Моделирование выходных характеристик полевого транзистора на основе двухслойного графена с h-BN подзатворными диэлектриками

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В.А., Ермак В.О.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация: *В докладе представлены результаты расчета электрических характеристик полевого транзистора (ПТ) на основе двухслойного графена (ДГ) с h-BN подзатворными диэлектриками при различных температурах окружающей среды. Моделирование проводилось с применением разработанной квантовой диффузионно-дрейфовой модели полевого транзистора, учитывающей открытие запрещенной зоны в двухслойном графеновом канале прибора при приложении напряжения к затворам транзистора.*

1. Введение

Разработка полевых транзисторов на основе 2D-материалов, в том числе на двухслойном графене, является перспективным направлением наноэлектроники. В настоящее время на основе графена созданы различные приборные структуры, а именно: транзисторы, диоды и т.д. Материальная система графен-hBN является перспективной не только для использования в качестве элементов двумерной электроники, но и в высокочувствительных биологических сенсорах. Особый интерес представляет моделирование приборных структур на основе ДГ.

2. Модель. Результаты моделирования

С помощью квантовой диффузионно-дрейфовой модели ПТ на ДГ [1-5] были проведены расчеты выходных характеристик двухзатворного ПТ на ДГ с h-BN подзатворными диэлектриками для случая напряжения на верхнем затворе равном –3В при комнатной температуре (рис. 1). При расчетах использованы следующие параметры: длина канала L = 5 мкм, ширина канала W= 4 мкм, эффективная масса ДГ $m^*=0{,}0311m_0$, толщина верхнего диэлектрика d_{top} = 7,8 нм, что соответствует 25 слоям гексагонального нитрида бора (h-BN), толщина нижнего диэлектрика 90,48 нм (h-BN), эффективная энергия оптических фононов $\hbar\Omega$ = 101,7 мэВ, подвижность электронов в двухслойном графеновом канале μ_e=0,026 м^2/В·с, подвижность дырок в ДГ μ_h=0,0397 м^2/В·с, сопротивления на стоке и истоке $R_d = R_s = 50$ Ом, напряжение Дирака на верхнем затворе V_{gtop0} = -2,35 В, напряжение Дирака на нижнем затворе V_{gback0} = 2,8 В, напряжение на нижнем затворе V_{gback} = -30 В. Точность задания параметров моделирования, в частности диэлектрической проницаемости гексагонального нитрида бора, оказывает видимое влияние на электрические характеристики прибора.

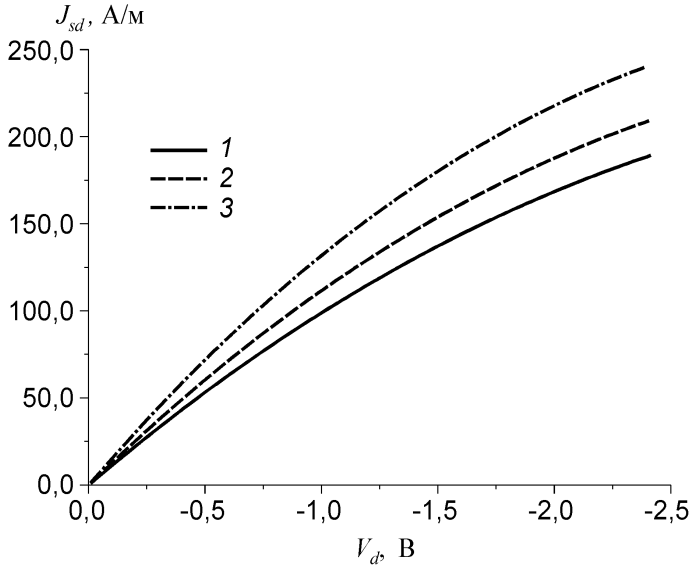


Рис. 1. Выходные характеристики полевого транзистора на основе ДГ с h-BN в качестве подзатворных диэлектриков при различных значениях диэлектрической проницаемости:
1) $\varepsilon = 3{,}0\varepsilon_0$; 2) $\varepsilon = 3{,}76\varepsilon_0$; 3) $\varepsilon = 5{,}09\varepsilon_0$

В работах различных авторов встречаются следующие значения этого параметра: 3÷4 ε_0 [6], 5,09 ε_0 [7], где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. На рис. 1 показаны характеристики ПТ на ДГ, с кривыми соответствующими различным значениям диэлектрической проницаемости подзатвоных диэлектриков (h-BN), а именно: кривая 1 соответствует $\varepsilon = 3{,}0\varepsilon_0$, кривая 2 – $\varepsilon = 3{,}76\varepsilon_0$, кривая 3 – $\varepsilon = 5{,}09\varepsilon_0$. Установлено, что с увеличением ε, плотность тока увеличивается.

В дальнейших расчетах использовано значение диэлектрической проницаемости гексагонального нитрида бора равное $3{,}76\varepsilon_0$. Проведено исследование выходных ВАХ ПТ на ДГ при различных температурах окружающей среды. На рис. 2 кривая 1 соответствует температуре окружающей среды равной 77 К, кривая 2 – 150 К, кривая 3 – 250 К, кривая 4 – 300 К. Установлено, что с увеличением температуры, ток стока возрастает.

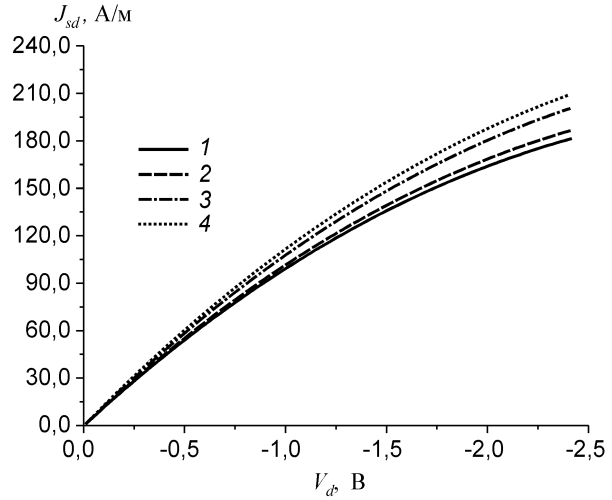


Рис. 2. Выходные характеристики полевых транзисторов на основе ДГ с h-BN в качестве подзатворных диэлектриков при различных температурах окружающей среды:
1) T = 77 K; 2) T =150 K; 3) T=250 K; 4) T=300 K

3. Заключение

Таким образом, показана возможность использования разработанной квантовой диффузионно-дрейфовой модели для исследования ПТ на основе ДГ с h-BN подзатворными диэлектриками. Показано влияние температуры окружающей среды на выходные характеристики исследуемого прибора. Исследование проведено с помощью системы моделирования наноэлектронных приборов NANODEV [8].

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований "Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии" Республики Беларусь.

Список литературы

1. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 444 с.
2. Abramov I. I., Labunov V. A., Kalameitsava N. V., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Quantum drift-diffusion models for dual gate field-effect transistors based on mono- and bilayer graphene // Proc. of SPIE. 2022. V. 12157. P. 121570X-1-6.
3. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А. Моделирование перспективных приборов наноэлектроники. Часть I. Модели // Нано- и микросистеманя техника. 2025. Т. 27. № 4. С. 167-172.
4. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование приборных структур наноэлектроники на основе 2D материалов // Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век. 2023. Т. 15. № 1. С.54-68.
5. Abramov I. I., Labunov V. A., Kalameitsava N. V. Simulation of field-effect transistors based on bilayer graphene and resonant-tunneling heterostructures based on 2D-materials with vertical transport // Russian Microelectronics. 2025. V. 54. N 8. P. 953-957.
6. Meric I. Characterization of graphene field-effect transistors for high performance electronics / Columbia University. Thesis. 2011. 72 p.
7. Perebeinos V., Avouris P. Inelastic scattering and current saturation in graphene // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. N 19. P. 195442-1–8.
8. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211E1-1-11.