

Численное моделирование трехбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена

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

Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

 nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация

Описана разработанная комбинированная численная самосогласованная модель для расчета электрических характеристик многобарьерных наноструктур на основе двухслойного графена. С ее использованием рассчитаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) трех-, четырех- и пятибарьерных резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе графена на подложке диоксида кремния (SiO_2). Исследовано влияние ширины барьеров и квантовых ям на ВАХ трехбарьерных РТД на основе графена на подложке SiO_2 . Рассмотрены структуры с симметричными барьерами и ямами. Установлено, что увеличение ширины квантовых ям приводит к существенному уменьшению плотностей пиковых токов и токов долины, а увеличение ширины потенциальных барьеров приводит к незначительному уменьшению плотности тока первого пика, а также к увеличению плотностей токов второго пика и долины.

Рассчитаны также зависимости плотностей токов от напряжений для РТД с четырьмя и пятью барьерами на основе гексагонального нитрида бора (h-BN) и диоксида кремния (SiO_2) и квантовыми ямами на основе двухслойного графена. Проведено сравнение ВАХ исследованных РТД.

Ключевые слова

моделирование, графен, резонансно-туннельный диод, многобарьерные наноструктуры, формализм волновых функций, численная комбинированная модель

Для цитирования

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Численное моделирование трехбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):343–355. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.001

Numerical simulation of triple-barrier resonant tunneling diodes based on graphene

I. I. Abramov ✉, N. V. Kolomejtseva, V. A. Labunov,
I. A. Romanova, I. Yu. Shcherbakova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus

✉ nanodev@bsuir.edu.by

Abstract

Graphene exhibits a number of unique electrical, optical, thermal and other characteristics. Its use, in particular, is promising in the development of new nanoelectronics device structures. Conducting theoretical and experimental research of various types of nanostructures based on carbon nanomaterials will allow us to conclude which of them can later become a new device base for nanoelectronics.

A combined numerical self-consistent model for the electrical characteristics calculating of multi-barrier graphene-based nanostructures is described. The developed model of the wave function formalism is based on a numerical self-consistent solution of the Schrödinger and Poisson equations. This model is of the combined class, since it is based on the use of semiclassical and quantum-mechanical approaches for describing the contact and active regions of the structure.

Triple-barrier resonant tunneling diodes (RTDs) with quantum wells based on bilayer graphene are the objects of study in this work. The influence of the material of potential barriers on the current – voltage characteristics (IV– characteristics) of such structures is investigated. Corresponding calculations were carried out using the developed combined numerical self-consistent model. The influence of the widths of barriers and quantum wells on the IV-characteristics of triple-barrier RTDs based on graphene on a SiO₂ substrate is studied. Current densities vs voltage curves are obtained for such structures with symmetric barriers and wells. It was found that an increase in the width of quantum wells leads to a significant decrease in the density of peak currents and currents in the valley, and an increase in the width of potential barriers leads to a slight decrease in the current density of the first peak, as well as an increase in the current density of the second peak and valley.

The paper also presents the numerical simulation results of four- and five-barrier RTDs with quantum wells based on bilayer graphene. Multibarrier structures with barriers based on hexagonal boron nitride and silicon dioxide are studied. The influence of the potential barriers number and of their material on the shape of the IV-characteristics of the structures under study was analyzed.

Keywords

Simulation, graphene, resonant tunneling diode, multibarrier nanostructures, wave function formalism, combined numerical model

For citation

Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Yu. Numerical simulation of triple-barrier resonant tunneling diodes based on graphene. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):343–355. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.001

Введение

Развитие нанотехнологии последних десятилетий привело к созданию новых наноматериалов, обладающих широким спектром уникальных электрических, оптических и магнитных свойств. К ним можно отнести синтезированные двумерные материалы и гетероструктуры, состоящие из слоев графена и h-BN, MoS₂, WS₂, SnS₂, MoSe₂, WSe₂ и др. [1–3].

Прогресс в изучении графена и его свойств свидетельствует о возможности его применения не только в электронной промышленности, но также и в других отраслях народного хозяйства [4]. Графен может использоваться в электронных компонентах и интегральных схемах (ИС), в частности при создании транзисторов, диодов, суперконденсаторов и т.п. Так, например, диоды и транзисторы на основе графена обладают рядом преимуществ перед полупроводниковыми аналогами, среди которых можно выделить высокую рабочую частоту приборов вследствие высокой подвижности носителей заряда в графене. Эти компоненты могут с успехом использоваться в качестве активных элементов высокочастотных генераторов и сверхбыстродействующих логических вентилей, а, следовательно, их применение в вычислительной технике может привести к существенному росту ее производительности.

Проектирование наноэлектронных схем с использованием приборных наноструктур на основе графена и доведение их до производства без соответствующего инструментария моделирования фактически невозможны. В связи с этим разработка адекватных физико-математических моделей и средств моделирования электрических свойств квантово-размерных наноструктур на основе графена является актуальной задачей. В НИЛ 4.1. БГУ-ИР, начиная с 2014 г., ведется разработка моделей приборных структур на основе графена и углеродных нанотрубок, в том числе моделей для исследования характеристик РТД [5–7] и графеновых транзисторов [7–9].

В качестве объектов исследования в данной работе выбраны многобарьерные квантово-размерные наноструктуры на основе графена. Перспективность использования многобарьерных структур на основе углеродных материалов связана с возможностью проектирования на их основе логических ячеек, лазеров,

солнечных элементов, фотодетекторов [4]. Массивы РТД недавно использовались в качестве терагерцовых осцилляторов [10]. Наш опыт исследования многоостровковых одноэлектронных цепочек и массивов [11–14] показывает, что подобный подход может использоваться, с одной стороны, для построения цепочек и матриц многобарьерных резонансно-туннельных структур, а с другой – для разработки функционально-интегрированных элементов ИС [14; 15] на их основе.

Используемая модель

Разработанная модель для расчета электрических характеристик многобарьерных наноструктур на основе двухслойного графена относится к классу комбинированных [14], так как основана на применении полуклассического и квантовомеханического подходов для описания приконтактных и активных областей структуры. Для учета эффектов сильного легирования в приконтактных областях применяется больцмановская аппроксимация статистики Ферми – Дирака [14]. Концентрация электронов в активной области находится в результате самосогласованного численного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона. Для рассматриваемых многобарьерных РТД на основе графена к активной области относятся потенциальные барьеры и расположенные между ними квантовые ямы. Количество потенциальных барьеров и ям, их форма и геометрические размеры могут варьироваться.

В качестве исходной численной самосогласованной модели использовалась комбинированная модель приборных структур работы [6], адаптированная для случая расчета многобарьерных РТД на основе графена. Используемые уравнения, начальные условия, а также полученные в результате конечно-разностной аппроксимации соотношения для граничных и внутренних точек приборной структуры приведены в работах [6; 16; 17].

Рассмотрим необходимые особенности реализации разработанной модели. Сначала задаются данные об исследуемой структуре, к которым относятся: число областей, их размеры, высота и форма барьеров, эффективная масса, диэлектрическая проницаемость материалов областей и концентрация легирующей примеси. Далее выбирается алгоритм построения сетки пространственной дискретизации, а именно: равномерной или неравномерной сетки в зависимости от требований к решаемой задаче. Задаются также исходные параметры для моделирования, которыми являются прикладываемое смещение или диапазон его изменения, диапазон энергий для расчета коэффициента прозрачности и шаг изменения этих параметров, а также

температура и квазиуровень Ферми. Именно на этом этапе задается требуемая точность проведения расчетов.

Для начала расчетов необходимо определить начальное приближение для потенциала, которое задается исходя из предположений электронейтральности и справедливости для подвижных носителей заряда бoльцмановской аппроксимации статистики Ферми – Дирака для всего прибора. После этого с помощью самосогласованного численного решения одномерных уравнений Шредингера и Пуассона решается транспортная задача для зоны проводимости. При этом уравнение Пуассона решается во всей области приборной структуры между контактами, а уравнение Шредингера в заданной области, включающей активную. В результате вычислений находится самосогласованный потенциал и заряд в приборе.

На втором этапе численно решается только уравнение Шредингера для зоны проводимости. На основе полученных волновых функций рассчитывается коэффициент прохождения. Плотность тока рассчитывается на основе известной формулы Тсу-Есаки.

Результаты моделирования

Структура исследуемых трехбарьерных РТД на основе графена и соответствующая зонная диаграмма при нулевом напряжении представлены на рис. 1.

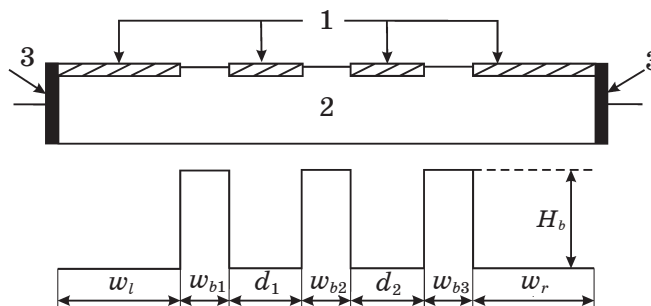


Рис. 1. Структура трехбарьерного РТД на основе графена и энергетическая диаграмма зоны проводимости: 1 – графен; 2 – подложка; 3 – контакты

Fig. 1. Triple-barrier graphene-based RTD structure and conduction band energy: 1 – graphene; 2 – substrate; 3 – contacts

К активной области трехбарьерных РТД относятся области барьеров с ширинами w_{b1} , w_{b2} , w_{b3} и высотой H_b , а также заключенные между ними квантовые ямы с ширинами d_1 и d_2 . Пассивными областями для данных структур являются области графена со стороны эмиттера и коллектора, расположенные

между контактами и барьерами активной области с ширинами w_l и w_r соответственно (рис. 1). Моделирование проводилось следующих основных параметрах: ширины приконтактных областей – 17 нм, концентрация примеси в приконтактных областях $N_D = 7,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$, температура окружающей среды – 300 К. Высота потенциальных барьеров H_b в рассматриваемой структуре составляет 3,58 эВ [18], а эффективная масса для двухслойного графена задавалась равной $0,041m_0$ (m_0 – масса покоя электрона) [19]. Ширины квантовых ям и потенциальных барьеров варьировались.

Было проведено исследование влияния ширины потенциальных барьеров на ВАХ (точнее зависимости плотности тока от напряжения; в дальнейшем просто ВАХ) трехбарьерного РТД. На рис. 2 приведены результаты моделирования для трех случаев, когда ширины барьеров равны: $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,2$ нм (кривая 1); $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,3$ нм (кривая 2) и $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,4$ нм (кривая 3). При этом ширины квантовых ям фиксировались и задавались равными $d_1 = d_2 = 3,4$ нм. Установлено, что увеличение ширин потенциальных барьеров приводит к незначительному уменьшению плотности тока первого пика, а также к увеличению плотностей токов второго пика и долины.

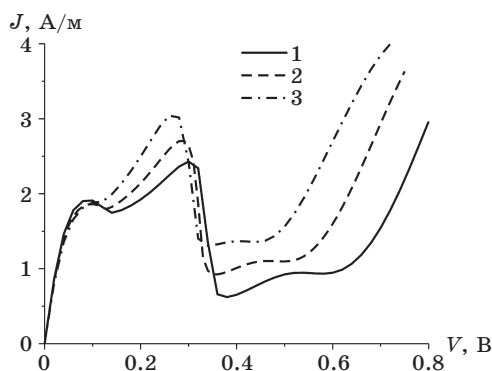


Рис. 2. Влияние ширин потенциальных барьеров на ВАХ трехбарьерного РТД на основе графена на подложке SiO_2

Fig. 2. Influence of potential barriers widths on the IV-characteristics of a triple-barrier graphene-based RTD on a SiO_2 substrate

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния ширин квантовых ям для трех случаев, а именно: $d_1 = d_2 = 3,0$ нм (кривая 1); $d_1 = d_2 = 3,4$ нм (кривая 2) и $d_1 = d_2 = 4,0$ нм (кривая 3). При этом ширины потенциальных барьеров фиксировались и задавались равными $w_{b1} = w_{b2} = w_{b3} = 1,3$ нм. Видно, что увеличение ширин квантовых ям приводит к существенному уменьшению плотностей пиковых токов и токов долины.

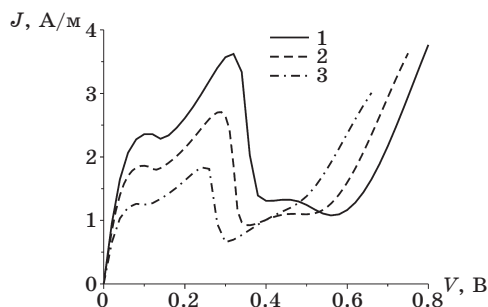


Рис. 3. Влияние ширины квантовых ям на ВАХ трехбарьерного РТД на основе графена на подложке SiO_2

Fig. 3. Influence of quantum well widths on the IV-characteristics of a triple-barrier graphene-based RTD on a SiO_2 substrate

Ранее в работе [20] были представлены результаты исследования влияния ширины квантовых барьеров и ям на ВАХ трехбарьерных РТД на основе гетероструктуры графен/h-BN. Полученные результаты моделирования трехбарьерных РТД на подложках SiO_2 и h-BN качественно согласуются. Однако отметим, что для структур на подложке SiO_2 изменение ширины квантовых барьеров и ям приводит к более существенному изменению плотностей пиковых токов и токов долины, что связано с влиянием материала подложки.

Рисунки 4 и 5 иллюстрирует результаты моделирования ВАХ четырех- и пятибарьерных РТД на основе двухслойного графена. Кривые 1 (рис. 4, 5) получены для многобарьерных РТД на подложке h-BN, а кривые 2 – для РТД на подложке SiO_2 . Ширины барьеров этих РТД задавались равными 1,3 нм, а квантовых ям 3,4 нм. Высота потенциальных барьеров H_b для РТД на основе графена на подложках h-BN и SiO_2 составляла 3,137 эВ [21] и 3,58 эВ [18] соответственно.

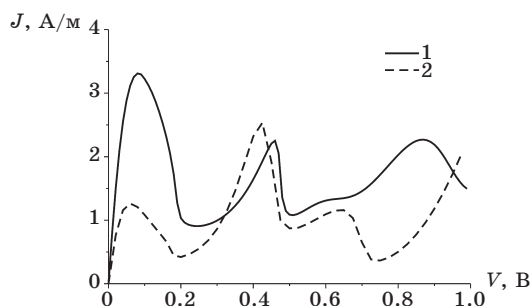


Рис. 4. ВАХ четырехбарьерных РТД на основе графена на подложках h-BN (кривая 1) и SiO_2 (кривая 2)

Fig. 4. IV-characteristics of graphene-based four-barrier RTDs on h-BN (curve 1) and SiO_2 (curve 2) substrates

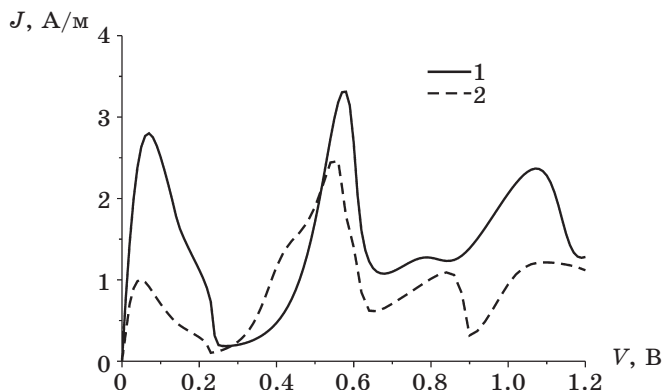


Рис. 5. ВАХ пятибарьерных РТД на основе графена на подложках h-BN (кривая 1) и SiO₂ (кривая 2)

Fig. 5. IV-characteristics of graphene-based five-barrier RTDs on h-BN (curve 1) and SiO₂ (curve 2) substrates

Как следует из графиков на рис. 4 и 5, разработанная комбинированная численная самосогласованная модель может использоваться для расчета ВАХ РТД на основе более сложных четырех- и пятибарьерных гетероструктур графен/h-BN и графен/SiO₂.

Заключение

Исследовано влияние ширин барьеров и квантовых ям на ВАХ трехбарьерных РТД на основе графена на подложке SiO₂. Получены зависимости плотностей токов от напряжений для трехбарьерных РТД на основе графена с симметричными барьерами и ямами. Установлено, что увеличение ширин квантовых ям приводит к существенному уменьшению плотностей пиковых токов и токов долины, а увеличение ширин потенциальных барьеров приводит к незначительному уменьшению плотности тока первого пика, а также к увеличению плотностей токов второго пика и долины.

Проиллюстрирована применимость разработанной комбинированной численной самосогласованной модели для расчета ВАХ РТД и на основе более сложных четырех- и пятибарьерных структур на подложках h-BN и SiO₂.

Программа, реализующая разработанную модель, включена в систему моделирования наноэлектронных устройств NANODEV, разрабатываемую в БГУИР с 1995 г. [22; 23].

Описанные в статье результаты были доложены на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».

Литература

1. Aliofkhazraei M., Ali N., Milne W. I., Ozkan C. S., Mitura S., Gervasoni J. L. (eds) *Graphene science handbook: Applications and industrialization*. CRC Press; 2016.
2. Dragoman M., Dragoman D. *2D Nanoelectronics: physics and devices of atomically thin materials*. Springer International publishing; 2017.
3. Ратников П. В., Силин А. П. Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы. *Успехи физических наук*. 2018;188(12):1249–1287. DOI: 10.3367/UFNr.2017.11.038231
4. 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;(7):4598–4810. DOI: 10.1039/C4NR01600A
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):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):3–11.
7. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on carbon nanomaterials. In: *Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018 (15 March 2019)*, 110220F. DOI: 10.1117/12.2520729
8. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами в различных режимах функционирования. *Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век*. 2018;(3):16–24. DOI: 10.18127/j22250980-201803-02
9. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование передаточных характеристик двухзатворных полевых графеновых транзисторов. *Нано- и микросистемная техника*. 2018;(11):643–650. DOI: 10.17587/nmst.20.643-650
10. Kasagi K., Suzuki S., Asada M. Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1THz. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(15):151601. DOI: 10.1063/1.5051007
11. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Характеристики металлических одноэлектронных транзисторов на различных материалах. *Физика и техника полупроводников*. 2000;34(8):1014–1019.
12. Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г. Влияние параметров конструкции и материалов на вольт-амперные характеристики двухостровковых одноэлектронных структур. *Физика и техника полупроводников*. 2002;36(10):1272–1277.
13. Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г. Модель многоостровковых одноэлектронных цепочек на основе метода Монте-Карло. *Физика и техника полупроводников*. 2003;37(5):583–587.

14. Абрамов И. И. *Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2016.
15. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. V. Резонансно-туннельные структуры. *Нано- и микросистемная техника*. 2007;(3):57–70.
16. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В. Комбинированная модель резонансно-туннельного диода. *Физика и техника полупроводников*. 2005;39(9):1138–1145.
17. Абрамов И. И., Гончаренко И. А. Численная комбинированная модель резонансно-туннельного диода. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2002;7(3):54–60.
18. Xu K., Zeng C., Zhang Q., Yan R., Wang K., Seabaugh A. C., Xing H. G., Suehle J. S., Richter C. A., Gundlach D. J., Nguyen N. V. Direct measurement of Dirac point energy at the graphene/oxide interface. *Nano Lett.* 2013;13(1):131–136.
19. Zou K., Hong X., Zhu J. Effective mass of electrons and holes in bilayer graphene: Electron-hole asymmetry and electron-electron interaction. *Physical Review B*. 2011;84:085408. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.085408
20. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Численное моделирование многобарьерных резонансно-туннельных структур на основе двухслойного графена. В: *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО'2017): материалы 27-й Междунар. Крымской конф., г. Севастополь, 10–16 сентября 2017 г.* Севастополь: Севастоп. гос. ун-т; 2017. Т. 4. С. 1108–1114.
21. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio. In: *2011 International Electron Devices Meeting, 5–7 Dec. 2011*. Washington, DC, USA; 2011. DOI: 10.1109/IEDM.2011.6131533
22. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования наноэлектронных приборов – NANODEV. *Микроэлектроника*. 2003;32(2):124–133.
23. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities. In: *Proc. SPIE 7521, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2009, (26 February 2010)*, 75211E. DOI: 10.1117/12.853521

References

1. Aliofkhazraei M., Ali N., Milne W. I., Ozkan C. S., Mitura S., Gervasoni J. L. (eds) *Graphene science handbook: Applications and industrialization*. CRC Press; 2016.
2. Dragoman M., Dragoman D. *2D Nanoelectronics: physics and devices of atomically thin materials*. Springer International publishing; 2017.
3. Ratnikov P. V., Silin A. P. Two-dimensional graphene electronics: current status and prospects. *Phys. Usp.* 2018;188(12):1249–1287. (In Russ.) DOI: 10.3367/UFNr.2017.11.038231

4. 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;(7):4598–4810. DOI: 10.1039/C4NR01600A
5. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of Graphene Resonant Tunneling Diodes on the Substrates of Various Types. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2015;(11):3–10.
6. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of resonant tunneling devices based on carbon nanomaterials. *Nanotekhnologii, razrabotka, primeneniye: XXI vek = Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century*. 2017;(3):3–11. (In Russ.)
7. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on carbon nanomaterials. In: *Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018 (15 March 2019)*, 110220F. DOI: 10.1117/12.2520729
8. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors with one and two gates in various operation modes. *Nanotekhnologii, razrabotka, primeneniye: XXI vek = Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century*. 2018;(3):16–24. (In Russ.) DOI: 10.18127/j22250980-201803-02
9. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of Transfer Characteristics of Dual-Gate Graphene Field-Effect Transistors. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2018;(11):643–650. DOI: 10.17587/nmst.20.643-650
10. Kasagi K., Suzuki S., Asada M. Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1THz. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(15):151601. DOI: 10.1063/1.5051007
11. Abramov I. I., Novik E. G. Parameters of metal single-electron transistors based on different materials. *Semiconductors*. 2000;34(8):975–980.
12. Abramov I. I., Ignatenko S. A., Novik E. G. Influence of the design and material parameters on the current-voltage characteristics of two-island single-electron chains. *Semiconductors*. 2002;36(10):1192–1197.
13. Abramov I. I., Ignatenko S. A., Novik E. G. Model of multi-island single-electron arrays based on the Monte Carlo method. *Semiconductors*. 2003;37(5):564–568.
14. Abramov I. I. *Bases of micro- and nanoelectronic devices simulation*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2016. (In Russ.)
15. Abramov I. I. Problems and Principles of Physics and Simulation of Micro- and Nanoelectronics Devices. Part V. Resonant-Tunneling Structures. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2007;(3):57–70. (In Russ.)

16. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V. A combined model of a resonant-tunneling diode. *Semiconductors*. 2005;39(9):1102–1109.
17. Abramov I. I., Goncharenko I. A. Combined numerical model of a resonant-tunneling diode. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy*. 2002;7(3):54–60. (In Russ.)
18. Xu K., Zeng C., Zhang Q., Yan R., Wang K., Seabaugh A. C., Xing H. G., Suehle J. S., Richter C. A., Gundlach D. J., Nguyen N. V. Direct measurement of Dirac point energy at the graphene/oxide interface. *Nano Lett.* 2013;13(1):131–136.
19. Zou K., Hong X., Zhu J. Effective mass of electrons and holes in bi-layer graphene: Electron-hole asymmetry and electron-electron interaction. *Physical Review B*. 2011;84:085408. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.085408
20. Abramov I. I., Kolomeitseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Numerical simulation of multi-barrier resonant tunneling structures based on bi-layer graphene. In: *Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2017). Proceedings of the 27 International Conference, Sevastopol, September 10–16, 2017. Sevastopol: Sevastopol State University; 2017. Vol. 4, pp. 1108–1114. (In Russ.)*
21. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio. In: *2011 International Electron Devices Meeting, 5–7 Dec. 2011. Washington, DC, USA; 2011. DOI: 10.1109/IEDM.2011.6131533*
22. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korolev A. V., Novik E. G., Rogachev A. I. NANODEV: A Nanoelectronic-Device Simulation Software System. *Russian Microelectronics*. 2003;32(2):97–104. DOI: 10.1023/A:1022604118886
23. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities. In: *Proc. SPIE 7521, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2009, (26 February 2010), 75211E. DOI: 10.1117/12.853521*

Благодарности

Финансирование работы проведено в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» («Нанотех»).

Acknowledgments

Funding was carried out in the framework of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus “Functional and Composite Materials, Nanomaterials” (“Nanotech”).

Информация об авторах

Абрамов Игорь Иванович, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, заведующий НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Коломейцева Наталья Владимировна, научный сотрудник НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Лабунув Владимир Архипович, доктор технических наук, академик НАН Беларуси, академик РАН, профессор, заведующий НИЛ 4.6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Романова Ирина Анатольевна, научный сотрудник НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Щербакова Ирина Юрьевна, младший научный сотрудник НИЛ 4.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

Information about the authors

Igor I. Abramov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Laboratory, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Natali V. Kolomejtseva, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Vladimir A. Labunov, Academician of NASB, Academician of RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Irina A. Romanova, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Irina Y. Shcherbakova, Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; P. Browka St. 6, Minsk, 220013, Belarus.

Поступила / Received: 02.12.2019

Принята в печать / Accepted: 15.12.2019