

Электрический транспорт в графене с различными интерфейсными условиями

© А.В. Бутко^{1,2}, В.Ю. Бутко^{1,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский академический университет — Научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vladimirbutko@gmail.com

(Поступила в Редакцию 8 декабря 2014 г.)

В интервале от комнатной температуры до температуры кипения азота исследовалось влияние интерфейса на электросопротивление химически осажденного из газовой фазы (CVD) графена. Сопротивление моно-слойного CVD-графена для случаев соприкосновения графена с подложками Si/SiO₂ и GaAs демонстрирует близкую к линейной металлическую температурную зависимость с практически совпадающим наклоном нормированных кривых. Данный наклон соответствует росту сопротивления графена на ~ 8% при нагреве от температуры кипения азота до комнатной. В этом же температурном интервале для четырехслойного графена наблюдается полупроводниковая температурная зависимость. Установлено, что напыление органического изолятора (парилена) на четырехслойный графен увеличивает наклон этой зависимости на ~ 5% и при комнатной температуре повышает сопротивление графена на ~ 20%.

Работа частично поддержана проектом РФФИ № 14-02-01212 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН.

1. Введение

Графен обладает рядом уникальных свойств, включая высокую механическую жесткость, гибкость, чувствительность (химическую и биологическую) и высокую подвижность носителей заряда (до $250\,000\text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$) [1]. Кроме того, высокая электропроводность в сочетании с прозрачностью является его важным преимуществом по сравнению с традиционными оптическими материалами. С учетом изложенного выше графен перспективен для создания нового поколения таких устройств, как большеформатные гибкие дисплеи, химические и биологические сенсоры, СВЧ-транзисторы, солнечные батареи и светодиоды.

Серьезной проблемой при использовании графена в электронике является сложность контроля его электрических свойств. Другой проблемой для широкого применения графена и родственных ему материалов является отсутствие простой технологии создания интегрированных электрических устройств в ситуации, в которой эти материалы использовались бы в поверхностном контакте с другими органическими или неорганическими структурами без значительного ухудшения электропроводности. С точки зрения решения этих проблем важное значение имеет исследование влияния на электропроводность графена его интерфейса с используемыми в электронике материалами. Особое внимание к таким исследованиям обусловлено тем, что графен, являющийся квазидвумерной системой, потенциально более чувствителен к состоянию поверхности, чем массивные мате-

риалы. В настоящее время установлено, что напыление неорганических материалов на графен может приводить к возникновению энергетической запрещенной зоны [2]. Физический механизм, ответственный за это явление, до сих пор не вполне понятен. Кроме того, большой теоретический интерес вызывают транспортные свойства графена на различных подложках [3,4]. Несмотря на важность влияния интерфейса на транспорт носителей заряда в графене, экспериментально это влияние исследовано слабо, особенно для химически осажденного из газовой фазы (CVD) графена, который является одним из наиболее перспективных для практического применения благодаря дешевизне и большой площади получаемых образцов. В силу изложенного выше задача настоящей работы состоит в исследовании влияния интерфейса на электросопротивление CVD-графена.

2. Экспериментальные методы

Условия синтеза и переноса слоев CVD-графена были аналогичными, описанным ранее в работах [5,6]. Измерения электрического сопротивления CVD-графена выполнялись четырехзондовым методом при постепенном погружении образца в жидкий азот. В качестве контактов на графене использовались золотые контактные площадки, полученные с помощью позитивной фотолитографии. Для исключения попадания остатков фотолитографических материалов на поверхность графена он переносился поверх уже сформированных контактных площа-

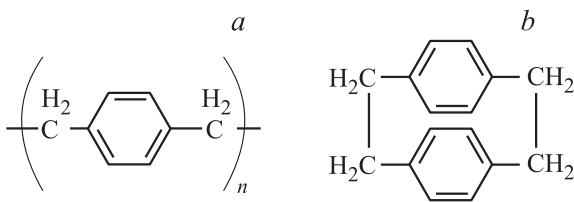


Рис. 1. Химические формулы парилена N (a) и парациклофана (b).

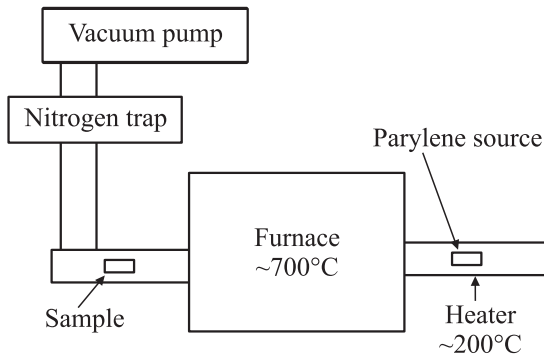


Рис. 2. Установка для напыления органического изолятора.

док. К первичным контактным площадкам с помощью серебряной пасты прикреплялись золотые контактные проволоки. Для исследования влияния интерфейса на электрический транспорт в графене использовались два способа.

В первом случае электрические свойства монослойного CVD-графена измерялись на двух различных подложках (Si/SiO₂ и GaAs). Выбор этих подложек был обусловлен в первую очередь важностью их использования в электронике и оптоэлектронике. Графен был расположен поверх золотых контактов толщиной ~ 100 nm с расстоянием между контактами ~ 20 μm. Идея этого способа заключалась в том, что при таком расстоянии между контактами графен обычно касается поверхности изолирующей подложки между контактами. В этом способе при создании интерфейса типа CVD-графен–неорганический изолятор удается избежать напыления неорганических изоляторов на поверхность графена, что могло бы привести к повреждению графена и уменьшению его электропроводности, не связанному с интерфейсом.

Во втором эксперименте использовалось напыление органического изолятора (парилена) на верхнюю (свободную) поверхность четырехслойного CVD-графена (4 является примерной средней оценкой числа атомных слоев в данных образцах графена). Измерения электропроводности графена проводились до и после напыления. Парилена является химически стабильным и биосовместимым полимерным диэлектриком. Его напыление на родственные графену органические материалы практически не приводит к ухудшению в них подвижности носителей заряда [7,8]. Важность изучения влияния напыле-

ния парилена на транспортные свойства графена определяется также возможностью использования парилена для создания полевых транзисторов на графене [9,10] и других родственных ему материалах [11–13]. Расстояние между золотыми контактными площадками составляло ~ 6 μm. На рис. 1, a показана химическая формула парилена N. Парилена N (поли-*n*-ксилилен) получается из парациклофана, называемого димерной формой парилена, путем нагрева парациклофана до 600–700°C. На рис. 1, b показана химическая формула парациклофана. На рис. 2 схематично изображена установка для напыления органического изолятора. Напыление проводилось в вакууме ~ 10⁻² Pa. Димерная форма парилена предварительно нагревалась в первой печи до ~ 200°C. Далее газообразный димер превращался в мономер при температуре ~ 700°C во второй печи. Выходя из второй печи и охлаждаясь, парилена напылялся в виде тонкой полимерной пленки на поверхность графена.

3. Результаты

На рис. 3 показаны измеренные зависимости нормированного электросопротивления монослойного CVD-графена на двух подложках (нормировка выполнена относительно величины электросопротивления графена при комнатной температуре). Абсолютная величина сопротивления монослойного CVD-графена „на квадрат“ была равна ~ 1 kΩ ~ 0.04R_Q, где R_Q = h/(e)² — квантовое сопротивление, являющееся предельной величиной сопротивления в графене [14] и играющее особую роль в других двумерных системах [15]. Из рис. 3 видно, что электрическое сопротивление монослойного CVD-графена в исследованном температурном диапазоне демонстрирует близкую к линейной металлическую температурную зависимость, практически совпадающую для обоих типов подложек.

На рис. 4, a и b показаны результаты измерений электросопротивления четырехслойного CVD-графена до и после напыления парилена. Нормировка на рис. 4, b выполнена относительно величины электросопротивления

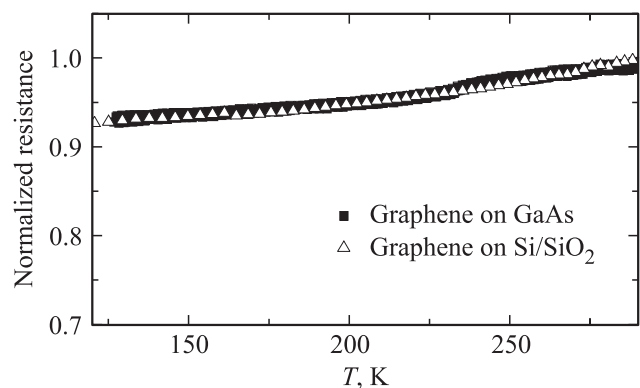


Рис. 3. Нормированное электрическое сопротивление монослойного графена на двух разных подложках.

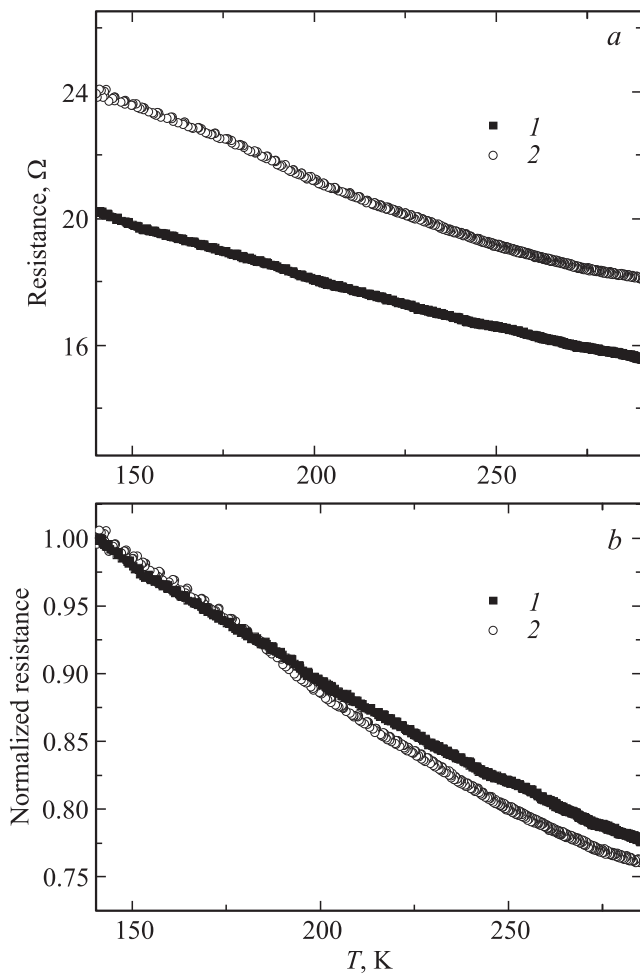


Рис. 4. Электрическое сопротивление (*a*) и нормированное электрическое сопротивление (*b*) четырехслойного графена до (1) и после (2) напыления органического полимера (парилена).

при температуре ~ 140 К. Видно, что для четырехслойного графена наблюдается полупроводниковая температурная зависимость. Увеличение электросопротивления четырехслойного графена при комнатной температуре после напыления парилена составляет приблизительно 20%. На рис. 4, *b* после напыления парилена наблюдается слабое ($\sim 5\%$) увеличение наклона полупроводниковой температурной зависимости нормированного электросопротивления.

4. Заключение

Показано, что электросопротивление CVD-графена слабо зависит от типа неорганического материала, находящегося в интерфейсном контакте с графеном. Продемонстрировано, что париленовый интерфейс увеличивает сопротивление, но слабо влияет на полупроводниковую температурную зависимость сопротивления четырехслойного CVD-графена. Наблюдаемый рост со-

противления графена при замене свободной поверхности графена интерфейсом графен–органический полимер может быть связан с влиянием такого интерфейса на π -орбитали графена.

Авторы благодарны А.В. Бабичеву, Ю.А. Кумзерову, А.Ю. Егорову, В.Э. Гасумянцу и Е.В. Никитиной за помощь.

Список литературы

- [1] M. Orlita, C. Faugeras, P. Plochocka, P. Neugebauer, G. Martinez, D.K. Maude, A.-L. Barra, M. Sprinkle, C. Berger, W.A. de Heer, M. Potemski. *Phys. Rev. Lett.* **101**, 267 601 (2008).
- [2] Y. Zhang, T. Tang, C. Girit, Z. Hao, M.C. Martin, A. Zettl, M.F. Crommie, Y.R. Shen, F. Wang. *Nature* **459**, 820 (2009).
- [3] С.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев. *ФТТ* **57**, 200 (2015).
- [4] С.Ю. Давыдов. *ФТТ* **56**, 816 (2014).
- [5] A.V. Babichev, V.E. Gasumyants, V.Y. Butko. *J. Appl. Phys.* **113**, 076 101 (2013).
- [6] А.В. Бабичев, В.Ю. Бутко, М.С. Соболев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Ю. Егоров. *ФТП* **46**, 815 (2012).
- [7] V.Y. Butko, J.C. Lashley, A.P. Ramirez. *Phys. Rev. B* **72**, 081 312 (2005).
- [8] V.Y. Butko, W. So, D.V. Lang, X. Chi, J.C. Lashley, A.P. Ramirez. *Physica B* **404**, 5221 (2009).
- [9] S.S. Sabri, P.L. Levesque, C.M. Aguirre, J. Guillemette, R. Martel, T. Szkopek. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 242 104 (2009).
- [10] G. Mordì, S. Jandhyala, C. Floresca, S. McDonnell, M.J. Kim, R.M. Wallace, L. Colombo, J. Kim. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 193 117 (2012).
- [11] V. Podzorov, V.M. Pudalov, M.E. Gershenson. *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1739 (2003).
- [12] V.Y. Butko, X. Chi, D.V. Lang, A.P. Ramirez. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4773 (2003).
- [13] V.Y. Butko, X. Chi, A.P. Ramirez. *Solid State Commun.* **128**, 431 (2003).
- [14] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos, A.A. Firsov. *Nature* **438**, 197 (2005).
- [15] V.Y. Butko, P.W. Adams. *Nature* **409**, 161 (2001).