

УДК 538.94

**КВАНТОВЫЕ РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ****К.Ю. Арутюнов**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Московский институт электроники и математики,  
Институт физических проблем РАН им. П.Л. Капицы*

При достижении геометрических размеров некоего объекта определенных характерных масштабов начинают проявляться явления, связанные с пониженной размерностью системы. Современные нанотехнологические методы позволяют воспроизводимо изготавливать твердотельные структуры суб-100 нм размеров, где уже могут давать ощутимый вклад различные квантовые размерные эффекты. В данной работе использовался метод взрывной электроннолучевой литографии и направленного вакуумного напыления для изготовления металлических нанопроводов из висмута (полуметалл) и титана (сверхпроводник). Далее физическим травлением в направленной плазме аргона сечение нанопроводов последовательно уменьшалось. Между актами травления измерялись электрические свойства структур при низких температурах, позволяющие проследить развитие соответствующих квантовых размерных эффектов. В висмутовых наноструктурах с уменьшением их поперечных размеров были обнаружены осцилляции сопротивления и резкое его увеличение при достижении суб-70 нм масштабов. Эффект может быть интерпретирован как квантовый размерный эффект, связанный с квантованием энергетического спектра электронов проводимости. В сверхпроводящих системах с уменьшением сечения нанопровода заметно увеличивалась ширина сверхпроводящего перехода. В самых тонких образцах конечное сопротивление наблюдалось при температурах, существенно меньших, чем критическая температура материала. Феномен может быть также объяснен некоей разновидностью квантового размерного эффекта для квазиодномерного сверхпроводника – эффектом квантового проскальзывания фазы. Оба явления находятся в хорошем согласии с существующими модельными представлениями. Наличие квантовых размерных эффектов накладывает фундаментальные ограничения на использование наноэлектронных элементов сверхмалых размеров.

*Ключевые слова:* квазиодномерные металлические каналы, размерное квантование, неравновесная сверхпроводимость, нанотехнология.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-7-16

**Введение**

Постоянная тенденция на увеличение степени интеграции микро- и наноэлектронных цепей предполагает, что основные свойства базовых элементов остаются качественно неизменными при соответствующем сокращении размеров. Одна из серьезнейших проблем современной электронной инженерии – катастрофический рост тепловыделения, достигающий в последних поколениях микропроцессоров впечатляющей величины порядка 100 Вт/см<sup>2</sup>. Радикальным решением, снимающим проблему джоулевого разогрева, может быть использование сверхпроводящих

---

Статья подготовлена в ходе проведения исследования (№ 15-01-0153) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2015–2016 гг. 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.

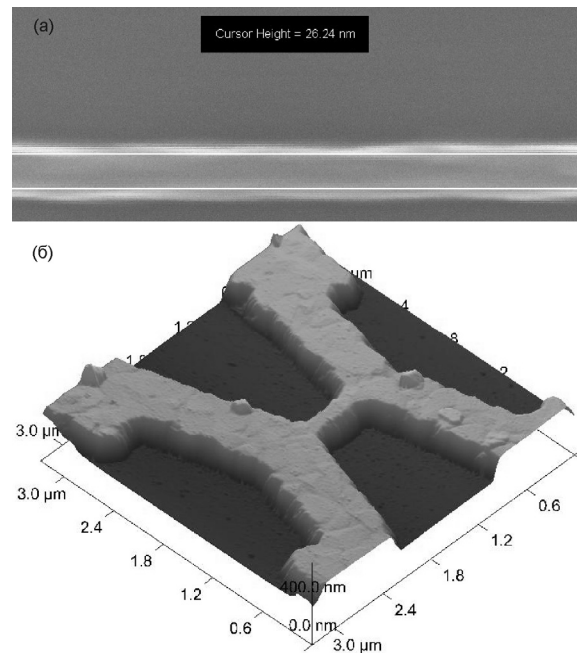
материалов в критических узлах системы. Другой проблемой является электрической пробой и/или квантовое туннелирование в диэлектрических слоях гибридных элементов (транзисторы, конденсаторы) сверхмалых размеров. На решение этой проблемы – разработку технологии изготовления «стойких» диэлектрических слоев нанометровых толщин – в настоящее время выделяются большие средства и затрачиваются огромные усилия. Однако, учитывая фундаментальный характер проблемы, трудно ожидать серьезного прогресса. Помимо обозначенных чисто «классических» проблем, миниатюризация электронных блоков неизбежно приводит к возникновению принципиальных ограничений, связанных с различными размерными, в том числе – квантовыми, эффектами [1].

В настоящей работе изучается влияние уменьшения сечения металлических нанопроводов на их электрическую проводимость. Нами были исследованы системы с нормальной электронной проводимостью (висмут) и сверхпроводящие образцы (титан), где ток переносится куперовскими парами электронов. И в том, и в другом случае удается показать, что при достижении определенных размеров электрические свойства таких объектов начинают радикально отличаться от поведения массивных проводников. В тонких каналах из нормального металла квантование энергетических уровней электронов проводимости приводит к периодическим осцилляциям сопротивления и его резкому увеличению при достижении некоего критического диаметра. В сверхпроводящих нанопроводах квантовые флуктуации параметра порядка приводят к существенному уширению формы сверхпроводящего перехода и в самых тонких образцах – к конечному сопротивлению при температурах, существенно меньших, чем критическая температура массивного материала.

## 1. Эксперимент

Металлические нанопровода изготавливались стандартным методом взрывной электроннолучевой литографии и направленного вакуумного напыления электронной пушкой. Титан напылялся в вакууме порядка  $10^{-9}$  мБар на подложку из оксидированного кремния. Висмутовые пленки осаждались в вакууме порядка  $10^{-6}$  мБар на подогреваемую до температуры  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  слюдяную подложку. Для обеспечения стекания заряда, перед загрузкой в камеру электронного литографа слюдяные подложки с резистом дополнительно покрывались  $\sim 5$  нм слоем алюминия. Типичный размер образца, предназначенного для проведения измерений сопротивления 4-контактным методом, составлял  $d = 40$  нм (толщина)  $\times w = 60$  нм (ширина)  $\times L = 5$  мкм (длина) для титана и  $100$  нм  $\times 300$  нм  $\times 1$  мкм для висмута. Перед проведением электрических измерений все наноструктуры тщательно анализировались при помощи растрового электронного и сканирующего силового микроскопов (рис. 1). Только те образцы, которые не обнаруживали очевидных структурных дефектов, исследовались далее.

Электрические измерения проводились автоматизированной системой при низких и сверхнизких температурах в криостате с жидким гелием и/или рефрижераторе растворения  $\text{He}^3\text{He}^4$ . В более ранних работах та же самая измерительная установка и многоступенчатая система радиочастотных фильтров использовалась при измерениях вольт-амперных характеристик (ВАХ) туннельных контактов металл–изолятор–сверхпроводник. Анализ формы таких ВАХ позволяет получить электронную температуру образца, которая в наших измерениях превосходила фонную температуру не более чем на  $15$  мК при базовой температуре порядка  $20$  мК [2–4]. При регистрации характеристик при фиксированной температуре температурный контроллер с пропорционально-интегрально-дифференциальной обратной связью обеспечивал стабильность поддержания температуры на уровне  $\pm 1$  мК.



*Рис. 1* – Микрофотография фрагмента титанового нанопровода, полученная растровым электронным микроскопом (а); микрофотография фрагмента висмутовой наноструктуры, полученная сканирующим силовым микроскопом (б)

*Fig. 1* – SEM image of a typical titanium nanowire (a); AFM image of a bismuth nanostructure (b)

После каждого цикла измерений электрического сопротивления образцы вынимались из криостата и помещались в вакуумную камеру, оборудованную ионной пушкой. Физическим травлением в направленной низкоэнергетической плазме аргона сечение нанопроводов последовательно уменьшалось. Предварительная калибровка на сонпыленных тонких пленках и анализ профиля при помощи сканирующего силового микроскопа позволяют контролируемо, с шагом в несколько нанометров, уменьшать эффективное сечение  $\sigma = dw$  наноструктуры, достигая суб-10 нм размеров [5]. Примечательно, что метод позволяет достигать шероховатости поверхности на уровне  $\pm 1$  нм [6]. Низкая энергия бомбардирующих ионов инертного газа  $\sim 0,5$  кэВ обеспечивает крайне низкую дефектность поверхности на уровне нескольких атомных слоев.

## 2. Квантовый размерный эффект в висмутовых наноструктурах

Примером проявления квантовых свойств электрона с массой  $m_e$  является квантование его энергетических уровней при помещении в «потенциальную яму» с характерным размером  $a$ :

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2a^2 m_e} n^2, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

Формально, квантование энергетических уровней должно проявляться и для электронов проводимости с эффективной массой  $m^*$ . С уменьшением характерного размера  $a$  (толщины пленки или диаметра провода) при равенстве энергий  $n$ -го

уровня и энергии Ферми  $E_F$  должна наблюдаться особенность кинетических свойств электронов – например, электрической проводимости. Однако для типичных металлов с эффективной массой  $m^* \approx m_e$  и энергией Ферми  $E_F$  порядка нескольких эВ элементарный расчет показывает, что квантование спектра становится заметным на масштабах порядка межатомного расстояния. Очевидно, что экспериментальное наблюдение соответствующего явления в таких материалах весьма затруднительно [7].

Квантовые размерные эффекты (КРЭ) должны особо явно проявляться в металлах с малой эффективной массой  $m^*$  и энергией Ферми  $E_F$  – например, в висмуте или сурьме. В первых экспериментах по наблюдению КРЭ в висмуте исследовалась электрическая проводимость тонких висмутовых пленок [8–11]. В самом деле, удалось показать, что с изменением толщины пленки проводимость меняется немонокотным образом. Однако удовлетворительного согласия между экспериментальными данными и предсказаниями теории в тех ранних экспериментах установить не удалось. Модельное описание эксперимента затруднено по причине сильной анизотропии спектра висмута. Поверхность Ферми висмута представляет из себя сложную многосвязную структуру, состоящую из трех электронных («легкие» L-электроны) и одной дырочной («тяжелые» T-дырки) поверхностей. Для однозначной интерпретации необходимо изготовить монокристаллическую структуру с известной ориентацией относительно кристаллографических осей, что достаточно проблематично.

В более поздних работах было показано, что в квазиодномерных висмутовых каналах, наиболее «выгодно» ориентированных вдоль соответствующей кристаллографической оси [10–12], можно ожидать перехода металл–диэлектрик, связанного с выходом нижнего уровня  $E_1$  на уровень Ферми при диаметрах нанопровода порядка 50 нм [12]. До достижения этого критического размера КРЭ будет проявляться как осцилляции проводимости, соответствующие равенству энергии  $E_n(\sigma)$  и энергии Ферми, достаточно жестко фиксированной «тяжелыми» T-дырками, размерным квантованием спектра которых можно пренебречь [13–14].

В этой работе мы использовали метод последовательного уменьшения диаметра висмутового нанопровода травлением в направленном пучке низкоэнергетической плазмы инертного газа [5]. Стартуя с эффективного диаметра  $\sigma^{1/2} = (dw)^{1/2} \approx 250$  нм, где  $d$  – толщина,  $w$  – ширина образца, нам удалось проследить зависимость сопротивления от эффективного сечения висмутового нанопровода вплоть до 20 нм масштабов. После каждого акта ионного травления размеры образца контролировались силовым микроскопом атомного разрешения. Результирующая погрешность измерения сечения образца порядка  $\sim 2$  нм определяется двумя основными факторами. Первый – проблема нахождения иглой силового микроскопа границы раздела металла и (стравленной) подложки. Второй – так называемый эффект деконволюции изображения, связанный с конечными размерами иглы, который особенно негативно проявляется при анализе топографии трехмерных объектов.

Типичная зависимость электрического сопротивления  $R$  висмутового нанопровода от эффективного диаметра  $\sigma$  показана на рис. 2. При температурах жидкого гелия хорошо прослеживаются немонокотность зависимости  $R(\sigma)$  и резкое увеличение сопротивления при диаметрах  $\sigma^{1/2} \sim 50$  нм, которая нами интерпретируется как проявление КРЭ. Нами были затрачены значительные усилия для получения висмутовых наноструктур с размером центральной части образца в виде единичного монокристаллита с размером порядка нескольких микрометров. Тем не менее, по всей видимости, нам так и не удалось реализовать ситуации, когда вклад в электрическое сопротивление дает только центральная (монокристаллическая)

часть образца. Подводящие электроды, выполненные в конфигурации для 4-контактных измерений, изготовлены из того же самого материала – висмута (рис. 1, б). Исходя из сказанного, к сожалению, наши результаты могут рассматриваться скорее как качественная демонстрация наличия КРЭ, а количественное сравнение с теорией проблематично из-за неопределенности кристаллографической ориентации «тела» образца и вклада подводящих контактов.

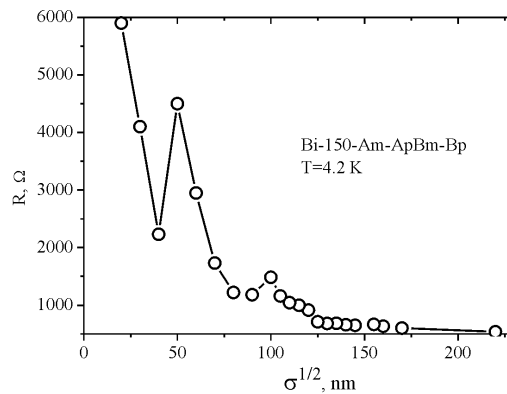


Рис. 2 – Зависимость сопротивления от эффективного сечения висмутового нанопровода после нескольких актов ионного травления

Fig. 2 – Resistance vs. effective diameter for the same bismuth nanowire after several sessions of ion milling

### 3. Квантовые флуктуации в титановых нанопроводах

С развитием нанотехнологий за последнее время значительно увеличился интерес к проблеме квазиодномерной сверхпроводимости [15]. Один из наиболее интересных явлений – эффект проскальзывания фазы, приводящий к появлению конечного сопротивления в тонких сверхпроводящих каналах. Проскальзывание фазы – быстрое зануление модуля параметра порядка  $\Delta = |\Delta|e^{i\phi}$  и одновременное «прокручивание» его фазы  $\phi$  на  $\sim 2\pi$  – может быть стимулировано термическими [15–17] (thermally activate phase slips TAPS) и квантовыми флуктуациями [15, 18–19] (quantum phase slip QPS). В первом случае конечное падение напряжения  $V_{\text{eff}}$  на образце наблюдается в непосредственной близости от критической температуры  $T \sim T_c$  и описывается выражением [15]:

$$V_{\text{eff}} = \frac{8\sqrt{6\pi}}{e} k_B T \frac{L}{\xi(T)} \sqrt{\frac{\delta F}{k_B T}} e^{-\frac{\delta F}{k_B T}} \sinh \left[ \frac{\pi h I}{2ek_B T} \right], \quad (2)$$

где  $I$  – измерительный ток;  $\delta F$  – энергия потенциального барьера, разделяющего состояния с разницей фаз  $\delta\phi = 2\pi$ ;  $\xi(T)$  – зависящая от температуры длина когерентности [15–17, 20]. Ранние эксперименты в тонких монокристаллах олова подтвердили наличие вклада термических флуктуаций (2) в области  $\delta T \sim 10$  мК ниже критической температуры [21, 22].

Более поздние исследования показали, что квантовая природа сверхпроводимости приводит к возможности проскальзывания фазы за счет квантовых флуктуаций параметра порядка, которые должны присутствовать при любых температурах с частотой [15, 18–19]:

$$\Gamma_{QPS} = \frac{S_{QPS}}{(h/\Delta)\xi(T)} L e^{-S_{QPS}}, \quad (3)$$

где действие  $S_{QPS} = A(R_Q/R_N)(L/\xi(T))$ ;  $R_Q = h/(2e)^2 = 6,47$  кОм;  $R_N$  – сопротивление образца в нормальном состоянии;  $A \approx 1$  – численная константа. В последнее десятилетие эффект квантового проскальзывания фазы активно исследовался [15]. Например, было продемонстрировано, что этот механизм приводит к подавлению незатухающих экранирующих токов в сверхпроводящих кольцах мезоскопических размеров [23] и возникновению кулоновской блокады в сверхтонких сверхпроводящих каналах, помещенных в высокоомное окружение [24, 25].

В настоящей работе мы исследовали форму сверхпроводящего перехода  $R(T)$  тонких титановых каналов. В типичной для таких экспериментов конфигурации стабилизации измерительного тока  $I$  эффективное сопротивление, задаваемое процессом квантовых проскальзываний фазы (3), может быть записано как

$$R_{QPS}(T) \equiv \frac{V_{\text{eff}}}{I} = \frac{h\Gamma_{QPS}}{2eI}. \quad (4)$$

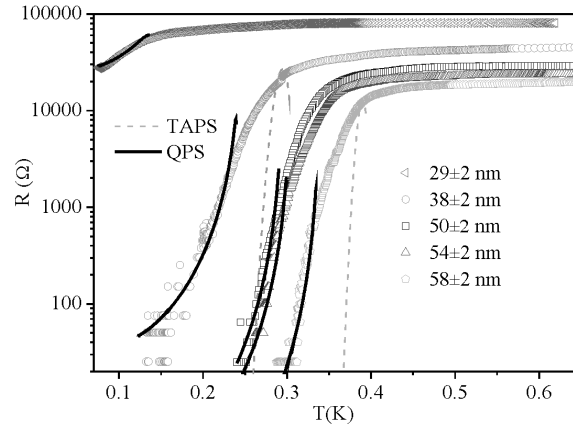


Рис. 3 – Зависимость сопротивления от температуры одного и того же титанового нанопровода после нескольких актов ионного травления. Эффективный диаметр каждого образца указан на рисунке. Сплошные линии соответствуют модели квантовых проскальзываний фазы для каждого образца. Штрихованные линии соответствуют модели термических активаций и построены для двух образцов – 38 и 58 нм

Fig. 3 – Resistance vs. temperature for the same titanium nanowire after several sessions of ion sputtering. The effective diameters of each sample are indicated in the plot. Solid lines correspond to QPS model for each sample. Dashed lines are fits using TAPS model and are plotted for sample 38 and 58 nm

Четкое разделение вклада квантовых флуктуаций (4) от вклада термического механизма (2) возможно при температурах, существенно ниже критической  $T \ll T_c$ , где вероятность последнего становится неизмеримо малой. Типичная зависимость сопротивления от температуры одного и того же титанового нанопровода после нескольких актов ионного травления приведена на рис. 3. Хорошо видно, что при

низких температурах термический механизм (2) – штрихованные линии на рис. 3 – дает существенно меньшие значения эффективного сопротивления по сравнению с данными эксперимента. В то время как квантовый механизм (3–4) – сплошные линии на рис. 3 – дает вполне разумное согласие с экспериментом. Следует отметить, что сравнение с экспериментом вкладов, определяемых процессами проскальзывания фазы – термического (2) или квантового (3) – строго говоря, правомочно в пределе, когда оба процесса являются «редкими» или, формально, когда эффективное сопротивление образца  $R(T) \ll R_N$ .

### Заключение

В работе экспериментально исследовались температурные зависимости сопротивления висмутовых и титановых нанопроводов. В висмутовых наноструктурах с уменьшением их поперечных размеров были обнаружены осцилляции сопротивления и резкое его увеличение при достижении суб-70 нм масштабов. Эффект может быть интерпретирован как квантовый размерный эффект, связанный с квантованием энергетического спектра электронов проводимости. В сверхпроводящих титановых системах с уменьшением сечения нанопровода заметно увеличивалась ширина сверхпроводящего перехода. Феномен может быть объяснен эффектом квантового проскальзывания фазы. Оба явления находятся в хорошем согласии с существующими модельными представлениями. Наличие квантовых размерных эффектов накладывает фундаментальные ограничения на использование нанoeлектронных элементов сверхмалых размеров.

### Благодарности

Автор хочет выразить благодарность М. Згирски, Л. Лейно, Я. Лехтинен, К.-П. Рииконен и П. Ялканен, без участия и помощи которых появление этой работы не было бы возможным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Tringides M.C., Jatochowski M., Bauer E.** Quantum size effects in metallic nanostructures // *Physics Today*. – 2007. – Vol. 60, iss. 4. – P. 50–54. – doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2731973>.
2. **Arutyunov K.Yu., Auraneva H.-P., Vasenko A.S.** Spatially resolved measurement of nonequilibrium quasiparticle relaxation in superconducting Al // *Physical Review B*. – 2011. – Vol. 83, iss. 10. – P. 104509-1–104509-7. – doi: [10.1103/PhysRevB.83.104509](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.104509).
3. Microrefrigeration by quasiparticle tunneling in NIS and SIS junctions / J.P. Pekola, A.J. Manninen, M.M. Leivo, K.Yu. Arutyunov, J.K. Suoknuuti, T.I. Suppala, B. Collaudin // *Physica B: Condensed Matter*. – 2000. – Vol. 280, iss. 1–4. – P. 485–490. – doi: [10.1016/S0921-4526\(99\)01842-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01842-6).
4. **Arutyunov K.Yu., Hongisto T.T.** Normal-metal-insulator-superconductor interferometer // *Physical Review B*. – 2004. – Vol. 70, iss. 6. – P. 064514-1–064514-6. – doi: [10.1103/PhysRevB.70.064514](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.064514).
5. Ion beam shaping and downsizing of nanostructures / M. Zgirski, K.-P. Riikonen, V. Tuboltsev, P. Jalkanen, T.T. Hongisto, K.Yu. Arutyunov // *Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 19, N 5. – P. 055301-1–055301-6. – doi: [10.1088/0957-4484/19/05/055301](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/05/055301).
6. Evidence of quantum phase slip effect in titanium nanowires / J.S. Lehtinen, T. Sajavaara, K.Yu. Arutyunov, M.Yu. Presnjakov, A. Vasiliev // *Physical Review B*. – 2012. – Vol. 85, iss. 9. – P. 094508-1–094508-7. – doi: [10.1103/PhysRevB.85.094508](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.094508).
7. **Rubio R., Agraït N., Vieira S.** Atomic-sized metallic contacts: mechanical properties and electronic transport // *Physical Review Letter*. – 1996. – Vol. 76, iss. 13. – P. 2302–2305. – doi: [10.1103/PhysRevLett.76.2302](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2302).
8. **Ogrin Yu.V., Lutskii V.N., Elinson M.I.** Observation of quantum size effects in thin bismuth films // *JETP Letters*. – 1966. – Vol. 3, iss. 3. – P. 71–73.

9. **Sandomirskii V.B.** Quantum size effect in a semimetal film // Soviet Physics JETP. – 1967. – Vol. 25, N 1. – P. 101–106.
10. **Komnik Yu.F., Bukhshtab E.I.** Observation of the quantum and classical size effects in polycrystalline thin bismuth films // Soviet Physics JETP. – 1968. – Vol. 27, N 1. – P. 34–37.
11. **Duggal V.P., Rup R.** Thickness-dependent oscillatory behavior of resistivity and Hall coefficient in thin single-crystalline bismuth films // Journal of Applied Physics. – 1969. – Vol. 40, iss. 2. – P. 492–495. – doi: 10.1063/1.1657426.
12. **Lin Y.-M., Sun X., Dresselhaus M.S.** Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires // Physical Review B. – 2000. – Vol. 62, iss. 7. – P. 4610–4623. – doi: 10.1103/PhysRevB.62.4610.
13. **Farhangfar S.** Quantum size effects in a one-dimensional semimetal // Physical Review B. – 2006. – Vol. 74, iss. 20. – P. 205318-1–205318-5. – doi: 10.1103/PhysRevB.74.205318.
14. **Farhangfar S.** Quantum size effects in solitary wires of bismuth // Physical Review B. – 2007. – Vol. 76, iss. 20. – P. 205437-1–205437-5. – doi: 10.1103/PhysRevB.76.205437.
15. **Arutyunov K.Yu., Golubev D.S., Zaikin A.D.** Superconductivity in one dimension // Physics Reports. – 2008. – Vol. 464, iss.1–2. – P. 1–70. – doi: 10.1016/j.physrep.2008.04.009.
16. **Langer J.S., Ambegaokar V.** Intrinsic resistive transition in narrow superconducting channels // Physical Review. – 1967. – Vol. 164, iss. 2. – P. 498–510. – doi: 10.1103/PhysRev.164.498.
17. **McCumber D.E., Halperin B.I.** Time scale of intrinsic resistive fluctuations in thin superconducting wires // Physical Review B. – 1970. – Vol. 1, iss. 3. – P. 1054–1070. – doi: 10.1103/PhysRevB.1.1054.
18. Quantum phase slips and transport in ultrathin superconducting wires / Zaikin A.D., Golubev D.S., A. van Otterlo, G.T. Zimányi // Physical Review Letters. – 1997. – Vol. 78, iss. 8. – P. 1552–1555. – doi: 10.1103/PhysRevLett.78.1552.
19. **Golubev D.S., Zaikin A.D.** Quantum tunneling of the order parameter in superconducting nanowires // Physical Review B. – 2001. – Vol. 64, iss. 1. – P. 014504-1–014504-14. – doi: 10.1103/PhysRevB.64.014504.
20. **Golubev D.S., Zaikin A.D.** Thermally activated phase slips in superconducting nanowires // Physical Review B. – 2008. – Vol. 78, iss. 14. – P. 144502-1–144502-8. – doi: 10.1103/PhysRevB.78.144502.
21. **Lukens J.E., Warburton R.J., Webb W.W.** Onset of quantized thermal fluctuations in one-dimensional superconductors // Physical Review Letters. – 1970. – Vol. 25, iss. 17. – P. 1180–1183. – doi: 10.1103/PhysRevLett.25.1180.
22. **Newbower R.S., Beasley M.R., Tinkham M.** Fluctuation effects on the superconducting transition of tin whisker crystals // Physical Review B. – 1972. – Vol. 5, iss. 3. – P. 864–867. – doi: 10.1103/PhysRevB.5.864.
23. Quantum phase slip phenomenon in ultra-narrow superconducting nanorings / K.Yu. Arutyunov, T.T. Hongisto, J.S. Lehtinen, L.I. Leino, A.L. Vasiliev // Scientific Reports. – 2012. – Vol. 2. – P. 293-1–293-7. – doi: 10.1038/srep00293.
24. **Lehtinen J.S., Zakharov K., Arutyunov K.** Coulomb blockade and Bloch oscillations in superconducting Ti nanowires // Physical Review Letters. – 2012. – Vol. 109, iss. 18. – P. 187001-1–187001-5. – doi: 10.1103/PhysRevLett.109.187001.
25. **Hongisto T.T., Zorin A.B.** Single-charge transistor based on the charge-phase duality of a superconducting nanowire circuit // Physical Review Letters. – 2012. – Vol. 108, iss. 9. – P. 097001-1–097001-5. – doi: 10.1103/PhysRevLett.108.097001.

## QUANTUM SIZE EFFECTS IN METALLIC NANOSTRUCTURES

**Arutyunov K.Yu.**

*National Research University Higher School of Economics,  
Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, Russian Federation  
P.L. Kapitza Institute for Physical Problems RAS, Moscow, Russian Federation*

Quantum size phenomena develop when the dimension(s) of a system approach certain characteristic scales. Modern nanotechnology enables routine and reproducible fabrication of nanostructures with sub-100 nm features where such effects might be pronounced. In this research we used lift-off lithography and vacuum metal deposition to fabricate bismuth (semimetal) and



titanium (superconductor) nanowires. Then low energy argon ion beam etching was used to progressively reduce the cross section of the structures. Electron transport properties were measured at low temperatures between the sessions of etching. Oscillations of electric resistance and its pronounced increase below  $\sim 70$  nm scales were observed when bismuth nanowire cross section was reduced. The observation can be interpreted as a manifestation of electron spectra size quantization in narrow semimetal channels. We observed broadening of the resistive transition in superconductors with reduction of the nanowire cross section. In the thinnest samples finite resistance was observed even at temperatures much lower than the bulk critical temperature. The phenomenon can be understood as manifestation of the quantum phase slip effect specific for ultra narrow superconducting channels. Both quantum size effects (in semimetals and superconductors) are in good agreement with the existing models. The existence of quantum size phenomena in metallic systems imposes fundamental limitations on the utilization of such ultra-small components in nanoelectronic circuits.

*Keywords:* quasi-one-dimensional metallic channels, size quantization, non-equilibrium superconductivity, nanotechnology

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-7-16

#### REFERENCES

1. Tringides M.C., Jatochowski M., Bauer E. Quantum size effects in metallic nanostructures. *Physics Today*, 2007, vol. 60, iss. 4, pp. 50–54. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2731973>
2. Arutyunov K.Yu., Auraneva H.-P., Vasenko A.S. Spatially resolved measurement of nonequilibrium quasiparticle relaxation in superconducting Al. *Physical Review B*, 2011, vol. 83, iss. 10, pp. 104509-1–104509-7. doi: 10.1103/PhysRevB.83.104509
3. Pekola J.P., Manninen A.J., Leivo M.M., Arutyunov K.Yu., Suoknuuti J.K., Suppala T.I., Collaudin B. Microrefrigeration by quasiparticle tunneling in NIS and SIS junctions. *Physica B: Condensed Matter*, 2000, vol. 280, iss. 1–4, pp. 485–490. doi: 10.1016/S0921-4526(99)01842-6
4. Arutyunov K.Yu., Hongisto T.T. Normal-metal-insulator-superconductor interferometer. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, iss. 6, pp. 064514-1–064514-6. doi: 10.1103/PhysRevB.70.064514
5. Zgirski M., Riikonen K.-P., Tuboltsev V., Jalkanen P., Hongisto T.T., Arutyunov K.Yu. Ion beam shaping and downsizing of nanostructures. *Nanotechnology*, 2008, vol. 19, no. 5, pp. 055301-1–055301-6. doi: 10.1088/0957-4484/19/05/055301
6. Lehtinen J.S., Sajavaara T., Arutyunov K.Yu., Presnjakov M.Yu., Vasiliev A. Evidence of quantum phase slip effect in titanium nanowires. *Physical Review B*, 2012, vol. 85, iss. 9, pp. 094508-1–094508-7. doi: 10.1103/PhysRevB.85.094508
7. Rubio R., Agrait N., Vieira S. Atomic-Sized Metallic Contacts: Mechanical Properties and Electronic Transport. *Physical Review Letter*, 1996, vol. 76, iss. 13, pp. 2302–2305. doi: 10.1103/PhysRevLett.76.2302
8. Ogrin Yu.V., Lutskii V.N., Elinson M.I. Observation of quantum size effects in thin bismuth films. *JETP Letters*, 1966, vol. 3, iss. 3, pp. 71–73.
9. Sandomirskii V.B. Quantum size effect in a semimetal film. *Soviet Physics JETP*, 1967, vol. 25, no. 1, pp. 101–106.
10. Komnik Yu.F., Bukhshtab E.I. Observation of the quantum and classical size effects in polycrystalline thin bismuth films. *Soviet Physics JETP*, 1968, vol. 27, no. 1, pp. 34–37.
11. Duggal V.P., Rup R. Thickness-dependent oscillatory behavior of resistivity and Hall coefficient in thin single-crystalline bismuth films. *Journal of Applied Physics*, 1969, vol. 40, iss. 2, pp. 492–495. doi: 10.1063/1.1657426.
12. Lin Y.-M., Sun X., Dresselhaus M.S. Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires. *Physical Review B*, 2000, vol. 62, iss. 7, pp. 4610–4623. doi: 10.1103/PhysRevB.62.4610
13. Farhangfar S. Quantum size effects in a one-dimensional semimetal. *Physical Review B*, 2006, vol. 74, iss. 20, pp. 205318-1–205318-5. doi: 10.1103/PhysRevB.74.205318
14. Farhangfar S. Quantum size effects in solitary wires of bismuth. *Physical Review B*, 2007, vol. 76, iss. 20, pp. 205437-1–205437-5. doi: 10.1103/PhysRevB.76.205437
15. Arutyunov K.Yu., Golubev D.S., Zaikin A.D. Superconductivity in one dimension. *Physics Reports*, 2008, vol. 464, iss. 1–2, pp. 1–70. doi: 10.1016/j.physrep.2008.04.009

16. Langer J.S., Ambegaokar V. Intrinsic resistive transition in narrow superconducting channels. *Physical Review*, 1967, vol. 164, iss. 2, pp. 498–510. doi: 10.1103/PhysRev.164.498
17. McCumber D.E., Halperin B.I. Time scale of intrinsic resistive fluctuations in thin superconducting wires. *Physical Review B*, 1970, vol. 1, iss. 3, pp. 1054–1070. doi: 10.1103/PhysRevB.1.1054
18. Zaikin A.D., Golubev D.S., Otterlo A. van, Zimányi G.T. Quantum phase slips and transport in ultrathin superconducting wires. *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, iss. 8, pp. 1552–1555. doi: 10.1103/PhysRevLett.78.1552
19. Golubev D.S., Zaikin A.D. Quantum tunneling of the order parameter in superconducting nanowires. *Physical Review B*, 2001, vol. 64, iss. 1, pp. 014504-1–014504-14. doi: 10.1103/PhysRevB.64.014504
20. Golubev D.S., Zaikin A.D. Thermally activated phase slips in superconducting nanowires. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, iss. 14, pp. 144502-1–144502-8. doi: 10.1103/PhysRevB.78.144502
21. Lukens J.E., Warburton R.J., Webb W.W. Onset of quantized thermal fluctuations in one-dimensional superconductors. *Physical Review Letters*, 1970, vol. 25, iss. 17, pp. 1180–1183. doi: 10.1103/PhysRevLett.25.1180
22. Newbower R.S., Beasley M.R., Tinkham M. Fluctuation effects on the superconducting transition of tin whisker crystals. *Physical Review B*, 1972, vol. 5, iss. 3, pp. 864–867. doi: 10.1103/PhysRevB.5.864
23. Arutyunov K.Yu., Hongisto T.T., Lehtinen J.S., Leino L.I., Vasiliev A.L. Quantum phase slip phenomenon in ultra-narrow superconducting nanorings. *Scientific Reports*, 2012, vol. 2, pp. 293-1–293-7. doi: 10.1038/srep00293
24. Lehtinen J.S., Zakharov K., Arutyunov K. Coulomb blockade and Bloch oscillations in superconducting Ti nanowires. *Physical Review Letters*, 2012, vol. 109, iss. 18, pp. 187001-1–187001-5. doi: 10.1103/PhysRevLett.109.187001
25. Hongisto T.T., Zorin A.B. Single-charge transistor based on the charge-phase duality of a superconducting nanowire circuit. *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, iss. 9, pp. 097001-1–097001-5. doi: 10.1103/PhysRevLett.108.097001

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Арутюнов Константин Юрьевич** – родился в 1962 году, д-р физ.-мат. наук, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая Школа Экономики». Область научных интересов: нанотехнология, физика низких температур, мезоскопика. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 109028, Россия, Москва, улица Таллинская, дом 34. Email: karutyunov@hse.ru).

**Arutyunov Konstantin Yurievich** (b. 1962) – Doctor of Science (Phys.& Math.), professor, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics. His research interests are currently focused on nanotechnology, low temperature physics and mesoscopics. He is author of more than 100 scientific papers. (Address: 34, Tallinskaya street, Moscow, 109028, Russian Federation. Email: karutyunov@hse.ru).

*Статья поступила 3 июня 2015 г.  
Received June 3, 2015*

#### To Reference:

Arutyunov K. Yu. Kvantovye razmernyye efekty v metallicheskih nanostrukturakh [Quantum size effects in metallic nanostructures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 7–16. doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-7-16