



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-71-78>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.794.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА И НИТРИДА БОРА

МУРАВЬЕВ В.В., МИЩЕНКО В.Н.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 27 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Приведены результаты моделирования процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, содержащей графен и слои гексагонального нитрида бора, с использованием метода Монте – Карло. Графен рассматривается в настоящее время как один из наиболее перспективных материалов для создания новых полупроводниковых приборов в высокочастотных диапазонах работы. Использование графена, который обладает высокой подвижностью носителей заряда, высокой теплопроводностью и рядом других положительных свойств, позволяет разработать новые полупроводниковые приборы с хорошими выходными характеристиками. Путем моделирования получены основные характеристики переноса электронов – зависимости скорости, средней энергии, подвижности от напряженности электрического поля в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена и области из нитрида бора. Моделирование процессов переноса электронов производилось с учетом изменения температуры слоев графена и нитрида бора, что наблюдается с увеличением напряженности электрического поля в структуре. Анализ полученных зависимостей показал, что при небольших значениях напряженности электрического поля, которые не превышают величину, равную приблизительно 2,5 кВ/см, наблюдается нелинейное изменение температуры структуры. При более значительных значениях напряженности электрического поля отмечается квазилинейное изменение температуры. Аналогичный вид зависимостей наблюдается и для зависимостей средней энергии электронов от напряженности электрического поля, полученных для слоя графена. Полученные зависимости характеристик переноса электронов могут служить основой для определения выходных характеристик в многослойных полупроводниковых приборах, содержащих слои графена, гексагонального нитрида бора и других материалов.

Ключевые слова: графен, нитрид бора, процессы переноса электронов, метод Монте – Карло.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Моделирование процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре с использованием графена и нитрида бора. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 71-78.

SIMULATION OF ELECTRON TRANSFER PROCESSES IN A SEMICONDUCTOR STRUCTURE USING GRAPHENE AND BORON NITRIDE

VALENTIN V. MURAVYOV, VALERY N. MISHCHENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Submitted 27 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This paper presents the results of simulating the electron transfer processes in a three-dimensional semiconductor structure containing graphene and layers of boron hexagonal nitride using the Monte – Carlo method. Graphene is currently considered one of the most promising materials for the creation of new semiconductor devices with good performance for high frequency ranges. The use of graphene, which has high mobility of charge carriers, high thermal conductivity and a number of other positive properties, allows the development of new semiconductor devices with good output characteristics. The simulation allowed us to obtain the main characteristics of electron transfer, namely, dependence of speed, average energy, mobility on the strength of the electric field in a semiconductor structure containing a layer of graphene and boron nitride region. Electron transfer processes were simulated considering temperature variations of graphene and boron nitride layers, which is observed with increasing strength of the electric field in the structure. The analysis of the obtained dependencies showed that at small values of electric field strength, which does not exceed approximately 2.5 kV/cm, there is a nonlinear change in electron energy and temperature. At more significant values of electric field strength a quasi-linear change in temperature is observed. The similar course of dependence is observed also for the dependences of the average energy of electrons on the intensity of the electric field for the graphene layer.. The resulting dependencies of electron transfer characteristics can serve the basis for determining output characteristics in multi-layer semiconductor devices containing layers of graphene, boron hexagonal nitride and other materials.

Keywords: graphene, boron nitride, electron transfer processes, Monte – Carlo method.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Muraviev V.V., Mishchenko V.N. Simulation of electron transfer processes in a semiconductor structure using graphene and boron nitride. Doklady BSUIR. 2020; 18(7): 71-78.

Введение

В настоящее время наблюдается большой рост разрабатываемых электронных приборов с использованием перспективного двумерного материала графена. Конструирование таких приборов для диапазонов СВЧ и КВЧ с улучшенными выходными характеристиками ставит задачи подбора сопутствующих графену диэлектрических и полупроводниковых материалов, которые бы обеспечили реализацию его уникальных электронных характеристик. Одним из перспективных материалов, которые рассматриваются для этих целей, является гексагональный нитрид бора (BN). Он имеет ряд положительных свойств: близкая к графену структура кристаллической решетки, низкая величина шероховатости поверхности, большой зазор между долинами зоны проводимости и валентной зоны, сравнительно высокое значение коэффициента теплопроводности. Известны конструкции полупроводниковых приборов с использованием графена и нитрида бора [1–3]. Однако детальный анализ работы таких приборов либо отсутствует, либо проводится с использованием упрощенных дейф-диффузионных моделей [3, 4]. Одним из наиболее известных методов анализа полупроводниковых структур считается метод Монте – Карло, который позволяет детально исследовать процессы переноса носителей заряда для реальных приборов [5, 6]. Целью данной статьи является исследование процессов переноса электронов с учетом их основных механизмов рассеяния на основе метода Монте – Карло в полупроводниковой структуре с использованием слоя графена, размещенного между двумя областями из гексагонального BN.

Метод и особенности моделирования параметров переноса электронов

Метод Монте – Карло [5, 6] был использован для исследования процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, которая состояла из монослоя графена, размещенного между двумя областями, выполненными из гексагонального BN. Такое построение в целом соответствует экспериментальной структуре, рассмотренной в [7].

Были выбраны следующие размеры моделируемой полупроводниковой структуры. Значение толщины слоя графена равнялось $0,34 \cdot 10^{-9}$ м [8]. Величина толщины верхнего слоя нитрида бора принималась равной $55 \cdot 10^{-9}$ м, толщины нижнего слоя нитрида бора – $32 \cdot 10^{-9}$ м, длины структуры – $4 \cdot 10^{-6}$ м, ширина структуры – $2 \cdot 10^{-6}$ м. Представленные выше размеры соответствовали размерам экспериментальной структуры, которая описана в [7]. Для реализации метода Монте – Карло количество моделируемых частиц для всей структуры со слоем графена и областями из гексагонального BN принималось равным 25 600. Полупроводниковая структура разбивалась по длине (координата x) на 100 элементарных ячеек, по высоте (координата y) – на 256 элементарных ячеек. Контактные области, которые представлены в [7], в процедуре моделирования с применением метода Монте – Карло не рассматривались, однако данные о них были использованы для расчета величины плотности выходного тока.

Для гексагонального BN значения электрофизических параметров и параметров долин выбирались из данных, полученных в [8, 9]. Для этого материала характерна трехдолинная К-М-Г-зонная диаграмма [8, 9]. Для долины К наблюдается наименьший энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной.

В разработанной программе моделирования процессов переноса носителей заряда с использованием метода Монте – Карло для областей, состоящих из материала BN, были учтены наиболее важные механизмы рассеяния: на оптических фононах, на ионизированных примесях, на акустических фононах, междолинное рассеяние между неэквивалентными долинами. Для слоя графена рассматривались следующие механизмы рассеяния: на полярных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах, на поверхностных оптических фононах, связанных с границей раздела графен и BN, а также дополнительно учитывалось электрон-электронное рассеяние [10, 11].

Для расчета величины энергии E электронов в графене использовалась зависимость этого параметра от волнового вектора k , представленная формулой из [12, 13]:

$$E = \hbar \cdot v_F \cdot \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}, \quad (1)$$

где k_x, k_y, k_z – составляющие волнового вектора (волновые числа) вдоль координат x, y, z соответственно, v_F – скорость Ферми в графене, величина которой принималась равной $1,5 \cdot 10^8$ см/с [7], \hbar – редуцированная постоянная Планка.

Моделирование средней дрейфовой скорости электронов для представленной структуры проводилось с применением выражения из [7]:

$$v = \frac{I}{e \cdot n_{sh} \cdot w_{sh}}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, I – выходной ток структуры, n_{sh} – концентрация электронов, w_{sh} – ширина структуры. Величина тока I определялась для всей структуры при использовании метода Монте – Карло. Значения параметров n_{sh} и w_{sh} соответствовали данным, описанным в [7].

Моделирование средней величины подвижности электронов выполнялся по формуле из [6]:

$$\mu = \frac{v}{F}, \quad (3)$$

где v – средняя дрейфовая скорость электронов, F – напряженность электрического поля.

Результаты моделирования

Результаты моделирования процессов переноса электронов в рассмотренной выше структуре, которая содержит слой графена, размещенного между областями из гексагонального BN, в зависимости от величины напряженности электрического поля F представлены на рис. 1–3.

На рис. 1, *a* представлены результаты расчета зависимости плотности выходного тока в полупроводниковой структуре, описанной выше, от напряженности электрического поля при различных значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2).

На рис. 1, *b* показаны зависимости средней дрейфовой скорости электронов в полупроводниковой структуре от напряженности электрического поля. Кривыми 1 и 3 на рис. 1, *b* показаны зависимости скорости электронов, полученные путем моделирования с использованием разработанного алгоритма и программы, использующей метод Монте – Карло, при концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12}$ и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно. При моделировании зависимостей скорости электронов, представленных кривыми 1 и 3 на рис. 1, *b*, а также других зависимостей, кроме оговоренных особо, использовалась специальная итерационная методика учета изменения температуры слоя графена и слоев BN. Суть этой методики заключалась в изменении температуры с учетом сравнения полученной при моделировании средней скорости электронов и аналогичного значения средней скорости электронов, которое получено экспериментально. Кривыми 2 и 4 на рис. 1, *b* показаны зависимости скорости электронов, полученные экспериментально [7], при концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12}$ и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Кривыми 5 и 6 на рис. 1, *b* показаны зависимости скорости электронов, полученные путем моделирования с использованием разработанного алгоритма и программы, использующей метод Монте – Карло, при концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12}$ и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно, но при этом предполагалось, что температура слоя графена и прилегающих слоев нитрида бора не изменялась и составляла величину 300 К.

Как видно из анализа кривых 1–4, представленных на рис. 1, *b*, наблюдается довольно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных при учете изменения температуры в рассмотренной структуре. С другой стороны, видно, что кривые 5 и 6, полученные без учета изменения температуры, значительно расходятся с экспериментальными данными, которые представлены кривыми 2 и 4 на рис. 1, *b*.

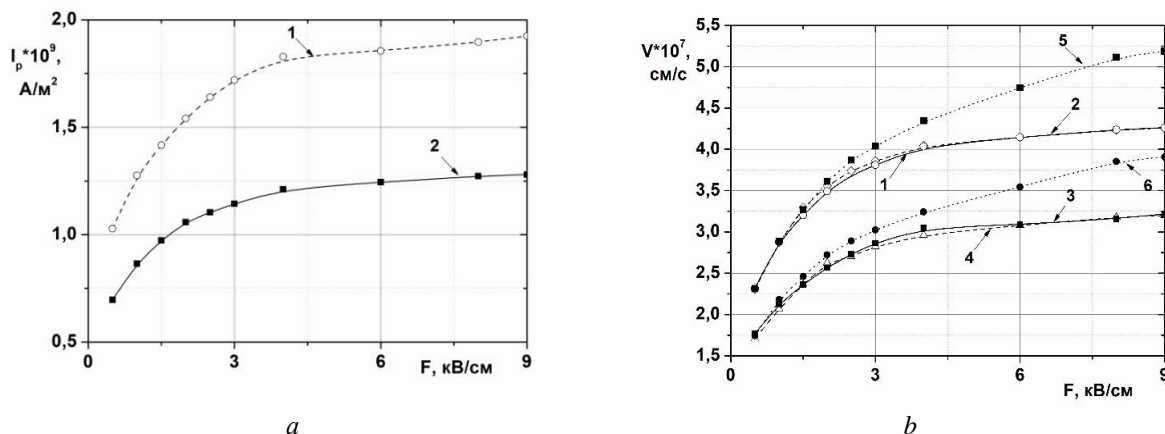


Рис. 1. Зависимости выходного тока (*a*) и средней дрейфовой скорости (*b*) от напряженности электрического поля

Fig. 1. Dependence of output current (*a*) and average drift velocity (*b*) on the electric field strength

На рис. 2, *a* показаны зависимости изменения температуры слоев графена и нитрида бора в полупроводниковой структуре от напряженности электрического поля при значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит увеличение температуры полупроводниковой структуры. Причем при небольших значениях

напряженности электрического поля наблюдается нелинейный, близкий к параболическому вид зависимостей изменения температуры (до значений напряженности, не превышающих приблизительно 2,5 кВ/см). При значительном увеличении напряженности электрического поля выше отмеченной величины наблюдаются квазилинейные зависимости.

На рис. 2, *b* представлены полученные путем моделирования зависимости подвижности электронов для описанной выше структуры при значениях концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей, выполненный с учетом формулы (3), показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит монотонное, нелинейное уменьшение подвижности электронов, что объясняется более существенным увеличением напряженности электрического поля по сравнению с ростом средней скорости электронов.

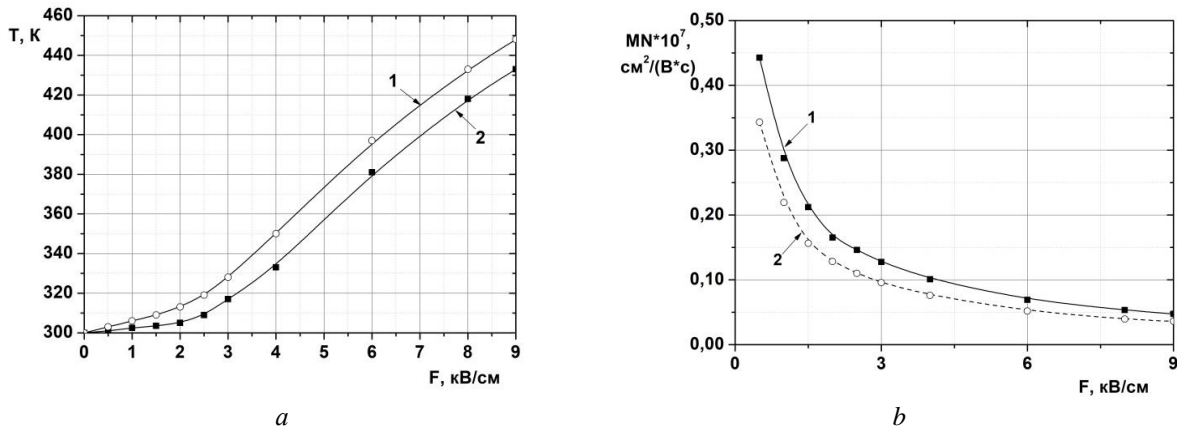


Рис. 2. Зависимости температуры слоев графена и нитрида бора (*a*), подвижности электронов (*b*) от напряженности электрического поля

Fig. 2. Dependence of the temperature of graphene and boron nitride layers (*a*), of the average speed of electrons in a single layer of graphene (*b*) on the electric field strength

Использование метода Монте – Карло позволяет исследовать процессы переноса носителей заряда не только для всей представленной структуры, но и в ряде ее выделенных областей. Особый интерес вызывают процессы переноса электронов в слое графена. С использованием этого подхода получены и показаны на рис. 3 зависимости средних значений энергии и дрейфовой скорости электронов для выделенного слоя графена, расположенного, как описано выше, между слоями из материала h-BN.

На рис. 3, *a* представлены полученные путем моделирования зависимости энергии электронов в одиночном слое графена, входящем в состав описанной выше структуры, при значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит увеличение энергии электронов в одиночном слое графена. Причем при небольших значениях напряженности электрического поля наблюдается нелинейный, параболический вид зависимостей изменения энергии электронов (до значений напряженности, не превышающих приблизительно 2,5 кВ/см). Такой ход зависимости можно трактовать влиянием окружающих слоев материала h-BN в процессе перехода электронов из этих слоев в слой графена и обратно. При значительном увеличении напряженности электрического поля, выше отмеченной величины, средняя энергия возрастает и наблюдаются квазилинейные зависимости, которые близки к зависимостям, описываемых уравнением (1). Анализ этих данных показывает, что здесь строгой линейной зависимости не наблюдается, что говорит о влиянии на слой графена окружающих его областей из материала h-BN, но это влияние становится слабее, чем при более низких значениях напряженности электрического поля.

На рис. 3, *b* представлены полученные путем моделирования зависимости средней скорости электронов в одиночном слое графена, входящем в состав описанной выше структуры, при значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит монотонное квазилинейное увеличение средней скорости электронов в одиночном слое графена.

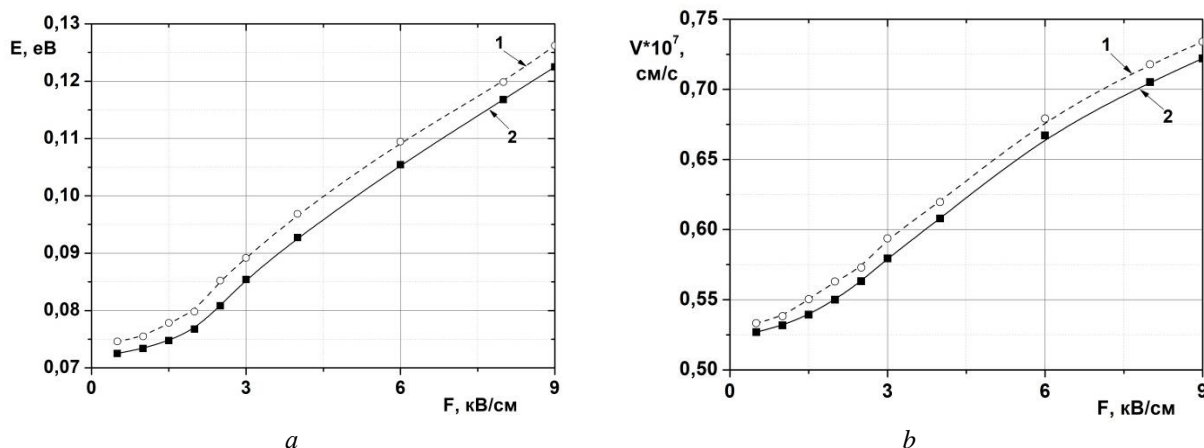


Рис. 3. Зависимости энергии электронов (а) и средней скорости электронов (b) в одиночном слое графена от напряженности электрического поля

Fig. 3. Dependence of the energy (a) and mobility of electrons (b) in a single layer of graphene on the electric field strength

Заключение

Представлены результаты моделирования процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре, содержащей графен и две области из гексагонального BN, с использованием метода Монте – Карло. В результате выполненных исследований были получены наиболее важные характеристики переноса электронов – зависимости средних значений скорости, энергии, подвижности от напряженности электрического поля. Моделирование процессов переноса электронов показало необходимость учета изменения температуры слоев графена и нитрида бора, что наблюдается с увеличением напряженности электрического поля. Анализ полученных зависимостей показал, что при небольших значениях напряженности электрического поля, которые не превышают величину, равную приблизительно 2,5 кВ/см, наблюдается нелинейное изменение температуры структуры. При более значительных значениях напряженности электрического поля наблюдается квазилинейное изменение температуры. Выполненные исследования процессов переноса электронов в слое графена показали на похожий характер изменения величины средней энергии электронов. Отмеченные выше особенности полученных характеристик можно трактовать как результат сложных процессов переноса носителей заряда в слоях графена и гексагонального BN, входящих в состав исследуемой структуры. Опираясь на полученные зависимости характеристик переноса электронов в исследованной структуре, создаются предпосылки применения метода Монте – Карло для определения выходных характеристик в многослойных полупроводниковых приборах, содержащих слои графена, гексагонального BN и других материалов.

Список литературы

1. Stolyarov M., Liu G., Shur M., Balandin A. Suppression of $1/f$ in near-ballistic h-BN-graphene-h-BN heterostructure field-effect transistors. *Applied Physics Letters*. 2015;107:023106. DOI.org/10.1063/1.4926872.
2. Lee K.H., Shin H.J., Lee J., Lee I.Y., Kim G.H., Choi J.Y., Kim S.W. Large-Scale Synthesis of High-Quality Hexagonal Boron Nitride Nanosheets for Large-Area Graphene Electronics. *Nano Letters*. 2012;12:714. DOI.org/10.1021/nl203635v.
3. Свинцов Д.А., Вьюрков В.В., Лукичев В.Ф., Буренков А., Охснер Р. Туннельные полевые транзисторы на основе графена. *Физика и техника полупроводников*. 2013;47(2):244-250.
4. Serov A.Y., Ong Z.-Y., Fischetti M.V., Pop E. Theoretical analysis of high-field transport in graphene on a substrate. *Journal of Applied Physics*. 2014;116:034507-1. DOI.org/10.1063/1.4884614.
5. Hockney R., Eastwood J. *Numerical simulation using particles*. М.; 1987.
6. Шур М. *Современные приборы на основе арсенида галлия*. Москва: Мир; 1991.

7. Yamoah M.A., Yang W., Pop E., Goldhaber-Gordon D. High Velocity in Graphene Encapsulated by Hexagonal Boron Nitride. *Nano*. 2017;11:9914-9919. DOI: 10.1021/acsnano.7b03878.
8. Wang J., Ma F., Sun M. A. Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications. *RSA Advances*. 2017;7:16801. DOI:10.1039/c7ra00260b.
9. *Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. Ed. by Levinshtin M.E., Romyantsev S.L., Shur M.S. New York: John Wiley&Sons; 2001.
10. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Интенсивности рассеивания носителей заряда в графене, расположенном на подложке из гексагонального нитрида бора. *Доклады БГУИР*. 2019;7-8(126): 141-148. DOI: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-141-148>.
11. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Определение интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена. *Доклады БГУИР*. 2017;6(108):42-47.
12. Jyotsna C., Jing G. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Appl. Phys. Letters*. 2009;95:023120. DOI.org/10.1063/1.3182740.
13. Tian F., Aniruddha K., Huili X., Debdeep J. High-field transport in two-dimensional graphene. *Physical Review*. 2011;B84:125450. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125450.

References

1. Stolyarov M., Liu G., Shur M., Balandin A. Suppression of 1/f in near-ballistic h-BN-graphene-h-BN heterostructure field-effect transistors. *Applied Physics Letters*. 2015;107:023106. DOI.org/10.1063/1.4926872.
2. Lee K.H., Shin H.J., Lee J., Lee I.Y., Kim G.H., Choi J.Y., Kim S.W. Large-Scale Synthesis of High-Quality Hexagonal Boron Nitride Nanosheets for Large-Area Graphene Electronics. *Nano Letters*. 2012;12:714. DOI.org/10.1021/nl203635v.
3. Svintsov D.A., Vyurkov V., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A., Burenkov A., Ohsner R. [Tunneling field effect transistors based on graphene]. *Физика и техника полупроводников=Physics and Technology of Semiconductors*. 2013;47(2):224-250. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.115452. (In Russ.)
4. Serov A. Y., Ong Z.-Y., Fischetti M. V., Pop E. Theoretical analysis of high-field transport in graphene on a substrate. *Journal of Applied Physics*. 2014;116:034507-1. DOI.org/10.1063/1.4884614.
5. Hockney R., Eastwood J. *Numerical simulation using particles*. M; 1987.
6. Shur M. [*Sovremennye pribory na osnove arsenida gallija*]. Moscow: Mir; 1991. (in Russ.)
7. Yamoah M. A., Yang W., Pop E., Goldhaber-Gordon D. High Velocity in Graphene Encapsulated by Hexagonal Boron Nitride. *Nano*. 2017;11:9914-9919. DOI: 10.1021/acsnano.7b03878.
8. Wang J., Ma F., Sun M. A. Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications. *RSA Advances*. 2017;7:16801. DOI:10.1039/c7ra00260b.
9. *Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. Ed. by Levinshtin M.E., Romyantsev S.L., Shur M.S. New York: John Wiley&Sons; 2001.
10. Murav'ev V.V., Mishhenko V.N. [Intensivnosti rasseivaniya nositelei zariada v graphene, raspologennom na podlogke iz geksogonalnogo nitrida bora]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;7-8(126):141-148. DOI: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-141-148>. (in Russ.)
11. Murav'ev V.V., Mishhenko V.N. [Opređenje intensivnostej rasseivaniya jelektronov v odinochnom sloe grafena avtorov]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;6(108):42-47. (in Russ.)
12. Jyotsna C., Jing G. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Appl. Phys. Letters*. 2009;95:023120. DOI.org/10.1063/1.3182740.
13. Tian F., Aniruddha K., Huili X., Debdeep J. High-field transport in two-dimensional graphene. *Physical Review*. 2011;B84:125450. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125450.

Вклад авторов

Муравьев В.В. предложил идею проведения моделирования процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена, расположенного между областями из гексагонального нитрида бора.

Мищенко В.Н. выполнил моделирование процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена, расположенного между областями из гексагонального нитрида бора.

Authors' contribution

Muravyov V.V. proposed the idea of simulating the transfer of electrons in a semiconductor structure containing a layer of graphene, located between the layers of boron nitride.

Mishchenko V.N. simulated electron transfer processes in a semiconductor structure containing a layer of graphene, located between the layers of boron nitride.

Сведения об авторах

Муравьев В.В., д.т.н., чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мищенко В.Н. к.т.н., доцент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-394-55-58;
+375-17-293-80-70;
e-mail: mishchenko@bsuir.by
Мищенко Валерий Николаевич

Information about the authors

Muravyov V.V., D.Sci, Corr. mem. of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Mishchenka V.N. PhD, Associate Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-394-55-58;
+375-17-293-80-70;
e-mail: mishchenko@bsuir.by
Mishchenka Valery Nickolaevich