Моделирование четырехбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур, включающих области GaN, SiC и графен

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Ермак В. О.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь
nanodev@bsuir.edu.by

Аннотация: *С использованием разработанной комбинированной модели резонансно-туннельных структур проведено исследование влияния количества графеновых слоев, представляющих собой квантовые ямы, на вольт-амперные характеристики (ВАХ) резонансно-туннельных четырехбарьерных гетероструктур на основе GaN/SiC/графен.*

1. Введение

Моделирование приборных структур на основе 2D-материальных систем является одной из актуальных задач наноэлектроники. В докладе рассматривается моделирование характеристик гетероструктур, функционирующих на эффекте резонансного туннелирования, который состоит в резком увеличении проницаемости такой структуры для электронов, обладающих энергией, совпадающей с энергией резонансных уровней в квантовой яме.

Доклад посвящен моделированию электрических характеристик многобарьерных резонансно-туннельных гетероструктур на основе материальной системы GaN/SiC/графен с серией графеновых квантовых ям.

2. Модель. Результаты моделирования

Результаты исследований, приводимые в докладе, получены с применением комбинированной модели [1] резонансно-туннельных структур, содержащих 2D-, 3D-области [2-4]. В резонансно-туннельной гетероструктуре с ограниченным числом слоев, каждый из которых меньше длины свободного пробега электронов, происходит туннелирование электронов через систему потенциальных барьеров. Для описания процесса туннелирования электронов из эмиттерной области в коллекторную используется уравнения Шредингера, решаемое в активной области приборной структуры, представляющей собой серию потенциальных барьеров с расположенными между ними квантовыми ямами. Потенциал в гетероструктуре находится путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Причем последнее решается для всего прибора. Поэтому модель является комбинированной, т.е. учитывающей влияние приконтактных областей.

Расчет характеристик проводился для четырехбарьерной резонансно-туннельной гетероструктуры на основе GaN/SiC/графен при комнатной температуре. Рассматриваемая структура содержит SiC барьеры толщиной 1 нм и графеновые квантовые ямы, окруженные спейсерами. Спейсерные области со стороны эмиттерного и коллекторного контактов не легированы и имеют толщину 2,2 нм. В GaN эмиттерной и коллекторной приконтактных областях с размерами 20 нм концентрация примеси равна $1 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. При моделировании использовались следующие значения электрофизических параметров: высота барьеров 0,92 эВ с гетерограницей Ga/Si [5], эффективная масса и относительная диэлектрическая проницаемость областей, состоящих из GaN, равны $m^* = 0{,}2m_0$ и $\varepsilon = 8{,}9\varepsilon_0$ [6], для SiC $m^* = 0{,}645m_0$, $\varepsilon = 9{,}7\varepsilon_0$, для двухслойного графена $m^* = 0{,}037m_0$ [7] и $\varepsilon = 3{,}4\varepsilon_0$ [8], для трехслойного графена $m^* = 0{,}052m_0$ [7] и $\varepsilon = 4{,}0\varepsilon_0$ [8], для четырехслойного графена $m^* = 0{,}052m_0$ и $\varepsilon = 5{,}3\varepsilon_0$ [8], где m_0 – масса покоя электрона, ε_0 –диэлектрическая проницаемость вакуума. На рис. 1 приведены ВАХ исследуемой гетероструктуры на основе GaN/SiC/графен, рассчитанные для различных значений ширин графеновых квантовых ям. Кривая 1 соответствует ширинам квантовых ям равным 2 слоям графена, кривая 2 – 3 слоям графена, кривая 3 – 4 слоям графена. Толщина одного слоя графена равна 0,335 нм, согласно данным работы [9]. При расчетах ширина квантовых ям округлялась с точностью до единиц ангстрем. На рис.1 приведены зависимости плотности тока от напряжения, приложенного к контактам.

Установлено, что при рассмотрении первого пика на ВАХ гетероструктуры, пиковый ток увеличивается с уменьшением количества слоев, а пиковое напряжение смещается в область более высоких значений. Второй пик на характеристике ярко выражен для случая ширины квантовой ямы равной 3 слоям графена. В случае 2 слоев после первого пика наблюдается нарастание тока.

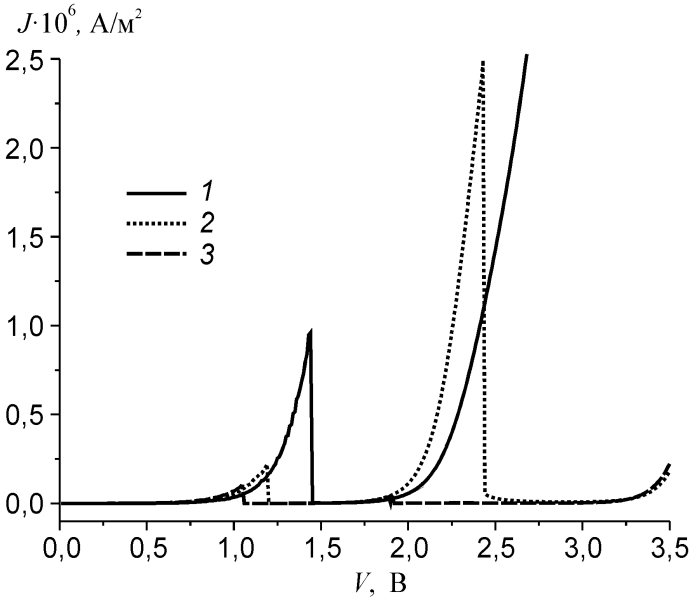


Рис. 1. ВАХ четырехбарьерных резонансно-туннельных гетероструктур GaN/SiC/графен, рассчитанные при различной ширине квантовых ям:
1) 2 слоя графена; 2) 3 слоя графена; 3) 4 слоя графена

3. Заключение

В докладе проведен анализ влияния ширины квантовых ям на ВАХ четырехбарьерной гетероструктуры на основе GaN/SiC/графен. Установлено, что наилучшими характеристиками обладает гетероструктура с двухслойными квантовыми ямами. Программа реализующая модель резонансно-туннельных гетероструктур включена в систему моделирования наноэлектронных приборов NANODEV [10].

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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Lee J., Davis R.F., Nemanich R.J. Direct bonding of GaN and SiC; A novel technique for electronic device fabrication // International Journal of high Speed Electronics and Systems. 2004. V. 14. N 1. P. 83-105.
6. Liu Y., Gao B., Gong M., Shi R. Modeling and optimization of a double-well double-barrier resonant tunneling diode GaN/AlGaN/GaN/AlGaN // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. P. 215701-1-6.
7. Koshino M., Ando T. Orbital diamagnetism in multilayer graphenes: Systematic study with the effective mass approximation // Phys. Rev. B. 2007. V. 76**.** P. 085425.
8. Santos E. J. G., Kaxiras E. Electric-field dependence of the effective dielectric constant in graphene // Nano Lett. 2013. V. 13. P. 898-902.
9. Алексенко А.Г. Графен. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 168 с.
10. 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.