



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-141-148>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.794.61

ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕИВАНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ГРАФЕНЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ ГЕКСОГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

МУРАВЬЕВ В.В., МИЩЕНКО В.Н.

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

Поступила в редакцию 28 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Приведены результаты моделирования интенсивностей рассеивания носителей заряда в графене, расположенном на подложке из гексогонального нитрида бора. Графен считается перспективным материалом для формирования новых полупроводниковых приборов с хорошими характеристиками для диапазонов СВЧ и КВЧ. Представлены формулы, которые позволяют выполнить моделирование основных интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена, размещенном на подложке из нитрида бора. Получены зависимости интенсивности рассеивания на оптических фонах, связанных с границей раздела между графеном и слоем из гексогонального нитрида бора при изменении толщины зазора между этими слоями. Моделирование основных интенсивностей рассеивания производилось как для обычной температуры, равной 300 К, так и для повышенной, равной 370 К, что связано с необходимостью учета повышения температуры слоя графена при увеличении энергии электронов. Анализ полученных зависимостей показал, что при значениях энергии электронов, которые превышают величину, равную приблизительно 0,165 эВ, наблюдается преобладание рассеивания электронов на оптических фонах, присущих внутреннему слою графена, электрон-электронного рассеивания, а также рассеивания на оптических фонах, связанных с границей раздела между графеном и слоем из гексогонального нитрида бора, над другими видами рассеивания. При низких значениях энергии, которые меньше чем приблизительно 0,03 эВ, преобладает рассеивание на примесях над другими видами рассеивания. Опираясь на полученные зависимости интенсивностей рассеивания электронов в графене, становится возможной реализация статистического метода Монте – Карло для определения характеристики переноса электронов в полупроводниковых приборах, содержащих слои графена и гексогонального нитрида бора.

Ключевые слова: графен, нитрид бора, полупроводниковая структура, интенсивность рассеивания, процессы переноса электронов, метод Монте – Карло.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Интенсивности рассеивания носителей заряда в графене, расположенном на подложке из гексогонального нитрида бора. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 141–148.

THE INTENSITY OF SCATTERING OF CHARGE CARRIERS IN GRAPHENE, LOCATED ON A SUBSTRATE OF HEXAGONAL BORON NITRIDE

VALENTIN V. MURAVYOV, VALERY N. MISHCHENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 28 November 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The results of modeling the scattering intensities of charge carriers in graphene located on a substrate of hexagonal boron nitride are presented. Graphene is considered a promising material for the formation of new semiconductor devices with good characteristics for the microwave and HF bands. Formulas are presented that allow modeling of the main electron scattering intensities in a single layer of graphene placed on a substrate of boron nitride. The dependences of the scattering intensity on optical phonons associated with the interface between graphene and a layer of hexagonal boron nitride are obtained when the thickness of the gap between these layers changes. Simulation of fixed rate dispersion was carried out as for normal temperature equal to 300 K and at elevated – equal to 370, which is connected with the necessity of considering the temperature rise of the graphene layer with increasing electron energy. The analysis of the obtained dependences showed that at electron energy values that exceed a value equal to approximately 0.165 eV, there is a predominance of electron scattering on optical phonons inherent in the inner layer of graphene, electron-electron scattering, as well as scattering on optical phonons associated with the interface between graphene and a layer of hexagonal boron nitride, over other types of scattering. At low energy values, which are less than about 0.03 eV, the dispersion on impurities prevails over other types of dispersion. Based on the obtained dependences of electron scattering intensities in graphene, it becomes possible to implement the Monte – Carlo statistical method to determine the characteristics of electron transfer in semiconductor devices containing layers of graphene and hexagonal boron.

Keywords: graphene, boron nitride, semiconductor structure, scattering intensity, electron transfer processes, Monte – Carlo method.

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

For citation. Muraviev V.V., Mishchenko V.N. The intensity of scattering of charge carriers in graphene, located on a substrate of hexagonal boron nitride. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 141-148.

Введение

Для анализа процессов переноса носителей заряда и их последующего рассеивания в полупроводниковых структурах широкое применение нашел статистический метод Монте – Карло. Разработан ряд полупроводниковых структур, которые содержат слои графена, размещенные на подложке из нитрида бора (BN) [1–3]. Использование BN в качестве подложки для графена привлекает рядом положительных свойств: близкая к графену структура кристаллической решетки, низкая шероховатость поверхности, большой зазор между нижней и верхними долинами в зоне проводимости, относительно большие значения энергий оптических мод. Отмеченные достоинства BN позволяют надеяться на создание новых конструкций полупроводниковых приборов диапазонов СВЧ и КВЧ с улучшенными характеристиками. Однако для изучения работы таких приборов и разработки новых конструкций необходим детальный анализ процессов переноса носителей заряда. Целью данной работы является исследование интенсивностей рассеивания электронов в графене, размещенном на подложке из BN.

Определение интенсивностей рассеивания электронов в графене

В полупроводниковых структурах обычно рассматриваются следующие механизмы рассеивания электронов: рассеяние на внутренних оптических фононах, на поверхностных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах и электрон-электронное рассеивание [4].

Интенсивность рассеивания на поверхностных оптических фононах при испускании фононов может быть найдена с помощью выражения, представленного в [4]:

$$\frac{1}{\tau_{so}^+} = \frac{n_q^+ \cdot e^2 \cdot E_{so}}{4 \cdot \pi \cdot \hbar^2 \cdot v_F \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{k_d^\infty} - \frac{1}{k_d^0} \right) \cdot \left(\frac{x+1}{x} \right) \cdot I^+(x, u) \cdot \theta(E - E_{so}). \quad (1)$$

Аналогичное выражение для определения интенсивности рассеивания на поверхностных оптических фононах при поглощении фононов [4]:

$$\frac{1}{\tau_{so}^-} = \frac{n_q^- \cdot e^2 \cdot E_{so}}{4 \cdot \pi \cdot \hbar^2 \cdot v_F \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{k_d^\infty} - \frac{1}{k_d^0} \right) \cdot \left(\frac{x+1}{x} \right) \cdot I^-(x, u), \quad (2)$$

где $n_q = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_{so}}{k_B \cdot T}\right) - 1}$ – число оптических фононов, которое при испускании фононов

подставляется в выражение $n_q^+ = n_q + 1$, а при поглощении фононов – в выражение $n_q^- = n_q$, e – заряд электрона, E_{so} – энергия фононов, величина которой для BN обычно принимается равной 102,4 эВ [5, 6], v_F – скорость Ферми, величина которой принимается равной $1,5 \cdot 10^8$ см/с [7], \hbar – постоянная Планка, E – энергия электронов, k – модуль вектора волнового числа, параметр $x = \frac{E}{E_{so}}$, параметр $u = \frac{d \cdot E_{so}}{v_F \cdot \hbar}$, d – величина зазора между слоями графена и BN, ϵ_0 – электрическая постоянная, k_d^∞ – относительная диэлектрическая проницаемость для BN на высоких частотах, k_d^0 – относительная диэлектрическая проницаемость для BN на низких частотах, $\theta = (E - E_{so})$ – ступенчатая функция Хэвисайда, T – температура, k_B – постоянная Больцмана. Расчет специального интеграла $I^\pm(x, u)$ выполнялся по формуле

$$I^\pm(x, u) = \int_0^\pi \exp(-2 \cdot u \cdot p^\pm(x, u)) \cdot p^\pm(x, u) \cdot \frac{\cos(\theta) \cdot \cos(1 + \theta)}{(p^\pm(x, u) + \lambda_v)^2} d\theta, \quad (3)$$

где параметр $p^\pm(x, u)$ определялся как

$$p^\pm(x, u) = \sqrt{x \cdot (x \mp 1) \cdot (1 - \cos(\theta)) + 1}, \quad (4)$$

параметр λ_v можно найти, зная N_s – концентрацию электронов в двухмерном слое графена,

$$\lambda_v = \frac{e^2 \cdot \sqrt{N_s}}{\epsilon_0 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{k_d^0 + 1}{2} \right) \cdot E_{so}}. \quad (5)$$

В графене, в отличие от обычных полупроводников, энергия электрона прямо пропорциональна модулю вектора волнового числа вблизи точки Дирака и описывается зависимостью [8–9]

$$E = v_F \cdot \hbar \cdot k . \quad (6)$$

Данную зависимость учитывают при анализе электрон-электронного рассеивания, при котором вероятность перехода двух взаимодействующих электронов, имеющих начальное состояние волновых векторов (k, k_0) , в конечное состояние (k', k'_0) может быть найдена с использованием правила «золотого сечения» Ферми [10–13]. Зависимость (6) представляет одну из главных особенностей, которые определяют динамику поведения электронов в графене. Исходя из представленных выше особенностей, для интенсивности электрон-электронного рассеивания с участием пары элементов была получена зависимость [13], которая использовалась при моделировании:

$$\frac{1}{\tau^{e-e}} = \frac{\pi \cdot e^4 \cdot N_s \cdot g}{\hbar^2 \cdot (\epsilon_0 \cdot \epsilon_s)^2} \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{[Q(\alpha) + Q_0]^2}, \quad (7)$$

где параметр $Q(\alpha) = g \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$, Q_0 – постоянная экранирования, для расчета которой можно использовать выражение, полученное в [10], ϵ_s – относительная диэлектрическая проницаемость графена, параметр $g = |k - k_0|$ – модуль разности волновых векторов исходного и второго электронов, которые участвуют в процедуре рассеивания. Анализ уравнения (7) позволяет установить основные зависимости параметра τ^{e-e} от концентрации электронов в слое графена, от величины относительной диэлектрической проницаемости графена, а также от величины энергии электронов.

Интенсивность акустического рассеяния может быть найдена с помощью выражения, приведенного в [8]:

$$\frac{1}{\tau_{AP}} = \frac{D_{AP}^2 \cdot k_B \cdot T \cdot E}{4 \cdot v_F^2 \cdot \hbar^3 \cdot \rho_m \cdot v_{ph}^2}, \quad (8)$$

где D_{AP} (эВ) – акустический деформационный потенциал, $v_{ph} = 2 \times 10^4$ – скорость акустических фононов (звука) (см/с), $\rho_m = 7,6 \times 10^{-7}$ (кг/м²) – плотность графена. Значение величины D_{AP} в литературе еще не установлено окончательно.

Интенсивность рассеяния на внутренних оптических фононах определяется следующим выражением [9]:

$$\frac{1}{\tau_{op}(k)} = \frac{D_o^2 \cdot \left(n_{op} + \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \right)}{2 \cdot \hbar^2 \cdot v_F^2 \cdot \rho_m \cdot \omega_o} (E \pm \hbar \cdot \omega_o), \quad (9)$$

где знак \pm выбирается при поглощении и испускания фонона соответственно, D_o (эВ) – оптический деформационный потенциал, ω_o – частота оптического фонона, $n_{op} = 1 / (e^{\hbar \cdot \omega_o / (k_B \cdot T)} - 1)$ – число оптических фононов в объемной части графена.

Интенсивность рассеяния на примесях определяется выражением, представленным в [8]:

$$\frac{1}{\tau_{imp}} = \left(\frac{\hbar \cdot v_F^2}{20} \right) \times \left(\frac{n_{imp}}{E} \right), \quad (10)$$

где $\hbar = 2 \cdot \pi \cdot \hbar$, а параметр n_{imp} – концентрация примеси в графене, величина которой при моделировании принималась равной $8,86 \cdot 10^{11}$ см⁻² согласно данным статьи [6].

Результаты моделирования

Исходя из представленных выше выражений, было выполнено моделирование основных интенсивностей рассеивания электронов в слое графена, расположенном на подложке из BN. На рис. 1 показаны результаты расчета интенсивностей рассеивания на поверхностных оптических фононах в графене при испускании (а) и поглощении (b) фононов от энергии при температуре $T = 300$ К. Как видно из рис. 1, интенсивности рассеивания на поверхностных оптических фононах при поглощении и испускании фононов монотонно уменьшаются с ростом энергии. Кривые, обозначенные на рис. 1, а и b цифрами 1, получены при величине зазора d между слоями графена и BN, равной $1 \cdot 10^{-9}$ м, а аналогичные кривые, но обозначенные цифрами 2, получены при величине $d = 1 \cdot 10^{-13}$ м. На рис. 1, а отмечено пороговое значение энергии $E_{th1} = E_{so}$, ниже которого интенсивность данного вида рассеивания не рассматривается и равняется нулю. Значение параметра N_s принималось при моделировании равным величине $3 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$. Как показывает анализ этих кривых, значительное изменение значения параметра d приводит лишь к небольшому изменению интенсивности рассеивания как при испускании, так и поглощении фононов.

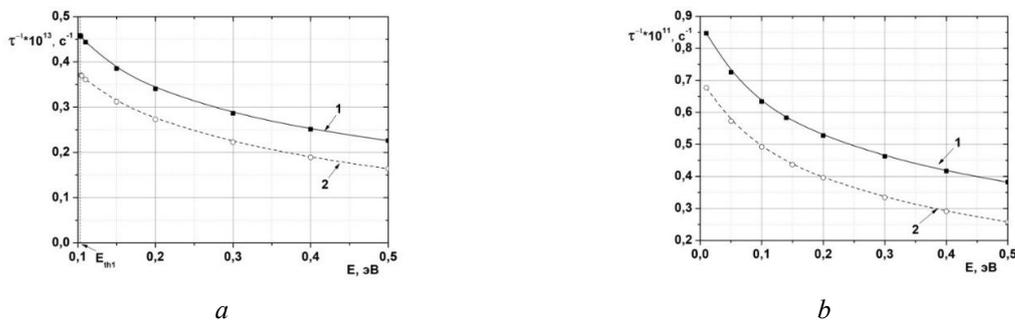


Рис. 1. Зависимости интенсивностей рассеивания электронов на поверхностных оптических фононах при испускании (а) и поглощении (b) фононов от энергии при температуре 300 К

Fig. 1. Dependences of the intensities of electron scattering on surface optical phonons upon emission (a) and absorption (b) of phonons on energy at a temperature 300 K

На рис. 2 представлены результаты расчета интенсивностей рассеивания на внутренних оптических фононах в графене при поглощении (кривая 1) и испускании (кривая 2) фононов от энергии при температурах $T = 300$ К (а) и $T = 370$ К (b). Необходимость проведения расчетов при повышенном значении температуры $T = 370$ К объясняется тем, что в работе [6] при проведении экспериментальных измерений структуры, состоящей из слоев графена и BN, наблюдалось увеличение температуры до величины приблизительно 70 К при подаче рабочего постоянного напряжения. Величины параметров $D_o = 1 \cdot 10^9$ эВ/см, $\hbar \cdot \omega_0 = 164,6$ мэВ, согласно данным из [9], хотя их значения еще окончательно не установлены. В [8] для графена выбиралась величина параметра $\hbar \cdot \omega_0 \approx 200$ мэВ. Исследование поведения кривых 1 и 2 на рис. 2, а и b показывает, что при увеличении энергии интенсивность рассеивания на внутренних оптических фононах монотонно увеличивается при испускании и поглощении фононов [9, 13].

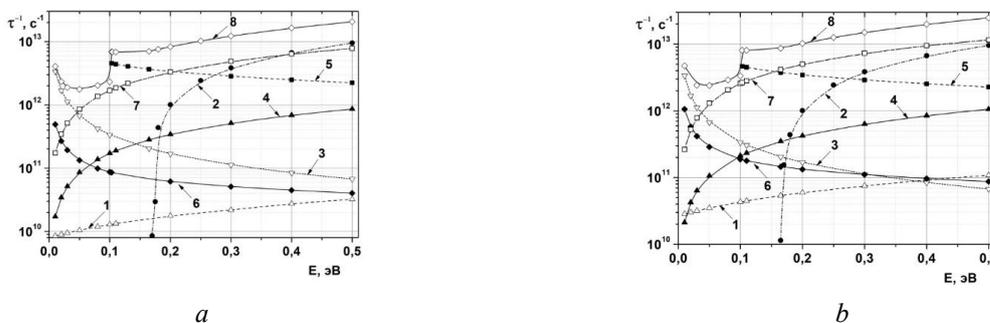


Рис. 2. Зависимости интенсивностей рассеивания электронов в графене от энергии при температуре 300 К (а) и 370 К (b)

Fig. 2. Dependence of electron scattering intensities in graphene on energy at temperature 300 K (a) and 370 K (b)

Результаты моделирования, показанные на рис. 1 для значения параметра $d = 1 \cdot 10^{-13}$ м, представлены на рис. 2 еще раз для того, чтобы выполнить их сравнение с другими видами рассеивания. Таким образом, на рис. 2, *a* и *b* представлены зависимости интенсивностей рассеивания на поверхностных оптических фононах в графене при испускании (кривая 5) и поглощении (кривая 6) фононов от энергии.

Зависимости интенсивностей рассеивания на примесях от энергии представлены кривыми 3 на рис. 2, *a* и *b*. Анализ рис. 2 показывает, что рассеивание на примесях преобладает над другими видами рассеиванием только при низких значениях энергии (менее 0,03 эВ) при тех значениях концентрации, которые принимались при моделировании. При увеличении концентрации примесей интенсивность этого вида рассеивания пропорционально увеличивается.

Зависимости интенсивностей рассеивания на акустических фононах от энергии поля показаны кривыми 4 на рис. 2, *a* и *b*. Для проведения расчетов величина параметра D_{AP} принималась равной 18 эВ согласно рекомендациям, высказанным в [8]. Как видно из этих данных, интенсивность рассеивания на акустических фононах монотонно увеличивается с ростом энергии [8, 13]. Используя значение параметра диэлектрической проницаемости ϵ_s , равное 1,8 [14], были получены зависимости электрон-электронного рассеивания, которые представлены кривыми 7 на рис. 2, *a* и *b*. Анализ этих зависимостей показывает, что интенсивность электрон-электронного рассеивания монотонно возрастает с увеличением энергии электрического поля [13].

Кривыми 8 на рис. 2 показаны зависимости общей (суммарной) интенсивности рассеивания при температурах $T = 300$ К (*a*) и $T = 370$ К (*b*). Анализ этих кривых показывает, что с ростом температуры в целом наблюдается увеличение интенсивностей рассеивания, хотя по отдельным зависимостям, например, для примесей, такой закономерности не наблюдается, что объясняется анализом уравнения (10). При больших энергиях (приблизительно больше чем 0,3 эВ) доминирующими видами рассеивания над другими видами рассеивания являются рассеивания на внутренних оптических фононах при испускании фононов (рис. 2, *a, b*, кривые 2) и электрон-электронное рассеивание (рис. 2, *a, b*, кривые 7).

Заключение

Представлены результаты моделирования интенсивностей рассеивания электронов в слое графена, расположенном на подложке из гексагонального нитрида бора. Выполнен анализ основных механизмов рассеяния электронов в графене: рассеяние на внутренних оптических фононах, на поверхностных оптических фононах, на акустических фононах, на примесях, электрон-электронное рассеивание. Установлено преобладание рассеивания электронов на оптических фононах, присущих внутреннему слою графена, электрон-электронного рассеивания, а также рассеивания на оптических фононах, связанных с границей раздела между графеном и слоем из гексагонального нитрида бора, над другими видами рассеивания в области при величинах энергии, превышающих приблизительно 0,165 эВ.

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., Бьюрков 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. Aniruddha K., Tian F., Debdeep J. Effect of high-k dielectrics on charge transport in graphene-based field effect transistors. *Physical Review*. 2010;82:1154520. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.115452.
5. Perebeinos V., Avouris P. Inelastic Scattering and Current Saturation in Graphene. *Physical Review*. 2010;81:195442. DOI.org/10.1103/PhysRevB.81.195442.
6. 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.
7. Hwang C., Siegel D., Mo S., Regan W., Ismach A., Zhang Y., Zettl A., Lanzara A. Fermi Velocity

- Engineering in Graphene by Substrate Modification. *Scientific reports*. 2012;2:590. DOI:10.1038/srep00590.
8. Jyotsna C., Jing G. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Applied Physics Letters*. 2009;95:023120. DOI.org/10.1063/1.3182740.
 9. Tian F., Aniruddha K., Huili X., Debdeep J. *High-field transport in two-dimensional graphene*. *Physical Review*. 2011;84:125450. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125450.
 10. Moško M., Moškova A. Ensemble Monte Carlo simulation of electron-electron scattering: Improvement of conventional methods. *Physical Review*. 2010;4(19):10794-10803.
 11. Li X., Barry E.A., Zavada J.M., Nardelli Buongiorno M., Kim K. W. Influence of electron-electron scattering on transport characteristics in monolayer grapheme. *Applied Physics Letters*. 2010;97:08210. DOI.org/10.1063/1.3483612.
 12. Goodnick S. M., Lurgi P. Effect of electron-electron scattering on non-equilibrium transport in quantum-well system. *Physical Review*. 1988;7(5):2578-2588. DOI.org/10.1103/PhysRevB.37.2578.
 13. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Определение интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена. *Доклады БГУИР*. 2017;108(6):128-129.
 14. Santos E.J.G., Kaxiras E. Electric-Field Dependence of the Effective Dielectric Constant in Graphene. *Nano Lett*. 2013;13(5):898-902. DOI.org/10.1021/nl303611v.

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]. *Phisika i tehnika polyprovodnikov=Physics and Technology of Semiconductors*. 2013;47(2):224-250. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.115452. (In Russ.)
4. Aniruddha K., Tian F., Debdeep J. Effect of high-k dielectrics on charge transport in graphene-based field effect transistors. *Physical Review*. 2010;82:1154520. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.115452.
5. Perebeinos V., Avouris P. Inelastic Scattering and Current Saturation in Graphene. *Physical Review*. 2010; 81:195442. DOI.org/10.1103/PhysRevB.81.195442.
6. 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.
7. Hwang C., Siegel D., Mo S., Regan W., Ismach A., Zhang Y., Zettl A., Lanzara A. Fermi Velocity Engineering in Graphene by Substrate Modification. *Scientific reports*. 2012;2:590. DOI:10.1038/srep00590.
8. Jyotsna C., Jing G. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Applied Physics Letters*. 2009; 95:023120. DOI.org/10.1063/1.3182740.
9. Tian F., Aniruddha K., Huili X., Debdeep J. High-field transport in two-dimensional graphene. *Physical Review*. 2011;84:125450. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125450.
10. Moško M., Moškova A. Ensemble Monte Carlo simulation of electron-electron scattering: Improvement of conventional methods. *Physical Review*. 2010;4(19):10794-10803.
11. Li X., Barry E.A., Zavada J.M., Nardelli Buongiorno M., Kim K. W. Influence of electron-electron scattering on transport characteristics in monolayer grapheme. *Applied Physics Letters*. 2010;97:08210. DOI.org/10.1063/1.3483612.
12. Goodnick S.M., Lurgi P. Effect of electron-electron scattering on non-equilibrium transport in quantum-well system. *Physical Review*. 1988;7(5):2578-2588. DOI.org/10.1103/PhysRevB.37.2578.
13. Muravyov V.V., Mishchenka V.N. [Determination of the electron scattering intensities in a single graphene layer]. *Doklady BGUIR=Doklady BGUIR*. 2017;108(6):128-129. (In Russ.)
14. Santos E.J.G., Kaxiras E. Electric-Field Dependence of the Effective Dielectric Constant in Graphene. *Nano Letters*. 2013;13(5):898-902. DOI.org/10.1021/nl303611v.

Вклад авторов

Муравьев В.В. предложил идею поведения моделирования интенсивностей рассеивания в слое графена, расположенном на поверхности подложки из нитрида бора.

Мищенко В.Н. выполнил моделирование интенсивностей рассеивания в слое графена, расположенном на поверхности подложки из нитрида бора.

Authors contribution

Muravyov V.V. proposed the idea of modeling the behavior of scattering intensities in a graphene layer located on the surface of a boron nitride substrate.

Mishchenka V.N. performed modeling of scattering intensities in a graphene layer located on the surface of a boron nitride substrate.

Сведения об авторах

Муравьев В.В., член-корр. НАН Республики Беларусь, профессор, д.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Адрес для корреспонденции

220012, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
моб. тел. +375-29-394-55-58;
тел. +375-17-293-80-70;
e-mail: mishchenko@bsuir.by
Мищенко Валерий Николаевич

Information about the authors

Muravyov V.V., Member-corr. of NAS of Belarus, Professor, D.Sci, Professor of Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics.

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

Address for correspondence

220012, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
mob. tel. +375-29-394-55-58;
tel. +375-17-293-80-70;
e-mail: mishchenko@bsuir.by
Mishchenka Valery Nikolaevich