).
5. Tinkham M. Introduction to superconductivity. 2d ed. McGraw-Hill, Inc., New York; 1996.
6. Croitoru M. D., Vagov A., Shanenko A. A. and Axt V. M. // Supercond. Sci. Technol., V. 25, 124001 (2012).