

Полевой эффект в графене при интерфейсном контакте с водными растворами уксусной кислоты и гидроксида калия

© А.В. Бутко¹, В.Ю. Бутко^{1,2,¶}, С.П. Лебедев^{1,3}, А.А. Лебедев¹, Ю.А. Кумзеров¹

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

² Санкт-Петербургский академический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: vladimirybutko@gmail.com

(Поступила в Редакцию 28 марта 2017 г.)

Для создания новых перспективных химических сенсоров большое значение имеет исследование влияния на транзисторные характеристики графена его интерфейса с водными растворами кислот и щелочей. Созданы и исследованы транзисторные структуры на основе графена, выращенного путем термического разложения карбида кремния. Для интерфейса графена с водными растворами уксусной кислоты и гидроксида калия в транзисторной геометрии при изменении напряжения между затвором и истоком обнаружен полевой эффект, соответствующий дырочному типу носителей заряда в графене. Установлено, что увеличение концентрации молекулярных ионов в данных растворах приводит к усилению зависимости сопротивления транзистора от напряжения на затворе.

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 14-02-01212) и РНФ (проект № 15-12-00027).

DOI: 10.21883/FTT.2017.10.44981.097

1. Введение

Транзисторные структуры на основе графена перспективны для создания нового поколения химических и биологических сенсоров. Например, в работе [1] заявлено создание рН-транзисторного сенсора на основе четырехслойного графена, находящегося вблизи точки Дирака, полученного методом термического разложения карбида кремния, в котором исследуемая жидкость исполняет роль изолятора между поверхностью графена и затвором. Полевой транзистор был создан с помощью фотолитографии, контакты находились на расстоянии 0.5 mm. Исследователи регистрировали зависимость сопротивления графена от напряжения на затворе при различных значениях рН. При изменении рН раствора наблюдалось смещение точки Дирака (при увеличении рН раствора точка Дирака сдвигается в положительную сторону). Ряд результатов данной работы подвергся сомнению в других публикациях [2,3]. Таким образом, дальнейшее исследование транзисторных характеристик графена в области при его интерфейса с водными растворами кислот и щелочей имеет практическое значение. В настоящей работе проводится исследование графена, полученного с помощью термического разложения карбида кремния, который без дополнительной термической обработки находится вдали от точки Дирака.

2. Экспериментальные методы

Графен, получаемый с помощью термического разложения карбида кремния, является одним из наиболее перспективных материалов для практических приложений благодаря возможности использования высококачественных образцов большой площади. В настоящей работе для роста графена подложка карбида кремния нагревалась до $\sim 1400^\circ\text{C}$ в условиях вакуума $\sim 10^{-6}$ Torr в течение 10–20 min. Диагностика и оценка толщины (2–4 монослоя) исследуемых образцов графена была выполнена в работе [4] с использованием метода рамановской спектроскопии. Для проведения электрических измерений в настоящей работе контакты к графену изготавливались с использованием серебряной пасты и контактных золотых проволочек. Типичное расстояние между контактами было порядка 1 mm. Контактные площадки и барьерный изолятор в исследуемых устройствах расположены поверх изучаемого полупроводника (графена). Такая геометрия транзисторных структур схожа с геометрией исследованных нами ранее транзисторов на основе монокристаллов органических полупроводников [5,6]. Исследуемые в настоящей работе транзисторные структуры (рис. 1) аналогичны структурам графена с водным барьерным изолятором, описанным нами в [4]. В отличие от упомянутой публикации в настоящей работе в качестве барьерных изоляторов используются водные растворы кислот (уксусная кис-

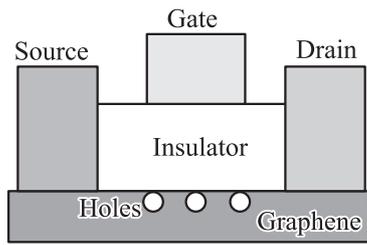


Рис. 1. Схема полевого транзистора.

лота) и щелочей (гидроксид калия) разной молярной концентрации. В изучаемых структурах потенциал на затворе направляет ионы в исследуемой жидкости к интерфейсу с графеном, что приводит к изменению электрических свойств графена. Серебряные контактные площадки изолировались от водных растворов при помощи клея GE Varnish. Измерения были автоматизированы и проводились в реальном времени с помощью программы, написанной нами на языке Lab VIEW. Измерения осуществлялись вольтметрами АКIP В7-78/1.

3. Результаты

Из рис. 2 видно, что при изменении напряжения между затвором и истоком наблюдается изменение сопротивления графена (полевой эффект). Рис. 2 демонстрирует также, что полученная зависимость от напряжения затвора различается для водных растворов уксусной кислоты и гидроксида калия на одном образце графена. Для водного раствора уксусной кислоты наблюдается ускоренное падение сопротивления полевого транзистора при достижении определенного порогового

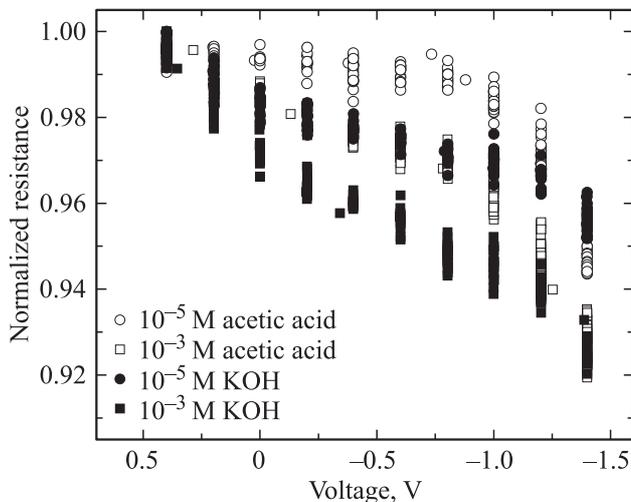


Рис. 2. Зависимость от напряжения между затвором и истоком сопротивления графена при его контакте с водным раствором уксусной кислоты и с водным раствором гидроксида калия на одном и том же образце.

напряжения на затворе, тогда как в области интерфейса графена со щелочным раствором гидроксида калия наблюдается практически линейная зависимость сопротивления полевого транзистора от напряжения между затвором и истоком. Полевой эффект в этих структурах связан с возможностью управления напряжением с помощью величины электрического заряда на интерфейсе графена с водным раствором. Обнаруженный полевой эффект соответствует дырочному типу носителей заряда в графене в отличие от электронного типа носителей заряда, характерного для монослойного графена, выращенного схожим методом [7]. Обнаруженное различие типа носителей заряда, возможно, частично обусловлено

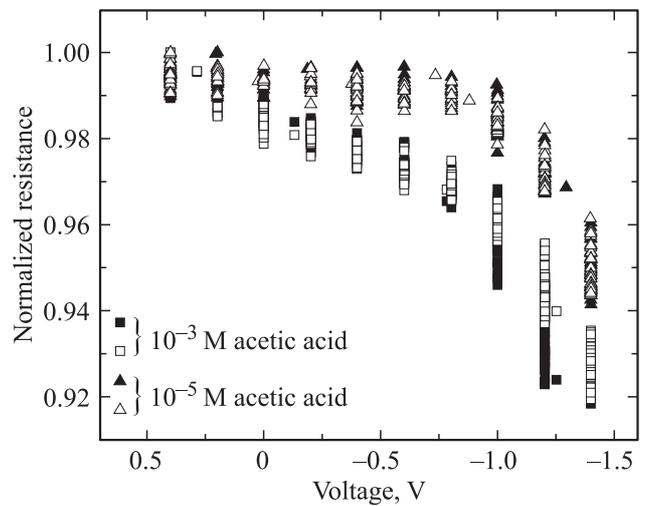


Рис. 3. Зависимость от напряжения между затвором и истоком сопротивления графена при его контакте с водным раствором уксусной кислоты для различных измерений при двух молярных концентрациях на одном образце.

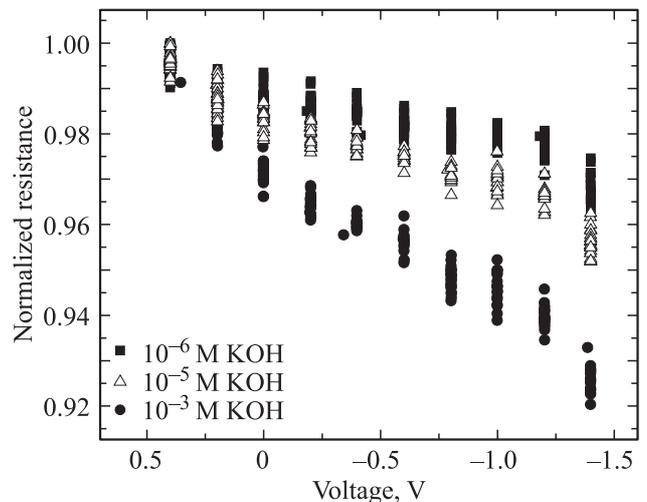


Рис. 4. Зависимость от напряжения между затвором и истоком сопротивления графена при его контакте с водным раствором гидроксида калия для трех молярных концентраций на одном образце.

дырочным допированием графена при его взаимодействии с молекулами водных растворов [8]. Из рис. 3 и 4 видно, что увеличение концентрации молекулярных ионов в данных растворах приводит к усилению зависимости сопротивления транзистора от напряжения между затвором и истоком.

4. Заключение

Обнаружен полевой эффект, знак которого демонстрирует, что дырки являются основным типом носителей заряда в исследуемом графене. Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности создания сенсоров на основе графена, которые позволяют определить молярную концентрацию для исследованных типов водных растворов кислот и щелочей.

Авторы благодарны В.Ю. Давыдову, А.Н. Смирнову, А.А. Сысоевой и А.В. Фокину за помощь.

Список литературы

- [1] P.K. Ang, W. Chen, A.T.S. Wee, K.P. Loh. *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 14392 (2008).
- [2] W. Fu, C. Nef, O. Knopfmacher, A. Tarasov, M. Weiss, M. Calame, C. Schonenberger. *Nano Lett.* **11**, 3597 (2011).
- [3] M.H. Lee, B.J. Kim, K.H. Lee, I.S. Shin, W. Huh, J.H. Cho, M.S. Kang. *Nanoscale* **7**, 7540 (2015).
- [4] А.В. Бутко, В.Ю. Бутко, С.П. Лебедев, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев, Ю.А. Кумзеров. *ФТТ* **58**, 1432 (2016).
- [5] V.Y. Butko, X. Chi, D.V. Lang, A.P. Ramirez. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4773 (2003).
- [6] V.Y. Butko, X. Chi, A.P. Ramirez. *Solid State Commun.* **128**, 431 (2003).
- [7] L.H. Hess, M.V. Hauf, M. Seifert, F. Speck, T. Seyller, M. Stutzmann, I.D. Sharp, J.A. Garrido. *Appl. Phys. Lett.* **99**, 033503 (2011).
- [8] T. Feng, D. Xie, G. Li, J. Xu, H. Zhao, T. Ren, H. Zhu. *Carbon* **78**, 250 (2014).