

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт электроники и телекоммуникаций

НЕДЕЛЯ НАУКИ ИЭиТ

Материалы
Всероссийской конференции

18–23 ноября 2024 года



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2024

УДК 004.9:535.1:535.3:537.9:538.9:621.3
ББК 34.2:30.6:32.844.2:32.841:65.38
Н42

Неделя науки ИЭиТ : материалы Всероссийской конференции, 18–23 ноября 2024 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 237 с.

В сборник включены статьи студентов, аспирантов, молодых ученых и сотрудников Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, университетов, научных организаций и предприятий Санкт-Петербурга и других городов России, зарубежных стран по материалам докладов, принятых на секционные заседания конференции «Неделя науки ИЭиТ». Статьи отражают современный уровень научно-исследовательской работы участников конференции в области физики материалов, нанотехнологий и наноэлектроники, радиофизики и телекоммуникаций.

Представляет интерес для специалистов в различных областях знаний, для учащихся и работников системы высшего образования и Российской академии наук.

Редакционная коллегия:

*В. Э. Гасумянц (отв. ред.), К. В. Грешневилов, Д. Д. Каров,
Е. А. Медведева, А. В. Майзель, С. О. Мельников, В. Ю. Паневин,
А. О. Ситникова, К. В. Соловьев*

Печатается по решению
Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-8807-7

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2024

Д.Н. Тонков¹, А.Н. Грозова¹, И.А. Кобычно¹, В.Э. Гасумянц^{1,2},
А.В. Алгушаева³, Р.Ф. Хуснутдинов³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,

³ООО Научно-производственное предприятие «ТурбоМашПром»

МЕХАНИЗМЫ ПРОВОДИМОСТИ В ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ТЕРМОПОЛИУРЕТАНА

Полимерные нанокompозиты на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и полимерной матрицы обладают уникальными механическими, электро- и теплопроводящими, а также тензорезистивными свойствами [1, 2]. Сочетание этих свойств делает полимерные композиты на основе УНТ прекрасными кандидатами на роль материалов для носимой электроники и тензорезистивных датчиков. Вместе с тем, полимерные нанокompозиты представляют интерес и с точки зрения фундаментальных исследований в силу некристалличности их структуры. Электронный транспорт в проводящих полимерных композитах существенно отличается от электронного транспорта в традиционных твердых телах (металлах и полупроводниках). Исследованию электронных процессов в некристаллических твердых телах, а именно в халькогенидных и ферми стеклах, жидких металлах, а также вырожденных полупроводниках было посвящено огромное количество работ (см., например, посвященную целиком этой проблеме книгу [3]), чего нельзя сказать о полимерных нанокompозитах.

В литературе имеется довольно много работ, посвященных исследованию тензорезистивных свойств полимерных композитов различного состава, а также влияния типа и содержания проводящего наполнителя на значение порога протекания. Однако данные по анализу механизмов электронного транспорта в полимерных нанокompозитах на основе одностенных УНТ сильно разнятся. Так, например, в [4] проводимость описывается в модели с переменной длиной прыжка и модели туннелирования, вызванного тепловыми флуктуациями. В [5] говорится о реализации в композитах с нанотрубками прыжкового механизма проводимости по ближайшим соседям, а в [6] – режима прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка.

В связи с изложенным, целью данной работы являлось исследование электронного транспорта в полимерных нанокompозитах на основе одностенных УНТ и термополиуретана (phermoplastic polyurethane, TPU).

Образцы композиционных материалов изготавливались в несколько этапов. На первом этапе полимер (TPU) растворяли в N,N-диметилформамиде (ДМФА). Углеродные нанотрубки замешивали в N,N-диметилформамиде с добавлением додецилсульфата натрия. После полного растворения додецилсульфата натрия полученную смесь УНТ в ДМФА добавляли в раствор TPU и оставляли замешиваться на магнитной мешалке в течении 12 часов. По истечении этого времени для полной диспергации УНТ в растворе TPU использовали погружной гомогенизатор. После того как все агломераты УНТ разрушались, из полученного раствора методом раскатки на подложке из фторопласта, с дальнейшей сушкой при 150 °С в течении 10 мин для испарения растворителя, изготавливались тонкие пленки-прекурсоры (толщиной около 40 мкм). Затем полученные тонкие плёнки-прекурсоры вырезались в размер пресс-формы и подвергались горячему прессованию под давлением 0.2–0.3 МПа с проставками 100 мкм при температуре 180 °С в течении 20 мин. Измерения сопротивления проводились четырехконтактным методом в диапазоне температур от 77 до 300 К на переменном токе частотой 21 Гц в режиме частотной селекции.

На рис. 1 представлены температурные зависимости нормированного на значение при комнатной температуре, R_{300K} , удельного сопротивления для трех исследованных композитов

с различным содержанием наполнителя. На первый взгляд, они демонстрируют активационный характер, однако это не так, как это хорошо видно из рис. 2, *а*, на котором приведена зависимость нормированного сопротивления в логарифмическом масштабе от обратной температуры. Линейность зависимостей в координатах $\lg(\rho/\rho_{300\text{К}}) - 1/T$ наблюдается только в узком диапазоне высоких температур (см. прямые, проведенные на рис. 2, *а*); при понижении температуры эти зависимости становятся существенно нелинейными. При этом увеличением содержания наполнителя в композите область линейности зависимостей на рис. 2, *а* последовательно уменьшается.

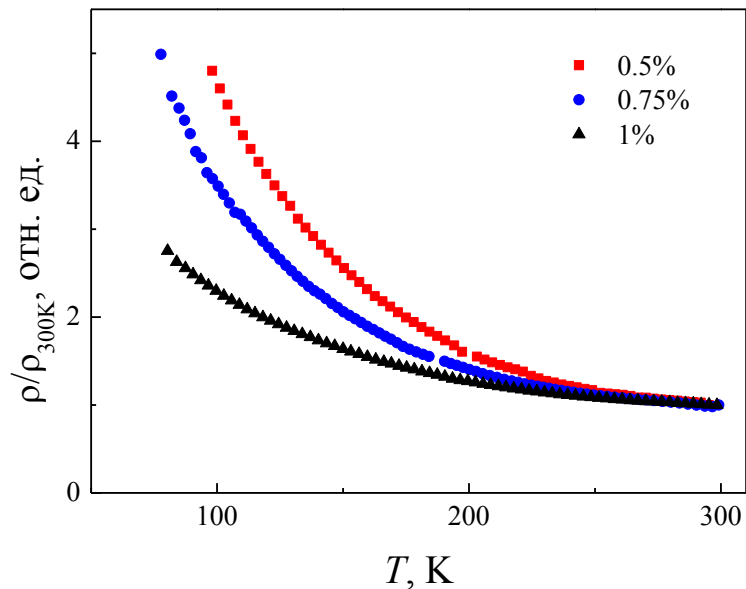


Рис. 1. Температурные зависимости нормированного удельного сопротивления для композитов с различным содержанием УНТ-наполнителя

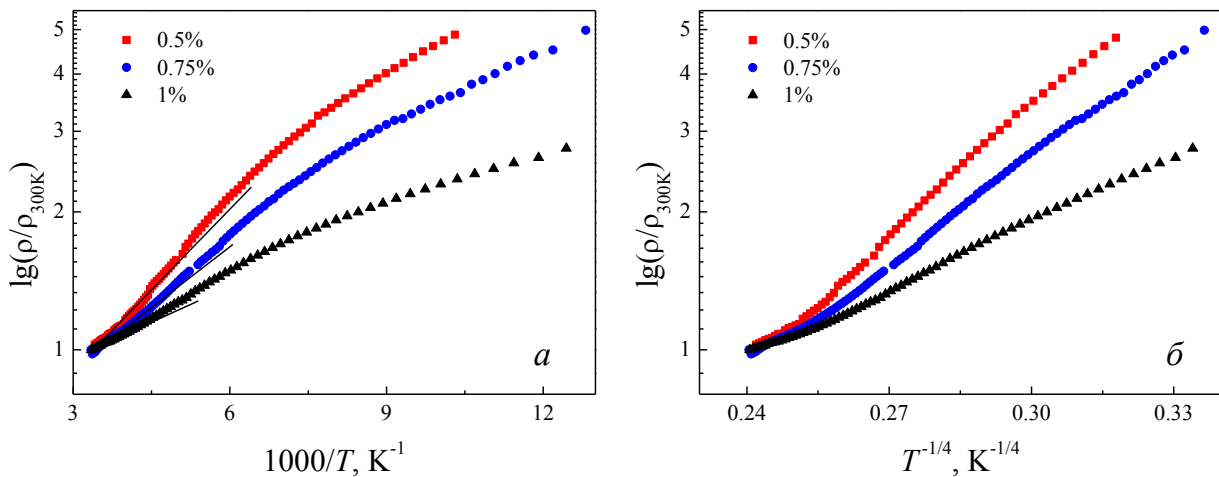


Рис. 2. Зависимости нормированного удельного сопротивления в логарифмическом масштабе в различных координатах: от T^{-1} (*а*), от $T^{-1/4}$ (*б*)

Нелинейность зависимостей на рис. 2, *а* указывает на возможность реализации механизма прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. В этом случае температурная зависимость сопротивления описывается формулой [3]:

$$\rho(T) = \left(e^2 D(E_F) \bar{R}^2 v_{ph} \right)^{-1} \exp(B/T^{1/4}), \quad (1)$$

где $D(E_F)$ – плотность состояний на уровне Ферми, $\bar{R}$ – средняя длина прыжка, v_{ph} – множитель, определяющий частоту рассеяния носителей заряда на фононах, $B = 1.66(\alpha^3/k_B D(E_F))^{1/4}$, где k_B – постоянная Больцмана, α – коэффициент затухания волновой функции локализованных носителей.

На рис. 2, б приведена зависимость нормированного сопротивления в логарифмическом масштабе от $T^{-1/4}$. Видно, что при температурах вблизи комнатной эти зависимости являются нелинейными, что соответствует данным на рис. 2, а. Однако при температурах ниже 220–250 К (в зависимости от содержания наполнителя), что соответствует 0.26–0.25 К^{-1/4}, данные зависимости приобретает линейный характер, что свидетельствует о реализации режима прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. При этом видно, что наклон зависимостей на рис. 2, б последовательно уменьшается с ростом содержания УНТ-наполнителя в композите (более чем в два раза при переходе от концентрации наполнителя 0.5% к 1%). Отметим, что в исследуемом диапазоне температур множитель $(e^2 D(E_F) \bar{R}^2 v_{ph})^{-1}$ вносит небольшой вклад в наклон зависимости $\rho(T^{-1/4})$, поэтому изменение коэффициента наклона прямых на рис. 2, б связано преимущественно с изменением значения параметра B . Выявленное из анализа полученных зависимостей $\rho(T)$, изменение параметра B , по всей видимости, может быть связано с уменьшением значения коэффициента затухания волновой функции локализованных носителей α .

Таким образом, в данной работе экспериментально исследованы температурные зависимости удельного сопротивления полимерных нанокомпозитов на основе одностенных УНТ и термополиуретана и проведен их анализ в рамках моделей различных механизмов проводимости. Показано, что в области высоких температур реализуется механизм прыжковой проводимости между ближайшими соседями, который при понижении температуры переходит в механизм прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. При этом с ростом содержания УНТ-наполнителя температура, при которой происходит смена режима прыжковой проводимости, последовательно возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fenta E.W., Mebratie B.A. Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 16. – P. e36490.
2. Shah K., Talamadupula K.K., Acar P., Seidel G.D. Reduced-order model for multiphysics simulations of CNT/Polymer Composites via principal component regression and artificial neural networks // *Comput. Mater. Sci.* 2024. – Vol. 244. – P. 113200.
3. Mott N.F., Davis E.A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. – 2nd edition. – Oxford: Clarendon Press, 2012. – 608 p.
4. Jeon K., Lumata L., Tokumoto T., Steven E., Brooks J., Alamo R.G. Low electrical conductivity threshold and crystalline morphology of single-walled carbon nanotubes – high density polyethylene nanocomposites characterized by SEM, Raman spectroscopy and AFM // *Polymer*. – 2007. – Vol. 48. – N 16. – P. 4751–4764.
5. Zhang R., Dowden A., Deng H., Baxendale M., Peijs T. Conductive network formation in the melt of carbon nanotube/thermoplastic polyurethane composite // *Compos. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 69. – N 10. – P. 1499–1504.
6. Fan J., Wan M., Zhu D., Chang B., Pan Z., Xie S. Synthesis and properties of carbon nanotube-poly pyrrole composites // *Synth. Met.* – 1999. – Vol. 102. – N 1–3. – P. 1266–1267.