

Алгоритм и программа, реализующие модель полевых транзисторов на двухслойном графене

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Щербакова И. Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация: На основе предложенной квантовой диффузионно-дрейфовой модели полевых транзисторов на двухслойном графене разработаны алгоритм и программное обеспечение, позволяющее рассчитывать выходные характеристики исследуемых приборов в зависимости от конструктивно-технологических параметров структур, а также вычислять значения ряда параметров.

1. Введение

В последнее десятилетие проводятся исследования приборных структур на основе графена и других 2D-материалов. В наших работах [1,2] проведено детальное описание разработанной квантовой диффузионно-дрейфовой модели полевых транзисторов на двухслойном графене, а в работах [3-5] – на однослойном графене. Отметим, что важным для исследования наноэлектронных приборов является их моделирование [6]. В данной работе проведено моделирование вольт-амперных характеристик (ВАХ) полевых транзисторов на двухслойном графене с помощью разработанных алгоритма и программного обеспечения.

2. Модель, алгоритм и программа. Результаты

Были разработаны алгоритм и программное обеспечение, реализующие модель полевого транзистора на двухслойном графене и предназначенные для расчета выходных характеристик прибора. Учтено три случая токопереноса, а именно: когда носителями заряда являются электроны, дырки, а также одновременно электроны и дырки. Для каждого случая использованы полученные ранее выражения для коэффициента квантовой емкости. Алгоритм включает следующие блоки: 1) блок задания исходных данных структуры исследуемого полевого транзистора на двухслойном графене; 2) расчет емкостей верхнего и нижнего затворов; 3) расчет вертикальных полей верхнего и нижнего затворов, а также усредненное поле полевого транзистора; 4) расчет открываемой ширины запрещенной зоны в двухслойном графене; 5) расчет остаточной плотности носителей заряда в канале полевого транзистора на двухслойном графене; 6) расчет квантовой емкости без учета коэффициента α ; 7) самосогласованный расчет электростатического потенциала с учетом коэффициента квантовой емкости α . Самосогласованный расчет осуществляется итерационным методом и продолжается до тех пор, пока поправка электростатического потенциала не станет меньше заданного значения. Далее рассчитываются общая плотность заряда в двухслойном графене и скорость насыщения. Эффективная подвижность находится усреднением значений подвижностей электронов и дырок. На завершающем этапе находится плотность тока с учетом сопротивлений на истоке и стоке в зависимости от напряжения на стоке при фиксированном напряжении на верхнем затворе.

С помощью разработанного на основе предложенного алгоритма, программного обеспечения были проведены расчеты ВАХ двухзатворного полевого транзистора на двухслойном графене с длиной канала 4 мкм [7]. Исследовано влияние напряжения на нижнем затворе на характеристики данной приборной структуры, т.е. напряжение сток-исток изменялось в диапазоне от 0 до -2,5 В при фиксированном напряжении на верхнем затворе -3 В, в то время как напряжение на нижнем затворе оставалось неизменным для каждого из рассмотренных случаев, а именно: 1 – $V_{bg} = -60$ В; 2 – $V_{bg} = -50$ В; 3 – $V_{bg} = -40$ В; 4 – $V_{bg} = -30$ В; 5 – $V_{bg} = -20$ В; 6 – $V_{bg} = -10$ В. В исследованиях некоторых авторов, утверждалось, что нижний затвор практически не оказывает влияния на ВАХ, однако теоретические расчеты, полученные с помощью предложенной модели показывают, что это влияние может быть существенным. По-видимому, все зависит от толщины и материала подложки, а также от толщины и материала нижнего подзатворного диэлектрика. В расчетах учитывается только толщина диэлектрика нижнего затвора (контакт нижнего затвора присоединен непосредственно к подложке), а толщина подложки в модели не учитывается. Если в полевого транзисторе на двухслойном графене толщина нижнего диэлектрика намного превышает толщину верхнего, влиянием подложки можно пренебречь [8].

Однако, в случае использования более тонкой подложки и более тонкого диэлектрика нижнего затвора (менее 1 мкм) [8], например, при толщине нижнего диэлектрика 90 нм влияние напряжения на нижнем затворе может быть важным, т.к. на полученных нами зависимостях при определенных значениях напряжения сток-исток плотность тока резко возрастает, а ВАХ при различных V_{bg} отличается количественно. Процесс резкого возрастания плотности тока принято считать следствием межзонного туннелирования.

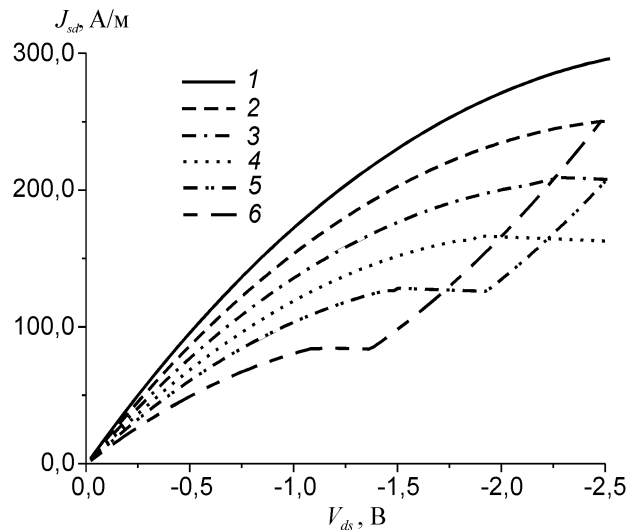


Рис. 1. Выходные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене при различных напряжениях на нижнем затворе

3. Заключение

Разработан алгоритм и программное обеспечение, реализующие квантовую диффузионно-дрейфовую модель полевых транзисторов на двухслойном графене, и позволяющие рассчитывать выходные характеристики исследуемых приборов. Проведены расчеты характеристик полевого транзистора на основе двухслойного графена с двумя затворами. Построены графики зависимостей плотностей токов исследуемой структуры от напряжения между стоком и истоком при фиксированных напряжениях на верхнем затворе. Исследовано влияние напряжения на нижнем затворе на изменение данных характеристик.

Разработанная программа, реализующая квантовую диффузионно-дрейфовую модель полевого транзистора на двухслойном графене, включена в систему моделирования нанoeлектронных приборов и устройств NANODEV [9], разрабатываемую в БГУИР с 1995 года.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований "Конвергенция" Республики Беларусь.

Список литературы

1. 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. 12157X-1-6.
2. Абрамов И. И., Лабунов В. А., Коломейцева Н. В., Щербакова И. Ю. Моделирование приборных структур на основе двухслойного графена и других 2D-материалов с помощью системы NANODEV // X Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники» 12-14 октября 2022, Минск, БГУ, С. 330-334.
3. Abramov I. I., Kolomeitseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Yu. Influence of gate dielectrics of field-effect graphene transistors on current-voltage characteristics // Russian Microelectronics. 2021. V. 50, N 2. P. 118-125.
4. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomeitseva N. V., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of graphene field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on carbon nanomaterials // Proc. of SPIE. 2019. V. 110222. P. 110222F-1-11.
5. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами в различных режимах функционирования // Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век. 2018. №3. С. 16-24.
6. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и нанoeлектроники, LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2016. 444 с.
7. Szafrank B. N., Fiori G., Schall D., Neumaier D., Kurz H. Current saturation and voltage gain in bilayer graphene field effect transistors // Nano Lett. 2012. V. 12, N 3. P. 1324-1328.
8. Feijoo P.C., Pasadas F., Bonmann M., Asad M., Yang X., Generalov A., Vorobiev A., Banszerus L., Stampfer C., Otto M., Newmaier D., Stake J., Jimenez D. Does carrier velocity saturation help to enhance f_{max} in graphene field-effect transistors? // Nanoscale Adv. 2020. V. 2. P. 4179-4186.
9. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva 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.