

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»**

Департамент электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ

ОТЧЕТ О ПРОХОЖДЕНИИ ПРАКТИКУМА

Место прохождения практикума: институт физических проблем имени Капицы

Автор: Седов Егор Андреевич

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель практикума

«__» _____ 2016 г.

Москва, 2016 г.

Оглавление

Введение	3
Эссе	3
Вывод	6
Список литературы.....	7

Введение

В рамках участия в научно-учебной группе я проходил практикум в институте физических проблем имени Капицы. В ходе работы необходимо было ознакомиться с оборудованием, находящимся в лаборатории, для последующей с ним работы, провести анализ различной литературы по изучаемой мной теме, т.е. по квантовым размерным эффектам и научиться строить теоретические зависимости описывающие данные эффекты.

Эссе

Для экспериментального изучения квантовых размерных эффектов (КРЭ) необходимо тщательно проверить и подготовить основную установку, на которой будут помещаться исследуемые образцы. Так как КРЭ лучше проявляются при очень низких температурах, необходимо использовать жидкий гелий. Поэтому одной из важнейших задач являлась проверка, как экспериментальной установки, так и рефрижератора, в который она будет помещаться, на наличие микротрещин, которые могли бы вызвать утечку жидкого гелия. Для этого использовался гелиевый масс-спектрометрический течеискатель. Также были подготовлены расходные материалы для основной установки, например, витые пары из тонкого провода.

В качестве теоретической работы было изучено большое количество литературы по данной тематике, причём были изучены как работы за последние несколько лет, так и более ранние. Участвуя в научно-учебной группе, планируется рассмотреть влияние размеров образца на его электрическое сопротивление. Такие работы уже имеются [1,2,3], но как в более ранних [1,2], так и в более поздних [3] публикациях данный эффект рассматривается в тонких плёнках висмута. В предстоящей же работе будут рассмотрены тонкие висмутовые нанопровода. Несмотря на, казалось бы, уже полностью

исследованную тему, она по-прежнему актуальна, благодаря тому, что тонкие висмутовые провода ещё никем не рассматривались.

Эксперименты по выявлению КРЭ в нанопроводах уже были поставлены ранее, о чём свидетельствуют публикации [4,5,6]. Но, теоретического объяснения, соответствующим экспериментальным данным, так и не было дано. Это и являлось основной задачей, поставленной передо мной в рамках работы в практикуме. Теоретические модели, описывающие КРЭ в тонких плёнках, уже были представлены в некоторых публикациях[3]. Но чёткой теоретической модели, отражающей КРЭ в тонких проводах, до сих пор нет. В работе [7] была представлена модель, объясняющая зависимость сопротивления от эффективного диаметра в тонких нанопроводах. Данная модель предсказывает не только осцилляции различных параметров, но и переход висмута из металла в диэлектрик при достижении некоего диаметра провода. Этот переход должен произойти при поперечном сечении провода порядка $d = \sqrt{4w_0t_0/\pi} \approx 59$ нм, где w_0 и t_0 соответственно равны:

$$w_0 = \frac{\hbar\pi}{\sqrt{2M_x(\mu_x^e + \mu_x^h)}} \approx 100 \text{ нм}, \quad t_0 = \frac{\hbar\pi}{\sqrt{2M_y(\mu_y^e + \mu_y^h)}} \approx 27 \text{ нм}, \quad (1)$$

Здесь $M_j \equiv \frac{m_j^e m_j^h}{(m_j^e + m_j^h)}$, $j = x, y$, а μ – химический потенциал. Зная ширину и

толщину перехода, мы можем построить зависимость концентрации электронов от уменьшающихся размеров по формуле:

$$\frac{n}{n_\infty} = \frac{1}{wt} \sum_{m,n=1}^{[r_w],[r_t]} \sqrt{U_{mn}^e} \left[\frac{1}{wt} \sum_{k,l=1}^{[r_w],[r_t]} \sqrt{U_{kl}^e} \right]_{w,t \rightarrow \infty}^{-1}, \quad (2)$$

Где $U_{ij}^e \equiv 1 - \left(\frac{i}{r_w}\right)^2 + \left(\frac{\mu_y^e}{\mu_x^e}\right) \left[1 - \left(\frac{j}{r_t}\right)^2\right]$, а $r_w \equiv \frac{w}{w_0}$, $r_t \equiv \frac{t}{t_0}$. Результат

построения показан на рисунке 1 (а). Возникшие ступеньки в концентрации зарядов и есть проявление квантового размерного эффекта. С уменьшением сечения провода, с каждым шагом, уменьшается и плотность электронов, достигая своего максимума в определённых позициях. Положения этих

максимумов очень сильно зависит от эффективных масс, то есть от кристаллической структуры провода.

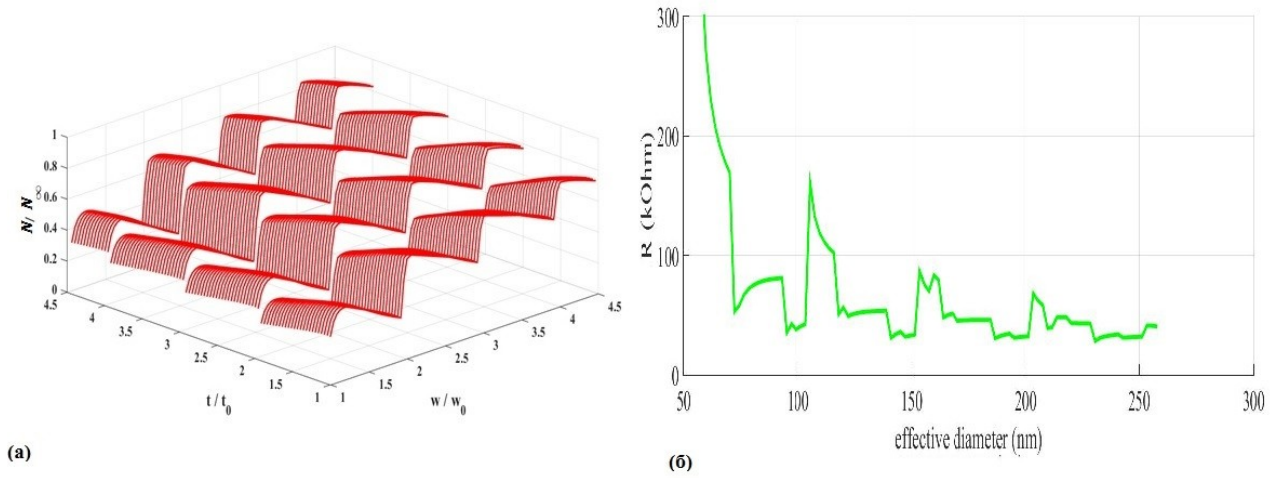


Рис. 1. (а) Зависимость концентрации электронов от толщины и ширины провода из висмута, (б).

С помощью кинетического уравнения Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\mathbf{p}}{m} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} \cdot \mathbf{F} = \left(\frac{df}{dt} \right)_{scatt} \quad (3)$$

и формулы (2), мы можем записать электронный вклад в электрическое сопротивление как:

$$R^e = \left(\frac{2 q_e^2}{\pi \hbar} \frac{1}{\varrho} \frac{\mu_x^e}{m_z^e} \sum_{m,n=1}^{[r_w],[r_t]} \frac{\left(\frac{2\hbar}{V_0} \right)^2 \sqrt{U_{mn}^e}}{\sum_{m',n'=1}^{[r_w],[r_t]} \frac{\Lambda_{m'n'}^{mn}}{\sqrt{U_{m'n'}^e}}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $\Lambda_{m'n'}^{mn} \equiv (2 + \delta_{mm'})(2 + \delta_{nn'})$ и $\varrho \equiv \frac{N}{\Omega}$ – величина плотности носителей. Дырочный вклад в сопротивление будет выглядеть аналогично. На рисунке 1 (б) представлена зависимость сопротивления от эффективного диаметра. На графике видны как осцилляции сопротивления, так и резкое возрастание сопротивления на примерно 58-60 нм, что говорит о наличии предсказанного метал-диэлектрик перехода.

Таким образом, взяв за основу модель из работы [7], планируется путём изменения тензора эффективных масс достигнуть нужных теоретических

параметров, максимально точно, описывающих экспериментальные данные, полученные в работе [4].

Теоретические расчёты происходили на компьютерах расположенных в лаборатории, а в качестве средства для построения зависимостей использовалась программа Matlab.

Вывод

В качестве результата была построена зависимость электрического сопротивления от эффективного диаметра образца, описывающая экспериментальные данные из работы [4] с достаточно высокой точностью (Рис. 2).

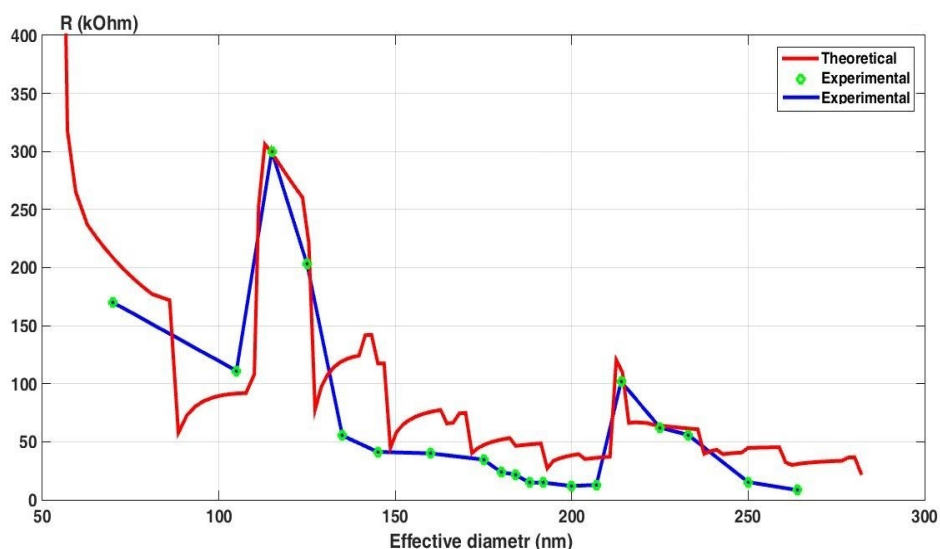


Рис. 2. Красным выделена полученная теоретическая кривая при $m_x^h = m_y^h = 0.059$, $m_z^h = 0.634$, $m_x^e = 0.0011$, $m_y^e = 0.2913$, $m_z^e = 0.0071$ и $w_0 \approx 113$ нм, $t_0 \approx 26$ нм. Синим цветом выделена кривая, построенная по экспериментальным данным. Зелёным отмечены данные полученные при эксперименте.

Из рисунка видно, что при проведении эксперимента было зафиксировано два всплеска сопротивления с разными амплитудами, а также заметна тенденция к увеличению сопротивления при приближении диаметра образца к диаметру перехода из металла в диэлектрик, предсказанному теоретической моделью. При построении теоретической кривой, описывающей данный

эксперимент, удалось выделить два главных пика сопротивления и показать границу перехода метал-диэлектрик.

Также была проведена работа по подготовке и тестированию экспериментальной установки.

Участие в практикуме позволило лучше разобраться в изучаемой мной теме, а также помогло мне в написании междисциплинарной курсовой работы. Полученные знания и результаты планируется использовать при написании магистерской диссертации и в предстоящих экспериментах.

Список литературы

1. Ю.Ф. Огрин, В.Н.Луцкий, М.И. Елинсон. О наблюдении квантовых размерных эффектов в тонких плёнках висмута. JETP Letters, 3,71 (1996).
2. В.Б. Сандомирский. Квантовый размерный эффект в полуметаллических плёнках. JETP, 25, 1 (1996).
3. M.C. Tringides, M. Jatochowski, E. Bauer. Quantum size effects in metallic nanostructures. Physics Today, 60, 4 (2007).
4. K. Arutyunov, M. Zgirski, K.-P. Riikonen, P. Jalkanen. Quantum Limitations of Electron Transport in Ultra-Narrow Nanowires. IREPHY, 1,1 (2007).
5. К.Ю. Арутюнов. Квантовые размерные эффекты в металлических наноструктурах. Доклады АН ВШ РФ, 3, 28 (2015).
6. Farhangfar S. Quantum size effects in solitary wires of bismuth. Physical Review B, 76 (2007).
7. Farhangfar S. Quantum size effects in a one-dimensional semimetal. Physical Review B, 74 (2006).