

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Попова Артема Александровича «Построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов для усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем» 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

Процесс разработки современной электронной компонентной базы СВЧ-диапазона основан на использовании библиотек для систем автоматизированного проектирования, содержащих модели активных и пассивных базовых элементов. Данные модели воспроизводят электрофизические характеристики приборов и используются для расчёта, анализа и оптимизации параметров разрабатываемых схемотехнических решений. Активное развитие новых полупроводниковых производств и технологических процессов в РФ требует снижения сроков на разработку и повышение точности библиотек моделей элементов, поэтому построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов является актуальной задачей как с научной, так и с практической точки зрения.

Общая характеристика работы

Работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений, списка использованных источников, включающего 193 наименования и приложений с актом внедрения результатов работы соискателя и свидетельствами о государственной регистрации одной программы для ЭВМ и трёх топологий интегральных микросхем. Объём диссертации с приложениями – 188 страниц, 101 рисунок и 23 таблицы.

Автореферат диссертации подготовлен и оформлен в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 и требованиями ВАК при Минобрнауки России и отражает основное содержание диссертационной работы.

Во введении указаны основные проблемы и тенденции в области моделирования СВЧ-транзисторов, определены цель и задачи исследований, показана актуальность темы, личный вклад автора, практическая значимость и достоверность полученных научных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первом разделе представлена общая классификация моделей СВЧ-транзисторов, проведён анализ существующих методик экстракции малосигнальных моделей для схемы включения с общим истоком, сделан подробный обзор эквивалентных схем, применяющихся для расчёта малосигнальных параметров коммутационных СВЧ-

транзисторов, приведены краткие сведения о физических компактных моделях GaN HEMT-транзисторов. В конце раздела сформулированы цель и задачи работы.

Во втором разделе приводится описание разработанных автором методик экстракции параметров малосигнальных моделей СВЧ-транзисторов с различными схемами включения. При рассмотрении тестовой структуры коммутационного транзистора даётся обоснование необходимости исключения влияния цепи затвора, в составе которой, как правило, присутствует отрезок микрополосковой линии передачи и сквозное отверстие. Также приводится блок-схема методики экстракции, включающая предложенный автором алгоритм сканирования паразитных сопротивлений. Для транзисторов, включенных по схеме с общим истоком, автором предложены подходы, позволяющие аналитическим способом рассчитать все внешние и внутренние параметры малосигнальной эквивалентной схемы, а также учесть распределённый характер внешних ёмкостей.

Третий раздел посвящён модифицированной модели ASM-HEMT, позволяющей выполнять анализ статических и динамических характеристик СВЧ-транзисторов на основе GaAs в современных системах схемотехнического моделирования. Модификация модели ASM-HEMT, суть которой заключается в корректировке выражений для аппроксимации численной зависимости квазиуровня Ферми от потенциала затвора в квантовой яме гетероструктуры, позволяет уменьшить расхождение между численным решением и аппроксимирующим выражением до 8%. В данном разделе также даётся описание и назначение основных параметров модели ASM-HEMT, приводятся уравнения для расчёта тока стока, затвора и зарядов на электродах транзистора, поясняется принцип учёта эффекта саморазогрева, наиболее выражено проявляющегося в мощных приборах. Раздел завершается описанием методики построения предложенной модели.

В четвёртом разделе приводятся результаты экспериментального исследования методик и моделей, предложенных в диссертационной работе. В качестве экспериментальных данных для построения моделей использовались результаты измерений характеристик СВЧ-транзисторов, изготовленных на трёх различных отечественных предприятиях. Средняя ошибка моделирования параметров рассеяния в случае малосигнальных моделей СВЧ-транзисторов с общим истоком составила не более 5%. С использованием построенных моделей были спроектированы и изготовлены тестовые СВЧ МИС буферных и малозумящих усилителей, а также ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей. Измеренные характеристики данных схем хорошо согласуются с расчётными данными.

В приложениях присутствуют: акт внедрения результатов диссертационной работы, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, свидетельства о регистрации топологий интегральных микросхем.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложен новый алгоритм экстракции, 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 НЕМТ/рНЕМТ на основе GaAs.

Научная значимость

Работа Артема Александровича Попова выполнена на высоком научном и техническом уровне, имеет логически выстроенную структуру и большой объём экспериментальных результатов, подтверждающих работоспособность предложенных автором методик и алгоритмов. Методика построения малосигнальной модели коммутационного СВЧ-транзистора включает алгоритм сканирования, который позволяет определить физически обоснованные значения паразитных сопротивлений, обеспечивая при этом минимальное отклонение рассчитанных параметров рассеяния от измеренных в широком диапазоне частот. Комбинированная методика экстракции позволяет выполнить построение малосигнальной шумовой модели не только в плоскостях самого транзистора, но и в плоскостях контактных площадок, что важно при разработке гибридных интегральных схем. Представленные в диссертации результаты не оставляют сомнений в научной значимости, поскольку задают перспективное направление для дальнейших исследований в области автоматизированной экстракции параметров моделей GaAs полевых транзисторов.

Достоверность результатов

Достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается согласованностью рассчитанных и экспериментально измеренных характеристик транзисторов и тестовых монокристаллических интегральных схем. Достоверность

экспериментальных данных обеспечивается применением современного измерительного оборудования и стандартными методиками проведения исследований.

По результатам исследований опубликовано 33 научных работы: 8 в журналах из перечня ВАК, 11 в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах WoS/Scopus, 10 статей в сборниках и трудах международных конференций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 3 свидетельства о регистрации топологий интегральных микросхем.

Практическая значимость

С практической точки зрения разработанные в диссертационном исследовании методики построения моделей СВЧ-транзисторов могут использоваться как фабриками, осуществляющими контрактное производство СВЧ МИС, так и дизайн-центрами, выполняющими работы по проектированию интегральных схем. В первом случае применение предложенных методик может повысить точность моделей транзисторов, поставляемых в комплекте с библиотекой базовых элементов. В случае дизайн-центров предложенные подходы также могут использоваться для построения моделей, если имеющиеся модели элементов для выбранного техпроцесса не удовлетворяют каким-либо требованиям, например, по частотному диапазону, области рабочих напряжений и др. **Практическая значимость** работы подтверждена актами о внедрении её результатов на предприятии ООО «50ом Технолоджиз». Следует также отметить, что результаты диссертации использовались при выполнении двух научных проектов при поддержке Российского научного фонда и Министерства науки и высшего образования РФ.

Замечания по диссертационной работе

Следует отметить некоторые недостатки диссертационной работы:

1. В главе 3 приводится описание корректировок уравнений физической модели ASM-HEMT для случая GaAs HEMT, тогда как верификация проводится для GaAs pHEMT (псевдоморфных HEMT). Не хватает упоминания о допустимости такого перехода и возможных последствий, связанных с этим.

2. Какие **качественные** физические различия GaN HEMT и GaAs HEMT легли в основу для корректировки аппроксимирующих уравнений положения квазиуровня Ферми модели ASM-HEMT? Или все различия оказались только количественными?

Заключение

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Артема Александровича Попова «Построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов для усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем» является завершённым научным исследованием, обладает актуальной научной новизной и соответствует требованиям, установленным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 в редакции от 18.03.2023, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.5 – «Физическая электроника» и 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Официальный оппонент

Кандидат технических наук по специальности 05.13.05

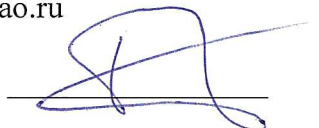
заместитель генерального директора по научной работе

ООО «Центр инновационных разработок ВАО» (ООО «Инноцентр ВАО»)

107564, Россия, г. Москва, ул. Краснобогатырская, д.2, стр. 2, офис 40

Тел.: +7 926 919 92 98

Адрес электронной почты: bas@icvao.ru



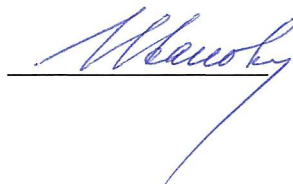
Алексей Сергеевич Будяков

« 02 » 05 2023 г.

Подпись к.т.н. Будякова А.С. удостоверяю

Ведущий специалист по кадрам

ООО «Инноцентр ВАО»



Елена Михайловна Иванова

