

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Боровой, Н.А., Куницкий, Ю.А., Каленик, А.А., Овсиенко, И.В., Цареградская, Т.Л. Наноматериалы, нанотехнологии, наноприборы / Н.А. Боровой. – Киев: Интсервис, 2015. – с.
2. Шпак, А.П., Лысов В.И., Куницкий, Ю.А., Цареградская, Т.Л. Кристаллизация и аморфизация металлических систем. / А.П. Шпак. – Киев: Академперіодика, 2002. – 207 с.
3. Мацуй, Л.Ю., Овсиенко, И.В., Федоров, В.Е. Моделирование процессов образования нанокompозитного материала "графит – оксид металла" / Металлофизика и новейшие технологии. – 2006. – Т.28, №4. – С. 521–533.
4. Исследование нанокompозиционных материалов системы С-Со / Л.Ю. Мацуй [и др.] // Неорганические материалы. – 2003. – 39, № 11. – С.1329–1336.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА И ГЕКСОГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

**В. В. Муравьев, В. Н. Мищенко**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, 220012 Минск, Беларусь, e-mail: mishchenko@bsuir.by*

С использованием метода Монте-Карло разработана программа для моделирования выходных характеристик полевых транзисторов, включающих в себя слои графена и гексагонального нитрида бора. Получены основные характеристики полевого транзистора – зависимости выходного тока стока от величины постоянного напряжения на затворе. Показана перспективность использования графена в конструкциях полупроводниковых приборов диапазонов СВЧ и КВЧ.

**Ключевые слова:** графен; нитрид бора; метод Монте-Карло; полупроводниковый прибор.

## MODELING THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF FIELD TRANSISTORS USING GRAPHENE AND HEXOGONAL BORON NITRIDE

**V. V. Muravyev, V. N. Mishchenka**

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki, 6, 220012 Minsk, Belarus,  
Corresponding author: V. N. Mishchenka (mishchenko@bsuir.by)*

A program has been developed using the Monte Carlo method to simulate the output characteristics of field-effect transistors using graphene and boron hexagonal nitride. The main characteristics of the field-effect transistor – dependence of the flow output current on the value of direct voltage at the gate – have been obtained. Perspectivity of use of graphene in constructions of semiconductor devices of microwave and microwave ranges is shown.

**Key words:** graphene; boron nitride; the Monte Carlo method; semiconductor device.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования, выполненные в последние годы, показали, что графен, представляющий собой слой углерода, обладает совокупностью ряда уникальных свойств и характеристик, например, большой механической прочностью и высокой теплопроводностью. Но одно из свойств графена – высокая подвижность носителей заряда, которая является одной из самой большой среди всех известных материалов, делает его перспективным материалом для использования в электронике и прогнозирует в будущем широкое использование в интегральных микросхемах [1–2]. Однако для реализации уникальных свойств этого материала в электронике необходимо разработка многослойных структур на основе графена и ряда других материалов – нитрида бора (BN), карбида кремния, дисульфидов некоторых металлов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

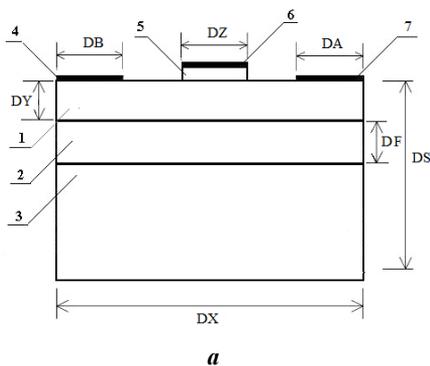
Для анализа многослойной приборной структуры с использованием одиночного слоя графена, размещенного на двухслойной подложке, состоящей из материалов нитрид бора и арсенид галлия, была разработана программа, в которой использовался метод Монте-Карло. Рассматривались следующие основные механизмы рассеивания электронов в графене: на оптических фононах, на примесях, на акустических фононах и электронно-электронное рассеивание [3, 4]. Путем моделирования получены основные выходные характеристики – зависимости выходного тока стока от величины постоянного напряжения на затворе. Моделирование выполнялось для значения температуры  $T = 300$  К, концентрации электронов в слое графена равном  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Исследованная полупроводниковая структура представлена на рис. 1. На этом рисунке показаны следующие элементы конструкции: 1 – слой графена, 2 – слой из гексагонального нитрида бора, 3 – слой из материала GaAs, 4 – исток, 5 – слой диэлектрика из двуокиси кремния, 6 – затвор, 7 – сток. Общая длина структуры, отмеченная параметром DX, принималась равной  $1 \cdot 10^{-6}$  м. Длина затвора, параметр DZ, равнялась  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м. Величины параметров DY и DF принимались равными  $0,34 \cdot 10^{-9}$  м. Величины параметров DA и DB, которые характеризуют контактные области, принимались равными  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м. Величина параметра DS принималась равной  $0,34 \cdot 10^{-7}$  м.

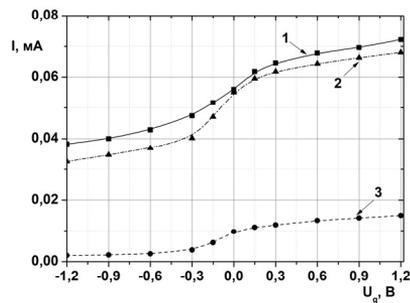
На рис. 2 показаны полученные путем моделирования зависимости выходного тока стока от величины постоянного напряжения на затворе. Кривая 1 получены для конструкции, представленной на рис. 1, с использованием одиночного слоя графена при толщине слоя двуокиси кремния (элемент 5 на рис. 1) равной величине  $0,34 \cdot 10^{-9}$  м. При этом кривые 1–3 на рис. 2 получены при постоянном напряжении на стоке равном 1,5 В, а напряжение на затворе изменялось в диапазоне значений от – 1,2 В до 1,2 В. Кривая 2 получена для конструкции, представленной на рис. 1, но при отсутствии слоя из материала нитрид бора (элемент 2 на рис. 1). Кривая 3 получена для конструкции транзистора, представленной на рис. 1, но без использования подложки из материала GaAs (элемент 3 на рис. 1). При этом общие размеры структуры и величины питающих напряжений при моделировании кривых 2 и 3, показанных на рис. 2, не менялись.

Анализ кривых 1–3, представленных на рис. 2, показывает, что выходной ток стока имеет максимальную величину и соответственно обеспечивается максимальная

крутизна выходной характеристики для конструкции, показанной на рис. 1, при размещении слоя графена на слое тонкого BN.



**Рисунок 1.** – Структура полупроводникового прибора, содержащего графен и нитрид бора



**Рисунок 2.** – Зависимости выходного тока стока от величины постоянного напряжения на затворе

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что использование одиночного слоя графена, расположенного на слое BN, позволяет получить приблизительно на 5–20 % более высокие значения выходного тока полевого транзистора и высокие значения крутизны выходной характеристики в сравнении с транзисторами, которые не используют этот слой. Эти обстоятельства, учитывая высокую подвижность и скорость электронов в слое графена, должны обеспечить хорошие выходные характеристики и широкий частотный диапазон работы разрабатываемых с использованием графена новых функциональных приборов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov [et al.] // Science. – 2004. – V. 306, P. 666–669.
2. High-field transport and velocity saturation in grapheme / Chauhan Jyotsna, Guo Jing // Appl. Phys. Letters. – 2009. – V. 95, P. 023120.
3. Интенсивности рассеивания носителей заряда в графене, расположенном на подложке из гексагонального нитрида бора / В.В. Муравьев, В.Н. Мищенко // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8 (126). – С. 141–147.
4. Определение интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена / В.В. Муравьев, В.Н. Мищенко // Доклады БГУИР. – 2017. № 6 (108). – С. 128–129.