

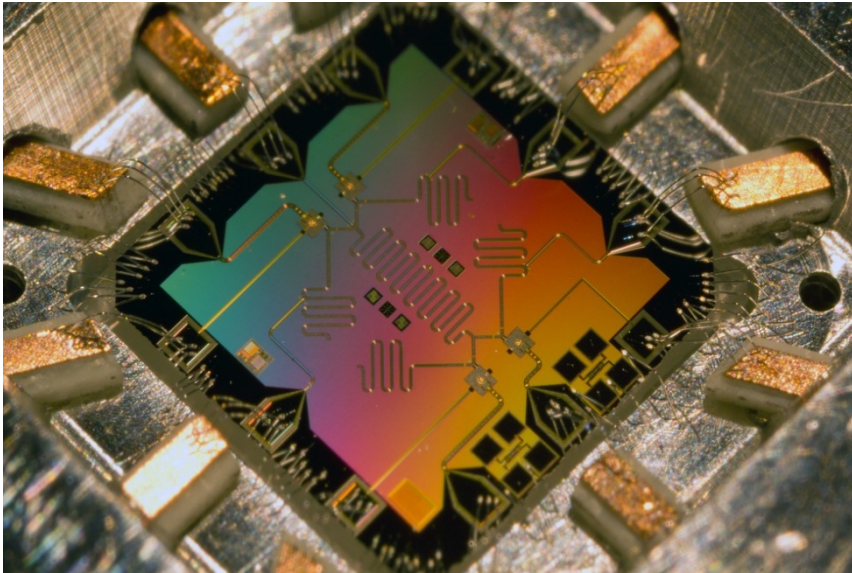
Выпускная квалификационная работа – магистерская
диссертация на тему:

Квантовые размерные эффекты в низкоразмерных наноструктурах

Студент группы МФЗ-151: Седов Егор

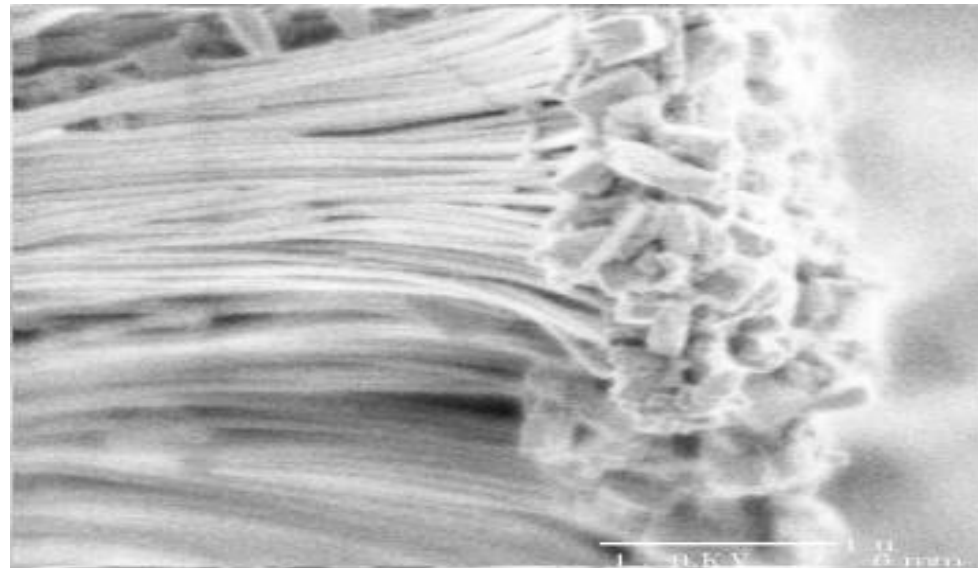
Научный руководитель: Арутюнов К.Ю.

Мотивация



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

- Уменьшение размеров электронных компонентов.
- Возникновение новых эффектов в телах 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:

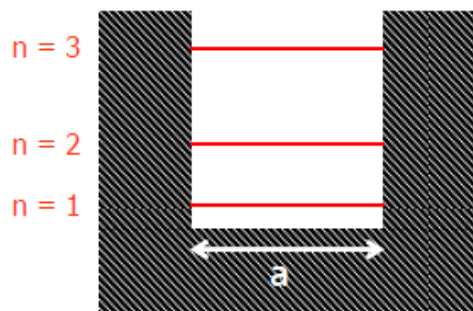
- Теоретическая интерпретация эксперимента.

Задачи:

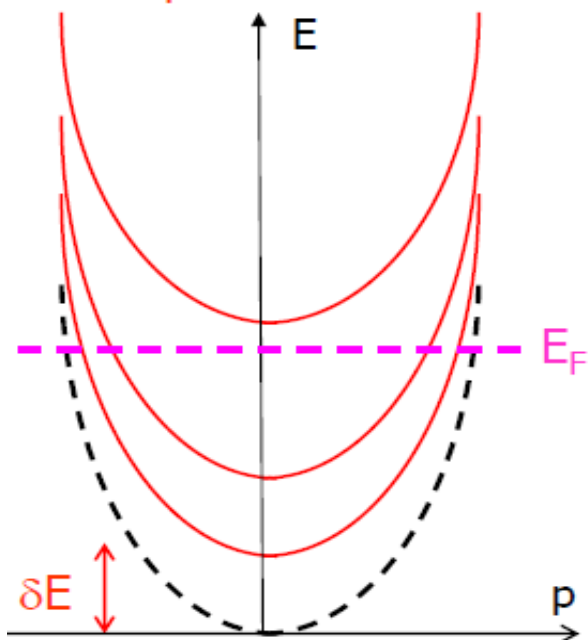
- Построить теоретические зависимости $R(t,w)$ и сопоставить их с данными полученными в эксперименте.
- Определить положение исследуемого образца относительно кристаллографических осей.

Размерный эффект

Частица в потенциальной яме



Электроны в металлах
Размерное квантование



Необходимые условия

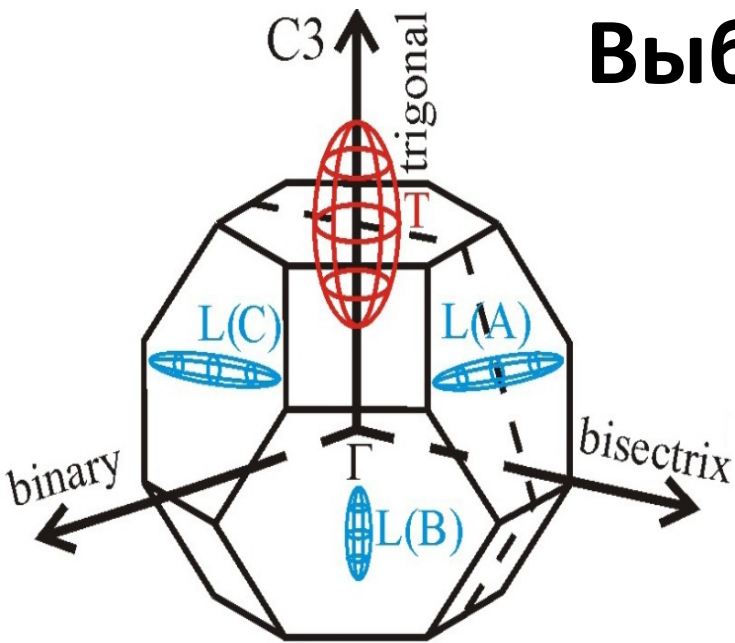
$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, n = 1, 2, 3, \dots$$

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

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

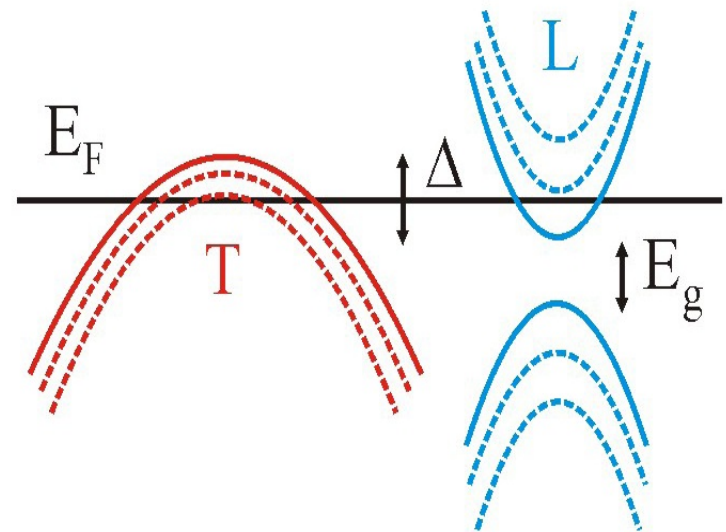
Выбор материала



- Эффективная масса электрона $m^* < 0.01 m$
- Очень низкая энергия Ферми $E_F = 28 \text{ мэВ}$
- Концентрация электронов $n_e \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ 1/см}$
- Электронные свойства Bi 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



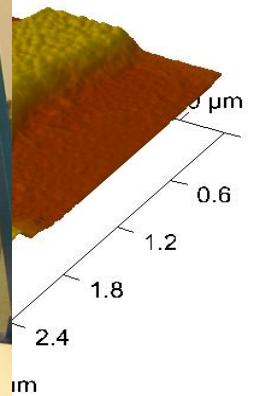
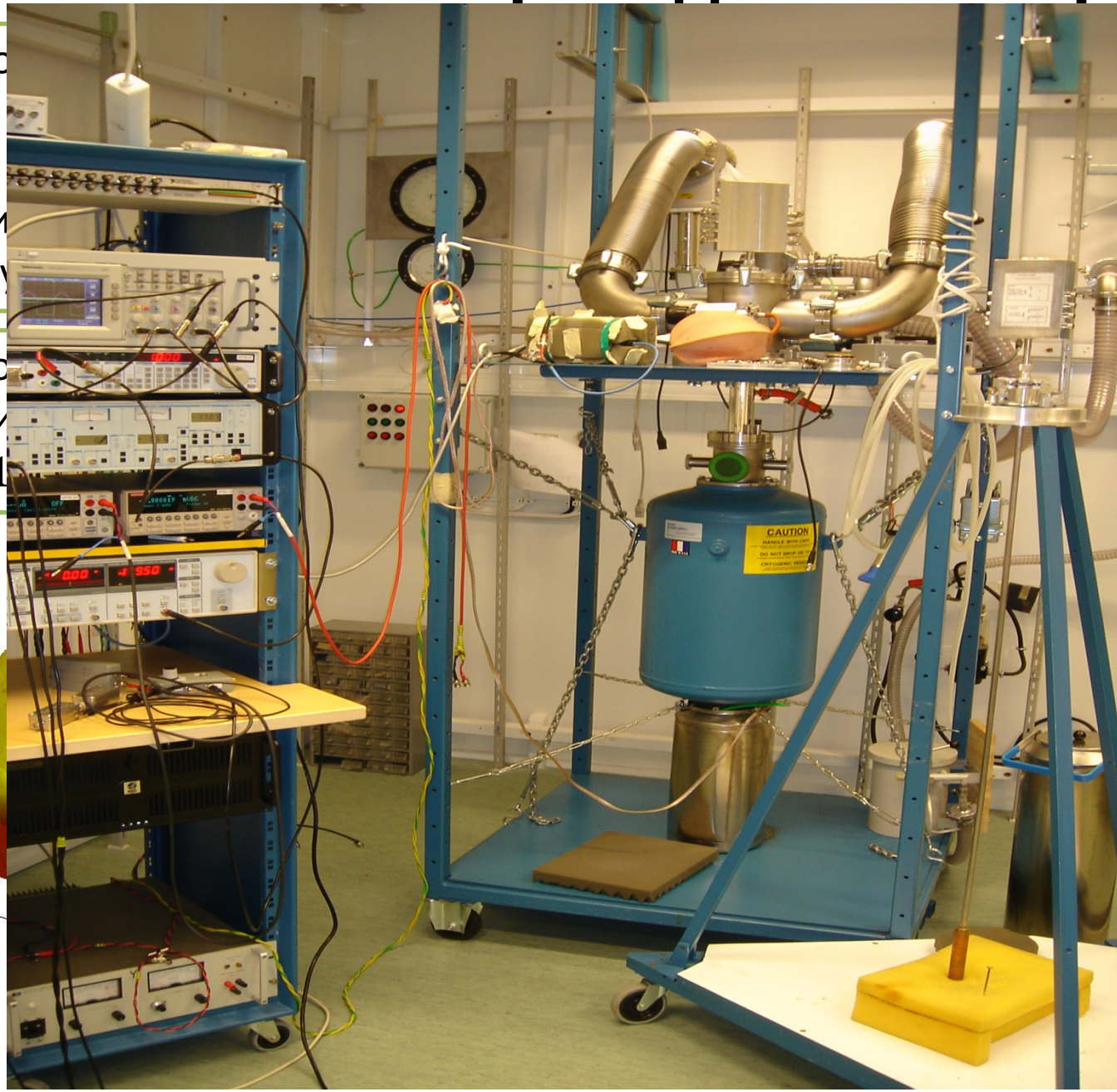
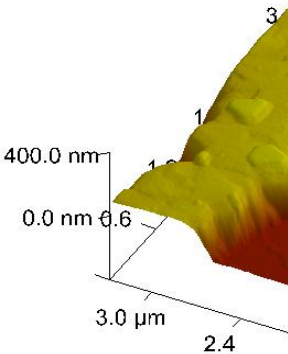
Изготовление нанопроводов и эксперимент

Было использовано
[Zgirski et al.]
висмута на
слоёв. Такие
наноструктуры

Был использован
литографии
в вакууме 10⁻⁶ Torr

травление
в матрицу
их атомных
ячейкам для

инфракрасной
с 99,9995%,
с 99,9995%



6
авления

Нанопровод с прямоугольным сечением: теория

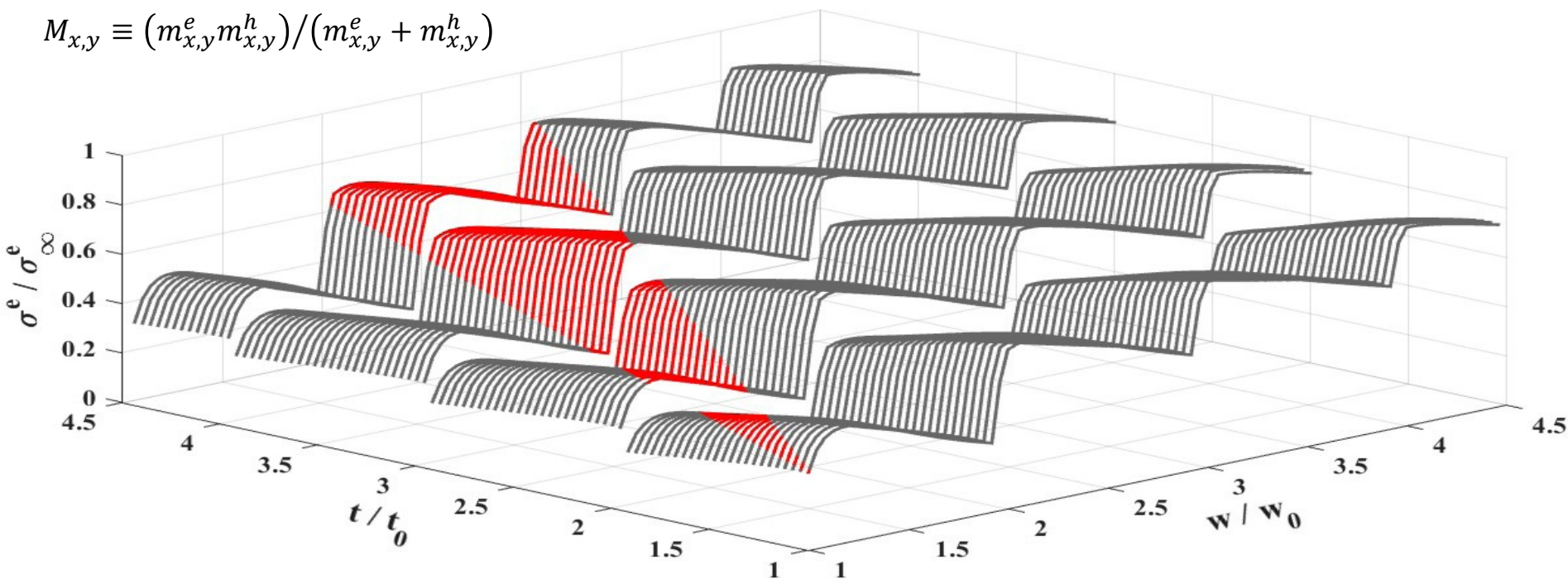
$$\sigma^e = \frac{2q_e^2}{\pi\hbar\varrho} \frac{\mu_x^e}{m_z^e} \sum_{m,n=1}^{[r_w],[r_t]} \frac{\left(\frac{2\hbar}{V_0}\right)^2 \sqrt{U_{mn}^e}}{\sum_{m',n'=1}^{[r_w],[r_t]} (\Lambda_{m'n'}^{mn}) / \sqrt{U_{m'n'}^e}}$$

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

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

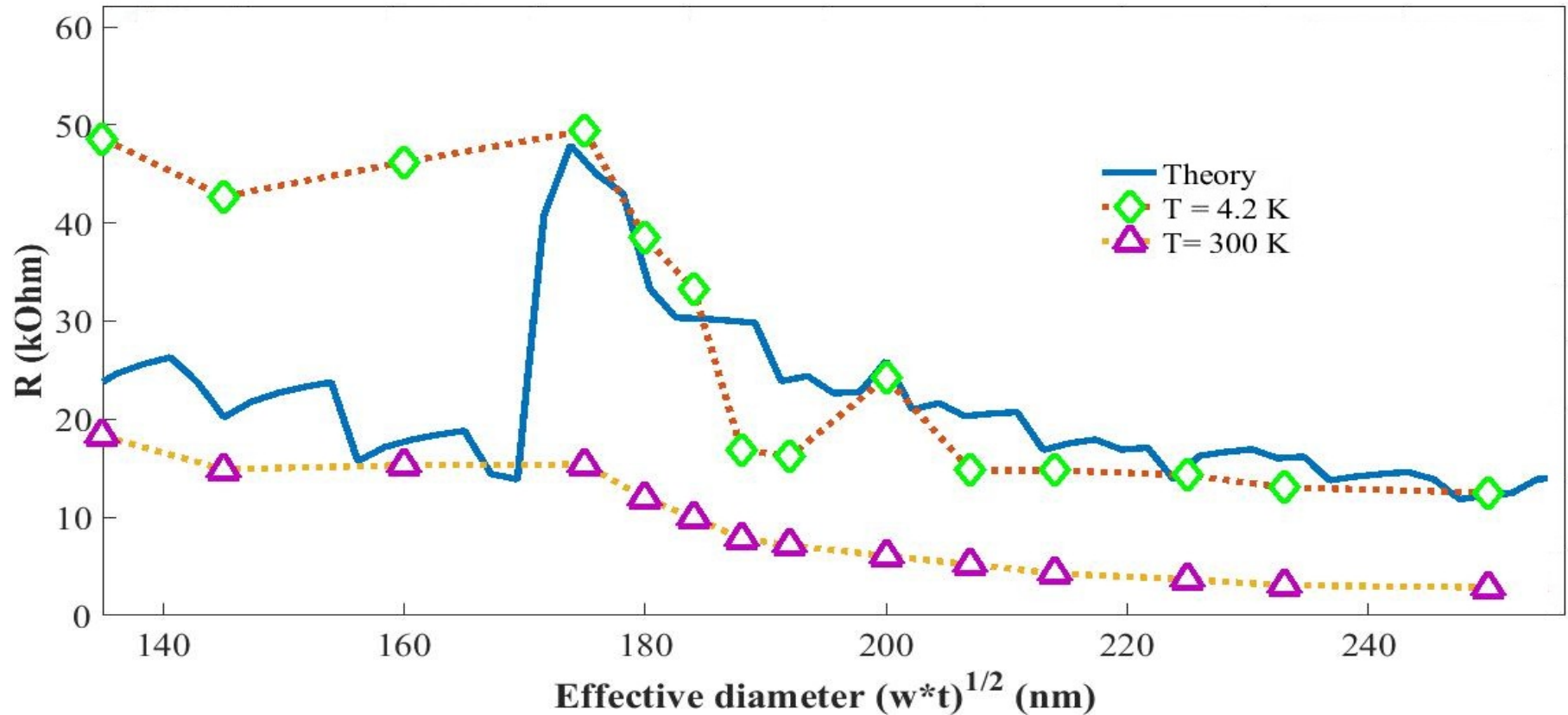
$$M_{x,y} \equiv (m_{x,y}^e m_{x,y}^h) / (m_{x,y}^e + m_{x,y}^h)$$

ϱ – 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 ϱ 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 σ^e ведёт себя как ступенчатая функция, зависящая от соответствующих размеров. Проводимость структуры σ_∞^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. ⁷

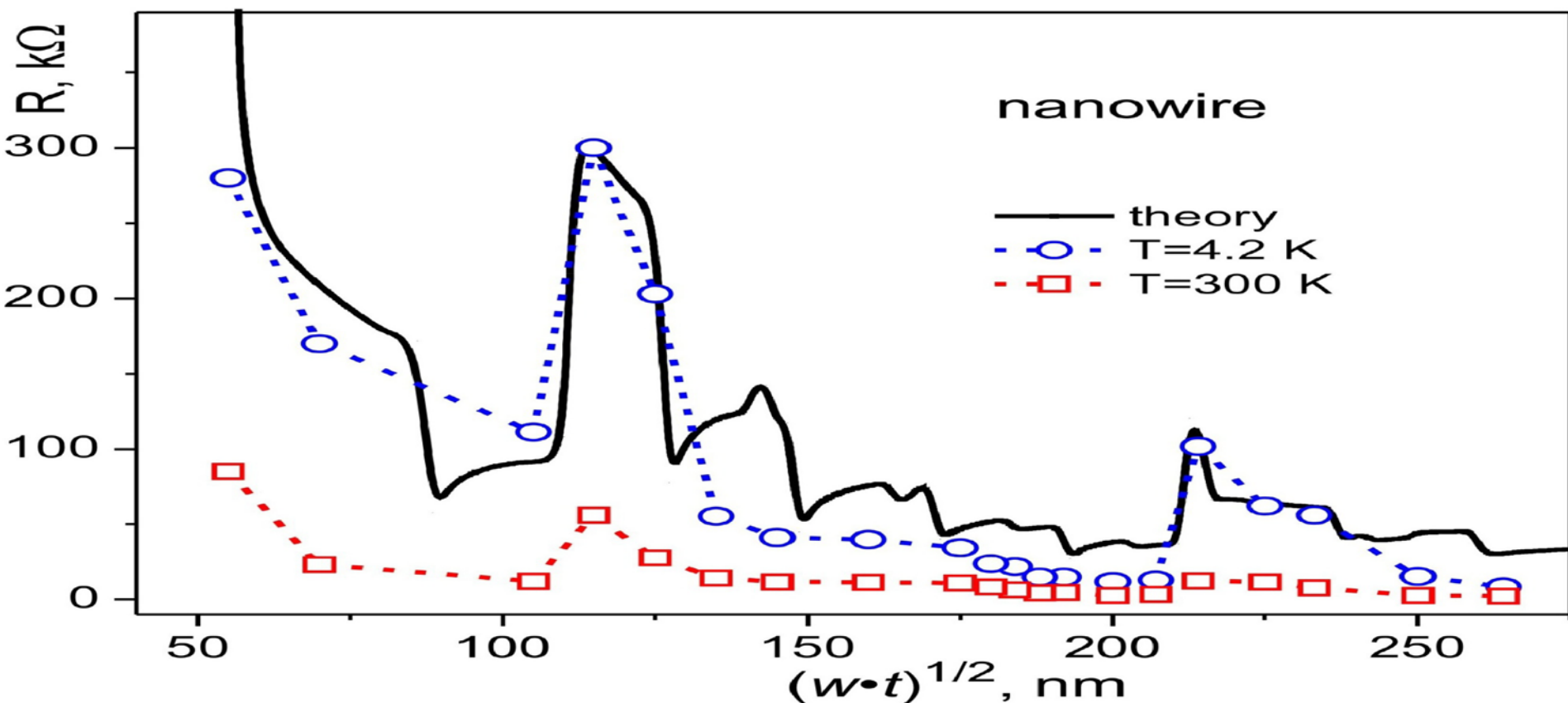
Результаты: образец №1



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 флуктуации 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 помощь в работе, а также – всему профессорско-педагогическому 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.