

# 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](mailto: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 нанозлектронных 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.

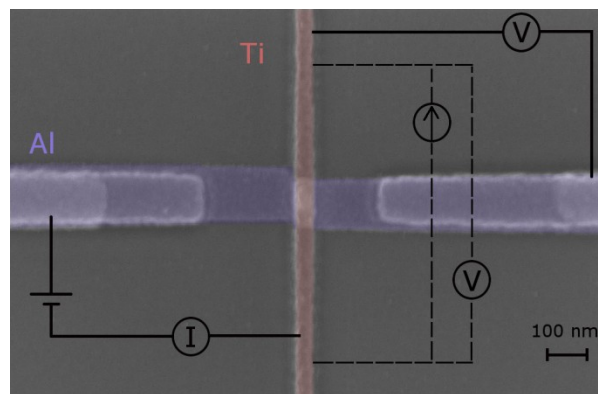
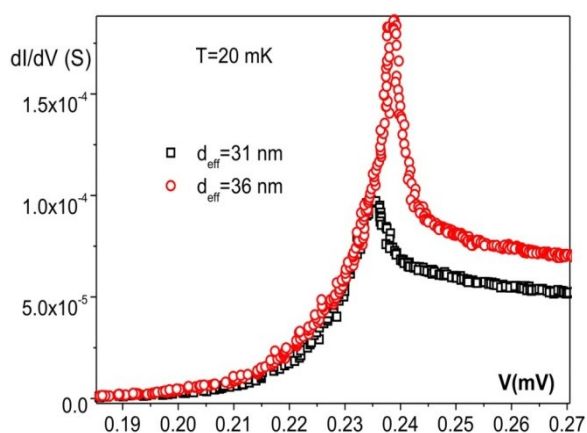


Рисунок 1. Электронная микрофотография структуры и схема измерений.

## 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 качественным образом 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.



**Рисунок 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.

## 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.

## 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)