

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ В ДИАПАЗОНАХ СВЧ И КВЧ

В.Н. Мищенко

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Графен, обладающий высокой подвижностью заряда, которая превышает подвижность носителей заряда для всех известных материалов, рассматривается в настоящее время как один из наиболее перспективных материалов для создания новых полупроводниковых приборов. Приведены результаты моделирования выходных характеристик полевых транзисторов с использованием графена и его модификаций в диапазонах СВЧ и КВЧ. Моделирование выполнялось с использованием метода Монте Карло, который позволяет исследовать основные выходные характеристики полевых транзисторов, содержащих области графена и модифицированного графена. Полученные в результате моделирования характеристики и параметры полевых транзисторов могут быть использованы для создания новых устройств диапазонов СВЧ и КВЧ, обладающих улучшенными выходными параметрами и характеристиками.

**Ключевые слова:** графен; фтор; водород; моделирование; полевой транзистор.

## MODELING OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS USING GRAPHENE AND ITS MODIFICATIONS IN THE MICROWAVE AND MWR RANGE

V.N. Mishchanka

*Educational Institution “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Graphene, which possesses high charge carrier mobility and velocity, exceeding that of all known materials, is currently considered one of the most promising materials for the creation of new semiconductor devices. The results of modeling the output characteristics of field-effect transistors using graphene and its modifications in the microwave and millimeter-wave ranges are presented. The modeling was performed using the Monte Carlo method, which allows one to investigate the key output characteristics of field-effect transistors containing graphene and modified graphene regions. The characteristics and parameters of the field-effect transistors obtained from the modeling can be used to create new microwave and millimeter-wave devices with improved output parameters and characteristics.

**Keywords:** graphene; fluorine; hydrogen; modeling; field-effect transistor.

## Введение

Исследования, выполненные в последние годы, показали, что графен, представляющий собой двухмерный слой углерода, обладает совокупностью ряда уникальных свойств и характеристик, например, большой механической жесткостью и рекордно большой теплопроводностью. Но одно из свойств графена – высокая подвижность носителей заряда, которая является одной из самой высокой среди всех известных материалов, делает его перспективным материалом для использования в электронике и прогнозирует в будущем возможную замену более изученных и популярных материалов в интегральных микросхемах [1]. Однако для реализации уникальных свойств графена необходима разработка и исследование новых полевых транзисторов диапазонов СВЧ и КВЧ на основе графена и его модификаций с использованием атомов водорода, фтора и других элементов.

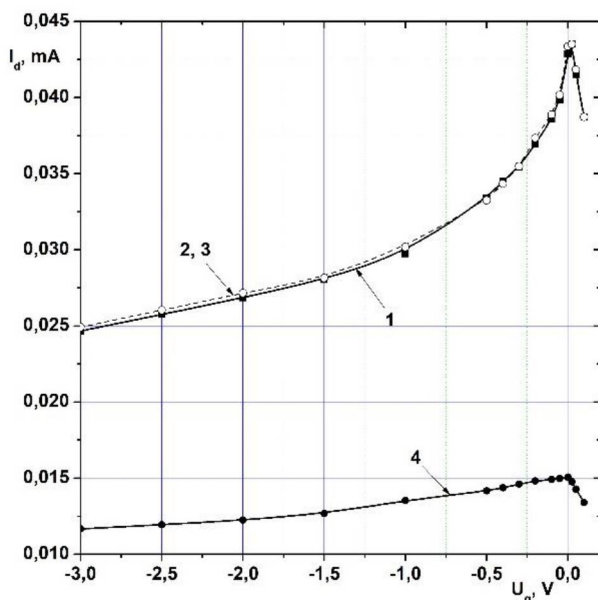
### Метод и особенности моделирования характеристик графена и его модификаций, входящих в состав полевых транзисторов

Моделирование из первых принципов графена и его модификаций, входящих в состав полевых транзисторов, было выполнено с помощью программных комплексов Quantum Espresso [2] и EPW [3]. Использовалось обобщенное градиентное приближение вида GGA при параметризации Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE). Были применены следующие параметры моделирования: энергия отсечки волновой функции составляла величину  $60 R_y$  ( $1 R_y \approx 13,605$  эВ), энергия отсечки плотности заряда и потенциалов –  $350 R_y$ , зона Бриллюэна была представлена с помощью сетки Монкхорста-Пака размером  $12 \times 12 \times 1$ . С помощью программного комплекса EPW были получены зависимости интенсивностей рассеивания носителей заряда для графена и его модификаций с использованием атомов водорода и фтора –  $C_2H_2$  или  $C_2F_2$  [4], которые далее были использованы в программе моделирования выходных характеристик исследованного полевого транзистора.

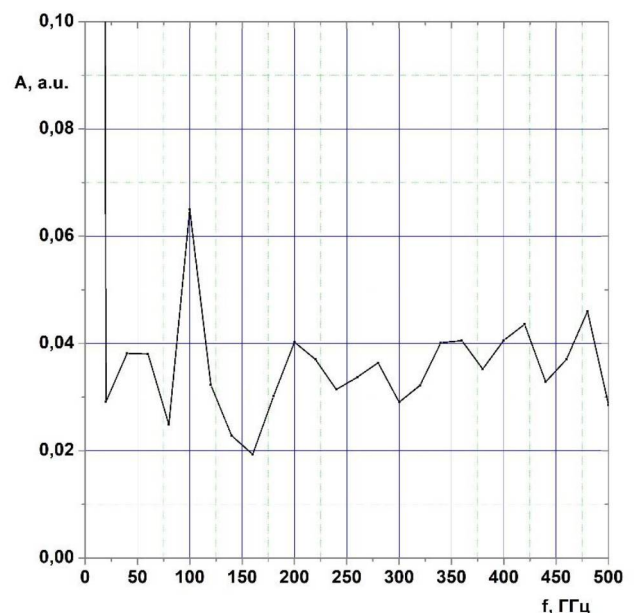
Для анализа полевого транзистора, который включал в себя области графена и его модификаций с использованием атомов водорода или фтора, была разработана программа, в которой использовался метод Монте-Карло. Рассматривались следующие основные механизмы рассеивания носителей заряда в графене и его модификациях с использованием атомов водорода и фтора: на оптических фононах, на примесях, на акустических фононах. Путем моделирования получены основные выходные характеристики – зависимости выходного тока стока от величины постоянного напряжения на затворе, которые позволили получить зависимости коэффициента усиления исследуемого полевого транзистора. Моделирование выполнялось для значения температуры

$T = 300$  К, концентрации электронов в слоях графена, гидрированного графена и GaAs равном  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Общая длина структуры принималась равной  $1 \cdot 10^{-6}$  м, длина затвора – равной  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м. Кривая 1 на рисунке а получена для конструкции при использовании только слоя графена на подложке из арсенида галлия без областей гидрированного или фторированного графена. Кривые 2 и 3 на рис. а получены для конструкции, которая содержит области графена и область модификации графена с использованием атомов водорода или фтора. Кривая 4 на рисунке а получена для конструкции при использовании только материала арсенид галлий, т.е. без использования слоев графена и областей гидрированного или фторированного графена. Анализ кривых 1–4, представленных на рисунке а, показывает, что выходной ток полевого транзистора, который содержит области графена и его модификации с использованием атомов водорода и фтора, имеет большую величину по сравнению с конструкцией, которая не имеет графена и гидрированного или фторированного графена.

Для представленной структуры путем моделирования была получена зависимость выходного тока полевого транзистора со слоем графена и гидрированного графена при подаче на вход, т.е. к ее затвору, внешнего гармонического сигнала с частотой 100 ГГц и амплитудой  $U_s = 0,003$  В в диапазоне КВЧ.



а. Зависимости выходного тока стока от величины напряжения на затворе  
a. Dependence of the output drain current on the gate voltage



б. Спектральная характеристика выходного сигнала полевого транзистора с использованием графена и гидрированного графена  
b. Spectral characteristic of the output signal of a field-effect transistor using graphene and hydrogenated graphene

На рис. 6 показана действительная часть комплексной амплитуды спектра, которая была получена путем преобразования Фурье, которое было применено к массиву полученных данных зависимости выходного тока от времени. Таким образом, за счет использования графена и его модификации – гидрированного и фторированного графена может быть получена возможность улучшения выходных характеристик в диапазоне КВЧ по сравнению с известными полевыми транзисторами, разработанными без использования графена и его модификаций.

### Заключение

Установлено, что применение графена и его модификаций с использованием атомов водорода или фтора позволяет получить более высокие значения выходного тока полевого транзистора (приблизительно, на 30–50 %), высокие значения крутизны выходной характеристики и коэффициента усиления в сравнении со аналогичными полевыми транзисторами, которая не используют графен и его модификации. Эти обстоятельства, учитывая высокую подвижность и скорость носителей заряда в слое графена, должны обеспечить хорошие выходные характеристики и широкий частотный диапазон работы разрабатываемых с использованием графена и его модификаций новых функциональных приборов и устройств диапазонов СВЧ и КВЧ.

### Список использованных источников / References

1. Novoselov K. S., Geim A. K., et al. (2004) Electric field effect in atomically thin carbon film. *Science*, 306, 666-669.
2. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., et al. (2009) QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *J. Phys.: Condens. Matter*. 21. 395502.
3. Lee H., Poncé S., Bushick K., Hajinazar S., Lafuente-Bartolome J., Leveillee J., et al. (2023) Electron-phonon physics from first principles using the EPW code. *npj Computational Materials*. 9. 156.
4. Mishchanka V.N. (2024) First-principles modeling of electron-phonon scattering rates in graphene. *Modern Electronic Materials*. 10 (3). 177-184.

### Сведения об авторе

**Мищенко В.Н.**, канд. техн. наук, доцент, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь, mishchenko@bsuir.by

### **Information about the author**

**Mishchanka V.N.**, PhD, associate professor, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk, Republic of Belarus, [mishchenko@bsuir.by](mailto:mishchenko@bsuir.by).