

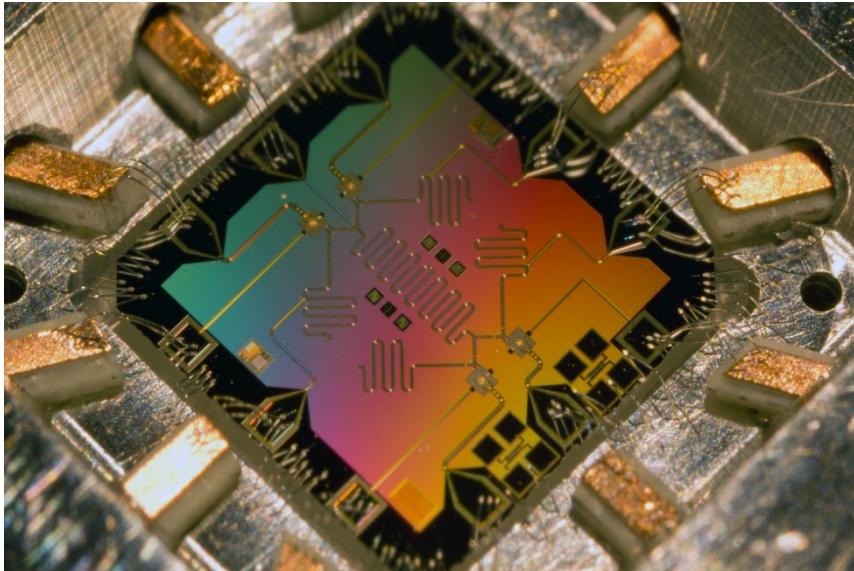
Выпускная квалификационная работа – магистерская  
диссертация на тему:

# Квантовые размерные эффекты в низкоразмерных наноструктурах

Студент группы МФ3-151: Седов Егор

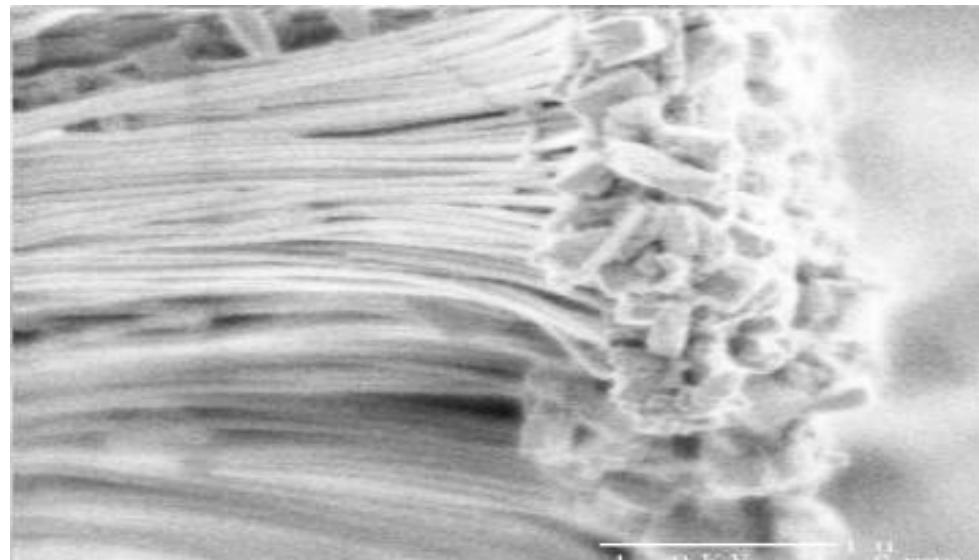
Научный руководитель: Арутюнов К.Ю.

# Мотивация



- Исследование 2D структур.
- Низкое качество 1D структур.
- Не чётко выделенные нанопровода.
- Недостаточно малые размеры нанопроводов.

- Уменьшение размеров электронных компонентов.
- Возникновение новых эффектов в телаах пониженной размерности.
- Создание качественно новых устройств.



Изображение пучка нанопроводов Bi [S. B. Cronin *PhD thesis, 2002*]

# Цели и задачи проекта

- Экспериментальное обнаружение квантового размерного эффекта в нанопроводе: переход провода из проводящего состояния в изолирующее.

## Моя цель и задача в проекте

### Цель:

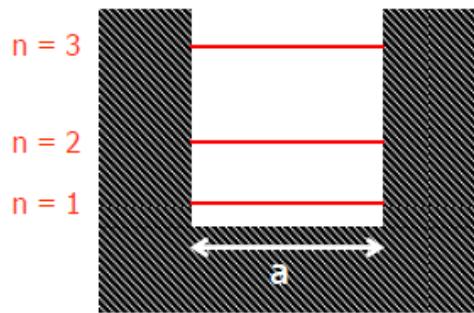
- Теоретическая интерпретация эксперимента.

### Задачи:

- Построить теоретические зависимости  $R(t,w)$  и сопоставить их с данными полученными в эксперименте.
- Определить положение исследуемого образца относительно кристаллографических осей.

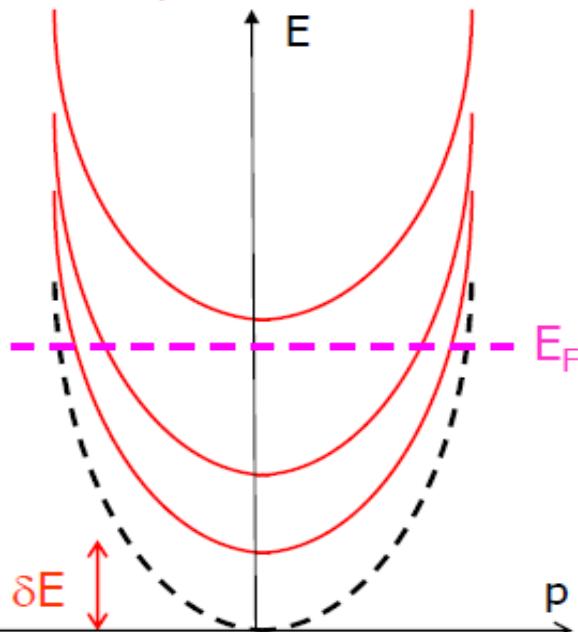
# Размерный эффект

Частица в потенциальной яме



Электроны в металлах

Размерное квантование



Необходимые условия

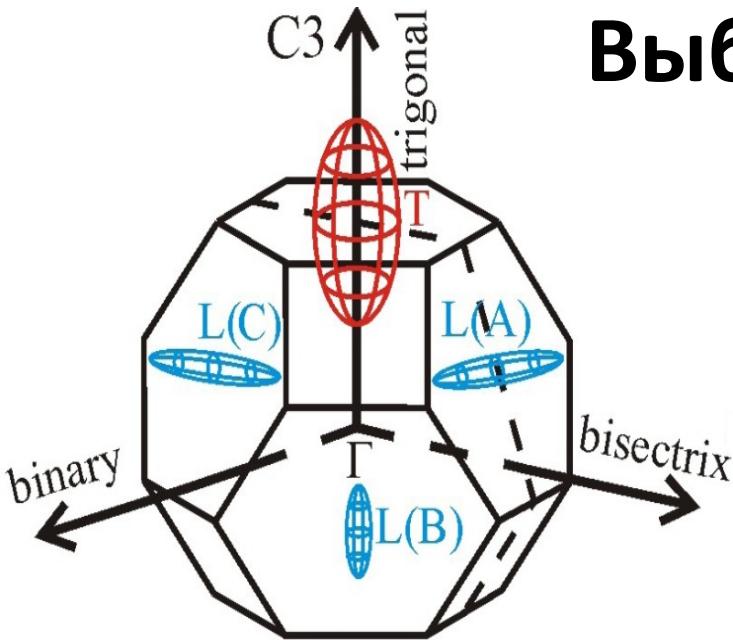
$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, n = 1, 2, 3, \dots$$

$$E_{n+1} - E_n \gg kT$$

Следствия

- Изменение электрических свойств с размером  $a$
- Переход металл-изолятор ниже порогового значения  $\delta E < E_F$
- Проявление КРЭ в типичных металлах ( $E_F \sim 1$  эВ,  $m^* \approx m$ ) на масштабах  $< 1$  нм

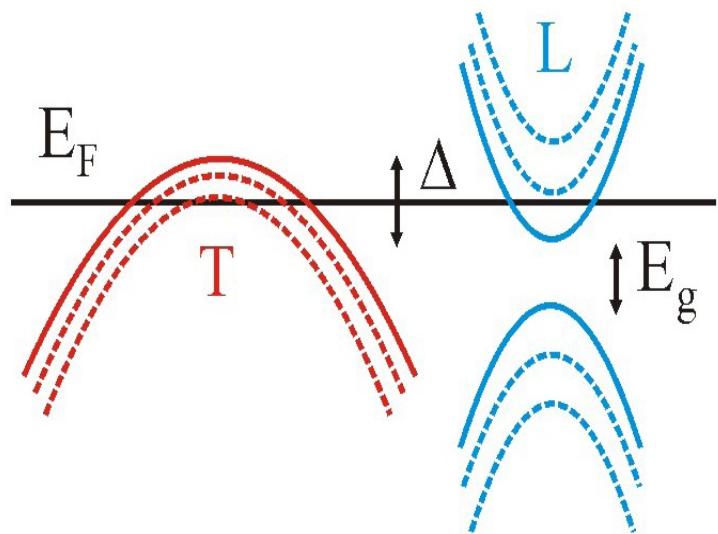
# Выбор материала



- Эффективная масса электрона  $m^* < 0.01 m$
- Очень низкая энергия Ферми  $E_F = 28$  мэВ
- Концентрация электронов  $n_e \sim 3 \cdot 10^{17}$  1/см
- Электронные свойства Ві сильно зависят от чистоты образца и его ориентации относительно осей кристалла

Образец «хороший» если он:

- Чистый
- Монокристаллический ( в силу анизотропии энергетического спектра)
- Отсутствие шероховатостей
- Не повреждён механически



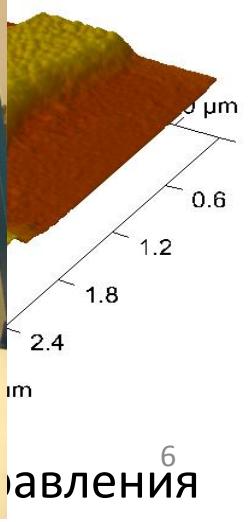
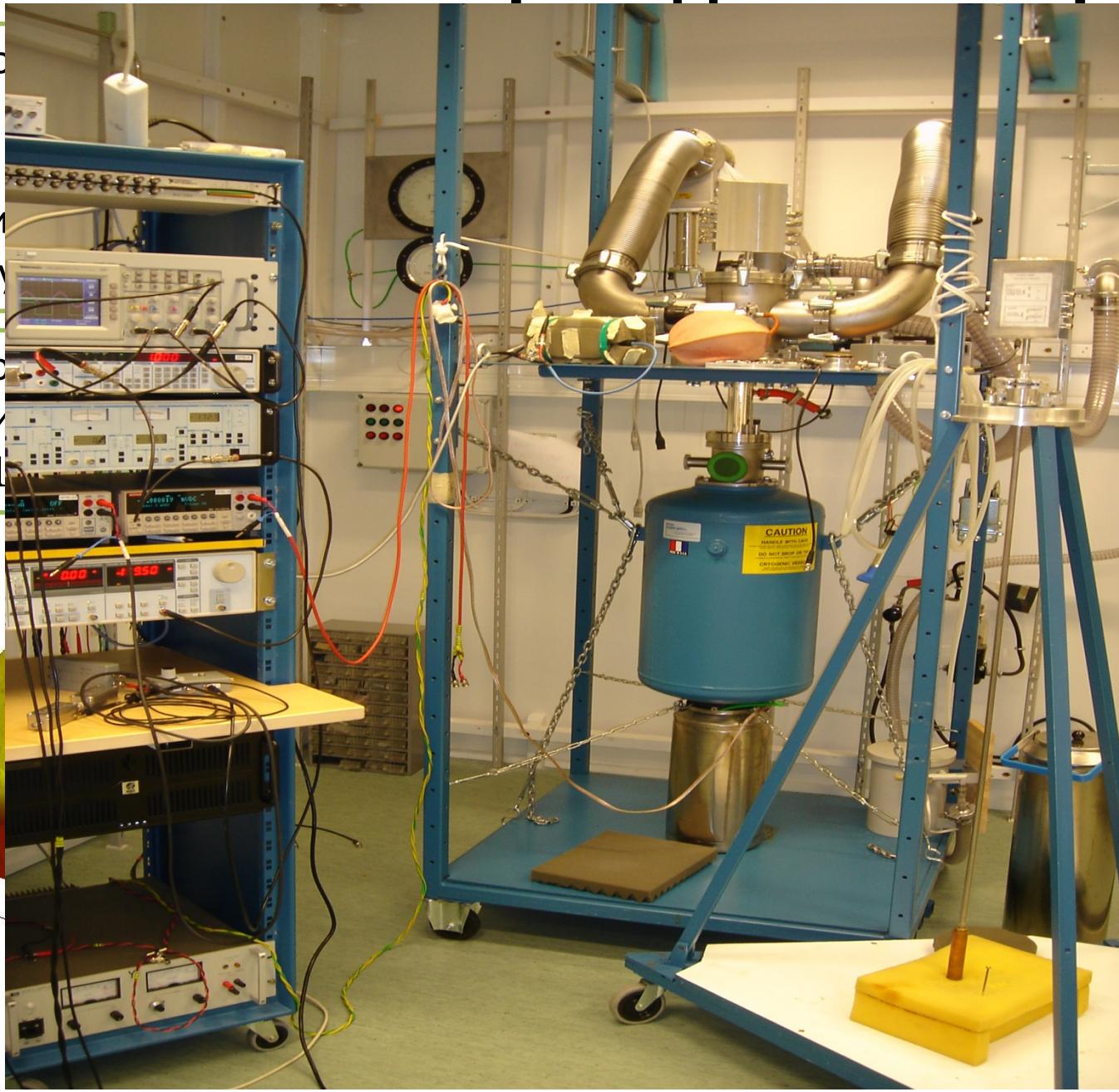
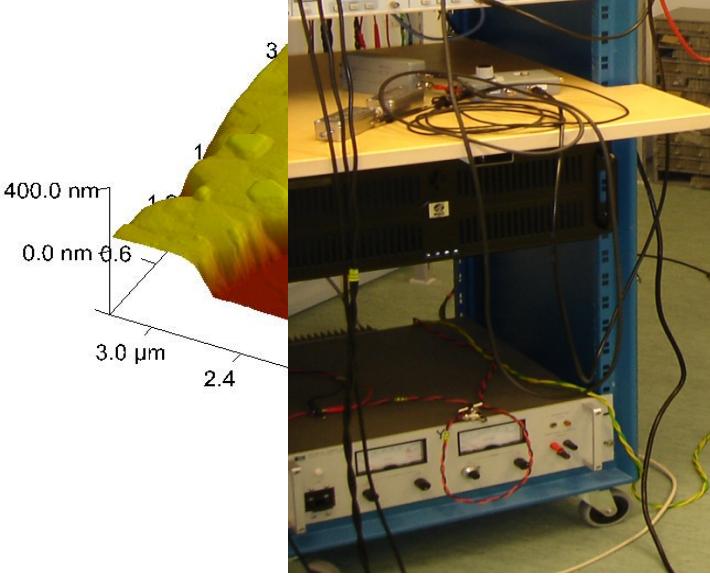
# Изготовление нанопроводов и эксперимент

Было испо  
[Zgirska et.  
висмута на  
слоёв. Таки  
нанострукту

травление  
в матрицу  
их атомных  
частиц, в  
ующим для

Был испо  
литографии  
в вакууме 1

нанолучевой  
ча 99,9995%,



# Нанопровод с прямоугольным сечением: теория

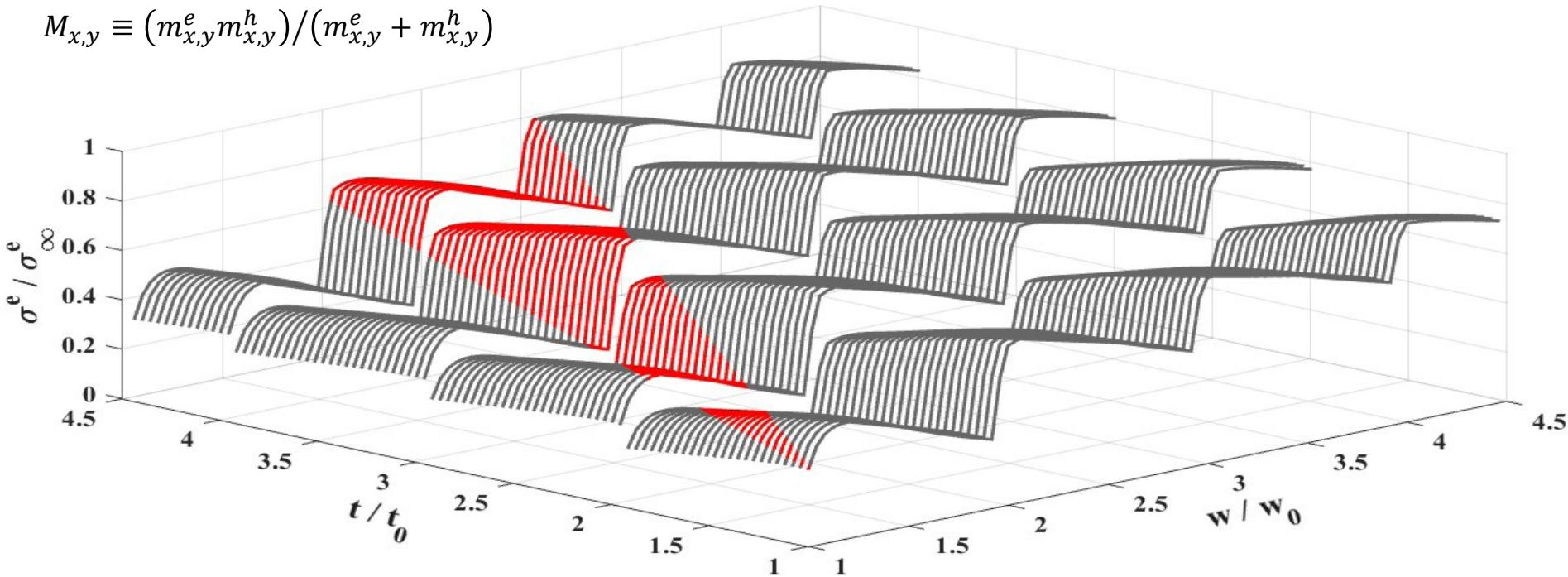
$$\sigma^e = \frac{2q_e^2}{\pi\hbar\varrho} \frac{\mu_x^e}{m_z^e} \sum_{m,n=1}^{[r_w],[r_t]} \frac{\left(\frac{2\hbar}{V_0}\right)^2 \sqrt{U_{mn}^e}}{\sum_{m',n'=1}^{[r_w],[r_t]} (\Lambda_{m'n'}^{mn}) / \sqrt{U_{m'n'}^e}}$$

$$U_{mn}^e \equiv 1 - \left(\frac{m}{r_w}\right)^2 + \left(\frac{\mu_y^e}{\mu_x^e}\right) \left[1 - \left(\frac{n}{r_t}\right)^2\right]$$

$$\Lambda_{m'n'}^{mn} \equiv (2 + \delta_{mm'})(2 + \delta_{nn'})$$

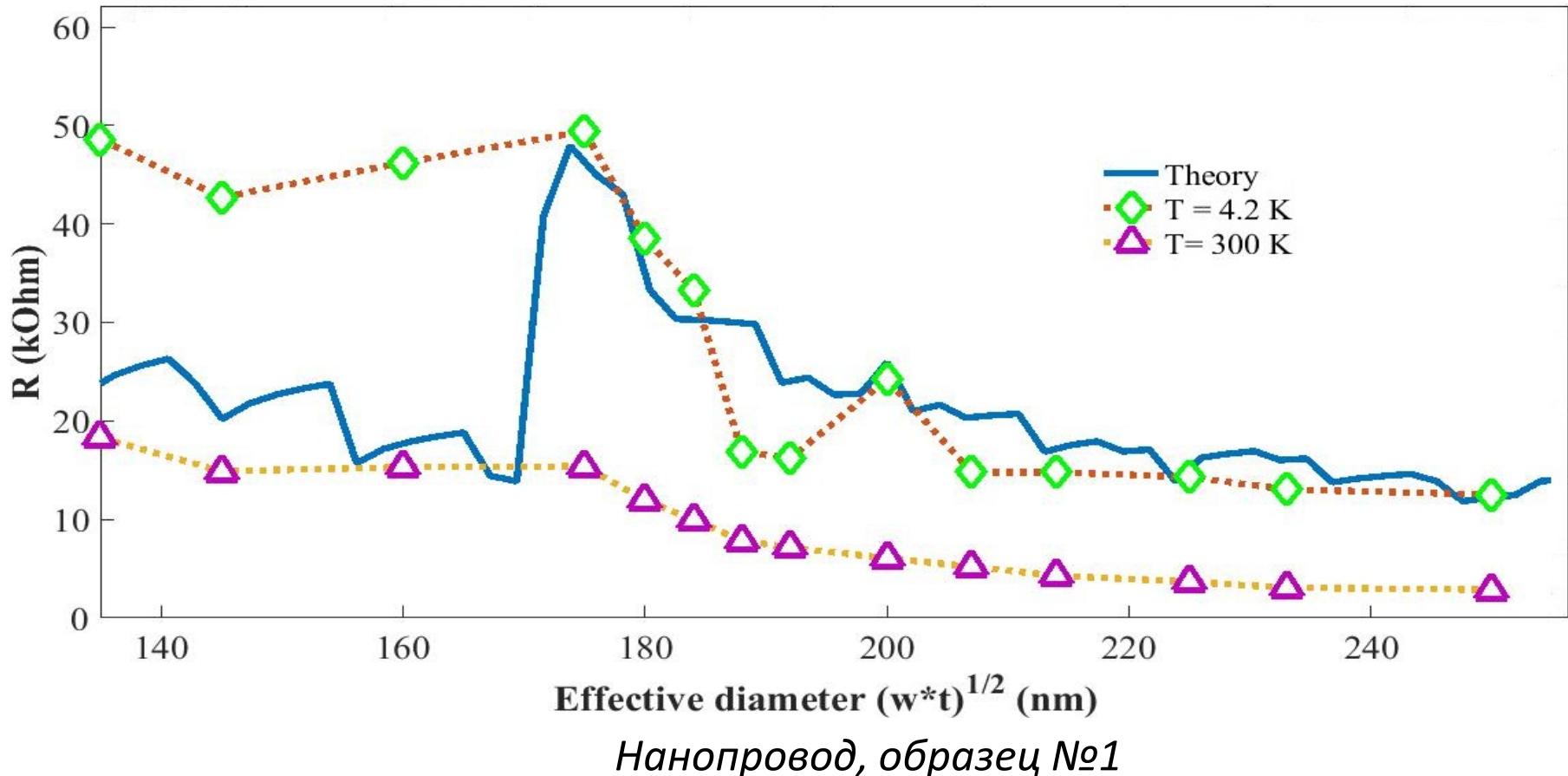
$$M_{x,y} \equiv (m_{x,y}^e m_{x,y}^h) / (m_{x,y}^e + m_{x,y}^h)$$

$\varrho$  – концентрация рассеивателей с потенциалом  $V_0$ . Параметры  $r_w \equiv w/w_0$  и  $r_t \equiv t/t_0$  есть ширина и толщина нанопровода, нормализованные на размеры  $w_0 = \hbar\pi(M_x\Delta_x)^{1/2}$  и  $t_0 = \hbar\pi(M_y\Delta_y)^{1/2}$ , соответствующие переходу метал-диэлектрик. Параметры  $\varrho$  и  $V_0$  не известны с достаточной точностью и подстраиваются как параметр, определяемый для «толстого» провода ( $w \rightarrow \infty$  и  $t \rightarrow \infty$ ), в котором КРЭ можно пренебречь. [Farhangfar S. PRB 74, 205318 (2006)]



В нанопроводе с поперечным сечением ( $w * t$ ) электронная проводимость  $\sigma^e$  ведёт себя как ступенчатая функция, зависящая от соответствующих размеров. Проводимость структуры  $\sigma_\infty^e$  достигает своего «массивного» состояния на масштабах  $w \gg w_0$ ,  $t \gg t_0$ , где  $w_0 \approx 110$  нм и  $t_0 \approx 25$  нм критическая ширина и толщина, соответствующие переходу метал-диэлектрик. Красным выделена область, отвечающая размерам образцов исследованных в работе. <sup>7</sup>

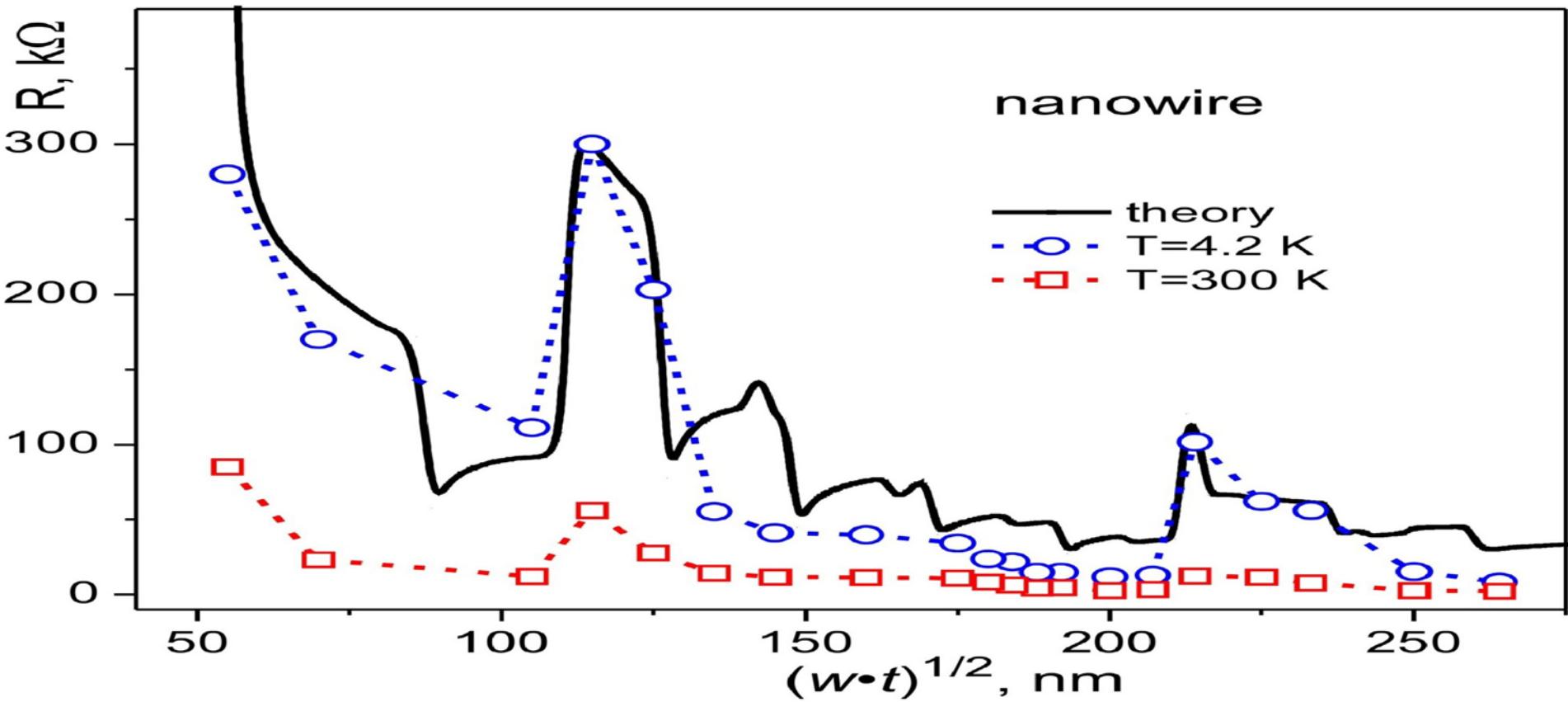
# Результаты: образец №1



Нанопровод, образец №1

Данному образцу соответствуют следующие значения: эффективные массы  $m_x^e=0.002$ ,  $m_y^e=0.2293$ ,  $m_z^e=0.0012$ ,  $m_x^h=0.634$ ,  $m_y^h=0.059$ ,  $m_z^h=0.059$ ; критические величины ширины и толщины  $w_0=101$  нм,  $t_0=29$ , нм;

# Результаты: образец №2



Нанопровод, образец №2

Образцу №2 соответствуют следующие значения эффективных масс:  $m_x^e=0.0011$ ,  $m_y^e=0.2913$ ,  $m_z^e=0.0071$ ,  $m_x^h=0.634$ ,  $m_y^h=0.059$ ,  $m_z^h=0.059$ . При этом величины критической ширины  $w_0$  и толщины  $t_0$ , при которых должен произойти переход металл-диэлектрик, равны 110 нм и 26 нм соответственно. Данный набор эффективных масс соответствует бинарной оси, однако не точно. Отклонение образца от бинарной оси составило порядка 3–4 градусов. Шаг:  $dw=1.87$  нм и  $dt=1.69$  нм; Стартовые размеры провода:  $w=300$  нм,  $t=265$  нм.

# Выводы

- Был выполнен расчёт теоретической модели для нескольких наиболее удачных образцов.
- Достаточно хорошее согласие теории с экспериментом.
- Удалось показать немонотонную зависимость сопротивления  $R(t,w)$  от поперечного сечения провода, дающую чёткие флюктуации сопротивления.
- Удалось зарегистрировать переход нанопровода висмута из проводящее состояние в диэлектрическое, вызванное квантово-размерным ограничением.
- Квантовый размерный эффект является универсальным эффектом и даёт вклад в любых металлических проводниках малых размеров

- Поломка большинства образцов.
- Только один образец удалось измерить вплоть до размеров, соответствующих переходу метал-диэлектрик.
- Малое количество измерений.

# **Спасибо за внимание**

## **Благодарности**

Выражаю благодарность своему научному руководителю К. Ю. Арутюнову за предоставление интересной темы и помошь в работе, а также – всему профессорско-перподавательскому составу МИЭМ НИУ ВШЭ за создание условий для успешной учебы и научной работы.

# Список публикаций и выступлений

- 1. Международная конференция ФизикА.СПб/2016. Тема доклада: Квантовые размерные эффекты в монокристаллических нанопроводах висмута.
- 2. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского. Тема выступления: Квантовые размерные эффекты в нанопроводах из висмута.
- 3. **Седов Е. А.**, Riikonen K. –P., Арутюнов К. Ю. Квантовые размерные эффекты в наноструктурах из висмута // **Неделя науки СПбПУ 2016**: материалы научной конференции с международным участием, 302-304 (2016).
- 4. **Sedov E. A.**, Riikonen K. –P., Arutyunov K. Yu. Quantum size phenomena in single-crystalline bismuth nanostructures // **Nature Group: Quantum Materials**, 2:18 (2017).
- 5. **Sedov E. A.**, Riikonen K. –P., Arutyunov K. Yu. Quantum size effect in single-crystalline bismuth nanorods // **Journal of Physics: Conference series**; Принята к печати, ноябрь 2017.
- 6. **Седов Е. А.**, Riikonen K. – P., науч. Рук: Арутюнов К. Ю. Квантовые размерные эффекты в висмутовых наноструктурах // **Сборник научно-исследовательских работ победителей конкурса НИРС 2016**; принята к печати, февраль 2018.