

Квантовые размерные эффекты в монокристаллических нанопроводах висмута

Седов Е. А.¹, К.-Р. Riikonen², Арутюнов К. Ю.^{1,3}

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

² NanoScience Centre, University of Jyvaskyla, Finland

³ Институт Физических Проблем РАН им. П. Л. Капицы

Аннотация

В металлическом объекте, где хотя бы одно из измерений сопоставимо с величиной волны де Броиля электронов проводимости, должны наблюдаться квантовые размерные эффекты (КРЭ). КРЭ могут проявляться в виде немонотонных зависимостей свойств материала от соответствующего размера. Особенно хорошо эффект заметен в материалах с эффективной массой носителей заряда гораздо меньшей, чем масса покоя электрона. Поэтому для наблюдения КРЭ больше всего подходят полуметаллы, например, висмут, благодаря малым эффективной массе и энергии Ферми [1]. Главной проблемой экспериментального исследования КРЭ в висмуте является сильная анизотропия его энергетический спектра, и поэтому для наблюдения КРЭ в висмутовых системах необходимо изготовить монокристаллическую наноструктуру с направлением протекания тока вдоль кристаллографических осей с малой эффективной массой [2]. В ходе работы нами было исследовано несколько квазидномерных висмутовых нанопроводов, и была обнаружена осциллирующая зависимость электрического сопротивления от сечения. При достижении эффективного диаметра нанопровода величины порядка 50 нм сопротивление резко возрастало, что может быть интерпретировано как квантово-размерный переход металл-диэлектрик [3]. Теоретические расчеты дают разумное согласие с экспериментом.

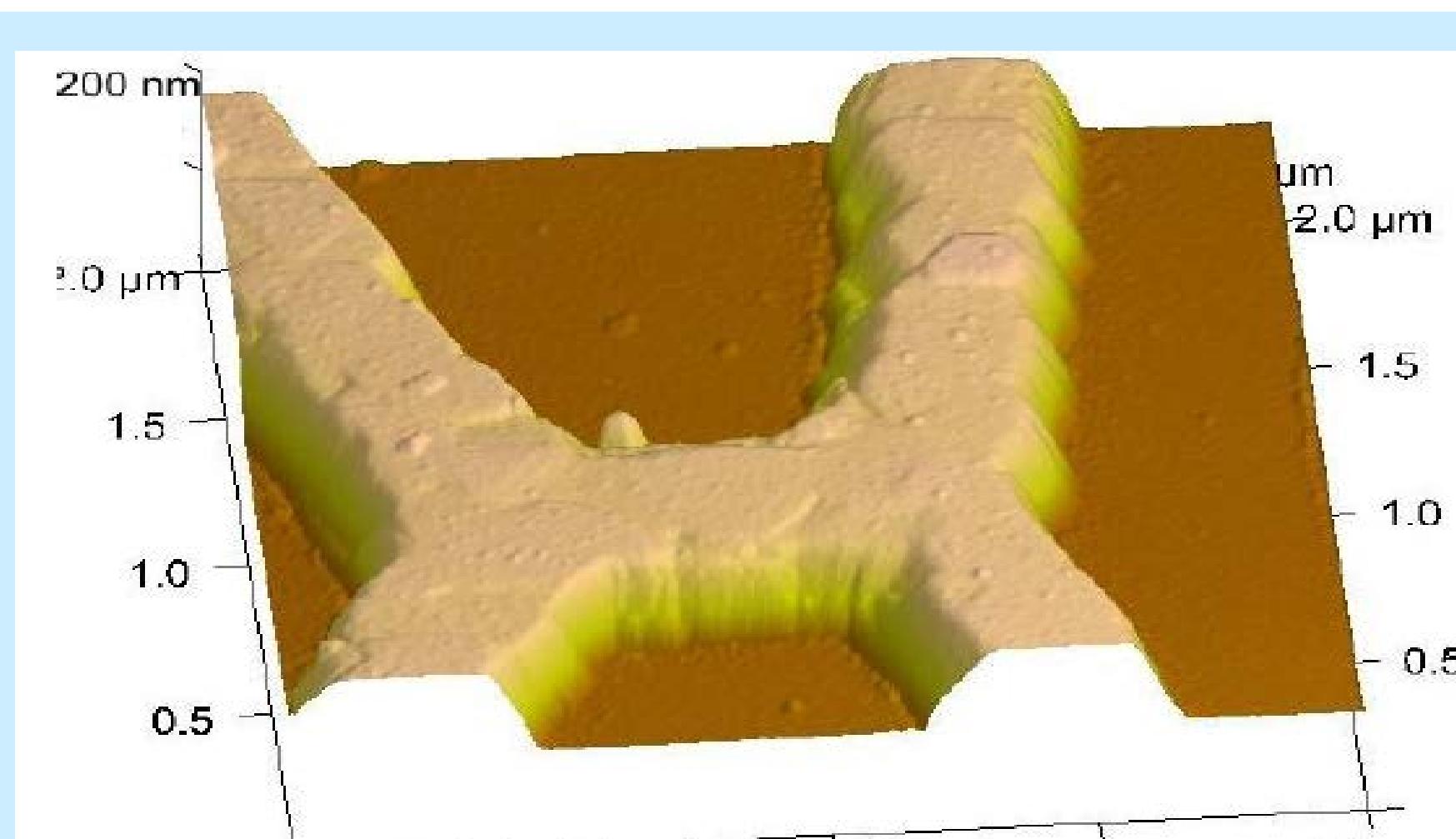


Рис. 1. Монокристаллическая наноструктура из висмута

Эксперимент

В ходе эксперимента исследовалось несколько образцов висмутовых нанопроводов. Изготавливались они методом взрывной электроннолучевой литографии и направленного вакуумного напыления электронной пушкой. Типичный размер проводов составлял порядка 240 нм x 300 нм x 1 мкм. Измерения сопротивления проводились 4-контактным методом. Все наноструктуры тщательно проверялись на предмет дефектов с помощью силового сканирующего микроскопа (Рис. 1). Измерения проводились в широком температурном диапазоне от комнатных до $T=4.2$ К.

После каждого акта измерения сопротивления, образцы извлекались из криостата и помещались в вакуумную камеру, оборудованную ионной пушкой. Далее, физическим травлением в направленной низкоэнергетической плазме аргона (порядка 500 эВ), сечение нанопроводов последовательно уменьшалось с шагом вплоть до нескольких нанометров [4].

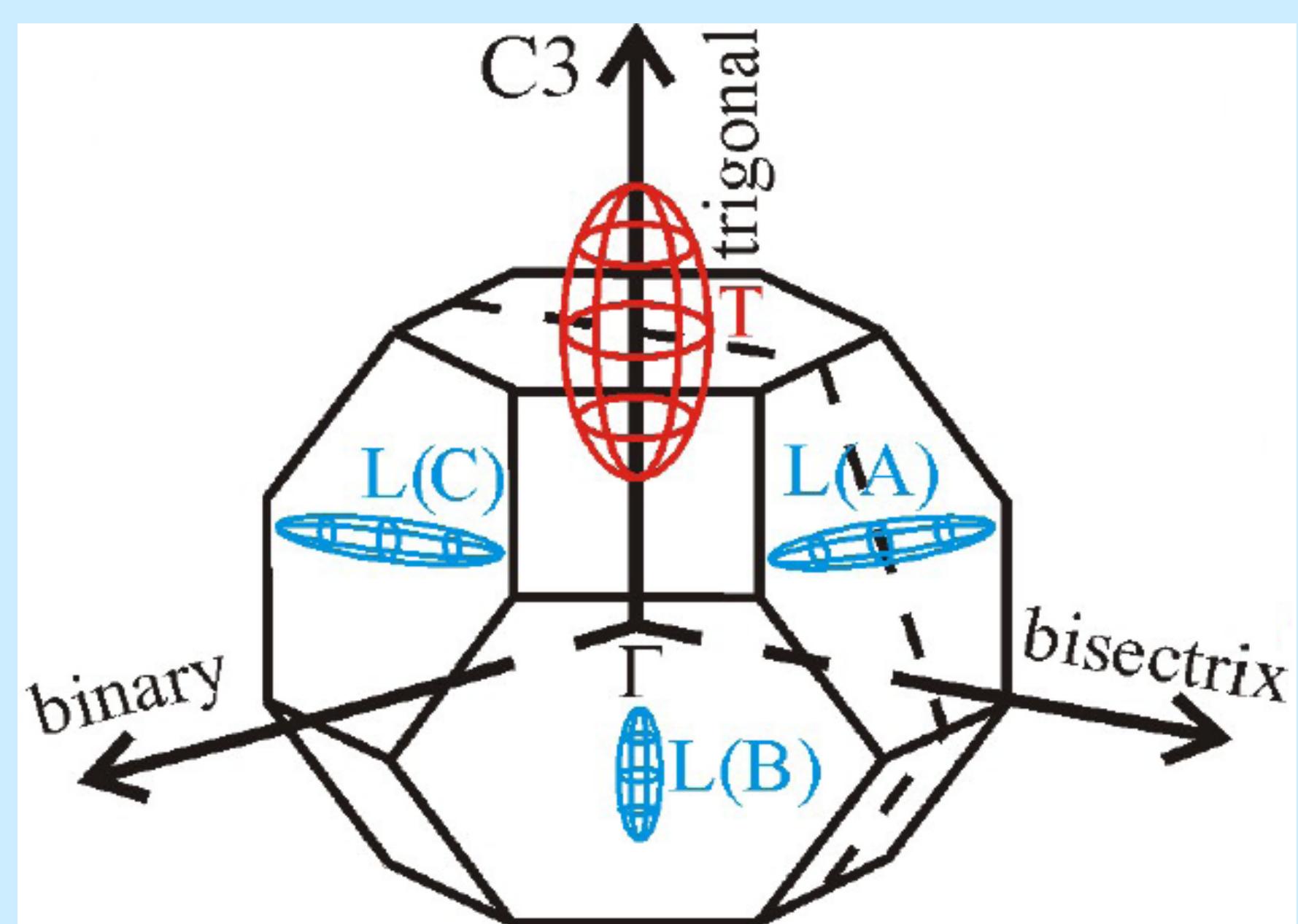


Рис. 2. Поверхность Ферми висмута. Синим представлены L – зоны электронов, красным дырочные T – зоны

Теория

Квантование энергетического спектра частицы в потенциальной яме проявляется при размерах ямы сопоставимых с величиной волны де Броиля. Соответствующая n-му состоянию энергия равна:

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

То же самое применимо и для электронов проводимости в проводнике конечных размеров. Поверхность Ферми висмута – очень сложная и состоит из нескольких электронных («лёгкие» L – электроны) и одной дырочной («тяжелые» T – дырки) поверхностей (Рис. 2). Уменьшение характерного размера a (например – диаметра провода) приводит к более выраженному квантованию энергетического спектра (Рис. 3), что проявляется как осцилляции кинетических свойств материала. Когда размер образца a станет меньше длины волны де Броиля для проводящих электронов, то самый нижний энергетический уровень с $n=1$ окажется выше энергии Ферми, и проводимость электронов резко упадет из-за перехода системы из металлического состояния в диэлектрическое.

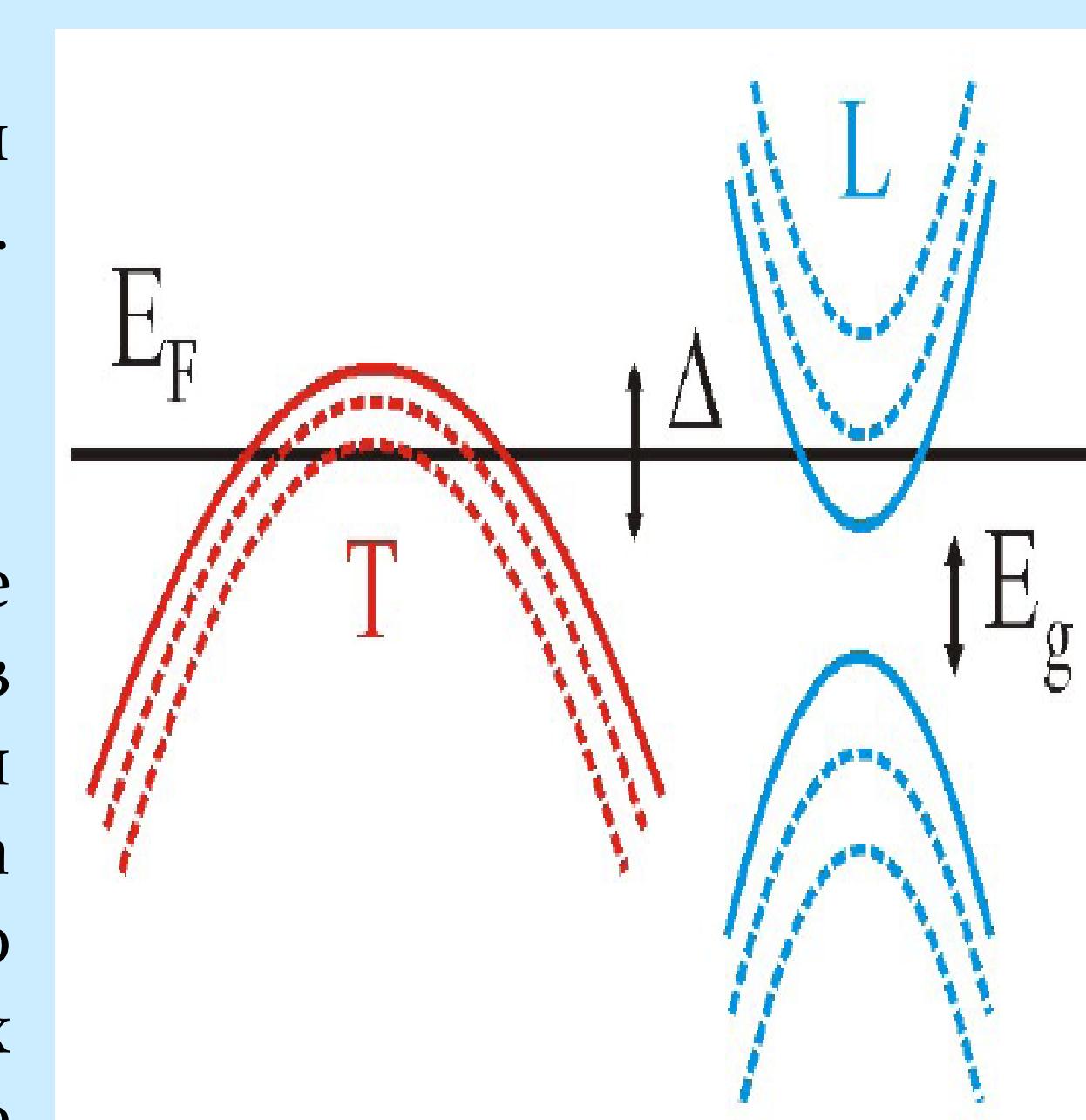


Рис. 3. Схематическое представление энергетического спектра висмута.

Результаты

В ходе работы исследовалась зависимость сопротивления висмутовых нанопроводов от их поперечного сечения. На рис. 4 представлены зависимости $R(t,w)$, где t и w – толщина и ширина нанопровода. Можно заметить, что теоретическая зависимость чётко описывает два главных пика возрастания сопротивления, полученных в эксперименте; и предсказывает переход в диэлектрическое состояние при $d_c = (t_c w_c)^{1/2} \approx 54$ нм. На графике видно, что экспериментальная зависимость начинает действительно резко возрастать при приближении к данному рубежу. Наилучшее согласие между расчетными и теоретическими зависимостями $R(t,w)$ на Рис. 4 получается в предположении, что тригональная ось С3 нормальна плоскости подложки, а биссекторная С2 совпадает с осью нанопровода с точностью в несколько градусов.

Выводы

Была обнаружена осциллирующая зависимость сопротивления нанопровода из висмута как функция его сечения. Полученные результаты объясняются влиянием квантового размерного эффекта и удовлетворительно описываются соответствующей моделью [2]. Эффект универсален и должен проявляться не только в висмуте, но и – в любых металлах. Явление необходимо учитывать при проектированииnanoэлектронных систем сверхмалых размеров.

Литература

- [1] Ogrin Yu.V. et. al., Observation of quantum size effects in thin bismuth films, *JETP Letters*, Vol. 3, iss. 3., 1966;
- [2] Farhangfar S. Quantum size effects in one-dimensional semimetal, *Physical Review B*, Vol. 74, iss. 20, 2006;
- [3] Арутюнов К.Ю. Квантовые размерные эффекты в металлических наноструктурах, *Доклады АН ВШ РФ*, №. 3(28), стр. 7-16, 2015;
- [4] Arutyunov K. et. al., Quantum limitations of electron transport in ultra-narrow nanowires, *IREPHY*, Vol. 1, 2007

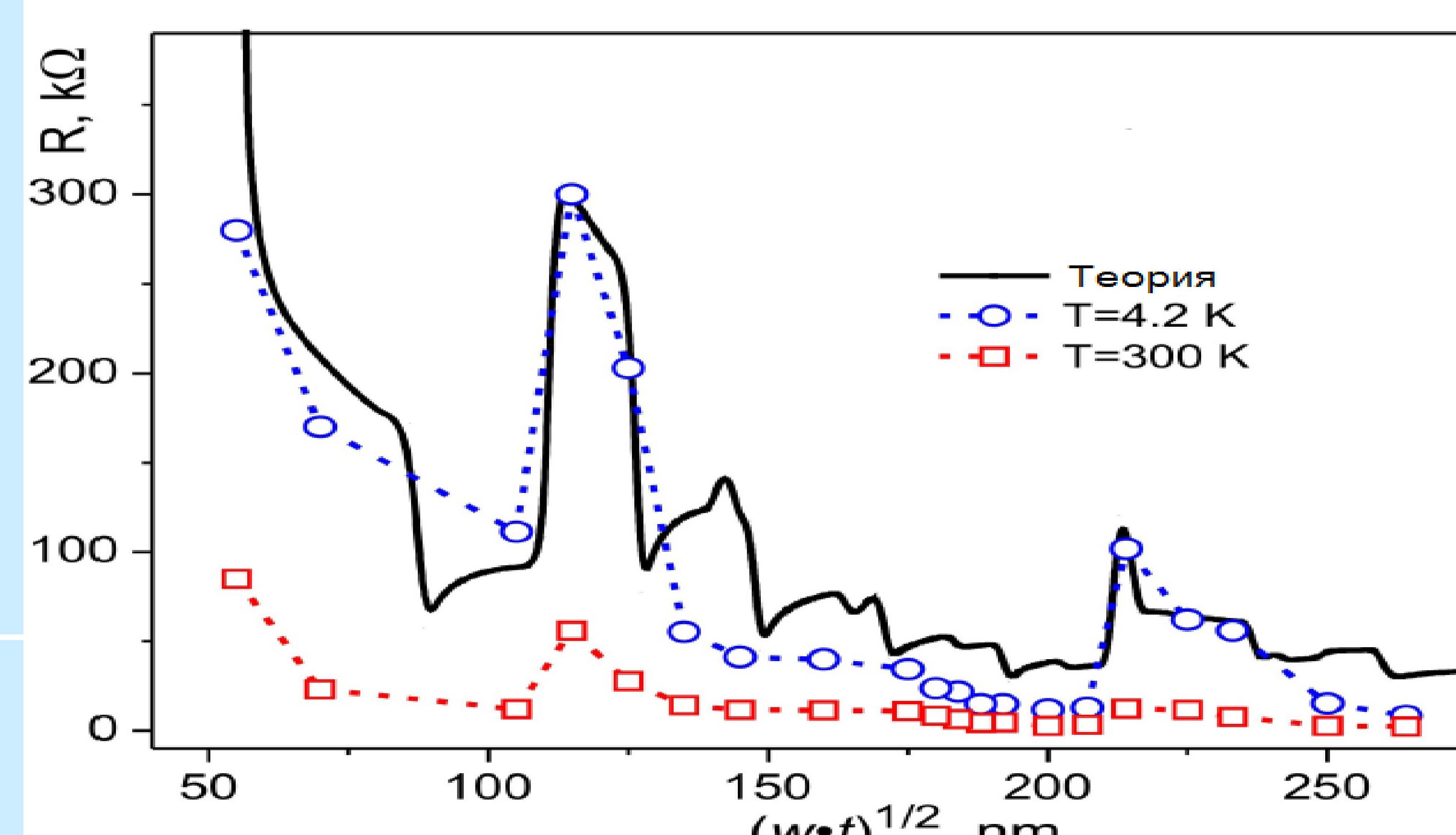


Рис. 4. Зависимость сопротивления нанопровода от эффективного диаметра. Чёрная сплошная линия соответствует расчету. Синими кружками и красными квадратами обозначены экспериментальные зависимости при $T=4.2$ К и $T=300$ К, соответственно

Благодарность

Работа была подготовлена в ходе проведения исследований (НУГ № 16-05-0029 «Физика низкоразмерных квантовых систем») в рамках программы «Научный фонд Национального исследовательского университета Высшая школа экономики (НИУ ВШЭ)» в 2016 году 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.

