

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.27.215-222

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф., **Н. В. Коломейцева**, ст. науч. сотр.,
В. А. Лабунов, д-р техн. наук, академик НАНБ, академик РАН, проф., зав. лаб.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, 220013,
Республика Беларусь. E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИБОРОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ. ЧАСТЬ II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поступила в редакцию 20.02.2025

Принята к публикации 05.03.2025

Предложены модели перспективных приборов на основе 2D-материалов, а именно: квантовая диффузионно-дрейфовая модель полевого транзистора на двухслойном графене, модель резонансно-туннельных структур (РТС) на основе 2D-материалов с вертикальным транспортом и модель резонансно-туннельных диодов (РТД), содержащих GaN, с вертикальным транспортом. С использованием моделей проведены исследования электрических характеристик приборных структур, включающих одно- и двухслойный графен, диоксид молибдена, карбид кремния, диселенид вольфрама, нитрид галлия.

В части II рассмотрены результаты моделирования на основе предложенных моделей.

Ключевые слова: полевой транзистор, одно- и двухслойный графен, вольт-амперная характеристика, комбинированная модель, моделирование, 2D-материалы, резонансно-туннельные структуры

Результаты моделирования графеновых полевых транзисторов

Проведено сравнение результатов моделирования выходных и передаточных характеристик графеновых полевых транзисторов (ПТ) с токопроводящим каналом, представляющим собой одно- и двухслойный графен, с помощью квантовых диффузионно-дрейфовых моделей, разработанных для ПТ на однослойном графене и для ПТ на двухслойном графене (ДГ), описанных в работе [1].

Поперечное сечение исследуемого двухзатворного ПТ на основе одно- и двухслойного графена приведено на рис. 1. ПТ на кремниевой подложке имеет два подзатворных диэлектрика SiO₂ толщиной 8 и 90 нм. Выходные характеристики получены при постоянном напряжении на верхнем затворе, равном -1 В (рис. 2) [2]. Передаточные характеристики рассчитаны при фиксированном напряжении на стоке, равном -1 В (рис. 3). На рис. 2 и 3 кривая 1 соответствует ПТ с каналом ДГ, кривая 2 — ПТ с каналом, представляющим собой однослойный графен с параметрами подвижности носителей заряда $h = 0,1$; $m = 0,05$; кривая 3 — ПТ с каналом, представляющим собой

однослойный графен с параметрами, входящими в расчет эффективной подвижности носителей заряда ($h = 0,1$; $m = 1,0$). Рис. 3 показывает, что на передаточных характеристиках при равных приложенных напряжениях, температуре окружающей среды и геометрических параметрах прибора на характеристике

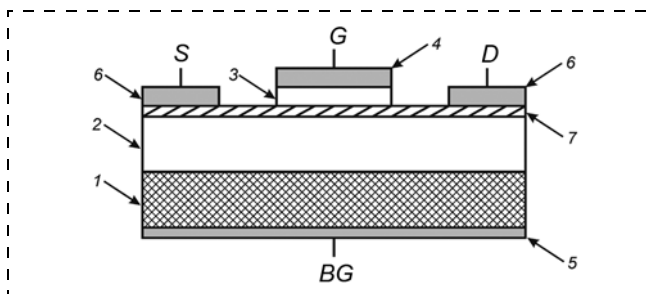


Рис. 1. Поперечное сечение двухзатворного ПТ на основе графена:

S — исток; G — верхний затвор; BG — нижний затвор; D — сток; 1 — подложка; 2 — диэлектрик нижнего затвора; 3 — диэлектрик верхнего затвора; 4 — металл верхнего затвора; 5 — металл нижнего затвора; 6 — металл истока и стока; 7 — одно- или двухслойный графен

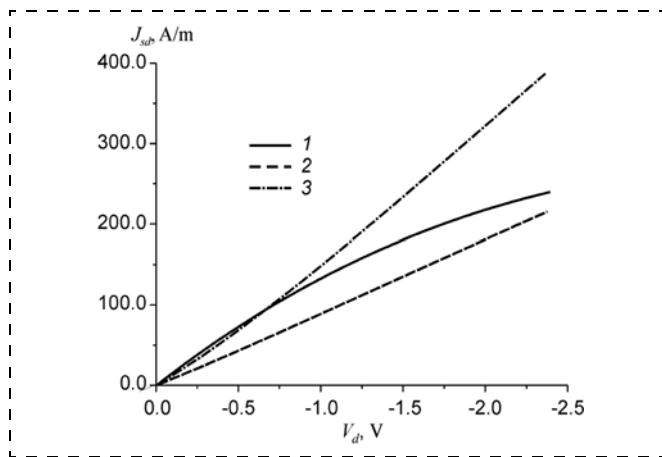


Рис. 2. Выходные характеристики ПТ с каналами из двухслойного (кривая 1) и однослойного графена (кривая 2, параметры подвижности $\mu = 0,1$; $m = 0,05$, кривая 3, параметры подвижности $\mu = 0,1$; $m = 1,0$)

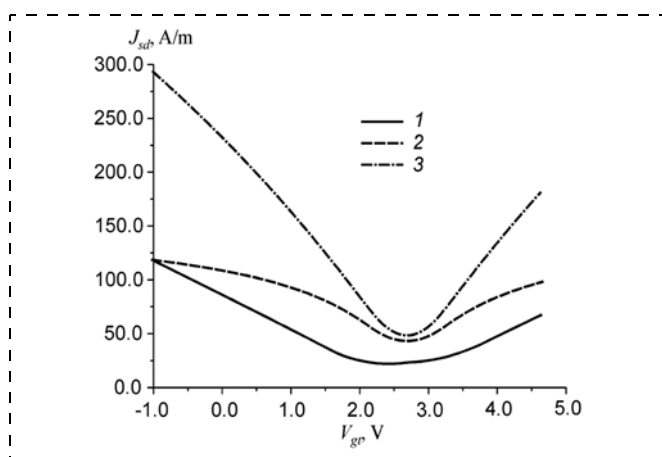


Рис. 3. Передаточные характеристики ПТ с каналами из двухслойного (кривая 1) и однослойного графена (кривая 2, параметры подвижности $\mu = 0,1$; $m = 0,05$), кривая 3 (параметры подвижности $\mu = 0,1$; $m = 1,0$)

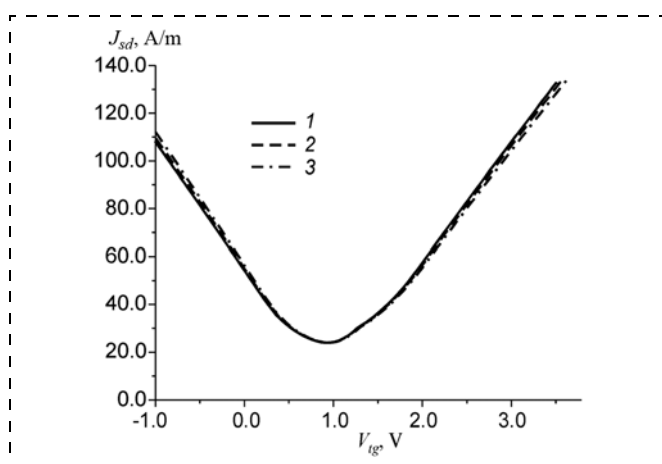


Рис. 4. Передаточные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене при различных суммарных сопротивлениях на стоке и истоке:

1 — 150 Ом; 2 — 300 Ом; 3 — 500 Ом

ПТ на ДГ наблюдается область насыщения (кривая 3, рис. 3). Это объясняется открытием запрещенной зоны в двухслойном графене, в результате чего он работает как полупроводник. Вследствие этого преимущество ПТ на ДГ перед ПТ на однослойном графене становится очевидным. На графиках приведены результаты моделирования для плотности тока стока.

Отметим, что приложение напряжения между верхним и нижним затворами ПТ на ДГ приводит к открытию запрещенной зоны в графеновом канале и улучшению тока насыщения на характеристиках устройства.

На рис. 4 показана зависимость плотности тока от напряжения на верхнем затворе при напряжении на стоке, равном 1 В, при различных суммарных сопротивлениях на стоке и истоке в предположении их равенства. Кривая 1 соответствует сопротивлению 150 Ом; кривая 2 — сопротивлению 300 Ом; кривая 3 — сопротивлению 500 Ом. Из рис. 4 следует, что сопротивления стока и истока слабо влияют на передаточные характеристики исследуемого прибора.

На примере ПТ на ДГ с длиной канала, равной 4 мкм, и с SiO_2 в качестве диэлектрика нижнего затвора проведено исследование выходных характеристик ПТ на ДГ. Толщину нижнего диэлектрика задавали равной 90 нм. Выполнен расчет вольт-амперных характеристик (ВАХ) 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. 5 [3] приведены результаты расчетов выходных характеристик ПТ на ДГ при напряжении на нижнем затворе -10 В. Кривая 1 соответствует диэлектрику верхнего затвора SiC ; кривая 2 — Al_2O_3 ; кривая 3 — $h\text{-BN}$; кривая 4 — SiO_2 (все диэлектрики толщиной 8 нм). 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 имеет p -тип проводимости, от $-1,34$ до $-2,5$ В — n -тип проводимости, и, наконец, на участке между $-1,05$ и $-1,34$ В носителями заряда являются как электроны, так и дырки. Аналогичные исследования проведены для ПТ на ДГ при напряжении на нижнем затворе -60 В. Здесь наблюдается p -тип проводимости канала (рис. 6) [3].

Исследования характеристик ПТ на ДГ показали, что сопротивления стока и истока слабо влияют на передаточные характеристики исследуемого прибора (см. рис. 4), поэтому в дальнейших расчетах сопротивления стока и истока не учитывали. На рис. 7 показаны передаточные характеристики ПТ на ДГ со следующими диэлектриками верхнего затвора: 1 — Al_2O_3 ; 2 — $h\text{-BN}$; 3 — SiO_2 . Расчеты проведены при фиксированном напряжении на стоке, равном -2 В, и напряжении на нижнем затворе, равном -60 В. Результаты моделирования показывают значительное различие характеристик приборных структур, обусловленное различными значениями диэлектрической проницаемости материала подзатворного диэлектрика и рассеянием на оптических фононах. Расчет от-

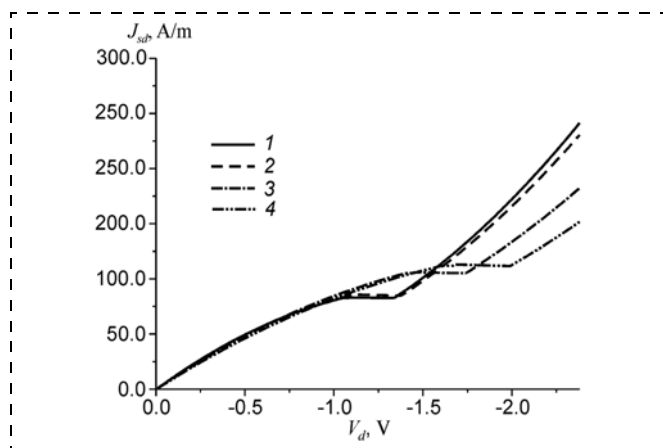


Рис. 5. Выходные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене при напряжении на нижнем затворе -10 В с различными диэлектриками верхнего затвора:

1 — SiC; 2 — Al_2O_3 ; 3 — $h\text{-BN}$; 4 — SiO_2

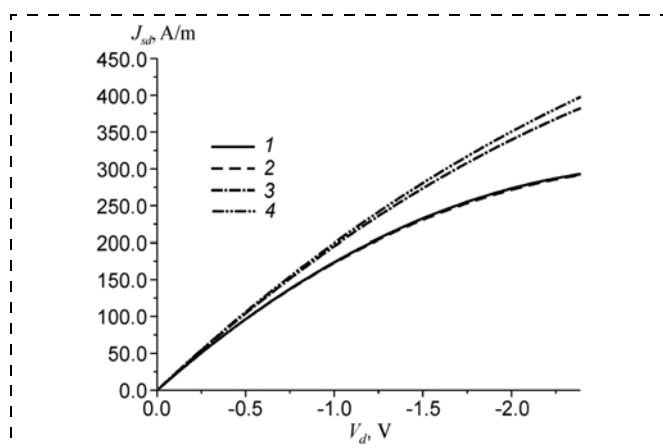


Рис. 6. Выходные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене при напряжении на нижнем затворе -60 В с различными диэлектриками верхнего затвора:

1 — SiC; 2 — Al_2O_3 ; 3 — $h\text{-BN}$; 4 — SiO_2

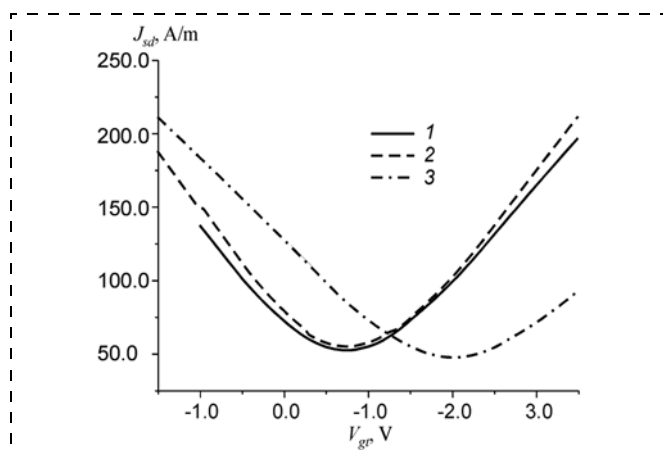


Рис. 7. Передаточные характеристики полевого транзистора на двухслойном графене с различными диэлектриками верхнего затвора:

1 — Al_2O_3 ; 2 — $h\text{-BN}$; 3 — SiO_2

крытия запрещенной зоны в исследуемом графеновом канале ПТ показал, что наибольшее значение E_g получено в ПТ на ДГ с Al_2O_3 в качестве верхнего подзатворного диэлектрика и составляет $0,160$ эВ. Для ПТ на ДГ с $h\text{-BN}$ в качестве верхнего подзатворного диэлектрика при $V_d = -2$ В значение $E_g = 0,142$ эВ, а для ПТ на ДГ с SiO_2 — $E_g = 0,137$ эВ.

Результаты моделирования РТС, включающих 2D-материалы с вертикальным транспортом

С использованием предложенной комбинированной модели резонансно-туннельных гетероструктур (РТС) проведены исследования двух- и многобарьерных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом [4].

В частности, на рис. 8 показаны результаты моделирования двухбарьерных гетероструктур с вертикальным транспортом на данной системе материалов. В исследуемой структуре квантовая яма шириной в пять слоев MoS_2 расположена между потенциальными барьерами шириной в три слоя WSe_2 . Квантовые ямы MoS_2 расположены между потенциальными барьерами WSe_2 высотой $0,67$ эВ. Эффективная масса и диэлектрическая проницаемость данных материалов зависит от числа атомных слоев, согласно литературе, приведенной в работе [1], и составляет для WSe_2 $m^* = 0,33m_0$, $\varepsilon = 7,9$ и для MoS_2 $m^* = 0,45m_0$, $\varepsilon = 7,3$. Приконтактные области шириной в 20 нм легированы донорной примесью $2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Влияние положения уровня Ферми на электрические характеристики исследуемой гетероструктуры показано на рис. 8. Видно, что с увеличением уровня Ферми, плотность тока возрастает. Построенные графики зависимостей плотности тока от напряжения подтверждают адекватность разработанной модели.

Также было проведено сравнение результатов моделирования двух- и трехбарьерных гетероструктур (рис. 9). Показано, что пиковые токи на ВАХ двухбарьерной и трехбарьерной структур близки по значениям, а пиковые напряжения смещаются в сторону больших значений.

Далее рассмотрим подробнее трехбарьерные гетероструктуры, состоящие из барьеров толщиной в три атомных слоя WSe_2 и квантовых ям из слоев MoS_2 с приконтактными областями MoS_2 толщиной в 20 нм, легированными донорной примесью $2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Построены графики зависимости плотности тока от напряжения при комнатной температуре. На рис. 10 и рис. 11 [4] показаны ВАХ исследованных гетероструктур с различной шириной квантовых ям, толщиной от 3 до 6 слоев MoS_2 . Исследования показали, что данные гетероструктуры содержат ярко выраженную область отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) в тех случаях, когда квантовая яма состоит из трех слоев MoS_2 (рис. 10, кривая 1), четырех слоев MoS_2 (рис. 10, кривая 2) и пяти слоев MoS_2 (рис. 11, кривая 1). При увеличении размера квантовых ям до шести слоев (рис. 11, кривая 2) с теми же остальными параметрами гетероструктуры область

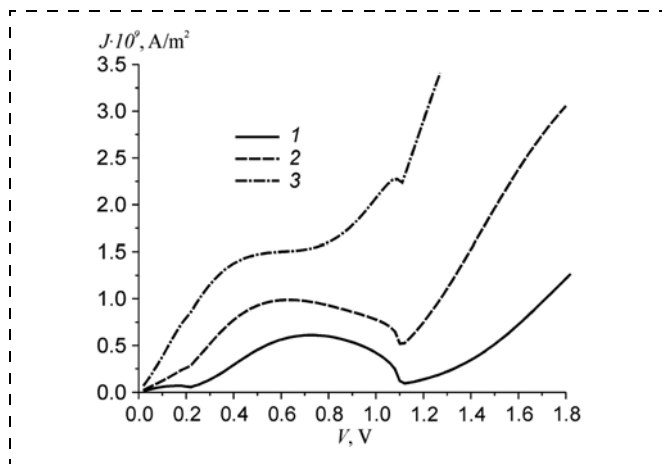


Рис. 8. ВАХ двухбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом с пяти-слоевыми квантовыми ямами и трехслойными потенциальными барьерами при различных значениях уровня Ферми: 1 — $E_F = 0,1$ эВ; 2 — $E_F = 0,15$ эВ; 3 — $E_F = 0,2$ эВ

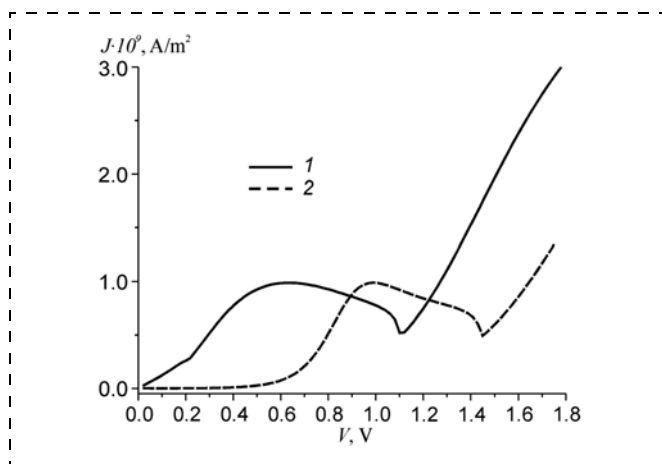


Рис. 9. ВАХ двухбарьерной (кривая 1) и трехбарьерной (кривая 2) резонансно-туннельной гетероструктуры на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом с трехслойными барьерами

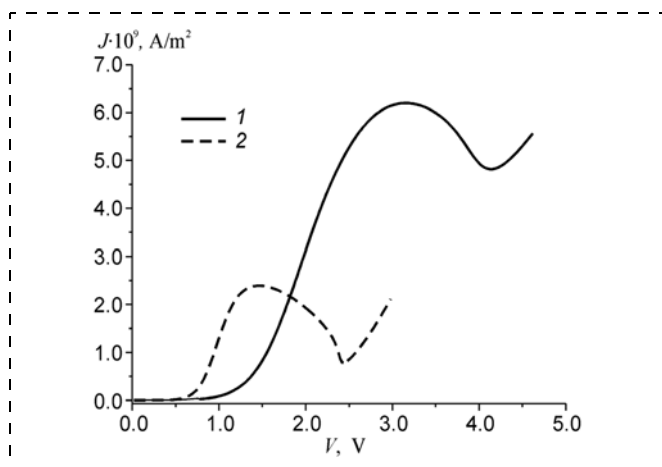


Рис. 10. ВАХ трехбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с различной шириной квантовых ям: 1 — три слоя MoS_2 ; 2 — четыре слоя MoS_2

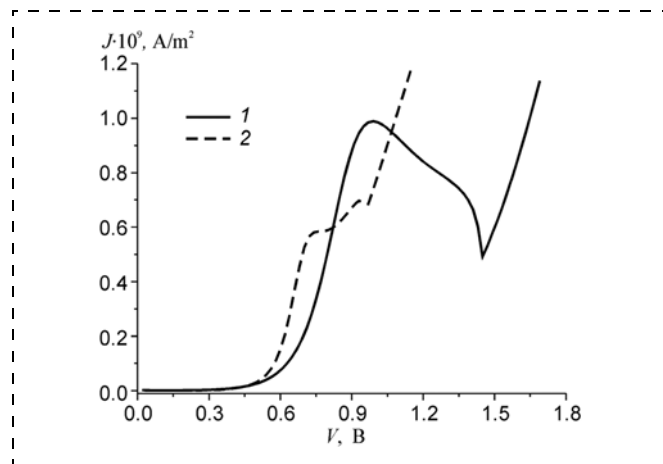


Рис. 11. ВАХ трехбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с различной шириной квантовых ям: 1 — пять слоев MoS_2 ; 2 — шесть слоев MoS_2

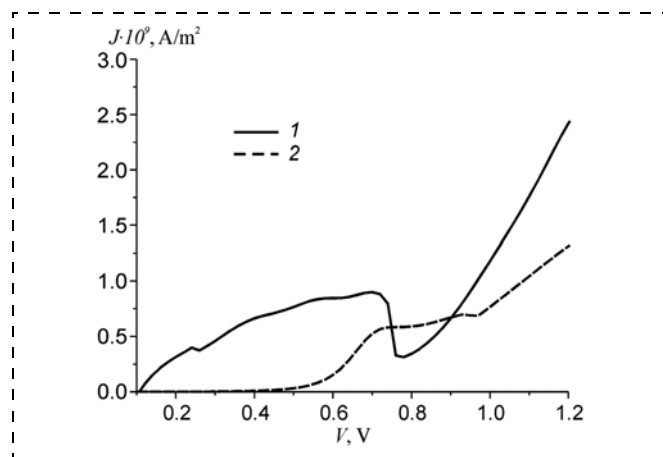


Рис. 12. ВАХ резонансно-туннельных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом с шестислойными квантовыми ямами и трехслойными потенциальными барьерами: 1 — четырехбарьерная гетероструктура; 2 — трехбарьерная гетероструктура

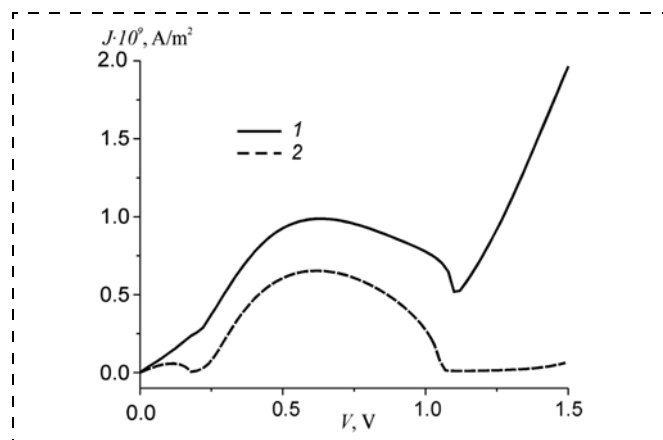


Рис. 13. ВАХ двухбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом с пяти-слоевыми квантовыми ямами и трехслойными потенциальными барьерами при различной температуре окружающей среды: 1 — $T = 300$ К; 2 — $T = 77$ К

ОДП практически исчезает, т. е. характеристика показывает нарастание плотности тока. Получены следующие контрастности: 1) 1,29 для гетероструктуры с трехслойной квантовой ямой; 2) 3,05 для гетероструктуры с четырехслойной квантовой ямой; 3) 2,0 для гетероструктуры с пятислойной квантовой ямой. Наилучшее соотношение имеет гетероструктура $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с четырехслойной квантовой ямой.

На рис. 12 приведено сравнение результатов моделирования ВАХ четырехбарьерной (кривая 1) и трехбарьерной (кривая 2) резонансно-туннельных гетероструктур с шестислойными квантовыми ямами и трехслойными потенциальными барьерами на основе материальной системы $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом.

Далее проведено исследование влияния температуры на ВАХ двухбарьерных гетероструктур (рис. 13), трехбарьерных гетероструктур (рис. 14) и четырехбарьерных гетероструктур (рис. 15) [2] на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом.

Гетероструктуры имеют следующие параметры. Потенциальные барьеры WSe_2 высотой в 0,67 эВ расположены между квантовыми ямами MoS_2 . Приконтактные области MoS_2 протяженностью 20 нм легированы донорной примесью $2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Диэлектрическая проницаемость материалов задается в зависимости от числа слоев. Потенциальные барьеры WSe_2 имеют значение диэлектрической проницаемости, равное 7,9, а квантовые ямы MoS_2 — 7,3. На рис. 13–15 кривая 1 — соответствует комнатной температуре 300 К, кривая 2 — температуре 77 К. Установлено, что характеристики обладают следующими контрастностями: 1,9 (кривая 1, рис. 13) при 300 К; 48,0 (кривая 2, рис. 13) при 77 К для двухбарьерной гетероструктуры; 2,0 (кривая 1, рис. 14) при 300 К; 36,0 (кривая 2, рис. 14) при 77 К для трехбарьерной гетероструктуры; 2,88 (кривая 1, рис. 15) при 300 К; 18 (кривая 2, рис. 15) при 77 К для четырехбарьерной гетероструктуры. Расчеты показали, что пиковый ток возрастает с ростом температуры.

Результаты моделирования РТД, включающих GaN, с вертикальным транспортом

Электрические характеристики моделируемых структур на основе материальной системы GaN/SiC /графен были рассчитаны с использованием разработанной комбинированной физико-математической модели [1].

Представлены результаты моделирования вертикального транспорта в двухбарьерных резонансно-туннельных гетероструктурах GaN/SiC с учетом гетерограниц Ga/Si , Ga/C . Показана важность учета данного фактора при расчетах и изготовлении устройств на данных гетероструктурах ввиду малости активной области (несколько атомных слоев материалов) исследуемых приборных структур. На примере варьирования ширины квантовой ямы для обоих случаев продемонстрировано влияние данного фактора на ВАХ гетероструктур.

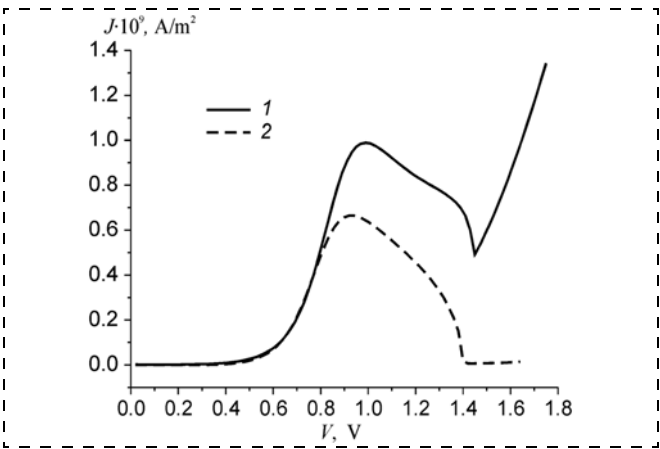


Рис. 14. ВАХ трехбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом с пятислойными квантовыми ямами и трехслойными потенциальными барьерами при различной температуре окружающей среды: 1 — $T = 300 \text{ К}$; 2 — $T = 77 \text{ К}$

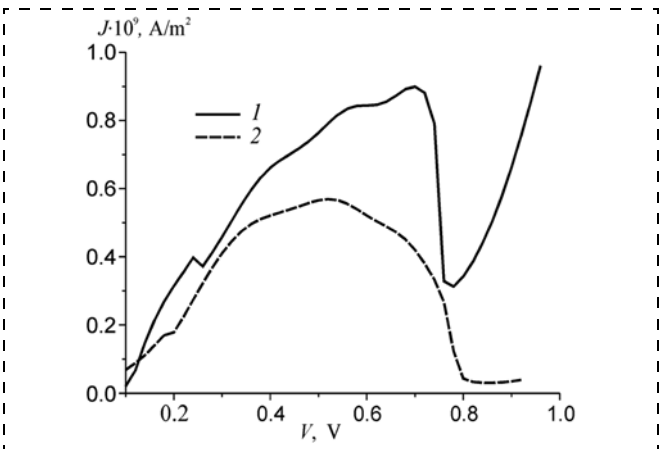


Рис. 15. ВАХ четырехбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом с шестислойными квантовыми ямами и трехслойными потенциальными барьерами при различной температуре окружающей среды: 1 — $T = 300 \text{ К}$; 2 — $T = 77 \text{ К}$

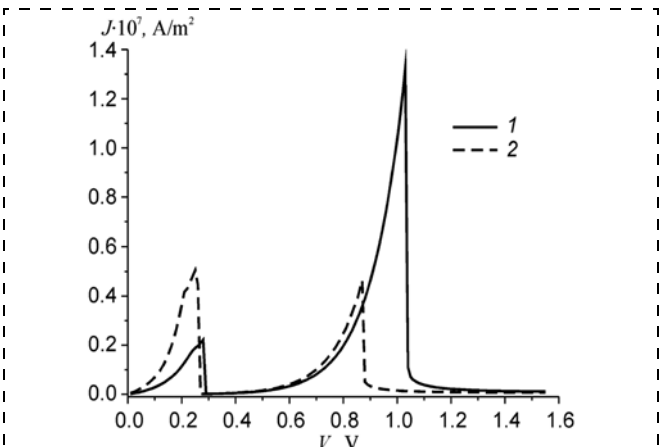


Рис. 16. ВАХ двухбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур GaN/SiC с гетерограницей Ga/Si с различной шириной квантовой ямы: 1 — $W_w = 1,6 \text{ нм}$; 2 — $W_w = 1,8 \text{ нм}$

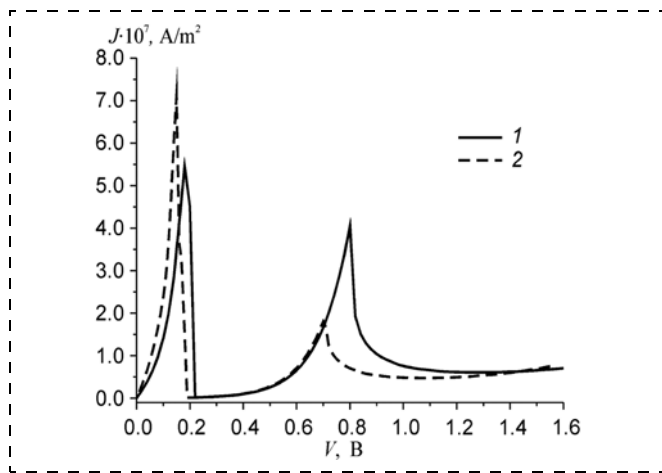


Рис. 17. ВАХ двухбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур GaN/SiC с гетерограницей Ga/C с различной шириной квантовой ямы:

1 — $W_w = 1,6$ нм; 2 — $W_w = 1,8$ нм

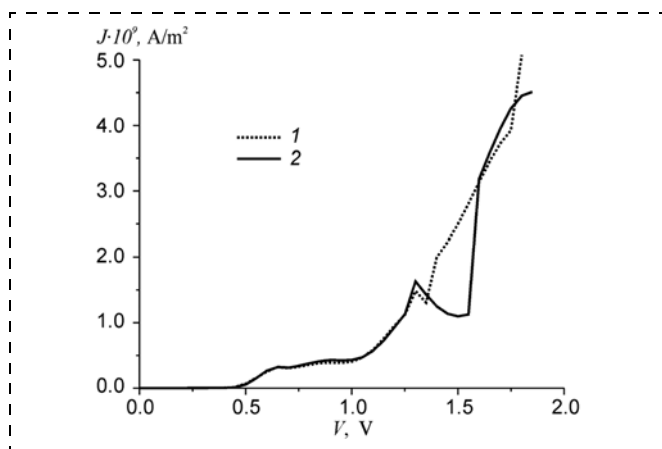


Рис. 18. ВАХ двухбарьерного РТД на основе $Al_{0,18}Ga_{0,82}N/GaN$, рассчитанные с различной точностью:

1 — $NStep = 537$; 2 — $NStep = 1074$, где $NStep$ — число шагов сетки пространственной дискретизации

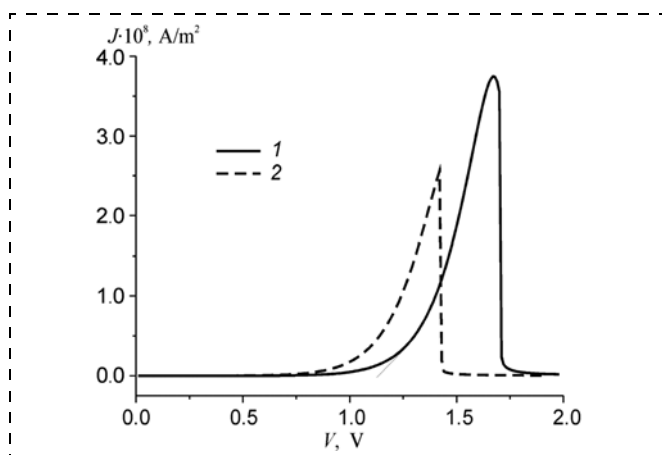


Рис. 19. ВАХ двухбарьерной гетероструктуры GaN/SiC/графен/SiC/GaN с различным числом слоев графена, представляющего собой квантовую яму:

1 — три слоя графена; 2 — четыре слоя графена

Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной модели по количественным и качественным показателям.

Рассчитаны ВАХ двухбарьерной гетероструктуры GaN/SiC с гетерограницей Ga/Si с шириной барьеров, равной 1,0 нм (рис. 16). Для данного случая высота потенциальных барьеров задана равной 0,92 эВ. Расчеты проведены для гетероструктур с различной шириной квантовой ямы (1,6 и 1,8 нм). Число шагов сетки пространственной дискретизации задавали равным 536 и 538 соответственно. В структурах также присутствуют спейсерные области GaN шириной 5 нм. Приконтактные области шириной 20 нм легированы донорной примесью $1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Аналогичные исследования проведены для гетероструктуры GaN/SiC с гетерограницей Ga/C (рис. 17). В данном случае их различие учитывали только за счет различия в высоте потенциальных барьеров [4]. Для случая гетероструктуры GaN/SiC с гетерограницей Ga/C высота потенциального барьера значительно ниже гетероструктуры GaN/SiC с гетерограницей Ga/Si и составляет 0,51 эВ. Проведенные расчеты показывают смещение пиковых напряжений в область более низких значений при увеличении ширины квантовой ямы. Очевидно, что плотности пиковых токов и токи долины для случая с гетерограницей Ga/C дают лучший результат.

Здесь также рассмотрены ВАХ гетероструктур с последовательным туннелированием. Было проведено моделирование двухбарьерного РТД с вертикальным транспортом (рис. 18) на основе $Al_{0,18}Ga_{0,82}N/GaN$. Показано, что область ОДП становится более выраженной с увеличением точности расчетов с использованием равномерной сетки пространственной дискретизации (рис. 18).

Далее была исследована гетероструктура GaN/SiC/графен/SiC/GaN, которая состоит из следующих областей: 1) эмиттера и коллектора GaN шириной по 20 нм; 2) спейсерных областей GaN шириной по 5 нм; 3) областей барьеров SiC и квантовой ямы, состоя-

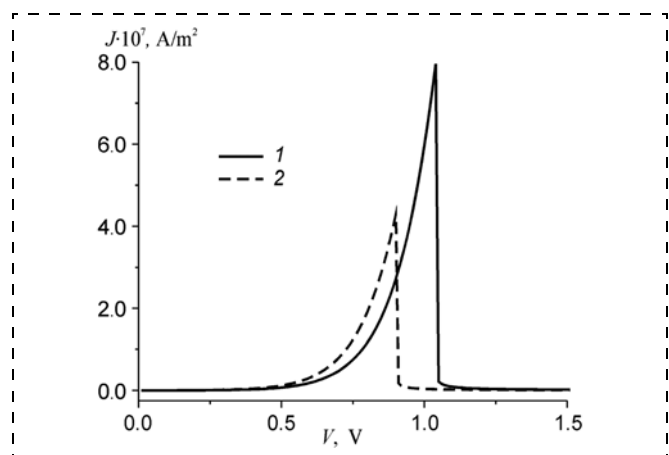


Рис. 20. ВАХ двухбарьерной гетероструктуры GaN/SiC/графен/SiC/GaN с различным числом слоев графена, представляющего собой квантовую яму:

1 — пять слоев графена; 2 — шесть слоев графена

щей из нескольких слоев графена, расположенных между спейсерами. Потенциальные барьеры SiC высотой 0,92 эВ имеют протяженность по 1,0 нм. При контактные области легированы донорной примесью $1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Диэлектрическая проницаемость и эффективная масса графена зависят от числа слоев, что было учтено при дальнейших расчетах. На рис. 19 и 20 показаны результаты моделирования электрических характеристик исследуемой гетероструктуры с различным числом слоев графена, представляющего собой квантовую яму. На рис. 19 кривая 1 соответствует трем слоям графена, кривая 2 — четырем слоям, на рис. 20 кривая 1 соответствует пяти слоям графена, кривая 2 — шести слоям. Показано, что с уменьшением числа слоев графена до трех, пиковый ток возрастает до значения $3,75 \text{ А/м}^2$, а пиковое напряжение смещается в область более высоких значений.

Заключение

С помощью программ, входящих в систему моделирования нанoeлектронных устройств NANODEV [5, 6], и реализующих модели различных приборных гетероструктур на основе двумерных материалов, проведено моделирование полевых транзисторов на двухслойном графене, гетероструктур с вертикальным транспортом на основе различных 2D-материалов, а также гетероструктур с вертикальным транспортом, включающих GaN.

Во-первых, с помощью разработанных квантовых диффузионно-дрейфовых моделей были проведены теоретические исследования выходных и передаточных ВАХ полевых транзисторов с каналами из одно- и двухслойного графена. На примере сравнения характеристик показаны преимущества ПТ на ДГ над ПТ на основе однослойного графена. С помощью разработанного программного обеспечения проведено моделирование выходных и передаточных ВАХ ПТ на ДГ с длиной канала 4 мкм с различными диэлектриками верхнего затвора.

Во-вторых, с использованием комбинированной самосогласованной модели, основанной на решении уравнений Шредингера и Пуассона, исследованы гетероструктуры с вертикальным транспортом на 2D-материалах, в частности двух-, трех- и четырехбарьерные резонансно-туннельные гетероструктуры на основе материальной системы $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$. Исследовано влияние температуры на электрические характеристики данных гетероструктур. Расчеты показали, что пиковый ток возрастает с ростом температуры. Также было исследовано влияние положения уровня Ферми на ВАХ двухбарьерных гетероструктур на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с квантовой ямой шириной в пять слоев MoS_2 , расположенной между потенциальными барьерами шириной в три слоя WSe_2 . Также было проведено сравнение результатов моделирования двух- и трехбарьерных гетероструктур. Показано, что пико-

вые токи на ВАХ двухбарьерной и трехбарьерной структур близки по значениям, а пиковые напряжения смещаются в сторону больших значений.

Прогнозирование характеристик позволяет подбирать конструкции устройств с оптимальными параметрами. Наилучшие ВАХ, согласно нашим исследованиям, имеют трехбарьерные гетероструктуры с вертикальным транспортом на основе $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$. В них варьировали число слоев MoS_2 (от трех до шести слоев), формирующих квантовую яму. Проанализирована область ОДП на ВАХ данных гетероструктур. Установлено, что наилучшей контрастностью, равной 3,05, обладает трехбарьерная гетероструктура $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$, состоящая из трехслойных барьеров WSe_2 и четырехслойных квантовых ям MoS_2 , а в случае шестислойных квантовых ям область ОДП мало выражена.

В-третьих, в исследованиях использована комбинированная модель резонансно-туннельных диодов, модифицированная на случай вертикального транспорта. С ее помощью рассчитаны характеристики двухбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур на основе GaN/SiC с учетом гетерограниц Ga/Si, Ga/C. Показана важность учета данного фактора при расчетах и изготовлении устройств на данных гетероструктурах ввиду малости активной области (несколько атомных слоев материалов) исследуемых приборных структур. На примере варьирования ширины квантовой ямы для обоих случаев продемонстрировано влияние данного фактора на ВАХ гетероструктур.

Также проведено моделирование двухбарьерного РТД с вертикальным транспортом на основе $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{N}/\text{GaN}$. Варьировали число узлов равномерной сетки пространственной дискретизации. Установлено, что область ОДП становится более выраженной с увеличением точности расчетов.

Исследовано влияние ширины квантовой ямы на ВАХ двухбарьерной гетероструктуры GaN/SiC/графен/SiC/GaN. Показано, что исследуемая гетероструктура имеет область ОДП с низким током долины и ярко выраженным пиковым током.

Проведенные исследования показали перспективность исследованных гетероструктур для дальнейшей разработки новой базы приборов микро- и нанoeлектроники на различных 2D-материалах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственных программ научных исследований "Конвергенция", "Микро- и нанoeлектроника", "Материаловедение, новые материалы и технологии" Республики Беларусь.

Список литературы

1. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А. Моделирование перспективных приборов нанoeлектроники. Часть I. Модели // Нано- и микросистемная техника. 2025. Т. 27, № 4. С. 167—172.
2. Абрамов И. И., Лабунов В. А., Коломейцева Н. В., Ермак В. О. Теоретическое исследование приборных гетерострук-

тур на основе 2D-материалов с использованием физико-математических моделей // Материалы и структуры современной электроники: материалы XI Междунар. науч. конф., Минск, 16–18 окт. 2024 г. / Белорус. гос. ун-т. Минск: БГУ, 2025. С. 354–358.

3. **Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А.** Инструментарий для расчета полевых транзисторов на основе двухслойного графена // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Вып. 6: Сб. науч. тр., Севастополь, 2024, Севастопольский гос. университет. С. 98–99.

4. **Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А.** Теоретическое исследование трехбарьерных резонансно-туннельных

гетероструктур $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ с вертикальным транспортом // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Вып. 6: Сб. науч. тр., Севастополь, 2024, Севастопольский гос. университет. С. 114–115.

5. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И.** Система моделирования нанoeлектронных приборов — NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 2. С. 124–133.

6. **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. Vol. 7521. P. 75211E1–1–11.

I. I. Abramov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by,
N. V. Kalameitsava, Senior Researcher, **V. A. Labunov**, Dr. Sci. (Tech.), Academician of NASB,
Academician of RAS, Professor, Head of Laboratory,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author:

Abramov Igor I., Dr.Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Simulation of Perspective Devices of Nanoelectronics. Part II. Simulation Results

Received on February 20, 2025

Accepted on March 05, 2025

In the paper models of perspective devices based on 2D-materials such as a quantum drift-diffusion model of field-effect transistors on bilayer graphene, model of resonant tunneling structures based on 2D-materials with vertical transport and model of resonant tunneling diodes including GaN with vertical transport were proposed. Investigations of IV-characteristics of device structures including mono- and bilayer graphene, molybdenum dioxide, carbon silicide, wolfram diselenide, gallium nitride were carried out with the using of proposed models.

In the part II simulation results based on the proposed models have been considered.

Keywords: field-effect transistor, mono- and bilayer graphene, IV-characteristic, combined model, simulation, 2D-materials, resonant tunneling structures

For citation:

Abramov I. I., Kalameitsava N. V., Labunov V. A. Simulation of Perspective Devices of Nanoelectronics. Part II. Simulation Results, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2025, vol. 27, no. 5, pp. 215–222.

DOI: 10.17587/nmst.27.215-222

References

1. **Abramov I. I., Kalameitsava N. V., Labunov V.** A simulation of perspective devices of nanoelectronics. Part I. Models. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 167–172.

2. **Abramov I. I., Labunov V. A., Kalameitsava N. V., Yermak V. O.** Theoretical investigation of device heterostructures based on 2D-materials with the using of physico-mathematical models // XI International science conference "Materials and structures of modern electronics", Minsk, BSU, 2025, pp. 354–358 (in Russian).

3. **Abramov I. I., Kalameitsava N. V., Labunov V. A.** Software for calculation of field-effect transistors based on bilayer graphene. 34th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Russia, Sevastopol, 2024, is. 6, pp. 98–99 (in Russian).

4. **Abramov I. I., Kalameitsava N. V., Labunov V. A.** Theoretic investigation of triple-barrier resonant tunnelling heterostructures $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ with vertical transport. 34th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Russia, Sevastopol, 2024, is. 6, pp. 114–115 (in Russian).

5. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korolev A. V., Novik E. G., Rogachev A. I.** NANODEV: A nanoelectronic device simulation software system. *Russian Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 97–104.

6. **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, vol. 7521, pp. 75211E1–1–11.