

07

## Полевой эффект при протонной и электронно-дырочной проводимости в транзисторе на основе оксида графена

© В.А. Смирнов<sup>1</sup>, А.Д. Мокрушин<sup>2</sup>, В.П. Васильев<sup>1</sup>,  
Н.Н. Денисов<sup>1</sup>, К.Н. Денисова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем химической физики РАН, Московская обл., Черноголовка

<sup>2</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Московская обл., Черноголовка

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
E-mail: vas@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 8 февраля 2016 г.

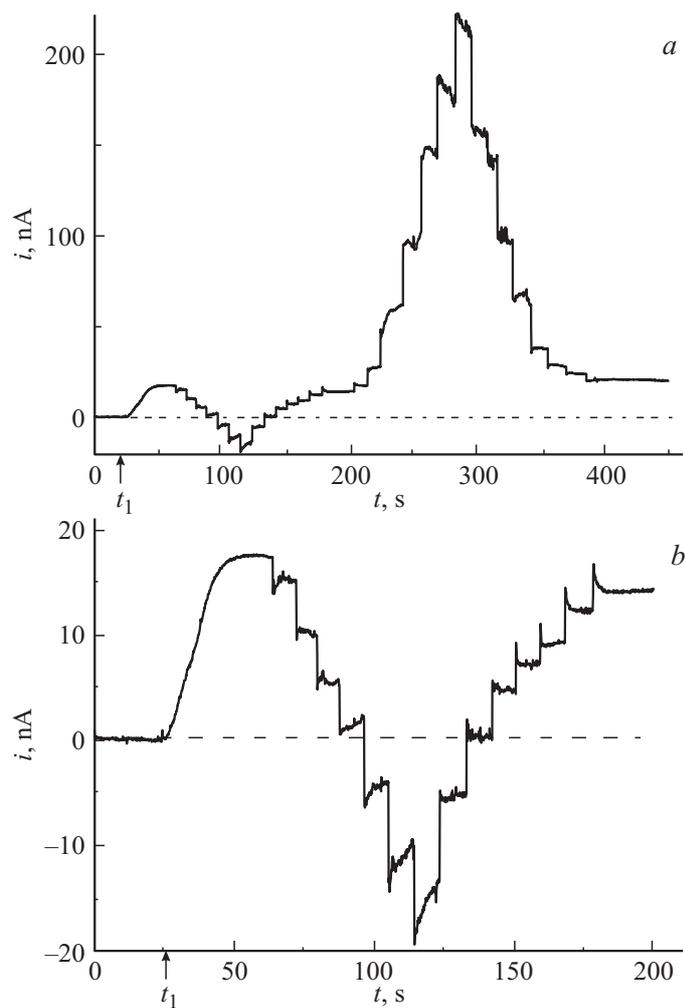
В пленках оксида графена можно наблюдать протонную (влажная атмосфера) и электронную (восстановленный оксид графена) проводимости. В транзисторе на основе оксида графена обнаружен и исследован полевой эффект при различных видах проводимости.

В основополагающей работе К.С. Новоселова, А.К. Гейма и др. [1] реализован и детально исследован полевой эффект (FE) в транзисторах с малой толщиной двумерного углеродного канала вплоть до графенового монослоя, высаженного на окисленную поверхность монокристаллической пластинки кремния. В работе были исследованы также магнитные явления в таких транзисторах. Эта работа вызвала взрывной интерес к объектам графенового типа, а результаты исследований можно найти в обзорных статьях [2–4]. Исследования FE-транзисторов на основе графена и окисленного кремния проведены в работах [5–7]. В работе [5] исследована подвижность носителей заряда в широком диапазоне температур. В работе [6] наблюдали смещение дираковской точки при обработке поверхности графена пучком электронов с энергией 30 keV. В работе [7] в FE-транзисторах использовали модифицированный графен (гетероструктуры), что позволило напряжением на затворе изменять ток на 4–5 порядков. В работе [8] в качестве изолирующего слоя предложено использовать

оксид графена (ОГ). Использование ОГ в качестве изолирующего слоя в FE-транзисторе также рассмотрено в работе [9]: на слое ОГ водородной плазмой создавался проводящий графеновый слой, а ОГ служил изолирующим слоем на затворе. ОГ использовался также в качестве изолирующего слоя в транзисторе, нанесенном на гибкий пластик, в котором в качестве активного слоя и электродов использовался графен [10].

ОГ в сухой атмосфере (относительная влажность  $RH < 7\%$ ) является изолятором с проводимостью  $\sigma < 10^{-7} \text{ S/cm}$ , а во влажной атмосфере он становится проводником с протонной проводимостью [11,12]. При частичном восстановлении, например химически (в парах гидразина), термически (нагрев при  $T > 130^\circ\text{C}$ ) или облучением УФ-светом, ОГ становится проводником с электронно-дырочной проводимостью. Влияние таких свойств ОГ на характеристики электронных устройств в литературе не исследовалось. В данной работе поставлена задача в модели полевого транзистора изучить влияние поперечного электрического поля на протонную и электронно-дырочную проводимость пленки ОГ, нанесенной на пластинку  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Получение ОГ и экспериментальные приемы приведены в [11]. Толщина пленки ОГ составляла около  $1 \mu\text{m}$ , использовались золотые электроды, расстояние между электродами  $2 \text{ mm}$ , толщина оксидного слоя  $\text{SiO}_2$  составляла  $0.1 \mu\text{m}$ . Токовые характеристики исследовались на потенциостате Р-20Х. Вся серия экспериментов проводилась на одном и том же образце.

На рис. 1 приведены токовые характеристики протонной проводимости транзистора — в образце присутствует лишь невосстановленный ОГ и электронная проводимость отсутствует. В сухой атмосфере при напряжении исток-сток  $V_{sd} = 1 \text{ V}$  ток отсутствует ( $i < 1 \text{ nA}$ ) даже при подаче на затвор напряжения  $V_g$  от  $-12$  до  $12 \text{ V}$ . При помещении транзистора во влажную атмосферу  $RH 75\%$  (время  $t_1$ ) в образце появляется ток, обусловленный протонной проводимостью (рис. 1, *b*). Примерно через минуту ток достигает насыщения, и тогда на затвор подается ступенчатое положительное напряжение. При этом ток транзистора начинает уменьшаться и даже меняет знак при достижении  $V_g = 6 \text{ V}$ . Уменьшение тока можно связать с электрон-протонной рекомбинацией. Последующая подача отрицательного напряжения ( $t > 200 \text{ s}$ ) существенно увеличивает ток. Как видно из рис. 1, при каждом переключении напряжения на затворе возникают токовые пики с постепенным спадом тока до некоторого стационарного значения.



**Рис. 1.** Протонная проводимость. *a* — токовые характеристики при помещении транзистора во влажную атмосферу RH 75% ( $t_1$ ), напряжение на затворе  $V_g$  изменяется ступенчато в диапазоне 0 – (+12 V) – 0 – (–12 V) – 0, ступень 1.5 V.  $V_{sd} = 1$  V. *b* — начальный участок рис. 1, *a*.

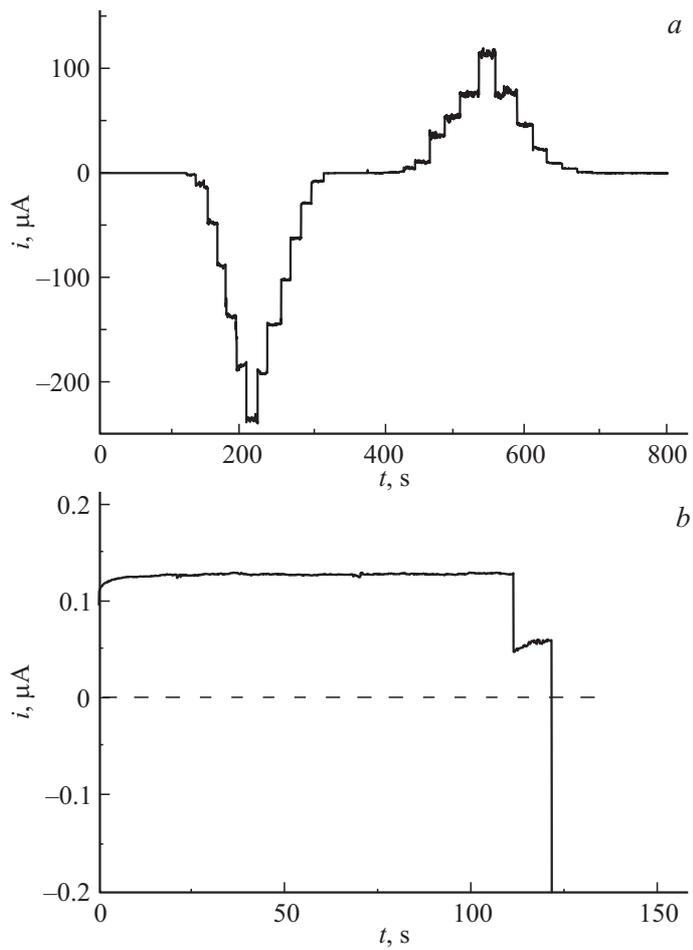
Такое явление обусловлено поляризационными свойствами молекул воды и заряженных фрагментов на плоскости наноллистов ОГ.

Последующее частичное восстановление ОГ приводит к появлению электронно-дырочной проводимости (рис. 2), а характер проводимости (электронной или дырочной) определяется знаком напряжения смещения. Начальный ток  $i_0 \approx 120$  нА, и этот ток зависит от степени восстановления ОГ. Полевой эффект в этом случае существенно меняет вид: при подаче на затвор положительного напряжения наблюдается увеличение тока транзистора (левый пик на рис. 2, *a*), что соответствует электронной проводимости в слое ОГ. Эти токи на три порядка превосходят токи протонной проводимости, представленной на рис. 1. Видно, что при отрицательном смещении (правый пик на рис. 2, *a*) дырочный ток примерно вдвое слабее электронного, и это можно объяснить различием величин дрейфовой подвижности электронов и дырок. На рис. 3 приведены линейные анаморфозы зависимостей, представленных на рис. 1 и 2.

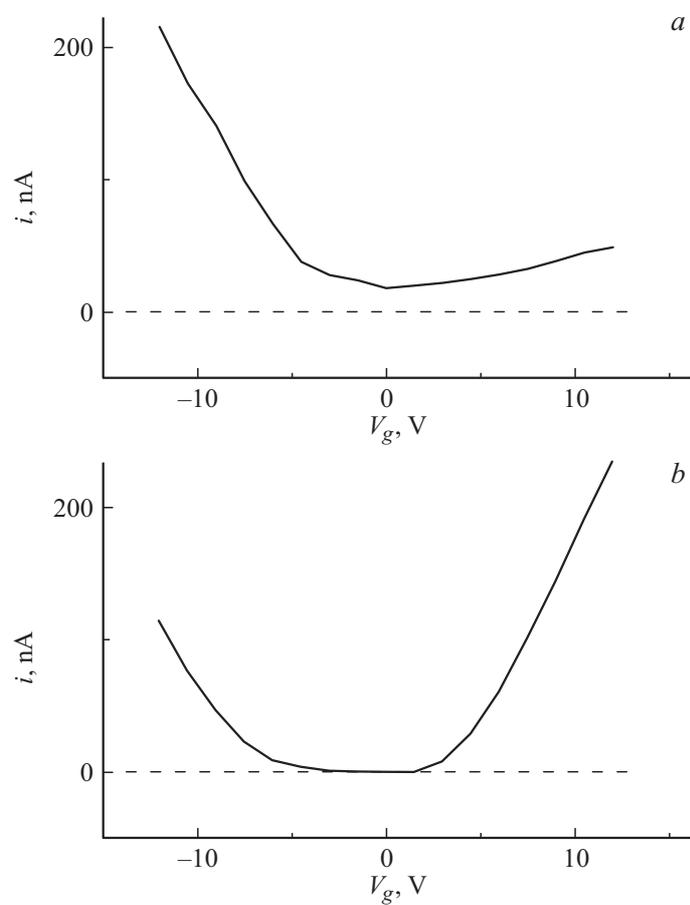
Следует обратить внимание на качественное и количественное отличие полевого эффекта при протонной и электронно-дырочной проводимостях. Во-первых, наблюдается инверсия зависимости тока от знака напряжения на затворе: отрицательное напряжение существенно увеличивает ток при протонной проводимости, а положительное смещение увеличивает электронную проводимость. Во-вторых, при электронной проводимости существенно увеличивается ток при тех же напряжениях на затворе по сравнению с протонной проводимостью — этот эффект можно объяснить различной подвижностью зарядов (электронов, дырок и протонов) в разных случаях.

Из рис. 3, *a* видно, что токи протонной проводимости при положительных смещениях остаются практически неизменными и не представляют интереса. Левая ветвь этого рисунка (отрицательное смещение) позволила оценить концентрацию протонов проводимости при разных смещениях. В нашем случае величина дрейфовой подвижности протонов принята равной величине, полученной в работе [13] для льда при температуре  $-5^\circ\text{C}$ :  $\mu_p = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . В таком случае концентрация протонов при нулевом смещении  $n_p = 0.4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , а при  $V_g = -12 \text{ V}$   $n_p = 4.4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , т.е. концентрация протонов при этом смещении увеличивается на порядок.

Анализ рис. 3, *b* при электронно-дырочной проводимости позволяет получить значения дрейфовой подвижности электронов и дырок при различных  $V_g$ , исходя из общего соотношения  $\sigma = ne\mu$  и с учетом



**Рис. 2.** Электронно-дырочная проводимость. *a* — токовые характеристики транзистора в сухом образце ( $\text{RH} < 7\%$ ) после частичного восстановления пленки ОГ в парах гидразина. Условия измерения те же, что и на рис. 1. *b* — начальный участок рис. 2, *a*,  $i_0 \approx 120$  нА.



**Рис. 3.** Зависимость тока от напряжения на затворе  $V_g$  при протонной (a) и электронно-дырочной (b) проводимости транзистора, построенная по данным рис. 1 и 2.

того, что  $V_{sd} = 1$  В. Например, при напряжении смещения  $V_g = 10$  В подвижность электронов  $\mu_e = 1.2 \cdot 10^2$  см<sup>2</sup>/(В · с), а дырочная подвижность  $\mu_h = 0.6 \cdot 10^2$  см<sup>2</sup>/(В · с), что примерно в 2 раза меньше электронной. Отметим, что в работе [14] для графенового слоя соотношение величин аналогичных подвижностей имеет обратный характер, причем сами подвижности ( $\mu \approx 10^4$  см<sup>2</sup>/(В · с)) существенно превышают наши значения. Это вполне естественно, поскольку графеновые пленки имеют гораздо более совершенную структуру по сравнению с толстыми (в десятки и даже сотни раз) пленками ОГ, в которых графеновые листы (восстановленные листы ОГ) расположены хаотично, а их восстановление произведено частично.

В работе показано, что полевой транзистор на основе ОГ при определенной степени восстановления может проявлять как протонную, так и электронно-дырочную проводимость. В последнем случае токи транзистора примерно на три порядка превышают токи протонной проводимости. Такие явления могут быть использованы для управления свойствами транзистора, например, в схемах датчиков и сенсоров. С другой стороны, влажность окружающей среды может существенно влиять на стабильность работы полевого транзистора, в котором ОГ используется в качестве изолирующего слоя.

## Список литературы

- [1] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. // *Science*. 2004. V. 306. P. 666.
- [2] Lemme M. // *Solid State Phenomena*. 2010. V. 156. P. 499.
- [3] Schwierz F. // *Nat. Nanotechnol.* 2010. V. 5. P. 486.
- [4] Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. // *Rev. Mod. Phys.* 2009. V. 81. P. 109.
- [5] Chen J.-H., Jang C., Xiao S., Ishigami M., Fuhrer M.S. // *Nat. Nanotechnol.* 2008. V. 3. P. 206.
- [6] Childres I., Jauregui L.A., Foxe M., Tian J., Jalilian R., Jovanovic I., Chen Y.P. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 97. P. 173 109.
- [7] Антонова И.В., Котин И.А., Небогатикова Н.А., Принц В.Я. // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. В. 19. С. 64.
- [8] Eda G., Nathan A., Wöbkenberg P., Colleaux F., Ghaffarzadeh K., Anthopoulos T.D., Chhowalla M. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. P. 133 108.
- [9] Standley B., Mendez A., Schmidgall E., Bockrath M. // *Nano Lett.* 2012. V. 12. P. 1165.

- 
- [10] *Lee S.-K., Jang H.Y., Jang S., Choi E., Hong B.H., Lee J., Park S., Ahn J.-H.* // Nano Lett. 2012. V. 12. P. 3472.
- [11] *Smirnov V.A., Denisov N.N., Ukshe A.E., Shulga Yu.M.* // Chem. Phys. Lett. 2013. V. 583. P. 155.
- [12] *Smirnov V.A., Denisov N.N., Dremova N.N., Volkovich Y.M., Rychagov A.Y., Sosenkin V.E., Belay K.D., Gutsev G.L., Shulga N.Y., Shulga Yu.M.* // Appl. Phys. A. 2014. V. 117. P. 1859.
- [13] *Kunst M., Warman J.M.* // Nature. 1980. V. 288. P. 465.
- [14] *Fallahazad B., Lee K., Lian G., Kim S., Corbet C.M., Ferrer D.A., Colombo L., Tutuc E.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 093112.