

ИЗУЧЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ БИОСЕНСОРОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Г. Гудков¹, В.Г. Тихомиров², С.В. Агасиева¹, В.Н. Вьюгинов³, В.В. Жердева⁴,
А.А. Зыбин³, Ю.Л. Рыбаков⁵, В.М. Гукасов⁵

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
“ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

³ АО “Светлана-Электронприбор”, Санкт-Петербург

⁴ Российская медицинская академия непрерывного профессионального
образования МЗ РФ, Москва

⁵ Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский
научно-консультационный центр экспертизы Минобрнауки России, Москва

Проведено численное моделирование влияния внешних воздействий на вольтамперные характеристики полевых транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN для биосенсоров. В качестве базовых инструментов для моделирования и оптимизации HEMT-транзисторов использовались программные пакеты для численного моделирования полупроводниковых приборов. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными результатами измерения электрофизических параметров гетероструктур и HEMT транзисторов.

Ключевые слова: *гетероструктура, HEMT транзисторы, моделирование, выходные параметры, биосенсоры, ПСА*

Введение

Полупроводниковые HEMT-транзисторы без затвора (High Electron Mobility Transistor – транзистор с высокой подвижностью электронов) предложены многими авторами в качестве основы для многопараметрических биосенсоров [1–7]. На протекание тока в двумерном канале HEMT-транзистора влияет адсорбция биологических молекул на подзатворной области, что приводит к новому зарядовому состоянию поверхности. В результате адсорбции молекул происходит управление током сток–исток

аналогично классическому затвору. Различные покрытия (платина, золото и др.) в виде микрокапель или сплошных пленок предлагаются для избирательной адсорбции биологических молекул на подзатворной области. Наиболее перспективным полупроводниковым материалом для таких биосенсоров рассматривались нитриды металлов 3-й группы – полупроводники, позволившие создание новых, уникальных по своим характеристикам, приборов опто- и микроэлектроники. Пример такого биосенсора показан на рис. 1. Для инвазивной биосенсорики важно, что приборы на основе GaN, AlGaIn

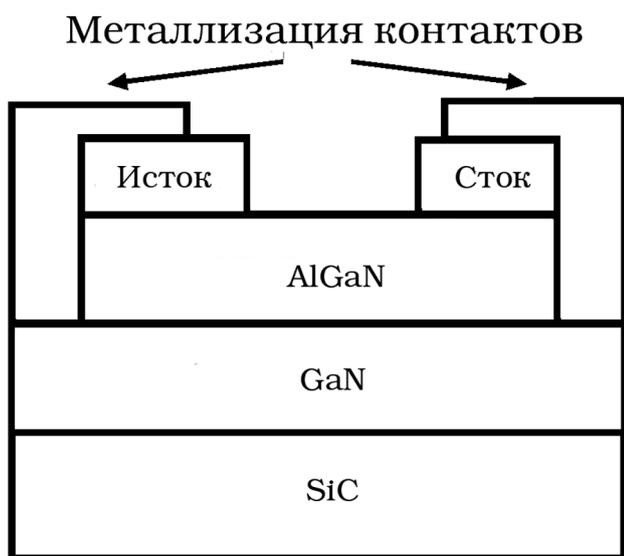


Рис. 1. Схематическое изображение биосенсора на основе GaN HEMT-транзистора без затвора

обладают исключительной химической и термостойкостью. Термическая стойкость обеспечивается не только свойствами полупроводникового материала, но и стойкостью контактов сток–исток.

На сегодняшний день достоверное подтверждение влияния параметров гетероструктуры и состояния ее поверхности на работу многопараметрических биосенсоров на основе HEMT-транзисторов без затвора продолжает оставаться сложной, трудоемкой и затратной процедурой [8]. Использование методов математического моделирования, базирующихся на многомерных численных моделях расчета транспорта носителей, тепловых процессов и динамических характеристик, позволяет дополнить, проверить и объяснить существующие экспериментальные данные, предсказать поведение приборных структур при изменении параметров, которые затруднительно экспериментально воспроизвести. Такие возможности открывает использование современных пакетов численного моделирования полупроводниковых приборов [9, 10]. Однако оптимальный выбор и эффективное использование того или иного пакета возможны только после верификации его возможностей для решения определенного класса задач, что требует получения параметров используемых моделей с учетом свойств конкретного объекта моделирования.

Материал и методы

В рамках настоящей работы проводилось численное моделирование влияния некоторых внешних воздействий на вольт-амперные характеристики полевых транзисторов на основе гетероструктур AlGa_n/Ga_n (HEMT). Необходимость прогнозирования важнейших выходных характеристик транзисторов потребовала построения моделей для статистики распределения носителей во всех областях гетероструктуры, модели дифференциальной подвижности электронов, а также тщательной настройки модели полного энергетического баланса транспорта носителей в канале HEMT-транзистора для учета разогрева основных носителей и адекватного описания процессов токопрохождения при внешних воздействиях и при особых режимах эксплуатации прибора. В качестве базовых инструментов для моделирования и оптимизации HEMT-транзисторов использовались широко известные программные пакеты для численного моделирования полупроводниковых приборов, хорошо себя зарекомендовавшие при расчетной оптимизации гетероструктурных полевых транзисторов [11]. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными результатами измерения электрофизических параметров гетероструктур и HEMT транзисторов.

Результаты

На рис. 2 показано схематическое поперечное сечение базовой транзисторной гетероструктуры AlGa_n/Ga_n с фрагментом расчетной области

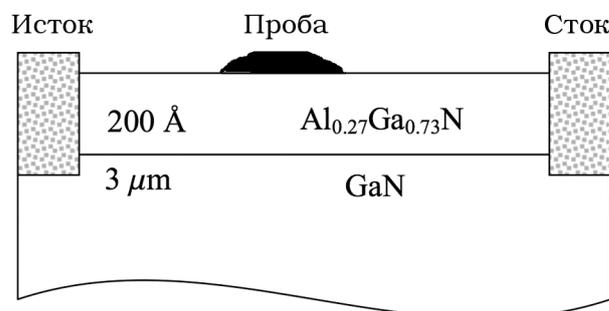


Рис. 2. Схематическое поперечное сечение базовой транзисторной гетероструктуры AlGa_n/Ga_n. Фрагмент расчетной области транзистора для численного моделирования

ной области транзистора для численного моделирования.

Прежде чем перейти к рассмотрению результатов расчета, следует обсудить ряд существующих проблем и способов их решения для многопараметрических биосенсоров на основе GaN HEMT. Авторами работ [12–14] предложен ряд конструктивных решений, обеспечивающих высокую чувствительность и удобство эксплуатации биосенсора. Например, предлагается конструкция биосенсора с покрытием области затвора золотом и специальной кислотой (thioglycolic acid) для определения наличия ионов тяжелых металлов в исследуемой жидкости.

Другие авторы разработали последовательность технологических операций для получения законченной конструкции биосенсора на кремниевой подложке, в частности, с металлизацией Ti и Ag/AgCl [13].

Исследователями предложены планарные конструкции, обеспечивающие как удобное нанесение исследуемой жидкости в область между истоком и стоком, так и получение малых величин сопротивления металлизации электродов для сохранения высокой чувствительности, предсказанной в лабораторных экспериментах или с помощью математического моделирования.

Особый интерес для возможности математического моделирования биосенсоров на основе гетероструктур AlGaIn/GaN HEMT представляет тот установленный экспериментально факт, что при изменении pH жидкости, нанесенной в месте расположения затвора, происходит изменение потенциала поверхности нитрида галлия.

Так, авторами работы [15] рассмотрены три варианта конструкции биосенсоров на основе гетероструктур AlGaIn/GaN HEMT. С их использованием получены зависимости поверхностного потенциала на границе гетероструктуры от pH раствора, наносимого в область затвора для всех трех вариантов.

На основе приведенных результатов стало возможно построить математическую модель, которая позволяет предсказать поведение тока стока в зависимости от изменений условий на поверхности гетероструктуры в области затвора, в частности, нанесение электролита с известным pH, а, кроме того, позволяет начать процесс направленной оптимизации конструкции биосенсоров на основе гетероструктур AlGaIn/GaN HEMT с це-

лью повышения их эксплуатационных характеристик. Далее в тексте, под заданным внешним фактором мы будем понимать расположение электролита с pH=3 в области затвора.

Проведенные численные расчеты по методу Монте Карло, позволяющие учесть существенно нелинейную полескоростную характеристику материала барьерного слоя и включающие модифицированную модель подвижности [11], позволяют спрогнозировать влияние заданного внешнего фактора на различные электрофизические параметры прибора. Были получены распределения концентрации электронов в двумерном электронном газе и по толщине гетероструктуры транзистора, а также локальной подвижности электронов под затвором и в глубине структуры, полученные в результате численного расчета, учитывающего упомянутые выше эффекты, для толщины барьерного слоя 20 нм. А также получены данные численных расчетов физических величин, до и после воздействия заданного внешнего фактора на исследуемую гетероструктуру GaN HEMT.

Для подтверждения достоверности разработанной математической модели и получаемых с помощью нее результатов был проведен расчет тока стока для конструкции биосенсора, описанной и экспериментально исследованной в работе [16]. На рис. 3 показаны результаты математического моделирования

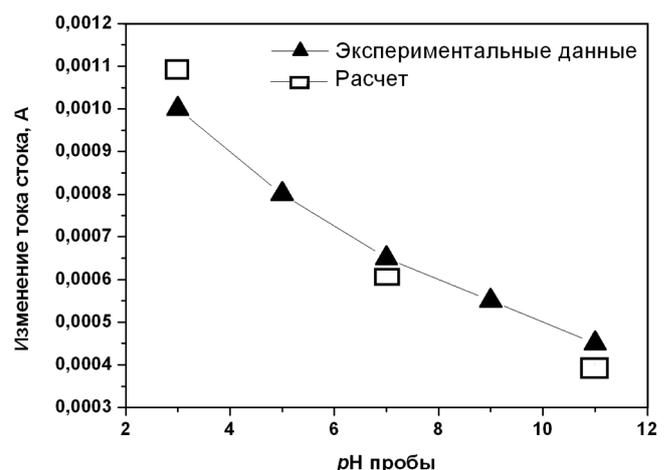


Рис. 3. Зависимость изменения тока стока от величины pH пробы в области затвора. Окружностями показаны предсказанные величины, полученные с помощью математического моделирования

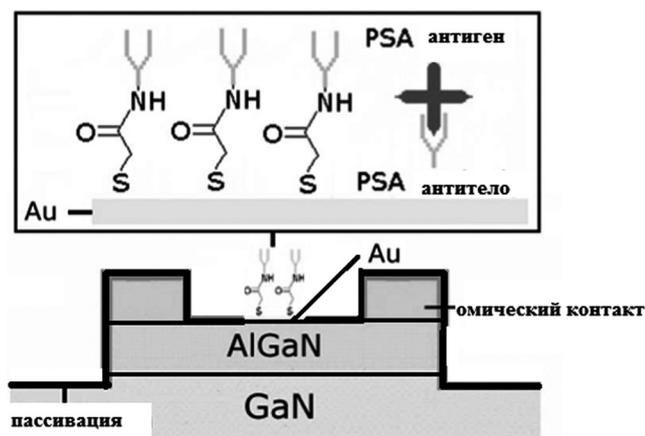


Рис. 4. Схематическое изображение биосенсора к PSA на основе GaN/AlGaN HEMT [17]

при потенциале на стоке 0,5 В и данные экспериментальных исследований, полученные в той же работе. На основе математической модели предсказана чувствительность биосенсора на уровне 80 мкА/рН, что подтвердилось экспериментальными данными. По итогам проведенных исследований и математического моделирования разработаны планарные конструкции биосенсоров с различным расстоянием сток-исток и металлизацией золотом.

В рамках работы были также проведены предварительные расчеты чувствительности идеализированного биосенсора к белкам. Расчеты проводились при допущении, что разработан метод иммобилизации белка-лиганда на поверхности GaN, обеспечивающий высокую плотность связывания, его функциональность и минимизирующий расстояние от поверхности полупроводника до связываемого белком аналита.

В ряде авторитетных работ приводятся экспериментальные результаты определения чувствительности аналита к простатический специфический антиген (PSA). На рис. 4 показано схематическое изображение биосенсора к PSA на основе GaN/AlGaN HEMT-транзистора и принцип его взаимодействия с аналитом.

По приведенным в этой работе экспериментальным результатам были проведены калибровки расчетных моделей основе гетероструктур AlGaN/GaN HEMT-транзистора.

Обсуждение и выводы

Таким образом, численные расчеты позволили предположить, что влияние заданного внешнего фактора (расположение электролита с известной величиной рН в области затвора и помещение раствора с заданной концентрацией PSA) на вольт-амперные характеристики исследуемого прибора существует и эта зависимость имеет монотонный характер. Требуются дополнительные исследования для направленного изменения самой гетероструктуры и общей конструкции биосенсора для повышения чувствительности и расширения спектра распознаваемых веществ.

Кроме того, результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования численного моделирования HEMT транзисторов на основе нитрида галлия для оптимизации конструкции биосенсора.

Список литературы

1. Ambacher O., Eickhoff M., Steinhoff G. et al. // Proc. ECS. 2002. Vol. 214. P. 27.
2. Neuberger R., Muller G., Ambacher O., Stutzmann M. High-Electron-Mobility AlGaN/GaN transistors (HEMTs) for fluid monitoring applications // Phys. Status Solidi A. 2001. Vol. 185. P. 85–89.
3. Schalwig J., Muller G., Ambacher O., Stutzmann M. Group-III-Nitride Based Gas Sensing Devices // Phys. Status Solidi A. 2001. Vol. 185. P. 39–45.
4. Steinhoff G., Hermann M., Schaff W.J. et al. pH response of GaN surfaces and its application for pH-sensitive field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 177–179.
5. Eickhoff M., Neuberger R., Steinhoff G. et al. // Phys. Status Solidi B. 2001. Vol. 228. P. 519–524.
6. Schalwig J., Muller G., Eickhoff M. et al. // Sens. Actuat. B. 2002. Vol. 81. P. 425.
7. Stutzmann M., Steinhoff G., Eickhoff M. et al. // Diamond Rel. Mater. 2002. Vol. 11. P. 886.
8. Kang B.S., Wang H.T., Ren F., Pearton S.J. Electrical detection of biomaterials using AlGaN/GaN HEMTs. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. № 8. P. 031101–031101.
9. Тихомиров В.Г., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г. и соавт. Исследование влияния параметров затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов

- на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs–InGaAs–GaAs // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 10. С. 1405–1409.
10. Tikhomirov V., Zemlyakov V., Volkov V et al. // Semiconductors. 2016. Vol. 50. № 2. P. 244–248.
 11. Hu W.D., Chen X.S., Quan Z.J. et al. Self-heating simulation of GaN-based metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistors including hot electron and quantum effects // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 074501–07509.
 12. Kang B.S., Wang H.T., Ren F., Pearton S.J. Electrical detection of biomaterials using AlGaN/GaN high electron mobility transistors // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 031101–031108.
 13. Hung S.C., Wang Y.L., Hicks B. et al. C. integration of selective area anodized AgCl thin film with AlGaN/GaN HEMTs for chloride ion detection // Electrochem. Solid State Lett. 2008. Vol. 11. № 9. P. 241–244.
 14. Wang H.T., Kang B.S., Chancellor T.F. et al. Selective detection of Hg(II) ions from Cu(II) and Pb(II) using AlGaN/GaN high electron mobility transistors // Electrochem. Solid State Lett. 2007. Vol. 10. P. 150–153.
 15. Steinhoff G., Hermann M., Schaff W.J. et al. pH response of GaN surfaces and its application for pH-sensitive field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 177–184.
 16. Kang S., Wang H.T., Ren H. et al. Role of gate oxide in AlGaN/GaN high-electron-mobility transistor pH sensors // J. Electronic Materials. 2008. Vol. 37. № 5. P. 550–553.
 17. Kang S., Wang H.T., Lele T.P. et al. Electrical detection of kidney injury molecule-1 with AlGaN/GaN high electron mobility transistors // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 112106.

STUDY OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF HETEROSTRUCTURE TRANSISTORS FOR BIOSENSORS BY A METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

A.G. Gudkov¹, V.G. Tikhomirov², S.V. Agasieva¹, V.N. Vityginov³, V.V. Zherdeva⁴,
A.A. Zybin³, Y.L. Rybakov⁵, V.M. Gukasov⁵

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia

³ "Svetlana-Electronpribor" JSC, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Russian Medical Academy of Postgraduate Education, Moscow, Russia

⁵ National Centre of Expertise in the Field of Science and Innovation of the Ministry of Science and Education of Russia, Moscow, Russia

Numerical simulation of the influence of external effects on current-voltage characteristics of field-effect transistors based on heterostructures AlGaN/GaN for biosensors was carried out in the present work. Software for numerical modeling of semiconductor devices was used for modeling and optimization of HEMT transistors. The simulation results were compared with the experimental results of measurements of electrophysical parameters of heterostructures and HEMT transistors.

Key words: heterostructure, HEMT transistors, modeling, output parameters, biosensors, PSA

E-mail: profgudkov@gmail.com