Механизмы проводимости макроразмерных пленок на основе неупорядоченных однослойных нанотрубок

Могорычная А.В.¹, Жуков С.С.¹, Жукова Е.С.¹, Цапенко А.П.², Красников Д.В.²,
Насибулин А.Г.², Горшунов Б.П.¹

¹Московский физико-технический институт (государственный университет), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

²Сколковский институт науки и технологий, 121205, г. Москва, Большой бульвар д.30, стр.1

DOI 10.34077/Semicond2019-377

С применением методов терагерцовой (ТГц) и инфракрасной (ИК) спектроскопии, выполнено систематическое исследование электродинамических свойств свободновисящих макроразмерных пленок на основе высококачественных углеродных однослойных нанотрубок (УНТ) [1] различной длины. С помощью импульсного ТГц спектрометра с временным разрешением и ИК Фурье-спектрометра получены спектры комплексных проводимости $\sigma^*(\nu)$ и диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(\nu)$ пленок со средними длинами УНТ 0.3, 1, 6, 13 и 40 мкм, в диапазоне частот от 5 до 15000 см⁻¹ и в интервале температур от 4 до 300 К. Полученные данные пересчитывались в спектры комплексного кондактанса – произведения проводимостей и толщин пленок, $\sigma(\nu)*d$. Эффективная толщина d пленок определялась по коэффициенту поглощения на длине волны 550 нм [1]. Для пленок с УНТ с длиной от 0.3 до 13 мкм толщина составила 300-400 нм, для пленок с УНТ с длиной 40 мкм – 40 нм.

Получены следующие результаты. 1. На частотах выше 80 см⁻¹ спектр пропускания пленок УНТ слабо изменяется с температурой. 2. Кондактанс пленок УНТ с длинами 0.3 и 1 мкм монотонно уменьшается с понижением температуры; в температурных зависимостях кондактанса пленок УНТ с длинами 13 мкм и 40 мкм обнаружен локальный максимум. 3. В частотных зависимостях кондактанса всех исследованных пленок в ТГц области наблюдается пик, частотное положение которого сдвигается в сторону высоких частот как с уменьшением длины УНТ, так и с понижением температуры. 4. С уменьшением частоты излучения характер температурной зависимости кондактанса пленок эволюционирует от металлического к полупроводниковому. 5. Для пленок с длинами УНТ 1.0, 6.0 и 13.0 мкм определенные длины свободного пробега электронов совпадают и составляют 3.5±0.4 мкм, в то время как для пленок с длинами УНТ 0.3 и 1.0 мкм длины свободного пробега электронов превышают среднюю длину УНТ.

Можно считать, что в толстых пленках среднее расстояние между точками пересечений (контактов) трубок меньше, чем в тонких. В таком случае полученные результаты свидетельствуют в пользу модели фононно-стимулированных прыжков (phonon-assisted hopping) электронов через потенциальные барьеры в точках контактов трубок [2-4]. С понижением температуры вероятность прыжков уменьшается, а различие в расстояниях между трубками в точках их пересечения приводит к постепенному «закрыванию» данных точек для «легкого перескока» электронов. Данные предположения позволяют объяснить сдвиг пика в ТГц спектрах кондактанса в область высоких частот, а также изменение характера температурной зависимости проводимости пленок УНТ с металлического на полупроводниковый при переходе от низких частот к высоким.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00246.

[1] A. Kaskela, et al., *Nano Lett.* 2010, **10**, 4349–4355.

[2] E.S.Zhukova et al., *Nanotechnology* 2017, **V.28**, N.44

[3] B.P.Gorshunov et al., *Carbon* 2018, **V.126**, PP. 544-551

[4] E.S.Zhukova et al., *Journal of Physics: Conference Series*, 1092, art. no. 012178 (2018)