

УДК 621.794.61

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

В.В. МУРАВЬЕВ, В.Н. МИЩЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 16 мая 2018*

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, содержащей одиночный слой графена. Использование графена, который обладает высокой подвижностью носителей заряда, высокой теплопроводностью и рядом других положительных свойств, является перспективным для создания новых полупроводниковых приборов с хорошими выходными характеристиками. В результате моделирования получены зависимости скорости, средней энергии, подвижности, коэффициента диффузии от длины структуры и напряженности электрического поля в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена и области из материала карбида кремния типа 4H-SiC.

*Ключевые слова:* графен, карбид кремния, процессы переноса электронов, метод Монте-Карло.

**Abstract.** The results of modeling of electron transfer processes in a three-dimensional semiconductor structure containing a single layer of graphene using the Monte-Carlo method are presented. The use of graphene, which has a high mobility of charge carriers, high thermal conductivity and a number of other positive properties, is promising for the creation of new semiconductor devices with good output characteristics. As a result of modeling, the dependences of the velocity, average energy, mobility, diffusion coefficient on the structure length and electric field intensity in a semiconductor structure containing a graphene layer and a region of a 4H-SiC silicon carbide material are obtained.

*Keywords:* graphene, silicon carbide, electron transfer processes, Monte Carlo method.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 118, No. 8, pp. 55-62**  
**Simulation of the processes of the electrons transfer**  
**in the semiconductor structure based on graphene**  
**V.V. Murav'ev, V.N. Mishchenka**

### Введение

Исследование процессов переноса носителей заряда для полупроводниковых соединений, содержащих графен, позволяет лучше понять, как те или иные изменения в конструкциях влияют на выходные характеристики приборов, и является актуальной задачей, которая связана с разработкой быстродействующих и мощных приборов диапазонов СВЧ и КВЧ [1–4]. Исследования процессов переноса носителей заряда выполнялось в [5] с помощью метода возмущения функционала электронной плотности (DFPT) в рамках теории функционала электронной плотности (DFT). Однако были получены зависимости средней скорости электронов от напряженности электрического поля для одиночного слоя графена лишь в диапазоне небольших значений напряженности электрического поля, которые не превышали величину приблизительно 0,2 кВ/см, и на основе этой зависимости была приведена оценочная величина подвижности электронов, приблизительно равная  $9,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при температуре 300 К. В ряде работ делается попытка оценки средней скорости электронов через величину среднего тока, который протекает через

полупроводниковую структуру [6-7]. Однако, как показывает анализ, наличие полупроводниковой подложки, на которой располагается слой графена, приводит к значительному изменению характеристик процессов переноса носителей заряда [6]. В работе [7] на основе оценки величины среднего тока приводятся результаты расчета средней дрейфовой скорости электронов с использованием метода Монте-Карло в диапазоне значений напряженности электрического поля до 10 кВ/см, однако не учитывается один из важнейших механизмов рассеивания – электрон-электронное рассеивание.

В полупроводниковых приборах использование метода Монте-Карло для анализа процессов дрейфа носителей заряда позволяет учесть все их механизмы рассеивания и получить зависимости распределения для стационарных и нестационарных процессов [4, 8, 9]. В данной статье на основе метода статистического моделирования были выполнены исследования основных характеристик процесса переноса носителей заряда в полупроводниковом приборе с использованием одиночного слоя графена в расширенном диапазоне значений напряженности электрического поля с учетом наиболее полного числа механизмов рассеивания электронов. Для этих целей был разработан вычислительный алгоритм, составлена и отлажена программа численного моделирования методом Монте-Карло в трехмерном пространстве.

### Метод и особенности моделирования параметров переноса электронов

Известно, что результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло зависят от значений основных электрофизических параметров материала и параметров модели зоны проводимости [9, 11–13]. Были исследованы особенности дрейфа электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, содержащей слой графена, при температуре  $T = 300$  К (рис. 1, *a*). Рассмотрены закономерности физического процесса переноса носителей заряда для двух вариантов расположения одиночного слоя (или монослоя) графена.

Для первого варианта одиночный слой графена (область, обозначенная цифрой 2 на рис. 1, *a*) располагается между двумя областями, выполненными из материала карбида кремния типа 4H-SiC (обозначенными цифрами 1 и 3 на рис. 1, *a*). Канал дрейфа электронов в виде слоя графена, обозначенного цифрой 2 на рис. 1, *a*, формировался вдоль координаты  $x$ . Две области, обозначенные цифрами 1 и 3 на рис. 1, *a*, выполняют функции ввода и вывода электронов для взаимодействия с областью 2. Моделирование процессов переноса электронов выполнялось для областей структуры, которые обозначены цифрами 1–3. Контактные области металлизации, обозначенные цифрами 4 и 5 на рис. 1, *a*, при моделировании не рассматривались и использовались в процедуре метода Монте-Карло для ввода или вывода электронов за пределы анализируемой структуры. Фактически рассматривался одиночный слой графена в подвешенном состоянии без подложки.

Для второго варианта одиночный слой графена, обозначенный цифрой 1 на рис. 1, *б*, располагался на подложке, выполненной из материала карбида кремния типа 4H-SiC, обозначенной цифрой 2 на рис. 1, *б*. Моделирование процессов переноса электронов выполнялось для областей структуры, которые обозначены цифрами 1–2. Контактные области металлизации, обозначенные цифрами 3 и 4 на рис. 1, *б*, при моделировании не рассматривались и использовались в процедуре метода Монте-Карло для ввода или вывода электронов за пределы анализируемой структуры. Фактически рассматривался вариант конструкции структуры, исследованный экспериментально в [6].

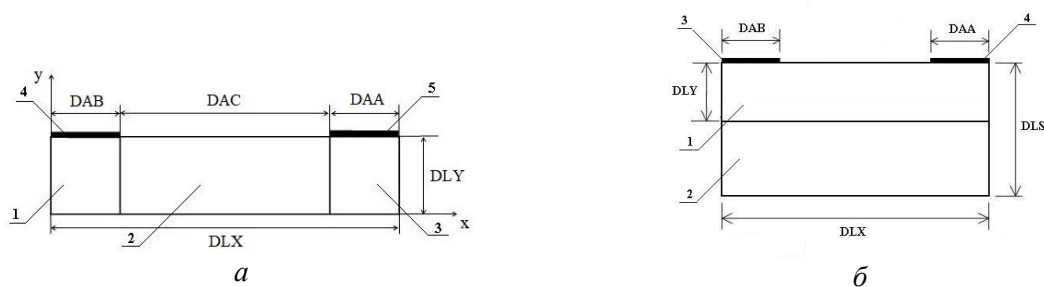


Рис. 1. Структуры полупроводниковых приборов, содержащих графен, без подложки (*a*) и с подложкой из материала 4H-SiC (*б*)

При моделировании выбирались следующие размеры слоя полупроводниковой структуры. Значение параметра DLY равнялось  $0,47 \cdot 10^{-9}$  м, что соответствует обычно выбираемой толщине слоя графена. Значение параметра DLX (условно – длина структуры) изменялось в процессе моделирования от значения  $1 \cdot 10^{-7}$  м до значения  $1 \cdot 10^{-5}$  м, а ширина структуры (третья координата  $z$  не показана) равнялась  $1 \cdot 10^{-6}$  м (рис. 1, а). Величина параметров DAB и DAA принималась одинаковой и равной 20 % от значения параметра DLX. Количество элементарных ячеек (шагов) для слоя полупроводниковой структуры по длине равнялось 100, по высоте – 30, а по ширине – 1. Количество моделируемых частиц для всей структуры со слоем графена и областями (или подложкой) из 4H-SiC принималось равным 30000. Значение параметра DLS для второй конструкции выбиралось равным  $0,141 \cdot 10^{-7}$  м. Было выбрано значение интервала времени  $dT$ , по завершении которого проводилось усреднение полученных результатов, равное  $5 \cdot 10^{-15}$  с.

Для материала 4H-SiC значения электрофизических параметров и параметров долин выбирались из данных, представленных в [10, 15]. Концентрация электронов принималась равной  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и использовалась модель, состоящая из электронных долин вида  $M-L-\Gamma$  [10]. В разработанной программе с использованием метода Монте Карло для анализа дрейфа электронов в областях, состоящих из материала 4H-SiC, были учтены наиболее важные механизмы рассеяния: на полярных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах, междолинное рассеяние между неэквивалентными долинами [13, 15]. При моделировании учитывались долины  $M_1$  и  $M_2$ , величина зазора между которыми определяется величиной равной 0,122 эВ, и долина  $L$  [15]. Для области структуры, содержащей графен, также дополнительно рассматривалось электрон-электронное рассеивание, анализ которого представлен в [16].

Для исследования процесса переноса электронов в графене использовалась линейная зависимость энергии  $E$  от волнового вектора  $k$ , что справедливо в области обычно рассматриваемых значений энергии [7, 14]:

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

где  $k_x, k_y, k_z$  – компоненты волнового вектора (волновые числа) вдоль координат  $x, y, z$  соответственно,  $v_F$  – скорость Ферми в графене, величина которой обычно принимается равной  $1,0 \cdot 10^8$  см/с,  $\hbar$  – постоянная Планка.

Расчет средней дрейфовой скорости электронов в областях, состоящих из материала 4H-SiC, и для электронов, которые инжектируются в слой графена из смежных областей 1, 3 (рис. 1, а) и области 2 (рис. 1, б) до момента релаксации с кристаллической структурой, выполнялся по формуле [9, 11]

$$v = \frac{\hbar \cdot k}{m^* (1 + 2 \cdot \alpha \cdot E)}, \quad (2)$$

где  $m^*$  – относительная эффективная масса электрона,  $\alpha$  – коэффициент непараболичности долины. Значения параметров  $m^*$  и  $\alpha$  выбирались из значений, представленных в [15].

Метод Монте-Карло используется также для определения коэффициента диффузии  $D$ . Если  $x, y, z$  – расстояния, пройденные электроном за время  $t$  вдоль направлений  $x, y, z$  соответственно, то обобщая формулу для расчета коэффициента диффузии  $D$ , представленную в [11, 12], на вариант трехмерной структуры, имеем

$$D = \frac{1}{3} \frac{d}{dt} \langle (x - \langle x \rangle) \cdot (y - \langle y \rangle) \cdot (z - \langle z \rangle) \rangle, \quad (3)$$

где угловые скобки  $\langle \rangle$  обозначают операцию усреднения. Выражение (3) использовалось в разработанной программе для определения коэффициента диффузии  $D$  путем усреднения данных по всему ансамблю моделируемых электронов.

Расчет подвижности электронов выполнялся по формуле [12]

$$\mu = \frac{v}{F}, \quad (4)$$

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

## Результаты моделирования

Результаты моделирования процессов переноса электронов в одиночном слое графена, который располагается в подвешенном состоянии без подложки, т. е. для варианта, показанного на рис. 1, *a*, в зависимости от величины напряженности электрического поля  $F$  представлены на рис. 2, 3. На этих рисунках представлены результаты расчета параметров переноса электронов как с учетом, так и без учета электрон-электронного рассеивания для области 2, показанной на рис. 1, *a*, где располагается слой графена.

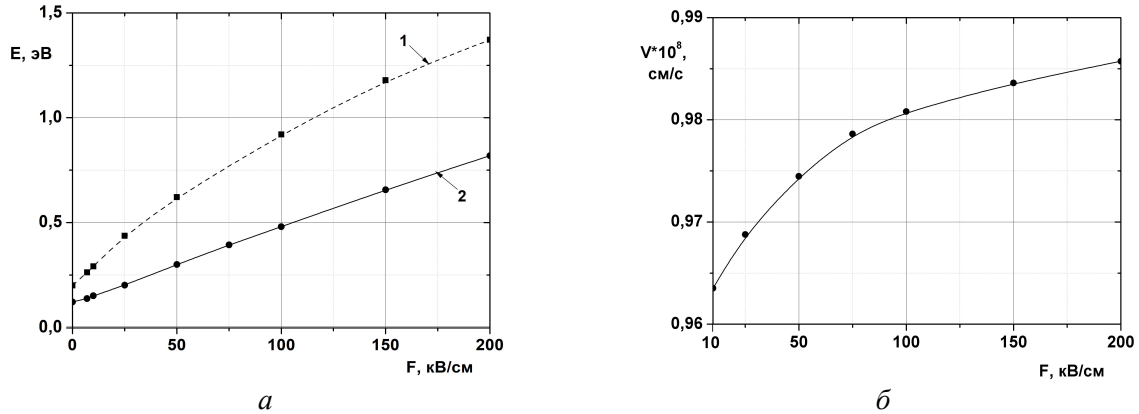


Рис. 2. Зависимости энергии электронов (*a*) и средней дрейфовой скорости (*б*) от напряженности электрического поля

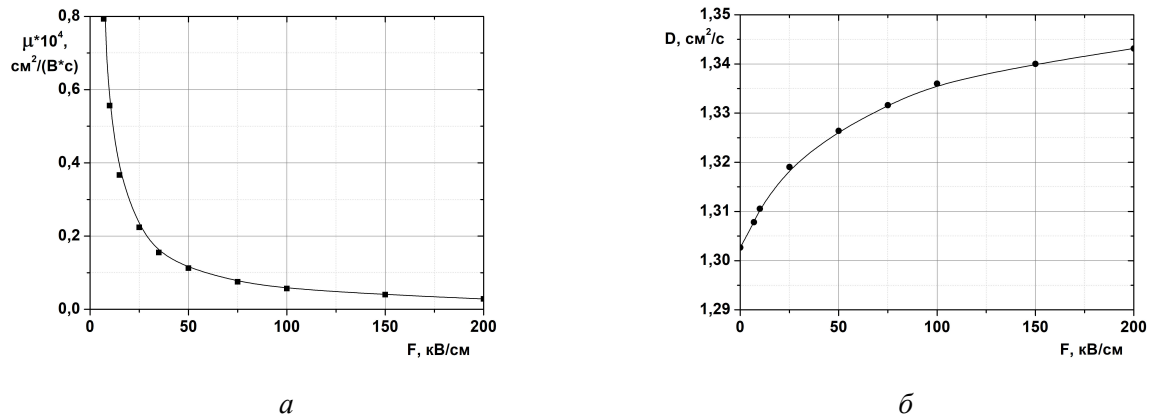


Рис. 3. Зависимости подвижности (*a*) и коэффициента диффузии (*б*) электронов от напряженности электрического поля

На рис. 2, *a* показаны зависимости средней энергии электронов от напряженности электрического поля, полученные с учетом (кривая 2, [16]) и без учета (кривая 1) электрон-электронного рассеивания. Видно, что величина средней энергии электронов монотонно возрастает с ростом напряженности электрического поля. Значения величины средней энергии электронов, полученные при учете электрон-электронного рассеивания, при всех значениях напряженности электрического поля меньше значений величины средней энергии, которые получены без учета электрон-электронного рассеивания электронов.

Зависимость средней скорости электронов, полученная с учетом электрон-электронного рассеивания [16], представлена на рис. 2, *б*. Результаты моделирования показали, что величина средней скорости электронов в отличие от величины средней энергии меняется незначительно при учете электрон-электронного рассеивания. Из анализа этой кривой видно, что среднее значение скорости монотонно возрастает при увеличении величины напряженности электрического поля  $F$ , оставаясь меньше значения скорости Ферми.

На рис. 3, *a* представлена зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля с учетом электрон-электронного рассеивания. Как видно из этого рисунка, величина подвижности электронов монотонно убывает с ростом напряженности электрического поля. Такой вид зависимости может быть объяснен использованием

формулы (3) для проведения расчетов, когда средняя скорость электронов меняется незначительно, а напряженность электрического поля монотонно возрастает, что и приводит к уменьшению подвижности электронов.

На рис. 3, б показана зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля с учетом электрон-электронного рассеивания. Как видно из этого рисунка, величина коэффициента диффузии электронов монотонно увеличивается при увеличении значений напряженности электрического поля.

Результаты моделирования процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, содержащей слой графена, в зависимости от длины структуры, т. е. вдоль координаты  $x$ , показанной на рис. 1, а, при величине напряженности  $F$  продольного электрического поля, равной 100 кВ/см, представлены на рис. 4, 5, а.

Зависимости средней дрейфовой скорости электронов (кривая 1) и коэффициента диффузии (кривая 2) от длины структуры, полученные в результате моделирования при величине параметра  $L_d$ , равном  $1 \cdot 10^{-6}$  м, показаны на рис. 4, а.

Как показывает анализ кривой 1, представленной на рис. 4, а, величина средней дрейфовой скорости электронов остается приблизительно одинаковой и немного меньше значения  $1,0 \cdot 10^8$  см/с в области слоя графена, обозначенной цифрой 2 на рис. 1, а, т. е. при значениях  $L/L_d > 0,2$  и  $L/L_d < 0,8$ . В областях истока 1 и стока 3 (рис. 1, а), состоящих из материала 4H-SiC, величина средней дрейфовой скорости электронов остается намного меньше величины средней дрейфовой скорости электронов, которой они обладают в слое графена.

Величина коэффициента диффузии электронов  $D$ , как видно из рис. 4, а, кривая 2, остается приблизительно одинаковой и равной  $1,38$  см<sup>2</sup>/с в области слоя графена, обозначенной цифрой 2 на рис. 1, а, т. е. при значениях  $L/L_d > 0,2$  и  $L/L_d < 0,8$ . Анализ показывает, что величина коэффициента диффузии электронов в областях истока 1 и стока 3 (рис. 1, а), состоящих из материала 4H-SiC, остается намного меньше величины коэффициента диффузии электронов, которой они обладают в слое графена.

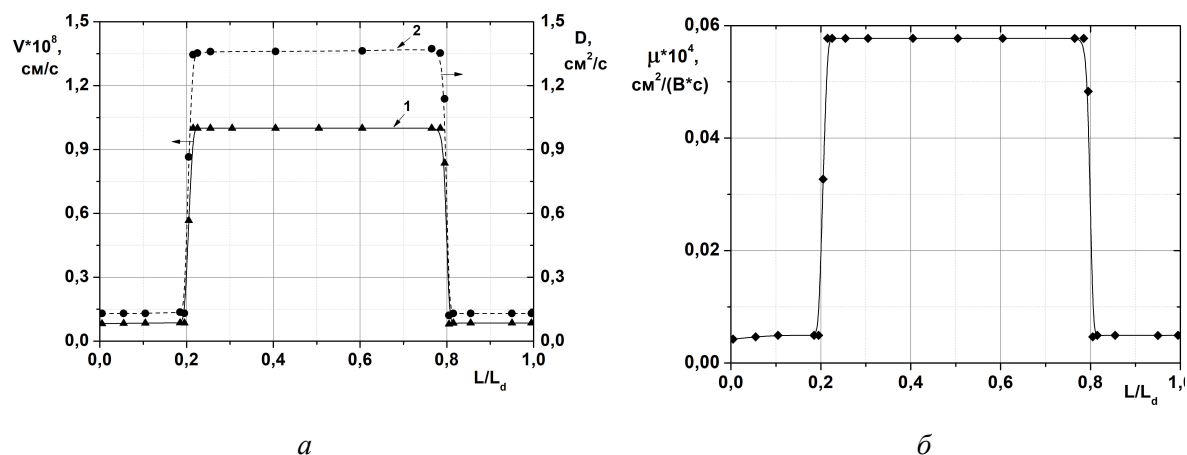


Рис. 4. Зависимости средней дрейфовой скорости и коэффициента диффузии электронов (а) и подвижности электронов (б) от относительной длины структуры

На рис. 4, б представлена зависимость подвижности электронов от длины структуры. Как видно из этого рисунка, величина подвижности электронов остается приблизительно одинаковой и равной  $0,56 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/(В·с) в области слоя графена, обозначенной цифрой 2 на рис. 1, а, т. е. при значениях  $L/L_d > 0,2$  и  $L/L_d < 0,8$ . Анализ показывает, что величина подвижности электронов в областях истока 1 и стока 3 (рис. 1, а), состоящих из материала 4H-SiC, остается намного меньше величины подвижности электронов, которой они обладают в слое графена.

Зависимости средней энергии электронов от длины структуры  $L/L_d$ , полученные в результате моделирования, представлены на рис. 5, а при длинах структуры  $L_d = 10 \cdot 10^{-6}$  м,  $1 \cdot 10^{-6}$  м,  $0,1 \cdot 10^{-6}$  м (кривые 1–3 соответственно). Величина средней энергии электронов

монотонно возрастает в области слоя графена, обозначенной на рис. 1, *a* цифрой 2, т. е. при значениях  $L/L_d > 0,2$  и  $L/L_d < 0,8$ . Как показывает анализ, величина средней энергии электронов в областях истока и стока 1 и 3 (рис. 1, *a*), состоящих из материала 4H-SiC, остается намного меньше величины средней энергии электронов, которой они обладают в слое графена, и практически не зависят от длины структуры.

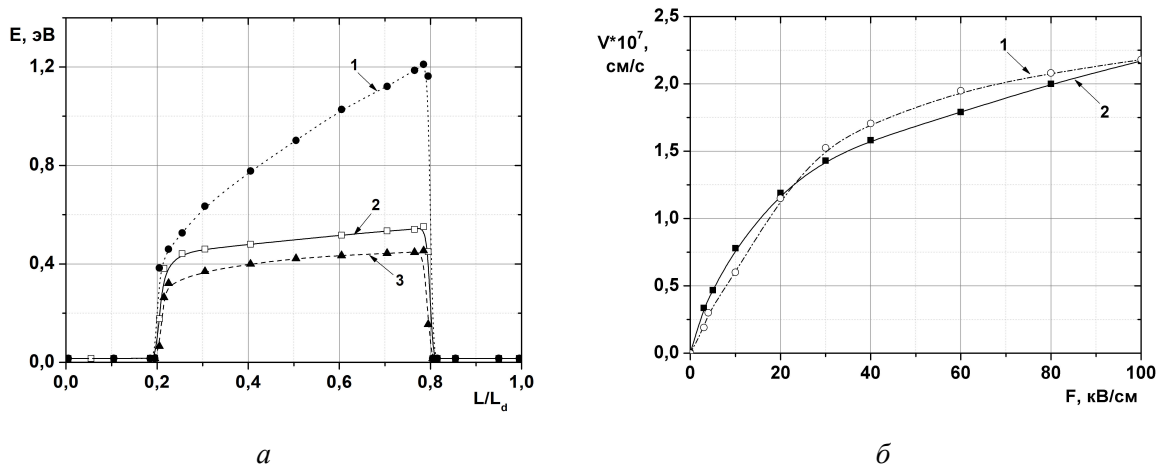


Рис. 5. Зависимость средней энергии электронов от относительной длины структуры (*a*) и средней скорости электронов от напряженности электрического поля (*б*)

Моделирование средней дрейфовой скорости электронов для второй анализируемой структуры, показанной на рис. 1, *б*, проводилось с использованием формулы [6]

$$v = \frac{I}{e \cdot n_{sh} \cdot w_{sh}}, \quad (5)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $I$  – выходной ток структуры,  $n_{sh}$  – поверхностная концентрация электронов в слое графена,  $w_{sh}$  – ширина структуры. Величина тока  $I$  определялась при использовании процедуры метода Монте-Карло, а значения параметров  $n_{sh} = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $w_{sh} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  выбирались исходя из данных, представленных в [6]. Зависимость средней дрейфовой скорости электронов, полученная в результате моделирования, показана кривой 2 на рис. 5, *б*. Экспериментальная кривая, полученная при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , соответствует величине параметра  $DLX = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  и для варианта подложки из карбида кремния, сформированной без насыщения атомами водорода (вариант as-grown в [6]), показана кривой 1 на рис. 5, *б*. Как видно из анализа кривых 1 и 2, представленных на рис. 5, *б*, наблюдается довольно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Выполнено моделирование выходного тока для транзисторной структуры, показанной на рис. 6, *a*. На рис. 6, *a* показаны следующие элементы конструкции: 1 – слой графена, 2 – подложка из материала 4H-SiC, 3 – исток, 4 – сток, 5 – затвор, 6 – слой изоляционного материала из оксида кремния. Общая длина структуры (параметр DLX) принималась равной  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а длина затвора (параметр DAZ) – равной  $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Величина постоянного напряжения, которое подавалось на сток относительно истока, принималась равной 1,5 В, а напряжение на затворе изменялось в диапазоне от  $-1,0$  до  $+1,0 \text{ В}$ . Зависимость выходного тока от напряжения на затворе, полученная в результате моделирования, показана на рис. 6, *б* кривой 1, которая соответствует конструкции прибора, показанной на рис. 6, *a*. Аналогично получена кривая 2, показанная на рис. 6, *б*, которая соответствует конструкции прибора, но без наличия слоя графена, представленного цифрой 5 на рис. 6, *a*. Сравнительный анализ кривых 1 и 2, представленных на рис. 6, *б*, показывает, что использование слоя графена позволяет значительно увеличить выходной ток и крутизну выходной характеристики транзистора.

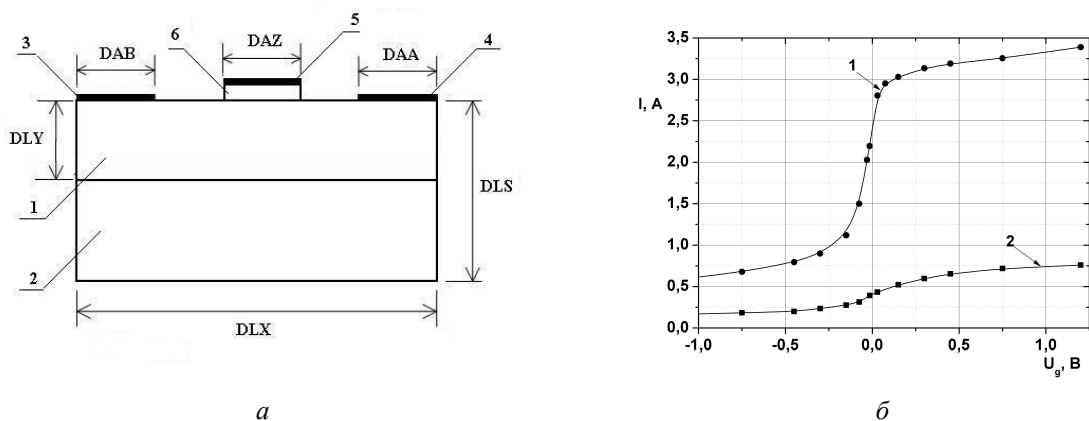


Рис. 6. Структура полупроводникового прибора, содержащего графен, (а) и зависимость выходного тока от напряжения на затворе (б)

### Заключение

Выполнено моделирование процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, содержащей графен. В результате моделирования получены основные характеристики дрейфа электронов – зависимости скорости, средней энергии, подвижности, коэффициента диффузии от длины структуры и напряженности электрического поля в полупроводниковых структурах, содержащих слой графена и области из материала 4H-SiC. Полученные значения средней скорости электронов в графене приблизительно в 9 раз больше, чем в материале 4H-SiC, а значения средней подвижности приблизительно в 18–20 раз выше, чем в материале 4H-SiC при значении напряженности электрического поля, равном 100 кВ/см. Такое же соотношение этих параметров наблюдается и при других значениях напряженности электрического поля. Результаты исследований показали, что учет электрон-электронного рассеивания существенно влияет на особенности поведения зависимости средней энергии электронов от напряженности электрического поля. Благодаря использованию графена с такими характеристиками переноса носителей заряда возможно достижение больших плотностей тока в открытом состоянии и высоких значений крутизны (в сравнении с кремниевыми транзисторами), что должно обеспечить отличные характеристики переключения и высокую частоту отсечки. Высокая подвижность и высокая скорость носителей заряда делает графен перспективным материалом для создания новых полупроводниковых приборов с хорошими выходными характеристиками. Результаты моделирования средней дрейфовой скорости электронов в исследованной структуре показали хорошее соответствие экспериментальным данным. Показано, что использование слоя графена позволяет значительно увеличить выходной ток и крутизну выходной характеристики исследуемых транзисторов.

### Список литературы

1. Top-Gated Epitaxial FETs on SiC-Face SiC Wafers with a Peak Transconductance of 600 mS/mm / J.S. Moon [et al.] // IEEE Electron Device Letters. 2010. Vol. 31. P. 260–262.
2. Lateral Graphene Heterostructure Field-Effect Transistor / J.S. Moon [et al.] // IEEE Electron Device Letters. 2013. Vol. 34, iss. 9. P. 1190–1192.
3. Туннельные полевые транзисторы на основе графена / Д.А. Свинцов [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, вып. 2. С. 244–250.
4. Мищенко В.Н. Моделирование средней дрейфовой скорости электронов в одномерной структуре из арсенида галлия // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 99–102.
5. First-principles analysis of electron-phonon interaction in grapheme / К.М. Borysenko [et al.] // Physical Review. 2010. Vol. B 81. P. 121412(R).
6. A temperature dependent measurement of the carrier velocity vs. electric field characteristic for as-grown and H-intercalated epitaxial graphene on SiC / M. Winters [et al.] // Appl. Phys. 2013. Vol. 113. P. 193708.
7. Chauhan Jyotsna, Guo Jing. High-field transport and velocity saturation in grapheme // Appl. Phys. Letters. 2009. Vol. 95. P. 023120.
8. Vasileska D., Goodnick S.M. Computational Electronics. Morgan and Claypool, 2006. 2016 p.
9. Fawcett W., Boardman D.A., Swain S. Monte Carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide // J. of Physical Chemistry Solids. 1970. Vol. 31. P. 1963–1990.

10. Persson C., Lindefelt U. Dependence of energy gaps and effective masses on atomic positions in hexagonal SiC // *Appl. Phys.* 1997. Vol. 86, № 11. P. 5036–5039.
11. Hockney R., Eastwood J. Numerical simulation using particles. M., 1987. 640 p.
12. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
13. Мищенко В.Н. Трехмерное моделирование выходных характеристик GaAs транзисторов с субмикронной длиной затвора // *Докл. БГУИР.* 2016. № 6 (100). С. 113–116.
14. High-field transport in two-dimensional grapheme / Fang Tian [et al.] // *Physical Review.* 2011. Vol. B 84. P. 125450.
15. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Моделирование процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре из карбида кремния // *Докл. БГУИР.* 2017. № 2 (104). С. 53–57.
16. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Определение интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена // *Докл. БГУИР.* 2017. № 6 (108). С. 42–47.

### References

1. Top-Gated Epitaxial FETs on SiC-Face SiC Wafers with a Peak Transconductance of 600 mS/mm / J.S. Moon [et al.] // *IEEE Electron Device Letters.* 2010. Vol. 31. P. 260–262.
2. Lateral Graphene Heterostructure Field-Effect Transistor / J.S. Moon [et al.] // *IEEE Electron Device Letters.* 2013. Vol. 34, iss. 9. P. 1190–1192.
3. Tunnel'nye polevye tranzistory na osnove grafena / D.A. Svincov [i dr.] // *Fizika i tehnika poluprovodnikov.* 2013. T. 47, vyp. 2. S. 244–250. (in Russ.)
4. Mishhenko V.N. Modelirovanie srednej drejfovoj skorosti jelektronov v odnomernoj strukture iz arsenide gallija // *Dokl. BGUIR.* 2015. № 8 (94). С. 99–102. (in Russ.)
5. First-principles analysis of electron-phonon interaction in grapheme / K.M. Borysenko [et al.] // *Physical Review.* 2010. Vol. B 81. P. 121412(R).
6. A temperature dependent measurement of the carrier velocity vs. electric field characteristic for as-grown and H-intercalated epitaxial graphene on SiC / M. Winters [et al.] // *Appl. Phys.* 2013. Vol. 113. P. 193708.
7. Chauhan Jyotsna, Guo Jing. High-field transport and velocity saturation in grapheme // *Appl. Phys. Letters.* 2009. Vol. 95. P. 023120.
8. Vasileska D., Goodnick S.M. Computational Electronics. Morgan and Claypool, 2006. 2016 p.
9. Fawcett W., Boardman D.A., Swain S. Monte Carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide // *J. of Physical Chemistry Solids.* 1970. Vol. 31. P. 1963–1990.
10. Persson C., Lindefelt U. Dependence of energy gaps and effective masses on atomic positions in hexagonal SiC. *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 86, № 11. P. 5036–5039.
11. Hockney R., Eastwood J. Numerical simulation using particles. M., 1987. 640 p.
12. Shur M. Sovremennye pribory na osnove arsenida gallija. M.: Mir, 1991. 632 s. (in Russ.)
13. Mishhenko V.N. Trehmernoe modelirovanie vyhodnyh harakteristik GaAs tranzistorov s submikronnoj dlinoj zatvora // *Dokl. BGUIR.* 2016. № 6 (100). С. 113–116. (in Russ.)
14. High-field transport in two-dimensional grapheme / Fang Tian [et al.] // *Physical Review.* 2011. Vol. B 84. P. 125450.
15. Murav'ev V.V., Mishhenko V.N. Modelirovanie processov perenosa jelektronov v poluprovodnikovoj strukture iz karbida kremnija // *Dokl. BGUIR.* 2017. № 2 (104). С. 53–57. (in Russ.)
16. Murav'ev V.V., Mishhenko V.N. Opredelenie intensivnostej rasseivaniya jelektronov v odinochnom sloe grafena // *Dokl. BGUIR.* 2017. № 6 (108). С. 42–47. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Муравьев В.В., д.т.н., 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. +375-17-293-80-70;  
e-mail: mishchenko@bsuir.by  
Мищенко Валерий Николаевич

### Information about the authors

Murav'ev V.V., D.Sci, professor of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Mishchenko V.N., PhD., associate professor of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-80-70;  
e-mail: mishchenko@bsuir.by  
Mishchenko Valery Nickolaevich