

2. Патрашев, А. Н. Гидромеханика / А. Н. Патрашев. – М.: Военн.- мор. изд-во, 1953. – 719 с.

3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 904 с.

4. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1951. – 575 с.

5. Испулов, А. А. Кубическая сплайн-интерполяция индивидуальных законов сопротивления авиационных бомб / А. А. Испулов, Д. А. Битюков, И. А. Якушев // Авиация: история, современность, перспективы развития: материалы V междунар. конф., Минск, 22 октября 2020 г. / Белорус. гос. акад. авиации. – Минск, 2021. – С. 157–158.

УДК 537.311.31

### **Электрофизические свойства пленок из углеродных нанотрубок**

Борисов В. А.

Белорусский национально-технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Одним из важных критериев при создании приборных и сенсорных устройств на основе углеродных нанотрубок является установлением механизмов проводимости, а также всевозможное изменение их электрофизических свойств путем улучшения их композиции. Для разработки различных датчиков и сенсоров макроскопические образцы на основе углеродных нанотрубок могут создаваться не только в виде композитов, но и в виде пленок, волокон, покрытий и т.д. Объектом исследования являются пленки из однослойных нанотрубок, которые были получены методом фильтрации через пористые мембраны суспензий, содержащих углеродные нанотрубки.*

Целью работы является установление механизмов электропроводности в пленках из углеродных нанотрубок.

Особая геометрия и различная структура дефектов пленок из УНТ позволили наблюдать эффекты квантового переноса в этих материалах, таких как слабая локализация, возникающая при диффузионном движении электрона, которое сопровождается интерференцией волновых функций электрона, описавшего замкнутую траекторию и вернувшегося в исходную точку за счет упругого рассеяния на примесях для двух противоположных направлений движения. Интерференция волновых функций повышает вероятность обратного рассеяния, вследствие чего сопротивление повышается [1]. Вследствие необходимости сохранения фазы волновой функции

электрона, возможным только при упругом рассеянии, этот эффект возможен в рассмотрении только при очень низких температурах. В работе [2] было продемонстрировано влияние эффекта слабой локализации на температурную зависимость сопротивления пленок из однослойных углеродных нанотрубок.

В низкоразмерных системах, в частности, к которым относятся пленки из углеродных нанотрубок, при низких температурах помимо эффекта слабой локализации может наблюдаться и другой механизм проводимости – прыжковая проводимость. Прыжковому механизму проводимости соответствует очень малая подвижность, так как прыжки электронов связаны со слабым перекрытием хвостов волновых функций соседних центров. Зависимость сопротивления от температуры согласно этой модели, разработанная Моттом, имеет следующий вид

$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_m}{T}\right) \frac{1}{d+1}, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление образца;  $T$  – температура;  $T_m$  – размерная константа;  $d$  – размерность системы [3].

Анализ литературных источников, в частности [4], свидетельствует о наличии такого механизма переноса заряда как прыжковая проводимость для пленок из УНТ при низких температурах.

На всем температурном интервале температурная зависимость сопротивления в неупорядоченных материалах, обычно характеризующихся большими проводящими областями, разделенными небольшими изолирующими барьерами может быть объяснена в рамках другого механизма электропроводимости – флуктуационно-индуцированное туннелирование. Физика этого механизма заключается в наблюдении, что, поскольку электроны стремятся туннелировать между проводящими областями в точках их наибольшего сближения, соответствующие туннельные переходы обычно имеют небольшой размер и поэтому подвержены большим колебаниям напряжения на переходе за счет температуры. Вследствие этого флуктуации напряжения напрямую влияют на вероятность туннелирования и вносят характерное изменение в обычно не зависящую от температуры туннельную проводимость.

Во всем интервале температур зависимости  $R(T)$  может быть аппроксимирована выражениями (2–4), которые получаются в рамках модели флуктуационно-индуцированного туннелирования, которая справедлива для неупорядоченных систем, в том числе массивов углеродных нанотрубок и полимерных композиционных материалов

$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_1}{T + T_0}\right), \quad (2)$$

где параметры  $T_0$  и  $T_1$  определяются следующим образом

$$T_0 = \frac{16\varepsilon_0 h A V_0^{3/2}}{2\pi^2 k_B (2m_e)^{1/2} W^2}, \quad (3)$$

$$T_1 = \frac{8\varepsilon_0 A V_0^2}{e^2 k_B W}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $h$  – постоянная Планка;  $A$  – площадь туннельного барьера;  $V_0$  – высота барьера;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $m_e$  – эффективная масса электрона,  $W$  – ширина туннельного барьера,  $e$  – заряд электрона.

Температура  $T_1$  является аналогом энергии активации и соответствует энергии барьера. При  $T = T_0$  энергии флуктуаций достаточно велики, чтобы преодолеть барьер, при этом соотношение  $T_0/T_1$  характеризует вероятность туннелирования при низких температурах в отсутствие флуктуаций [5].

Температурная зависимость сопротивления  $R(T)$  оригинальных пленок из УНТ изображена на рис.

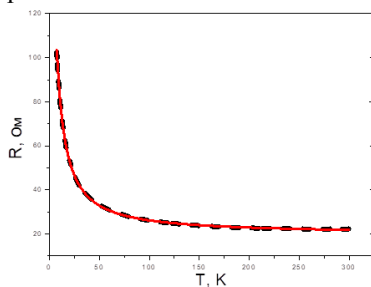


Рис. Температурная зависимость сопротивления  $R(T)$  необработанных пленок из углеродных нанотрубок:

сплошная красная линия – аппроксимация уравнением, полученная в рамках модели флуктуационно-индуцированного туннелирования

Из рис. видно, что полученная зависимость хорошо согласуется с выражением (2). Кроме того, из значения подгоночных параметров  $T_1$  и  $T_0$ ,

полученных с помощью компьютерной программы Origin, в которой была проведена аппроксимация, учитывая геометрические размеры пленки, можно получить значение ширины  $W$  и высоты  $V_0$  туннельного барьера для каждого из исследуемого образца.

На основе температурной зависимости сопротивления установлено, что на большом интервале температур основной вклад в сопротивления пленок из углеродных нанотрубок может быть объяснен в рамках модели флуктуационно-индуцированного туннелирования. Однако при очень низких температурах необходимо учитывать вклад и других механизмов электропроводимости.

### Литература

1. Bergmann, G. Weak localization in thin films / G. Bergmann // Phys. Rep. – 1984. – Vol. 107, No. 1. – P. 1–58.
2. Evidence for hole localization in a low stage acceptor graphite intercalation compound / L. Piraux [et al.] // Solid State Communications. – 1985. – Vol. 56. – P. 567–569.
3. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах / В. Ф. Гантмахер // М.: Физматлит. – 2013.
4. Hopping Conduction in Disordered Carbon Nanotubes / D. P. Wang [et al.] // Solid State Communications. – 2007. – Vol. 142. – P. 287–291.
5. Транспортные свойства ориентированной и изотропной бумаги из одностенных углеродных нанотрубок / М. С. Галков [et al.] // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 104–111.

УДК 621.316

### Using solar panels to recharge car battery

Akhmedov A. P.<sup>1</sup>, Khudoyberganov S. B.<sup>1</sup>, Yurkevich N. P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Transport University  
Tashkent, Republic of Uzbekistan,

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

*Today, solar energy technologies for automobiles perform mainly auxiliary functions: battery recharging, power supply in the field, and others. A solar cell in a vehicle can compensate for battery self-discharge and leakage current during long periods of parking. An example of using solar cells to recharge electric vehicles (electric scooters, electric cars) is a charging station.*