

Физико-топологическая модель арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов

И.Ю. Ловшенко¹, П.С. Кратович^{1,2}, А.А. Павлючик², Р.Е. Тернов^{1,3}, А.В. Кунц¹, О.В. Дворников⁵, В.Р. Стемпицкий¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

³ООО «НТЛаб-системы»

⁴ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

Аннотация: В работе приведен краткий обзор доступных компактных моделей приборных структур транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) на основе GaAs. Представлены результаты приборно-технологического моделирования ТВПЭ с проектными нормами 0,2 мкм, разработки методов определения (экстракции) параметров компактной модели ASM-HEMT. Выполнено сравнение результатов моделирования характеристик ТВПЭ с данными экспериментальных измерений. Для проверки работы модели проведено схемотехническое моделирование схемы зарядочувствительного предусилителя и разработано ее топологическое решение

Ключевые слова: транзистор с высокой подвижностью электронов, экстракция, моделирование, компактная модель, ASM-HEMT.

1. Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, англ. High electron mobility transistor – HEMT) находят применение в СВЧ-электронике, усилителях мощности, мобильной связи, а также военной промышленности [1]. Их применение обусловлено высокой подвижностью носителей заряда и стойкостью к ионизирующему излучению. Способность полупроводниковых приборов работать на более высоких частотах связана с подвижностью электронов. В связи с этим в СВЧ-электронике активно применяются приборные структуры на основе арсенида галлия (GaAs). ТВПЭ обеспечивают более высокий КПД при одинаковом напряжении питания и благодаря меньшим емкостным эффектам позволяют использовать более высокую частоту и большую полосу пропускания.

Для моделирования работы электрических компонентов существуют разные виды компактных моделей, различающиеся по архитектуре, принципу построения, возможностям и другим различным критериям [2]. Для моделирования ТВПЭ были разработаны эмпирические (EHEMT [3], Angelov [4] и Angelov GaN [5]) и физические (ASM-HEMT [6] и MVSG [7]) компактные модели, а также компактная модель на основе нейросетей (DynaFET [8]). Все приведенные модели обладают необходимыми критериями для выполнения моделирования. Модели EHEMT и Angelov отличаются сравнительно быстрым процессом моделирования и экстракции параметров, также преимуществом моделей является их простота, обусловленная опциональным добавлением данных о технологии изготовления прибора. Модель DynaFET обладает самой высокой точностью среди рассматриваемых моделей, однако процесс экстракции параметров затруднителен. Также недостатком модели является отсутствие возможности геометрического масштабирования параметров. По точности, модели ASM-HEMT и MVSG уступают DynaFET, однако, их преимуществом является наибольшее, среди рассматриваемых моделей, количество параметров, а также возможность геометрического масштабирования. По результатам сравнительного анализа доступных моделей сделан вывод, что наиболее адекватно описывает

поведение ТВПЭ модель ASM-HEMT.

Программный комплекс компании Silvaco или Synopsys позволяет производить адекватный расчет электрических и эксплуатационных характеристик ТВПЭ на основе GaAs с заданными параметрами. Для разработки схмотехнических и топологических решений применяются системы автоматизированного проектирования (САПР) компаний Cadence Design Systems, Mentor Graphics или Synopsys, в которых, несмотря на ряд достоинств, отсутствует поддержка ASM-HEMT [9, 10].

Таким образом, целью работы является реализация на языке описания аппаратуры Verilog-A модели ASM-HEMT и её интеграция в схмотехнический САПР, а также определение параметров модели посредством компьютерного приборно-технологического моделирования ТВПЭ на основе GaAs.

2. Структура ТВПЭ

Приборная структура двухканального псевдоморфного ТВПЭ на основе GaAs с проектными нормами 0,2 мкм представлена на рисунке 1, а. В качестве материала подложки используется GaAs толщиной 200 мкм; донорного слоя – AlGaAs толщиной 40 нм и концентрацией $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; буферного слоя – GaAs и AlGaAs, толщиной 0,2 мкм и 40 нм соответственно; активного слоя – GaAs толщиной 60 нм. В качестве металлизации используется система титан-золото (Ti/Au). Межслойная изоляция и пассивация – полимер Cyclotene 4022-35 толщиной 3,5 мкм.

В программном пакете Victory Device компании Silvaco заданы параметры приборной структуры ТВПЭ. Работа выхода контактов стока и истока составляет 3,7 эВ, контакта затвора – 5,2 эВ. Ширина запрещенной зоны полупроводниковых материалов рассчитывается в соответствии с концентрацией примеси, температурой и т.п. Конфигурация зонной диаграммы для заданных условий при напряжениях на затворе $V_z = 0 \text{ В}$ и стоке $V_c = 0,1 \text{ В}$ представлена на рисунке 1, б.

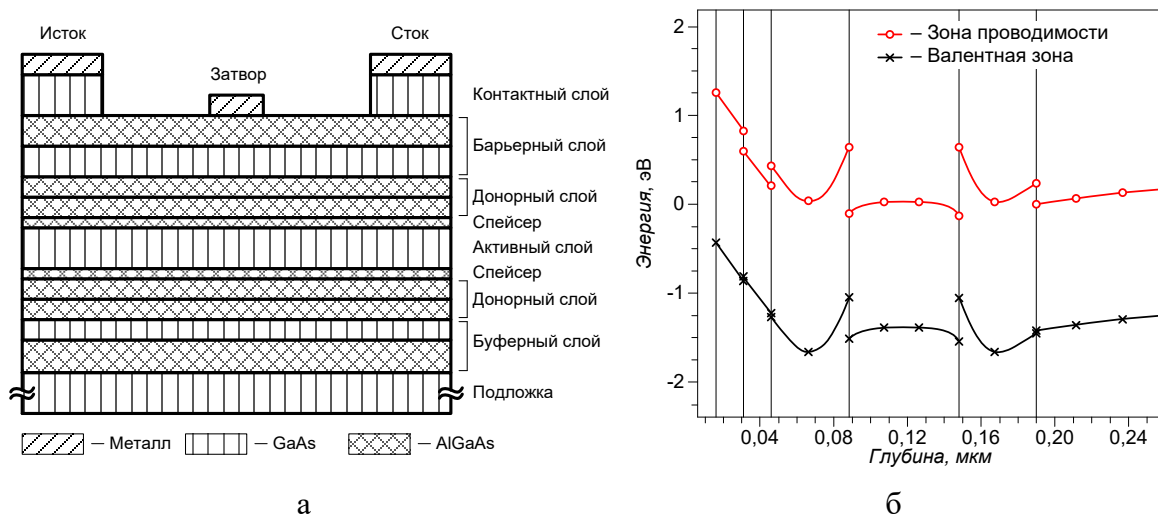


Рисунок 1. Приборная структура ТВПЭ (а) и зонная диаграмма в области затвора при напряжении на затворе $V_z = 0 \text{ В}$ и стоке $V_c = 0,1 \text{ В}$ (б).

3. Экстракция параметров

Вольтамперные характеристики, используемые в процессе экстракции, получены в результате проведения натуральных экспериментов и компьютерного моделирования. Была разработана стратегия экстракции [11], в соответствии с которой определены параметры модели. Максимальная относительная погрешность схмотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении

с экспериментальными данными составила не более 42,26 % (в области низких токов стока, соответствующей напряжению на затворе V_3 от -0,7 до -1 В). Показано, что модель, реализованная на Verilog-A, вносит дополнительный вклад в ошибку равный 5,4 %, 8,7 %, 16,2 % и 3,7 % (средняя относительная ошибка равна 8,5 %, 11,1 %, 23,3 % и 44,1 %) при напряжении на затворе равном 0, -0,2, -0,4, и -0,6 В соответственно.

4. Результат схемотехнического моделирования и топологического проектирования

На рисунке 2 представлена тестовая схема для проверки работоспособности модели, в качестве которой выбрана схема зарядочувствительного преусилителя.

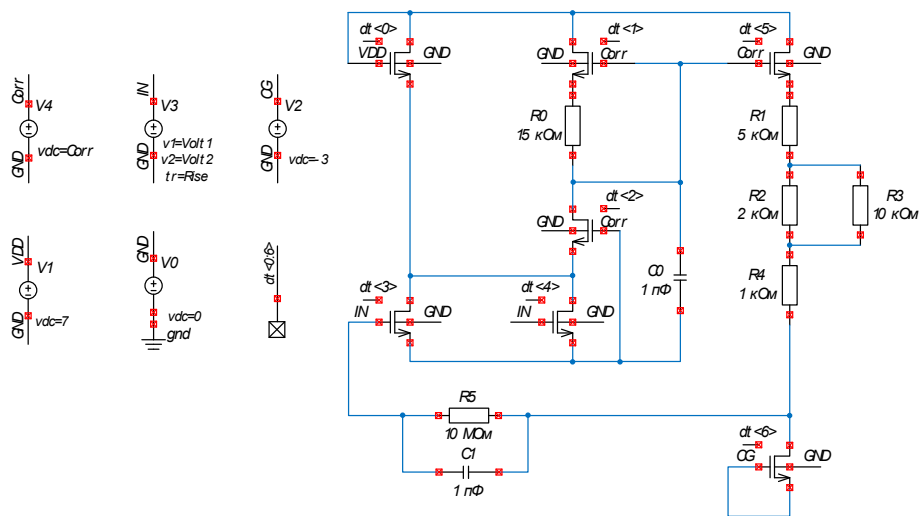


Рисунок 2. Электрическая схема зарядочувствительного преусилителя.

В схеме использованы транзисторы с длиной канала $L = 0,2$ мкм и шириной канала $W = 10$ мкм. Напряжение питания $V_{DD} = 7$ В. На вход схемы IN подан прямоугольный импульс от источника напряжения $vpulse$ (уровень логического нуля 0 В, единицы – 2 В, период 200 нс, длительность импульса 100 нс, время нарастания и спада 100 пс). Постоянное напряжение подается на входы CG и $Corr$. Время моделирования составляет 500 нс. Напряжение снимается на выходах $out1$, $out2$ и $out3$. На рисунке 3 представлены временные диаграммы, полученные в результате моделирования. Показано, что при подаче на вход импульса величиной 2 В, на выходах схемы $out1$, $out2$ и $out3$ происходит увеличение напряжения на 0,5, 1 и 2 В. Таким образом, установлено, что схема работает корректно.

Топологическое решение структуры ТВПЭ с $L = 0,2$ мкм и $W = 40$ мкм представлено на рисунке 4. Структура поделена на четыре сегмента с длиной канала $L = 0,2$ мкм и шириной канала $W = 10$ мкм. Для соединения областей стоков используется первый уровень металлизации, а для соединения областей затворов и истоков – второй. Всего на топологии используется 19 структурных слоев, из них: 2 слоя поликремния и контакт между ними; 2 уровня системы металлизации, каждый из которых представляет собой структуру «металл-контакт к металлу-переход на другой уровень»; омический контакт; 2 барьерных слоя; изоляция; 5 слоев соответствующих активной области ТВПЭ; сквозное отверстие под омические контакты для заземления.

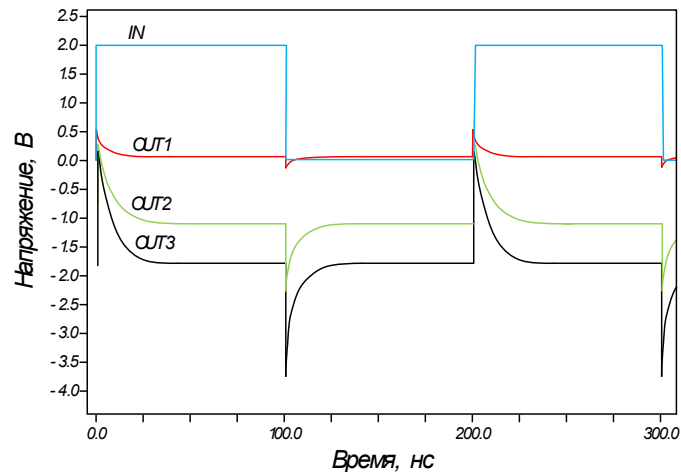


Рисунок 3. Временной анализ зарядочувствительного предусилителя.

Для проектирования топологии схемы зарядочувствительного предусилителя используются транзисторы с размерами 1000/0,2 мкм и 10/0,2 мкм. Для оптимизации геометрии прибора транзистор с геометрическими параметрами 1000/0,2 мкм был поделен на 10 сегментов размерами 100/0,2 мкм. Все резисторы проектировались при фиксированной ширине 4 мкм. Длина сегмента составляет 16 мкм, и их число определяется необходимой величиной сопротивления. Величина удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя составляет 250 Ом/□. Из описанных элементов было спроектировано топологическое решение, представленное на рисунке 5, площадью 950 мкм×380 мкм.

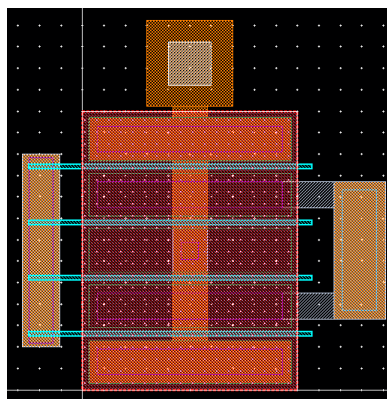


Рисунок 4. Топологическое решение ТВПЭ с $L = 0,2$ мкм и $W = 40$ мкм.

5. Заключение

Выполнен сравнительный анализ различных типов компактных моделей, используемых для моделирования электрических характеристик ТВПЭ на основе GaAs. Проведено приборно-технологическое моделирование структуры ТВПЭ на основе GaAs с проектными нормами 0,2 мкм в программном комплексе компании Silvaco. В соответствии с разработанной методикой определены параметров модели. На языке описания аппаратуры Verilog-A реализована компактная модель ASM-HEMT. В программном комплексе компании Cadence скомпонована электрическая схема зарядочувствительного предусилителя и проведен временной анализ, по результатам которого показана корректность применения реализованной на Verilog-A модели ASM-HEMT. Разработано топологическое решение электрической схемы зарядочувствительного предусилителя с проектными нормами 0,2 мкм.

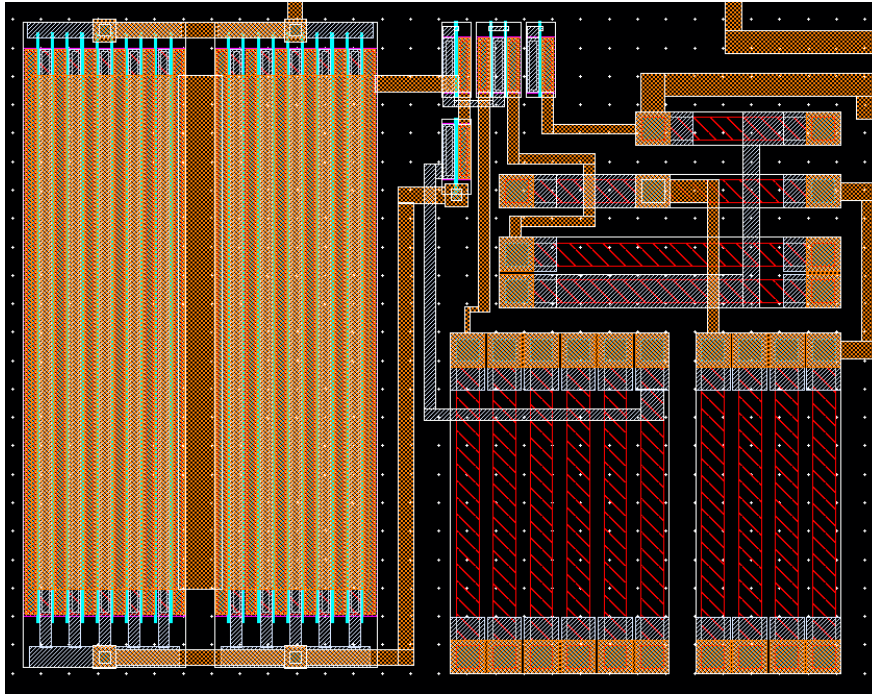


Рисунок 5. Увеличенный фрагмент топологии зарядочувствительного предусилителя.

Исследования выполнены при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.4).

Список литературы

1. Khandelwal S. Physics-based compact models: An emerging trend in simulation-based GaN HEMT power amplifier design //2019 IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
2. Коколов А. А., Шеерман Ф. И., Бабак Л. И. Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – №. 2-1 (22). – С. 118-126.
3. EHEMT Models: Keysight Advanced Design System. Documentation, P. 454-480.
4. Angelov I. et al. An empirical table-based FET model //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Т. 47. – №. 12. – С. 2350-2357.
5. Emekar S. et al. Modified angelov model for an exploratory GaN-HEMT technology with short, few-fingered gates //2017 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – IEEE, 2017. – С. 117-120.
6. Khandelwal S. Advanced SPICE Model for GaN HEMTs (ASM-HEMT): A New Industry-Standard Compact Model for GaN-based Power and RF Circuit Design. – Springer Nature, 2022.
7. Radhakrishna U. et al. MIT virtual source GaNFET-high voltage (MVSG-HV) model: A physics based compact model for HV-GaN HEMTs //physica status solidi (c). – 2014. – Т. 11. – №. 3-4. – С. 848-852.
8. Xu J. et al. Dynamic FET model-DynaFET-for GaN transistors from NVNA active source injection measurements //2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014). – IEEE, 2014. – С. 1-3.
9. Документация Mentor Graphics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ebook.pldworld.com/_semiconductors/Xilinx/AppLINX%20CD-ROM/Rev.7%20\(Q3-1998\)/docs/wcd0002e/wcd02ee5.pdf](http://ebook.pldworld.com/_semiconductors/Xilinx/AppLINX%20CD-ROM/Rev.7%20(Q3-1998)/docs/wcd0002e/wcd02ee5.pdf)
10. Документация Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHX303/Documentation/dcug.pdf>
11. Ловшенко И.Ю., Кратович П.С., Новиков П.Э., Корсак К.В., Стемпицкий В.Р. (2023) Разработка методов определения параметров физико-топологической модели арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7859900>.