

30. Graphene oxide nanosheet with high proton conductivity / M.R. Karim [et al.] , K. Hatakeyama, T. Matsui, H. Takehira, T. Taniguchi, M. Koinuma, Y. Matsumoto, T. Akutagawa, T. Nakamura, S. Noro, T. Yamada, H. Kitagawa, S. Hayami // J. Am. Chem. Soc. – 2013. – V. 135, № 22. – P. 8097–8100.
31. Enhanced proton conductivity of graphene oxide/nafion composite material in humidity sensing application / S. Ghosh [et al.] , R. Ghosh, P.K. Guha, T.K. Bhattacharyya // IEEE Trans. Nanotechnol. – 2016. – V. 15, № 5. – P. 782–790.
32. Tunable graphene oxide proton/electron mixed conductor that functions at room temperature / K. Hatakeyama [et al.] , H. Tateishi, T. Taniguchi, M. Koinuma, T. Kida, S. Hayami, H. Yokoi, Y. Matsumoto // Chem. Mater. – 2014. – V. 26, № 19. – P. 5598–5604.
33. Agmon, N. The Grotthuss mechanism / N. Agmon // Chem. Phys. Lett. – 1995. – V. 244, № 5-6. – P. 456–462.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

**И. И. Абрамов, В. А. Лабунов, Н. В. Коломейцева,
И. А. Романова, И. Ю. Щербакова**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: nanodev@bsuir.edu.by*

В докладе описаны комбинированные модели полевых графеновых транзисторов (ПГТ) и резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе графена. С их помощью исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) приборов в различных режимах работы.

Ключевые слова: графен; комбинированные модели; полевой транзистор; моделирование; резонансно-туннельный диод; вольт-амперная характеристика.

THEORETICAL STUDIES OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS AND RESONANT TUNNELING DIODES BASED ON GRAPHENE

**I. I. Abramov, V. A. Labunov, N. V. Kolomejtseva,
I. A. Romanova, I. Y. Shcherbakova**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki str. 6, 220013
Minsk, Belarus,
Corresponding author: I. I. Abramov (nanodev@bsuir.edu.by)*

In the paper the combined models of graphene field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on graphene are presented. IV-characteristics were investigated with the use of the proposed models in different operating mode.

Key words: graphene; combined models; field-effect transistor; simulation; resonant tunneling diode; IV-characteristic.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства графена позволяют создавать приборы с высокими показателями быстродействия. К таким приборным структурам, в частности, относятся ПГТ и РТД на графене [1]. Для прогнозирования электрических характеристик ПГТ и РТД необходимы модели, адекватно описывающие их работу в различных режимах функционирования.

В данной работе описаны разработанные комбинированные модели ПГТ на основе однослойного графена и РТД на основе двухслойного графена. Также в докладе представлены результаты исследования электрических характеристик исследуемых приборов.

МОДЕЛИ

Предложенная модель графенового ПГТ является квантовой диффузионно-дрейфовой моделью и относится к классу комбинированных [2]. В ней применен самосогласованный расчет электростатического потенциала. Моделирование выходных характеристик на основе предложенной модели описано в работах [3,4]. В докладе рассмотрен более сложный случай моделирования передаточных характеристик. Особенностью модифицированной модели является применение метода дихотомии для учета влияния сопротивлений стока и истока.

Для проведения расчетов характеристик графеновых РТД использовалась разработанная комбинированная самосогласованная модель [5, 6] на основе формализма волновых функций. В модели выделяются три вида областей: омические контакты, протяженные приконтактные области и активная область. В активной области, к которой относятся потенциальные барьеры и квантовая яма, самосогласованно решаются уравнения Шредингера и Пуассона. В приконтактных областях используется бoльцмановская аппроксимация статистики Ферми-Дирака. Таким образом, при описании РТД применяются полуклассический и квантовомеханический подходы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием предложенной комбинированной самосогласованной модели промоделированы передаточные характеристики двухзатворного ПГТ на однослойном графене.

На рис. 1 проиллюстрировано влияние ширины канала на передаточные вольт-амперные характеристики ПГТ на однослойном графене. Для удобства сравнения с экспериментальными данными на графике показана зависимость плотности тока стока от напряжения на верхнем затворе. Кривая 1 соответствует ширине канала 25 мкм (согласно экспериментальным данным работы [7] (кривая 3)), а кривая 2 – ширине канала 5 мкм. Точке Дирака на кривой соответствует минимум плотности тока стока. Как видно из рисунка, изменение передаточных характеристик более заметно в области дырочной проводимости (слева от точки Дирака), чем в области электронной проводимости (справа от точки Дирака). Это можно объяснить более высокими значениями подвижности дырок в однослойном графене, по сравнению с подвижностью электронов.

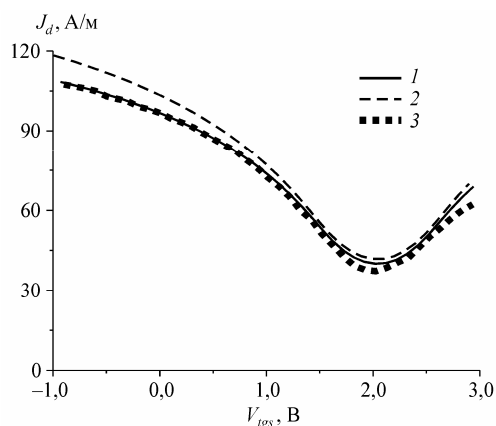


Рисунок 1. – ВАХ ПГТ

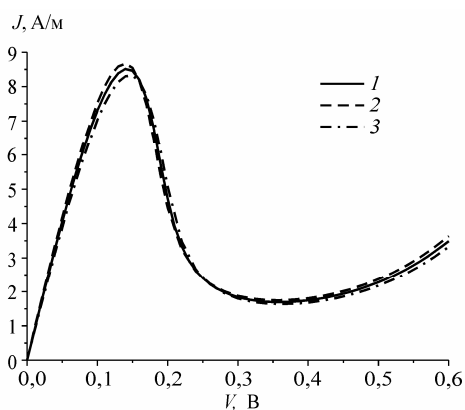


Рисунок 2. – ВАХ РТД

Проведены исследования характеристик двухбарьерного РТД на основе двухслойного графена на подложке гексагонального нитрида бора (h -BN) для различных величин высоты потенциальных барьеров (см. рис. 2).

Моделирование проводилось для РТД, в котором ширина квантовой ямы – 3,5 нм, ширины потенциальных барьеров – 1,2 нм, ширины приконтактных областей – 20 нм, концентрация примеси в приконтактных областях $N_d = 7,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$. Высоты потенциальных барьеров задавались в диапазоне значений 3,0–3,3 эВ. На рис. 2 представлены результаты моделирования ВАХ (точнее зависимости плотности тока от напряжения) РТД при температуре 300 К. Кривая 1 соответствует высоте барьеров 3,157 эВ (согласно данным работы [8]), кривая 2 – высоте барьеров 3,0 эВ, а кривая 3 – 3,3 эВ.

Из рис. 2 следует, что увеличение высоты потенциальных барьеров приводит к небольшому уменьшению значений плотностей пиковых токов. В то же время плотности токов долины изменяются незначительно. Это согласуется с результатами, полученными для РТД на основе графена на подложке диоксида кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы передаточные характеристики ПГТ на однослойном графене в зависимости от ширины канала. В разработанной модели использован оптимизационный метод дихотомии для учета влияния падения напряжений на сопротивлениях стока и истока. Также получены зависимости плотностей токов от напряжения для РТД на основе двухслойного графена на подложке h -BN для различных высот потенциальных барьеров.

Программы, реализующие разработанные модели ПГТ и РТД на графене, включены в систему моделирования нанoeлектронных приборных структур и устройств NANODEV [9, 10].

Работы проведены в рамках проектов Государственных программ научных исследований Республики Беларусь "Конвергенция" и "Нанотех".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ferrari A.C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K.S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // *Nanoscale*. – 2015. – Vol. 7. – P. 4598–4810.
2. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и нанoeлектроники. Монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 444 с.
3. Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами // *Нано- и микросистемная техника*. – 2017. – № 12. – С. 714-721.
4. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N.V., Romanova I. A. Simulation of field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on graphene // *Proc. of SPIE*. – 2016. – Vol. 10224. – P. 102240V-1-10.
5. Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А. Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложках различного типа // *Нано- и микросистемная техника*. – 2015. – № 11. – С. 3–10.
6. Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Лабунов В.А., Романова И.А. Моделирование резонансно-туннельных приборных структур на основе углеродных наноматериалов // *Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век*. – 2017. – №3, Т. 9. – С. 3–11.
7. Wang H., Hsu A., Antoniadis D.A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors // *IEEE Trans. Electron. Dev.* – 2011. – Vol. 58, No. 5. – P. 1523–1533.
8. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio // *2011 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. – 2011. – P. 11.4.1–11.4.4.
9. Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Игнатенко С.А., Королев А.В., Новик Е.Г., Рогачев А.И. Система моделирования нанoeлектронных приборов – NANODEV // *Микроэлектроника*. – 2003. – Т. 32, № 2. – С. 124–133.
10. Abramov I.I., Baranoff A.L., Goncharenko I.A., Kolomejtseva N.V., Bely Y.L., Shcherbakova I.Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // *Proc. of SPIE*. – 2010. – Vol. 7521. – P. 75211E-1-11.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ С НАНОАЛМАЗАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА В ВОДНЫХ СРЕДАХ

**Н. В. Белько¹, М. П. Самцов², Г. А. Гусаков², А. А. Луговский²,
В. А. Пархоменко¹, Е. С. Воропай¹**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: nikita.belko@gmail.com,*

²⁾ *Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь
samstov@bsu.by*

Исследованы процессы комплексообразования индотрикарбоцианинового красителя с ультрадисперсными алмазами детонационного синтеза в водных средах. Установлено, что эффективность связывания красителя с нанoалмазами зависит от типа их термической обработки. Показано, что более эффективно краситель взаимодействует с ультрадисперсными алмазами, отожженными в вакууме при 750 °С, по сравнению с образцами, отожженными в вакууме при 500 °С или в атмосфере воздуха