



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по НРИИ ТУСУР

канд. техн. наук, доцент

А.Г. Лоцилов

«11» января 2023г.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

по результатам представления диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов для усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем» выполнена на кафедре физической электроники ТУСУР.

В период подготовки диссертации аспирант Попов Артем Александрович очно обучался в аспирантуре ТУСУР по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» (профиль физическая электроника).

Научный руководитель: Троян Павел Ефимович, доктор технических наук, профессор, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой физической электроники, ведущий научный сотрудник Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники.

Научный консультант: Сальников Андрей Сергеевич, кандидат технических наук. Основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный

ный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий лабораторией автоматизации разработки микроэлектронных устройств «50ohm Lab».

### **Оценка выполненной работы соискателем работы**

Диссертация Попова Артема Александровича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки методик построения линейных и нелинейных моделей НЕМТ-транзисторов для проектирования схем, выполняющих функции усиления и коммутации СВЧ сигнала, имеющих важное значение при проектировании разных классов устройств СВЧ полупроводниковой электроники.

### **Актуальность темы**

Беспроводная передача данных – ключевое направление развития современных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем (РТС). Основные тенденции развития РТС – это улучшение их основных технических параметров, таких как ёмкость канала, качество и скорость передачи данных, что может быть достигнуто за счёт более широкого освоения СВЧ-диапазона и создания электронной компонентной базы (ЭКБ) высокой степени интеграции – СВЧ монолитных интегральных схем (МИС). Согласно ведущим мировым практикам, технологические проблемы создания СВЧ ЭКБ необходимо решать параллельно с задачами моделирования и автоматизированного проектирования. Наиболее эффективное взаимодействие между производством и центрами проектирования реализуется посредством библиотек базовых элементов, в состав которых входят модели активных и пассивных компонентов СВЧ МИС. Возможности моделей во многом определяют характеристики разрабатываемых схем и, соответственно, объёмы ресурсов, затрачиваемых на всех этапах производства. В ходе диссертационного исследования рассматривались актуальные вопросы построения моделей активных компонентов СВЧ МИС – наногетероструктурных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-транзисторов). С развитием технологий беспроводной передачи данных возрастает спрос на приёмопередающие модули (ППМ), в составе

которых используются функциональные блоки для управления амплитудой и фазой сигнала: а) ступенчатые аттенюаторы и фазовращатели; б) перестраиваемые фильтры и линии задержки. В качестве основного компонента в таких схемах, как правило, используются твердотельные СВЧ-переключатели на основе рin-диодов и полевых транзисторов. Согласно опубликованным исследованиям, с повышением рабочих частот ухудшается точность традиционных моделей НЕМТ-транзисторов, предназначенных для коммутации сигнала, что существенно сказывается на характеристиках разрабатываемых устройств. В настоящее время вопрос построения моделей таких транзисторов остаётся открытым.

#### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Автор лично сформулировал цель и задачи научного исследования, выполнил теоретические и экспериментальные исследования, провел верификацию и валидацию моделей, полученных с помощью разработанных в исследовании методик. Формулировка основных положений и выводов проводилась совместно с научным руководителем.

#### **Достоверность научных результатов**

Степень достоверности научных результатов, подтверждается: применением современных методов научных исследований; результатами верификации построенных данных по результатам эксперимента; результатами валидации построенных моделей в устройствах СВЧ-диапазона; опубликованием результатов в ведущих журналах по специальности.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный алгоритм сканирования позволяет определить физически обоснованные значения внешних (паразитных) сопротивлений стока и истока в малосигнальной эквивалентной схеме коммутацион-

ного НЕМТ-транзистора, при которых достигается минимальное отклонение рассчитанных параметров рассеяния от измеренных в широком диапазоне частот

2. Применение предложенной методики экстракции внешних (паразитных) ёмкостей на основе результатов электромагнитного анализа топологии НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим истоком, позволяет построить малосигнальную модель в диапазоне частот до 50 ГГц с интегральной ошибкой моделирования S-параметров менее 3% без применения численных методов оптимизации
3. Предложенные поправки в уравнениях модели ASM-НЕМТ снижают среднюю ошибку аппроксимации численной зависимости квазиуровня Ферми от потенциала затвора с 20% до 8%, что позволяет использовать модифицированную модель для расчёта статических и динамических характеристик арсенид-галлиевого СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов

### **Практическая значимость**

1. Предложенный алгоритм экстракции малосигнальной модели коммутационного НЕМТ-транзистора позволяет исключить из модели паразитное влияние подводящей линии и сквозного отверстия в цепи затвора
2. Разработанная методика позволяет провести экстракцию всех внешних ёмкостей эквивалентной схемы НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим истоком, без использования результатов измерений тестовых элементов при наличии верифицированной структуры для ЭМ-анализа
3. Разработанная методика позволяет учесть распределённый характер внешних ёмкостей эквивалентной схемы НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим истоком, без применения итерационных алгоритмов сканирования параметров модели

4. Реализована модифицированная физическая компактная модель ASM-HEMT для СВЧ-транзистора на основе GaAs, основные параметры которой имеют связь с параметрами техпроцесса
5. На основе предложенных методик построены линейные и нелинейные модели усилительных и коммутационных GaAs pHEMT-транзисторов, изготовленных на различных предприятиях
6. С использованием построенных линейных и нелинейных моделей были разработаны СВЧ МИС буферных и малошумящих усилителей, а также ступенчатых аттенюаторов и фазовращателей

### **Специальность, которой соответствует диссертация**

Диссертационная работа Попова Артема Александровича по своему содержанию соответствует паспорту специальности 1.3.5 – «Физическая электроника», а именно: п. 1.2 «Разработка технических основ приборов, установок, систем и технологических процессов в области твердотельной электроники, в том числе СВЧ-электронике, полупроводниковой электронике, акустоэлектронике, сверхпроводниковой электронике, спиновой электронике, оптоэлектронике, криоэлектронике», и специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии», а именно: п. 4 «Исследование и разработка микроволновых интегрированных схем новых поколений».

### **Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором**

По материалам диссертации опубликовано 33 научные работы, в том числе 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 11 в изданиях индексируемых в WoS/Scopus, 10 статей в сборниках международных конференций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 3 свидетельства о регистрации топологии интегральных микросхем.

*Работы, входящие в перечень ВАК или индексируемые в базах данных WoS/Scopus:*

1. **Попов, А.А.** Обзор методик построения малосигнальных моделей транзисторов для управляющих СВЧ-устройств / А.А. Попов, И.М. Добуш,

А.С. Сальников // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2020. – № 3(546). – С. 10–33.

2. **Попов, А.А.** Аналитическая аппроксимация численной зависимости положения квазиуровня Ферми в квантовой яме от потенциала затвора для разработки компактной модели GaAs НЕМТ-транзистора / А.А. Попов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 76. – С. 109–125. – DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-109-125.

3. Добуш, И.М. Разработка методик и программного обеспечения для автоматического построения моделей базовых элементов СВЧ монолитных интегральных схем / И.М. Добуш, А.С. Сальников, А.А. Калентьев, А.Е. Горяинов, **А.А. Попов**, Д.В. Билевич // Наноиндустрия. – 2019. – № S89. – С. 453–462. – DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.453.462.

4. Калентьев, А.А. Алгоритм автоматического построения малосигнальной модели GaAs рНЕМТ- транзистора и его реализация в САПР / А.А. Калентьев, А.С. Сальников, **А.А. Попов**, Д.В. Билевич, И.М. Добуш, А.Е. Горяинов, Т.Н. Файль // Наноиндустрия. Спецвыпуск. – 2020. – № S96-1. – С. 330–336. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.330.336.

5. Степанов, В.И. Универсальный алгоритм построения линейной модели GaAs рНЕМТ СВЧ-транзистора для усилительных применений / В.И. Степанов, **А.А. Попов**, А.С. Сальников // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 4. – С. 76–82. – DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-76-82.

6. Билевич, Д.В. Исследование алгоритмов сглаживания для предварительной обработки результатов измерений коэффициента шума СВЧ-транзистора при построении малосигнальной шумовой модели / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, И.М. Добуш, А.Е. Горяинов, Ю.А. Новичкова // Вестник РГРТУ. – 2020. – № 71. – С. 34–44. – DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-34-44.

7. Калентьев, А.А. Методы обработки результатов СВЧ-измерений для построения моделей элементов интегральных схем / А.А. Калентьев,

И.М. Добуш, А.С. Сальников, А.Е. Горяинов, Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, Т.Н. Файль, Ю.А. Новичкова, А.А. Метель // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4(99). – С. 428–430. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.428.430.

8. **Попов, А.А.** Исследование влияния электрофизических характеристик на параметры компактных моделей компонентов сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем / А.А. Попов, Д.В. Билевич, А.С. Сальников, А.А. Калентьев // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2020. – № 2(257). – С. 37–46. – DOI: 10.36845/2073-8250-2020-257-2-37-46.

9. **Попов, А.** Automatic large-signal GaAs HEMT modeling for power amplifier design / A. Popov, D. Bilevich, A. Salnikov, I. Dobush, A. Goryainov, A. Kalentyev // AEU - International Journal of Electronics and Communications. – 2019. – Vol. 100. – P. 138–143. – DOI: 10.1016/j.aeue.2019.01.008.

10. **Попов, А.** A combined technique for amplifier oriented small-signal noise model extraction / A. Popov, D. Bilevich, A. Salnikov, I. Dobush, A. Goryainov, A. Kalentyev, A. Metel // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2020. – Vol. 30, No 9. – DOI: 10.1002/mmce.22273.

11. Dobush, I.M. Development of a 0.15  $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT Process Design Kit for Low-Noise Applications / I.M. Dobush, I.S. Vasil'evskii, D.D. Zykov, D.S. Bragin, A.S. Salnikov, **А.А. Попов**, А.А. Gorelov, N.I. Kargin // Electronics. – 2021. – Vol. 10, No 22. – P. 2775. – DOI: 10.3390/electronics10222775.

12. **Попов, А.А.** A new extraction flow of the small-signal switch-HEMT model based on the parasitic resistance scanning algorithm / А.А. Попов, I.M. Dobush, A.S. Salnikov // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2022. – Vol. 32, No 9. – DOI: 10.1002/mmce.23278.

13. Salnikov, A.S. Automatic golden device selection and measurement smoothing algorithms for microwave transistor small-signal noise modeling / A.S. Salnikov, I.M. Dobush, **А.А. Попов**, D. V. Bilevich, A.E. Goryainov, A.A. Kalentyev, A.A. Metel // International Journal of Microwave and Wireless Technologies.

– Cambridge University Press, 2022. – P. 1–12.  
– DOI: 10.1017/S175907872200068X.

14. **Popov, A.A.** Small-signal and noise GaAs pHEMT modeling for low noise amplifier design / A.A. Popov, D. V Bilevich, A.A. Metel, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.E. Goryainov, A.A. Kalentyev // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1499. – P. 012033. – DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012033.

15. **Popov, A.A.** A Comparative Study on the Parasitic Parameter Extraction Techniques for the Small-Signal Microwave PHEMT Modeling / A.A. Popov, D.V. Bilevich, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.A. Metel, A.A. Kalentyev, A.E. Goryainov // 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2019. – P. 1–5.  
– DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944631.

16. **Popov, A.A.** Effect of Different De-Embedding Techniques on Small-Signal Parameters of X-Band Low-Noise Amplifier / A.A. Popov, I.M. Dobush, A.A. Metel, D. V. Bilevich, A.E. Goryainov, A.A. Kalentyev, A.S. Salnikov, I.S. Vasil'evskii // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Kazan, Russia: IEEE, 2021. – P. 1–5.  
– DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438889.

17. **Popov, A.A.** Verification of an Automatic GaAs HEMT Nonlinear Modeling Technique / A.A. Popov, D. V. Bilevich, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.A. Kalentyev, A.E. Goryainov // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2019. – P. 1–5.  
– DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729651.

18. Bilevich, D. V. Automatic Nonlinear Modeling Technique for GaAs HEMT / D. V. Bilevich, **A.A. Popov**, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.S. Goryainov, A.A. Kalentyev, D. V. Garays // 12th International Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines”, Dynamics 2018, Omsk, 13–15



november 2018. – Omsk, Russia: IEEE, 2018. – P. 1–5.  
– DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601444.

19. Salnikov, A. A Golden Device Selection Algorithm for Microwave Monolithic Integrated Circuit Elements Modeling / A. Salnikov, D. Bilevich, **A. Попов**, I. Dobush, A. Kalentyev, A. Goryainov // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2022. – P. 1–5.  
– DOI:10.1109/MWENT55238.2022.9802275.

*Доклады на Международных и Всероссийских конференциях*

20. **Попов, А.А.** Влияние подзатворного заглубления на пробивные характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки / А.А. Попов, Д.В. Билевич, А.С. Сальников // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 69–71.

21. Билевич, Д.В. Влияние длины затвора на параметры малосигнальной модели и на частотные характеристики транзистора / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, А.С. Сальников, А.А. Калентьев // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – 2019. – С. 74–76.

22. Билевич, Д.В. Экстракция параметров источника тока  $I_{ds}$  в нелинейной модели / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, Т.Ю. Сидорюк, А.С. Сальников // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 113–115.

23. Степанов, В.И. Алгоритм экстракции параметров источника тока нелинейной модели GaAs-pHEMT-транзистора / В.И. Степанов, **А.А. Попов**, А.С. Сальников // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции (18–20 ноября 2020 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2020. – С. 85–88.

24. Билевич, Д.В. Тестирование автоматической методики построения и верификации нелинейной модели GaAs НЕМТ-транзисторов / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, А.С. Сальников // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 47–50.
25. Степанов, В.И. Автоматическое построение и валидация нелинейной модели GaAs-pHEMT-транзистора для усилительных применений / В.И. Степанов, **А.А. Попов**, А.С. Сальников, А.А. Калентьев, А.Е. Горяинов // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. – 2021. – С. 78–81.
26. **Попов, А.А.** Оценка возможностей автоматизированной экстракции малосигнальных моделей GaAs pHEMT транзисторов, изготовленных по различным техпроцессам / А.А. Попов, Д.В. Билевич, А.С. Сальников, И.М. Добуш, А.Е. Горяинов, А.А. Калентьев // 30-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’ 2020): Материалы конференции, Севастополь, 06-12 сентября 2020 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Севастопольский государственный университет,” 2020. – С. 9–10.
27. Билевич, Д.В. Построение линейной модели СВЧ-транзистора / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, Т.Ю. Сидорюк, А.С. Сальников // Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 117–120.
28. Билевич, Д.В. Методика автоматического построения нелинейной модели GaAs НЕМТ транзистора / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, А.С. Сальников, И.М. Добуш, А.А. Калентьев, А.Е. Горяинов, Д.В. Гарайс // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»

(КрыМиКо'2018): Материалы конференции, Севастополь, 09–15 сентября 2018 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2018. – С. 86–92.

29. Билевич, Д.В. Построение большесигнальной модели НЕМТ-GaAs-транзистора / Д.В. Билевич, **А.А. Попов**, Т.Ю. Сидорюк, А.С. Сальников // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16-18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 148–150.

*Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ*

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661465 Российская Федерация. Программный модуль САПР для экстракции параметров малосигнальных моделей транзисторов Smart НЕМТ Modeling : № 2019660415 : заявл. 23.08.2019 : опубл. 02.09.2019 / Д.В. Билевич, А.Е. Горяинов, И.М. Добуш, А.А. Калентьев, **А.А. Попов**, А.С. Сальников ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью “50ом Технолоджиз”. – EDN: DNQLSB.

*Свидетельства о регистрации топологий интегральных микросхем*

31. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2020630225 Российская Федерация. Монолитная интегральная схема GaAs рНЕМТ трехкаскадного МШУ диапазона частот 8-12 ГГц : № 2020630230 : заявл. 11.11.2020 : опубл. 18.11.2020 / И.М. Добуш, А.С. Сальников, **А.А. Попов**, Д.В. Билевич ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "50ом Технолоджиз". – EDN: LBHRML.

32. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2021630149 Российская Федерация. Монолитная интегральная схема GaAs рНЕМТ трехкаскадного МШУ диапазона частот 20-30 ГГц FOL2030A2 : № 2021630137 : заявл. 20.09.2021 : опубл. 24.09.2021 / И.М. Добуш, **А.А. Попов**, Д.В. Билевич ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "50ом Технолоджиз". – EDN: JPNTFU.

33. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2022630021 Российская Федерация. Монолитная интегральная схема GaAs pHEMT окончного каскада драйвера цифрового управления ключевыми транзисторами FOLSP2AOVT : № 2022630017 : заявл. 02.02.2022 : опубл. 08.02.2022 / А.С. Сальников, Д.В. Билевич, **А.А. Попов** ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "50ом Технолоджиз". – EDN: MWZZKF.

По своему содержанию, объему проведенных научных исследований, научной новизне, научной и практической значимости, количеству и качеству публикаций, достоверности полученных результатов, проведенное А.А. Поповым исследование соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов для усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем» Попова Артема Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.5 – «Физическая электроника» и 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Заключение принято на научном семинаре кафедры физической электроники с приглашением сотрудников кафедры КСУП.

Присутствовало на заседании 8 чел., из них 4 доктора наук и 4 кандидата наук. Результаты голосования: «за» - 8 чел., против – 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 44 от 08 декабря 2022 года.

Председатель

Д-р техн. наук, зав. каф. ФЭ

 П.Е. Троян

Секретарь

канд. техн. наук, доцент каф. ФЭ

 Ю.С. Жидик