

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора
Центра по науке

Ю. А. ДЬЯКОВА



_____ 2023 г.

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы диссертационной работы

Создание современной и конкурентоспособной отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ), в частности СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), стимулирует разработку новой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), применяемой в таких перспективных научно-технических направлениях, как новые стандарты связи, интернет вещей, беспилотные автомобили, летательные аппараты и др. Современный подход к разработке СВЧ МИС предполагает использование математических моделей активных и пассивных элементов в системах автоматизированного проектирования (САПР) РЭА. Недостаточная точность моделей выражается в значимом отклонении рассчитанных в САПР от измеренных экспериментально характеристик СВЧ МИС и в большинстве случаев приводит к увеличению сроков разработки и стоимости устройства ввиду необходимости проведения дополнительных итераций по коррекции принципиальной схемы и/или топологии. В диссертационной работе рассматриваются методики построения математических моделей наногетероструктурных полевых транзисторов, а также вопросы повышения их точности, что делает работу актуальной.

Краткое содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованных источников, включая список публикаций по теме исследования, и двух приложений. Работа изложена на 188 страницах машинописного текста, содержит 101 рисунок и 23 таблицы. Список использованных источников включает 193 наименования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Степень достоверности результатов диссертационной работы подтверждается применением современных методов научных исследований, значительным объёмом экспериментальных данных, полученных с помощью современного измерительного оборудования, а также хорошим согласованием экспериментальных и расчётных данных.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы определяется следующим:

1. Предложен новый алгоритм экстракции внешних ёмкостей НЕМТ-транзистора применение которого позволяет получить физически обоснованные значения внешних сопротивлений в малосигнальной модели коммутационного НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим затвором.

2. Предложена новая аналитическая методика экстракции внешних ёмкостей НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим истоком, на основе результатов электромагнитного моделирования топологии прибора, учитывающая распределённый характер внешних элементов.

3. Впервые проведены построение, верификация и валидация модифицированной физической компактной модели ASM-НЕМТ для СВЧ-транзистора на основе GaAs.

Значимость результатов диссертации для науки и производства

Практическая значимость диссертационной работы в первую очередь определяется рядом разработанных методик и алгоритмов, позволяющих:

1. Исключить из малосигнальной модели коммутационного НЕМТ-транзистора паразитное влияние подводящей линии и сквозного отверстия в цепи затвора.

2. 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. Учесть распределённый характер внешних ёмкостей эквивалентной схемы НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим истоком, без применения итерационных алгоритмов сканирования параметров модели.

Также существенную практическую значимость имеют результаты модификации физической компактной модели ASM-HEMT, в результате чего была разработана нелинейная модель GaAs рHEMT-транзистора, основные параметры которой имеют связь с параметрами техпроцесса.

Работоспособность предложенных методик и алгоритмов подтверждена экспериментально путём построения и верификации моделей GaAs рHEMT-транзисторов, изготовленных на различных отечественных предприятиях. Дополнительно приведены результаты валидации построенных моделей на примере изготовленных тестовых СВЧ МИС буферных и малошумящих усилителей, а также ступенчатых аттенюаторов и фазовращателей.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты работы рекомендуется использовать при построении малосигнальных и нелинейных моделей СВЧ-транзисторов для САПР РЭА и последующем включении данных моделей в состав библиотек стандартных элементов, поставляемых отечественными предприятиями-изготовителями СВЧ-МИС.

Апробация результатов работы и публикации

По результатам исследований опубликовано 33 научных работы, в том числе 8 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 топологий интегральных микросхем.

Результаты исследования использовались при выполнении следующих работ:

1. Научный проект «Исследования и разработка цифрового дизайн-центра по проектированию микроэлектронных устройств для беспроводных систем связи», поддержанного грантом Российского научного фонда № 19-79-10036 (<https://rscf.ru/project/22-79-41023/>).

2. Научный проект «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем

передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки», выполняемый при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 1075-03-2020-237/1 от 05.03.2020, внутренний номер проекта FEWM-2020-0040.

Замечания

По тексту диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. В диссертации, на наш взгляд, не хватает информации относительно статистических норм на параметры транзисторов и их сравнения с параметрами приборов, для которых выполнялось построение моделей. Выбор репрезентативного прибора – критически важный этап, без которого построение модели не имеет существенной практической пользы.

2. В тексте третьего положения, выносимого на защиту, присутствует формулировка «аппроксимации численной зависимости квазиуровня Ферми от потенциала затвора». Корректнее было бы сказать «аппроксимации численной зависимости положения квазиуровня Ферми от потенциала затвора».

3. В качестве направления дальнейшего развития тематики диссертации целесообразно исследовать возможность применения разработанных методик экстракции для таких перспективных приборов, как НЕМТ-транзисторы на основе GaN.

Заключение

Указанные недостатки не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы Попова А.А. Автореферат соответствует основному содержанию работы, включает постановку цели и задач, основные результаты и выводы.

Диссертация Попова А.А. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Основные результаты, представленные в работе, обладают актуальностью, научной и практической значимостью, были представлены на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях.

Считаем, что диссертационная работа удовлетворяет п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), соответствует паспортам заявленных специальностей, а её автор, Попов Артем Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата

технических наук по специальностям 1.3.5. – «Физическая электроника» и 2.2.14. – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Доклад соискателя заслушан, отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», протокол от 27.04.2023 № 47 (в обсуждении приняли участие 18 специалистов, в том числе 6 кандидатов и 1 доктор наук).

Отзыв составил

Начальник отдела,
Курчатовского комплекса
НБИКС-ПТ,
кандидат физико-математических наук

Занавескин
Максим Леонидович
тел.: +7 (499) 196 7784
e-mail: Zhanaveskin_ML@nrcki.ru

Первый заместитель руководителя
Курчатовского комплекса
НБИКС-ПТ по науке,
кандидат физико-математических наук

Демин
Вячеслав Александрович

Начальник отдела,
Курчатовского комплекса
НБИКС-ПТ,
кандидат физико-математических наук

Емельянов
Андрей Вячеславович

Подписи Занавескина М.Л. , Демина В.А., Емельянова А.В. подтверждаю:

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

Борисов
Кирилл Евгеньевич

Адрес НИЦ «Курчатовский институт»:
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
e-mail: nrcki@nrcki.ru
<http://www.nrcki.ru>