

Инструментарий для расчета полевых транзисторов на основе двухслойного графена

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

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

Аннотация: В работе представлен инструментарий, реализующий квантовую диффузионно-дрейфовую модель полевого транзистора (ПТ) на двухслойном графене (ДГ). С его помощью проведено моделирование вольт-амперных характеристик ПТ на ДГ с различными диэлектриками верхнего затвора.

1. Введение

Последнее десятилетие проводился ряд исследований нанoeлектронных приборов [1], в том числе на основе одно- и двухслойного графена, которые лежат в основе нанoeлектронных устройств [2]. В частности, прогнозирование характеристик позволяет подобрать конструкции устройств с оптимальными параметрами.

2. Инструментарий. Модель. Результаты моделирования

В работе рассмотрена квантовая диффузионно-дрейфовая модель ПТ на ДГ. Ее детальное описание приведено в [2,3]. На первом этапе в модели осуществляется самосогласованный расчет электростатического потенциала V с учетом коэффициента квантовой емкости α . Открытие запрещенной зоны E_g в графеновом канале позволяет снизить токи утечки и учитывается при расчете коэффициента α . Возможны три случая токопереноса в ПТ на ДГ. В первом случае, когда канал ПТ, представляющий собой ДГ, является каналом n-типа, $qV \geq E_g/2$, где q — заряд электрона. В этом случае уровень Ферми перекрывает минимум зоны проводимости. Во втором случае, когда канал ПТ является каналом p-типа проводимости, $qV \leq -E_g/2$. В этом случае уровень Ферми перекрывает максимум валентной зоны. В третьем случае, когда канал обладает свойством биполярности, т.е. проводимость канала меняется от p-типа к n-типу, $-E_g/2 < qV < E_g/2$. Расчет реализуется самосогласованно итерационным методом и продолжается до тех пор, пока поправка электростатического потенциала не достигнет определенного значения. Далее находятся общая плотность листа ДГ, скорость насыщения, эффективная подвижность носителей заряда. Последняя находится усреднением значений подвижностей электронов и дырок. Уравнения по нахождению данных величин приведены в [2]. 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.

Модель реализована в виде двух программ на языке Compact Visual Fortran и предназначена для моделирования выходных и передаточных характеристик ПТ на ДГ. На примере ПТ на ДГ с длиной канала равной 4 мкм проведено исследование влияния параметров, необходимых для расчета вольт-амперных характеристик прибора: квантовая емкость, ширина открываемой запрещенной зоны в ДГ, остаточная плотность носителей заряда, общая плотность носителей заряда. Исследование подтвердило адекватность предложенной модели.

Исследуемым прибором является ПТ на ДГ с Al_2O_3 в качестве диэлектрика верхнего затвора, и с SiO_2 в качестве диэлектрика нижнего затвора. Проведена оценка квантовой емкости ПТ на ДГ при $V_{gback} = -60$ В. Квантовая емкость представляется в модели в виде произведения базового значения этого параметра, зависящего от эффективной массы ДГ, и коэффициента квантовой емкости α . Для исследуемого ПТ на ДГ величина квантовой емкости колеблется в диапазоне от 0 до $1,89 \cdot 10^{-2}$ В/м при приложенных напряжениях от 0 до -6 В.

Также был проведен расчет выходных вольт-амперных характеристик приборных структур с одинаковыми геометрическими размерами и отличающимися материалом диэлектрика верхнего затвора. Моделирование было проведено при комнатной температуре, напряжении на верхнем затворе равном -3 В. На рис. 1 приведены результаты расчетов характеристик ПТ на ДГ при напряжении на нижнем затворе -10 В. Кривая 1 соответствует диэлектрику верхнего затвора толщиной 8 нм SiC , кривая 2 — Al_2O_3 ; кривая 3 — $h-BN$; кривая 4 — SiO_2 . На примере кривой 1 рассмотрим переход проводимости канала ПТ от p-типа к n-типу. В диапазоне напряжений V_{ds} от 0 до $-1,05$ В, канал обладает p-типом проводимости, от $-1,34$ до $-2,5$ В — n-типом проводимости, и, наконец, на участке между $-1,05$ и $-1,34$ В носителями заряда являются как электроны, так и дырки. Аналогичные исследо-

вания проведены для ПТ на ДГ при напряжении на нижнем затворе – 60 В. Здесь наблюдается р-тип проводимости канала.

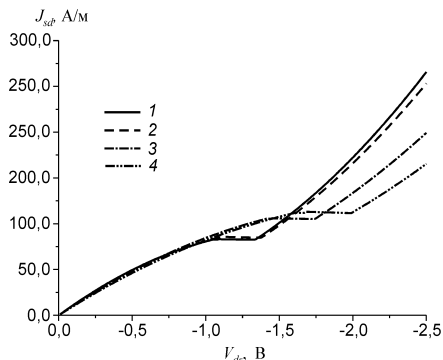


Рис. 1. Выходные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене при напряжении на нижнем затворе – 10 В с различными диэлектриками верхнего затвора:
1 — SiC; 2 — Al₂O₃; 3 — h-BN; 4 — SiO₂

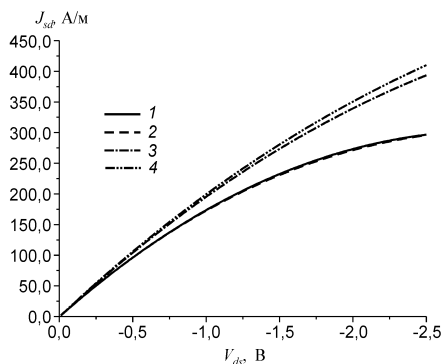


Рис. 2. Выходные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене при напряжении на нижнем затворе – 60 В с различными диэлектриками верхнего затвора:
1 — SiC; 2 — Al₂O₃; 3 — h-BN; 4 — SiO₂

3. Заключение

Разработанный инструментарий, реализующий квантовую диффузионно-дрейфовую модель ПТ на ДГ, включен в систему моделирования нанозлектронных приборов и устройств NANODEV [4], разрабатываемой в БГУИР с 1995 года. С его помощью исследованы вольт-амперные характеристики различных ПТ на ДГ.

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

Список литературы

1. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и нанозлектроники, LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2016. 444 с.
2. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование приборных структур нанозлектроники на основе 2D материалов // Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век. 2023. Т. 15. № 1. С.54-68.
3. Abramov I.I., Labunov V.A., Kalameitseva 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.
4. 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.