

На правах рукописи



ПОПОВ АРТЕМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ
ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ
И УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ
СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Специальности 1.3.5 – Физическая электроника
и 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Троян Павел Ефимович

Научный консультант: кандидат технических наук
Сальников Андрей Сергеевич

Официальные оппоненты: **Айзенштат Геннадий Исаакович**
доктор технических наук, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск, начальник лаборатории

Будяков Алексей Сергеевич
кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Центр инновационных разработок ВАО», г. Москва, заместитель генерального директора по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «**Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»**», г. Москва

Защита состоится «24» мая 2023 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/nqwpw0bw>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



А.В. Казаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Беспроводная передача данных – ключевое направление развития современных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем (РТС). Технологии беспроводной связи находят широкое применение в мобильной телефонии, спутниковых системах, радиолокации, навигации, телеметрии, дистанционном управлении, измерительной технике, автомобильной электронике и др. Последние достижения в области РТС стимулируют создание таких перспективных научно-технических направлений, как новые стандарты связи, интернет вещей, беспилотные автомобили и летательные аппараты. Основные тенденции развития современных РТС направлены на улучшение их основных технических параметров: повышение ёмкости канала, качества и скорости передачи данных, что может быть достигнуто за счёт более широкого освоения СВЧ-диапазона и создания электронной компонентной базы (ЭКБ) – СВЧ монолитных интегральных схем (МИС). Для эффективного развития РТС необходимо решать проблемы разработки технических основ создания приборов, в частности технологические проблемы создания СВЧ ЭКБ. Однако, согласно лучшей мировой практике, технологические проблемы следует решать параллельно с задачами моделирования и автоматизированного проектирования, где также требуются соответствующие модели, методы и программное обеспечение (ПО). Таким образом, моделирование является технической основой разработки и совершенствования твердотельных приборов СВЧ-диапазона.

На данный момент библиотеки базовых элементов для систем автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются стандартным средством взаимодействия предприятий, занимающихся производством СВЧ ЭКБ, и дизайн-центров, осуществляющих разработку принципиальной схемы и топологии устройства. В основе библиотек базовых элементов лежат модели активных и пассивных компонентов, способные воспроизводить характеристики изготовленных тестовых элементов в САПР РЭА.

С точки зрения построения наиболее сложными являются модели СВЧ-транзисторов, выступающих в роли активного компонента во многих типах СВЧ МИС. В зависимости от назначения модели СВЧ-транзисторов могут быть реализованы в виде малосигнальных эквивалентных схем (ЭС) либо в виде набора математических уравнений. Малосигнальные ЭС состоят из идеальных электрических элементов и используются в современных САПР РЭА в качестве так называемых линейных (малосигнальных) моделей, воспроизводящих параметры рассеяния (S-параметры) транзистора в окрестности заданной рабочей точки. Задача построения линейной модели сводится к задаче экстракции параметров ЭС – процедуре определения значений элементов малосигнальной эквивалентной схемы.

К настоящему времени известно большое многообразие работ (например, работы Dambrine G., Berroth M., Kompa G., Rorsman N., Crupi G., Resca D., Alt A., Jarndal A., Бобрешова А.М., Крутова А.В., Кокколова А.А.), посвящённых методикам экстракции параметров малосигнальных ЭС гетероструктурного полевого транзистора с высокой подвижностью электронов или НЕМТ-транзистора (от англ. High Electron Mobility Transistor – НЕМТ) на основе полупроводниковых соединений III-V групп (GaAs, GaN, InP). Однако большая часть предложенных методик пригодна только для построения моделей транзисторов, включенных по схеме с общим истоком (ОИ), что характерно для схем, предназначенных для усилительных применений. На данный момент в области малосигнальных моделей с ОИ наблюдается тенденция к усложнению ЭС, поскольку с повышением рабочих частот возникает проблема учёта распределённого характера элементов, ассоциируемых с электродами транзистора. Усложнение ЭС в свою очередь затрудняет процесс определения параметров модели, в результате чего исследователи предлагают новые методики экстракции на основе итерационного перебора значений определённых параметров ЭС либо на основе результатов электромагнитного (ЭМ) анализа топологии прибора.

В схемах СВЧ-переключателей (коммутаторов) транзистор подключают по схеме с общим затвором (ОЗ). Такой транзистор имеет отличную от схем с общим истоком топологию и, соответственно, иную конфигурацию эквивалентной схемы. Согласно опубликованным исследованиям, применение традиционных методик экстракции для моделей с ОИ не позволяет получить точную малосигнальную модель коммутационного транзистора, способную воспроизводить S-параметры прибора в широкой полосе частот. Для решения проблемы исследователи предлагают новые варианты тестовых структур и ЭС, а также новые методики построения моделей на основе ЭМ-анализа топологии транзистора.

Малосигнальные (линейные) модели используются при проектировании схем, в которых транзистор работает при малых уровнях входной мощности, например, при работе аттенуаторов с цифровым управлением или малощумящих усилителей (МШУ) в линейных режимах. При проектировании таких устройств достаточно иметь несколько малосигнальных моделей, воспроизводящих S-параметры транзистора в различных рабочих точках. При разработке схем, где на вход транзистора подается СВЧ-сигнал большой амплитуды, разработчикам необходимо учитывать верхнюю границу динамического диапазона, уровень интермодуляционных искажений, явление саморазогрева полупроводникового кристалла, а также эффект пробоя, возникающий при превышении допустимого уровня входной мощности. Малосигнальные модели не учитывают эти эффекты, поэтому в процессе разработки мощных СВЧ МИС используются нелинейные модели СВЧ-транзисторов.

Нелинейные модели полевых СВЧ-транзисторов формулируются в виде набора математических уравнений, связывающих входные (напряжения) и выходные (токи) характеристики прибора. Существует большое многообразие нелинейных моделей НЕМТ-транзисторов, однако до недавнего времени в распоряжении разработчиков были лишь формальные (эмпирические) модели, в основе которых заложены математические функции (например, гиперболический тангенс в модели Angelov, полином третьей степени в модели Curtice3), способные аппроксимировать характеристики транзисторов при использовании дополнительных коэффициентов. Основным недостатком такого класса моделей заключается в отсутствии физического обоснования выбора той или иной функции для формулирования уравнений модели. Следствием данного недостатка является сложная и трудоёмкая процедура экстракции, поскольку число коэффициентов (параметров) в формальных моделях может достигать до сотни, а физически связанные величины (токи и заряды) выражены с помощью не связанных между собой уравнений. Вопросы масштабируемости формальных моделей относительно геометрических параметров и температуры окружающей среды также остаются открытыми. Для этих целей к параметрам модели применяются полиномиальные функции, которые также не имеют физического обоснования и подбираются путём исследования результатов измерений характеристик тестовых элементов в нескольких конструктивных состояниях при различных температурных воздействиях. При этом для каждого из состояний проводится экстракция как внешних (паразитных), так и внутренних параметров нелинейной модели. В результате задача построения полноценной нелинейной модели транзистора может занимать продолжительное время даже с применением специализированного программного обеспечения.

В 2018 году в области нелинейных моделей произошёл качественный скачок, благодаря которому специалистам стали доступны две физические компактные модели нитрид-галлиевых НЕМТ-транзисторов, основанные на физических представлениях о работе прибора. Данные модели прошли многоэтапную процедуру стандартизации, которую проводило международное сообщество по компактным моделям Compact Model Coalition (СМС) при участии крупнейших мировых производителей СВЧ-микросэлектроники и разработчиков САПР РЭА. Основным преимуществом таких моделей является их физическая обоснованность. Несмотря на ряд допущений, которые используются при формулировании моделей, все основные уравнения имеют физическое обоснование, в связи с чем основные величины (токи и заряды) взаимосвязаны между собой. Это позволяет существенно упростить процедуру экстракции и масштабирования модели относительно геометрических параметров транзистора, поскольку рассчитываемые значения токов и зарядов в данном случае зависят от геометрических параметров модели (длины затвора, ширины канала и количества затворов). Анализ последних публикаций свидетельствует о том,

что при разработке СВЧ МИС на основе нитрид-галлиевой технологии разработчики всё чаще прибегают к использованию стандартизованных компактных моделей GaN HEMT-транзисторов. Однако работы по созданию аналогичных моделей для СВЧ-транзисторов на основе GaAs в настоящее время не ведутся.

На основании вышеизложенного следует, что решение научных и практических задач построения малосигнальных и нелинейных моделей СВЧ-транзисторов для разработки усилительных и управляющих СВЧ-устройств является актуальной проблемой. На основе вышеизложенного можно сформулировать цель и основные задачи исследования.

Цель работы. Разработка методик построения линейных и нелинейных моделей HEMT-транзисторов для проектирования схем, выполняющих функции усиления и коммутации СВЧ-сигнала.

Поставленная цель достигается решением следующих **основных задач**:

1. Разработка методики экстракции параметров малосигнальной эквивалентной схемы HEMT-транзистора, включенного по схеме с общим затвором, на основе алгоритма сканирования внешних сопротивлений.
2. Разработка комбинированной методики экстракции параметров малосигнальной шумовой модели HEMT-транзистора, включенного по схеме с общим истоком.
3. Разработка методики экстракции внешних ёмкостей эквивалентной схемы HEMT-транзистора, включенного по схеме с общим истоком, на основе результатов электромагнитного моделирования топологии прибора.
4. Исследование, анализ и модификация уравнений физической компактной нелинейной модели ASM-HEMT для возможностей применения при проектировании арсенид-галлиевых СВЧ МИС.
5. Построение, верификация и валидация линейных и нелинейных моделей HEMT-транзисторов, предназначенных для проектирования схем, выполняющих функции усиления и коммутации СВЧ-сигнала.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый алгоритм экстракции, применение которого позволяет получить физически обоснованные значения внешних сопротивлений в малосигнальной модели коммутационного HEMT-транзистора, включенного по схеме с общим затвором.
2. Предложена новая аналитическая методика экстракции внешних ёмкостей HEMT-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-HEMT для СВЧ-транзистора на основе GaAs.

Положения, выносимые на защиту:

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

Достоверность научных результатов. Степень достоверности научных результатов подтверждается: применением современных методов научных исследований; значительным объёмом экспериментальных данных, полученных с помощью современного измерительного оборудования; хорошим согласованием экспериментальных и расчётных данных.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

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-НЕМТ 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 рНЕМТ-транзисторов, изготовленных на различных предприятиях.

6. С использованием построенных линейных и нелинейных моделей были разработаны СВЧ МИС буферных и малошумящих усилителей, а также ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей.

Результаты диссертационного исследования использованы в следующих научно-исследовательских работах:

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.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, в 2018, 2019 гг.; Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, в 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.; Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, в 2017, 2018 гг.; Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, в 2018, 2019 гг.; «Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи» (Sibcon), г. Томск, в 2019 г., г. Казань, в 2021 г.

Публикации. По результатам проведённых исследований опубликованы 33 научные 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 топологии интегральных микросхем.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично либо при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отмечены современные тенденции и проблемы в области построения малосигнальных и нелинейных моделей СВЧ-транзисторов для САПР РЭА, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проводится обзор существующих подходов к моделированию СВЧ-транзисторов, включенных по схеме с общим истоком и общим затвором, рассматриваются ключевые этапы построения моделей, предназначенных для проектирования СВЧ-устройств в САПР РЭА.

По результатам обзора установлено, что вопросы построения малосигнальных и нелинейных моделей СВЧ-транзисторов достаточно широко освещены в современной литературе. С появлением новых технологий изготовления и повышением требований к характеристикам СВЧ-устройств возникает потребность в моделях, способных учитывать множество различных эффектов. В области малосигнальных моделей транзисторов, включенных по схеме с общим истоком, актуальной является проблема учёта распределённого характера элементов, ассоциируемых с электродами прибора. В качестве решения предлагаются более сложные структуры ЭС, для экстракции которых используются методики на основе сканирования параметров модели или ЭМ-анализа топологии СВЧ-транзистора.

Результаты опубликованных исследований показывают, что традиционные методики, работоспособность которых экспериментально подтверждена на транзисторах с общим истоком, не позволяют получить малосигнальную модель коммутационного СВЧ-транзистора с общим затвором, способную воспроизводить S-параметры прибора в широкой полосе частот. Для построения моделей коммутационных СВЧ-транзисторов предлагаются новые варианты тестовых структур и ЭС. При экстракции параметров данных ЭС также применяют ЭМ-анализ топологии прибора.

Помимо традиционных формальных нелинейных моделей разработчикам СВЧ МИС относительно недавно стали доступны стандартизованные компактные модели, основанные на физических представлениях о работе СВЧ-транзистора. Несмотря на очевидные преимущества по сравнению с формальными (например, в части простоты процедуры экстракции и масштабируемости модели относительно геометрических параметров прибора), применение этих моделей ограничивается лишь GaN НЕМТ-транзисторами, а работы по созданию аналогичных моделей для СВЧ-транзисторов на основе GaAs в настоящее время не ведутся.

В конце раздела формулируются основные задачи диссертационного исследования.

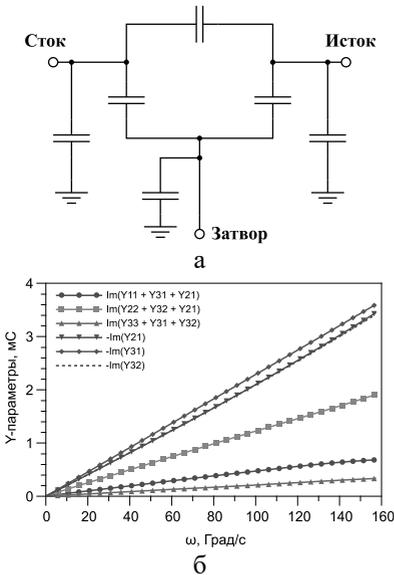


Рисунок 1 – Низкочастотная эквивалентная схема (а) и частотные зависимости Y-параметров (б) ЭМ-структуры коммутационного СВЧ-транзистора без учёта слоя мезы

коммутационный СВЧ-транзистор, в цепь затвора которого включен высокоомный резистор.

На первом этапе построения модели проводится экстракция внешних (паразитных) ёмкостей на основе результатов электромагнитного моделирования топологии коммутационного СВЧ-транзистора без активного слоя гетероструктуры (слоя мезы). Представляя рассчитанную структуру в виде эквивалентной схемы замещения (рисунок 1а), значения внешних ёмкостей могут быть определены из частотных зависимостей мнимых частей рассчитанных Y-параметров (рисунок 1б) как аналитически, так и методом наименьших квадратов.

На втором этапе проводится исключение влияния цепи затвора из измеренных S-параметров тестовой структуры СВЧ-транзистора. Далее следует этап экстракции внешних сопротивлений и индуктивностей, а также внутренних параметров малосигнальной ЭС для двух состояний: включенного и выключенного. Ввиду того, что применение традиционных методик экстракции внешних сопротивлений приводит к расчёту отрицательных сопротивлений канала, в предложенной методике при экстракции используется алгоритм сканирования внешних сопротивлений. Суть

Во втором разделе рассматриваются предложенные методики экстракции параметров малосигнальных моделей СВЧ-транзисторов, включенных по схеме с общим истоком и с общим затвором.

Предложенная методика экстракции параметров малосигнальных моделей коммутационных СВЧ-транзисторов предполагает использование результатов измерений S-параметров двух тестовых структур. Первая структура необходима для экстракции параметров малосигнальной модели и представляет собой коммутационный СВЧ-транзистор, включенный по схеме с ОЗ. В цепи затвора данной структуры, как правило, присутствуют последовательно соединённые микрополосковая линия передач и сквозное заземляющее отверстие. Вторая тестовая структура используется для верификации малосигнальной модели и содержит

алгоритма сводится к итерационному уменьшению значений внешних сопротивлений истока и стока и расчёту внутренних параметров ЭС для двух состояний. На каждой итерации работы алгоритма проводится оценка ошибки моделирования S-параметров транзистора, а также фиксируются экстрагированные значения параметров внутренней ЭС. Сканирование осуществляется до тех пор, пока для одного из внешних сопротивлений не будет достигнут нижний теоретический предел, оцениваемый с помощью измерений методом длинной линии. По результатам работы алгоритма выбирается итерация в окрестности минимума ошибки моделирования S-параметров для двух состояний, на которой все значения параметров внутренней ЭС являются положительными. На рисунке 2 представлены графики изменения параметров ЭС на каждой итерации. Применение алгоритма сканирования внешних сопротивлений позволяет избежать экстракции отрицательных значений параметров внутренней ЭС, обеспечивая при этом минимальную ошибку моделирования S-параметров.

Предложенная комбинированная методика экстракции параметров малосигнальной шумовой модели СВЧ-транзистора, включенного по схеме с ОИ, позволяет выполнять построение модели как в плоскостях отсчёта контактных площадок, так и в плоскостях самого транзистора.

На первом этапе проводится экстракция параметров эквивалентных схем замещения для пассивных тестовых структур на основе результатов измерений их S-параметров. В результате экстрагируются параметры ЭС, позволяющей определить малосигнальную модель СВЧ-транзистора с ОИ в плоскостях отсчёта контактных площадок (рисунок 3). Для этого к внутренним выводам данной ЭС необходимо подключить выводы самой

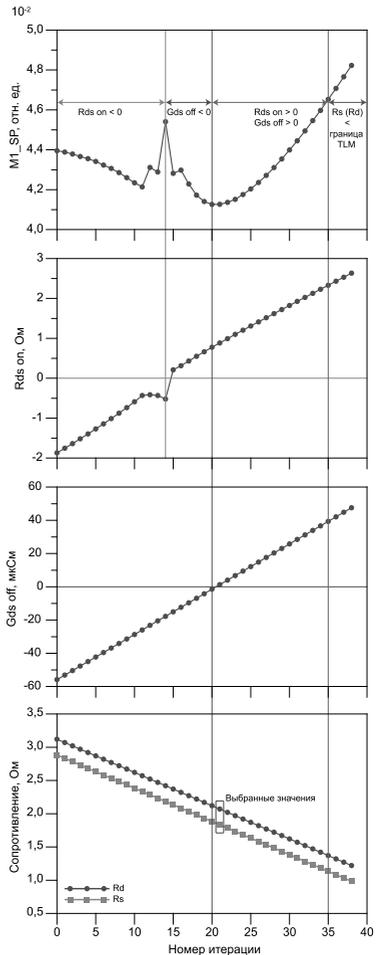


Рисунок 2 – Изменение ошибки моделирования $M1_{SP}$ и параметров $G_{ds\ off}$, $R_{ds\ on}$ при уменьшении значений внешних сопротивлений R_s и R_d

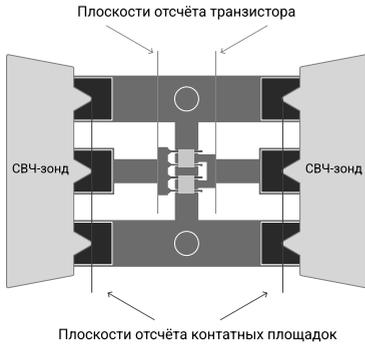


Рисунок 3 – Обозначение плоскостей отсчёта контактных площадок и СВЧ-транзистора

соответствующих ЭС. Внешние ёмкости рассчитываются на основе подхода, где используются S-параметры транзистора, измеренные в «холодном» режиме (при $V_{ds} = 0$ В) с отсечённым каналом ($V_{gs} \ll V_p$, где V_p – напряжение отсечки). Внешние сопротивления и индуктивности рассчитываются на основе подхода, где используются S-параметры транзистора, измеренные в двух «холодных» режимах: с отсечённым каналом ($V_{gs} \ll V_p$, где V_p – напряжение отсечки) и без смещения по затвору ($V_{gs} = 0$ В). При этом перед экстракцией внешних сопротивлений и индуктивностей исключается влияние внешних ёмкостей, значения которых были определены на предыдущем этапе. Параметры элементов внутренней ЭС СВЧ-транзистора рассчитываются методом наименьших квадратов на основе результатов измерений S-параметров в рабочей точке. Далее выполняется построение шумовой модели на основе результатов измерений коэффициента шума в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом методом подстройки эквивалентных шумовых температур сопротивлений ЭС в среде схемотехнического моделирования (симуляторе электронных схем).

Учитывая, что измерения коэффициента шума проводятся в плоскостях отсчёта контактных площадок, при определении значений эквивалентных шумовых температур малосигнальная модель также должна быть определена в соответствующих плоскостях отсчёта. Для этого выводы малосигнальной ЭС

малосигнальной модели. Далее рассмотрены основные этапы экстракции параметров самой малосигнальной модели СВЧ-транзистора. Для экстракции параметров малосигнальной ЭС, определённой в плоскостях СВЧ-транзистора (рисунок 4), необходимо использовать результаты измерений S-параметров со сдвинутыми плоскостями отсчёта. В рассматриваемом случае сдвиг плоскостей отсчёта осуществляется с помощью процедуры деэмбеддинга, используя либо результаты измерений S-параметров пассивных тестовых структур, либо рассчитанные S-параметры

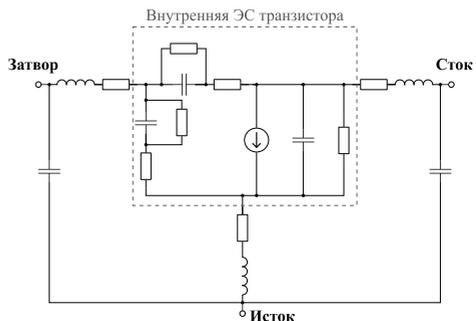


Рисунок 4 – Малосигнальная ЭС СВЧ-транзистора в рабочей точке

необходимо подключить к соответствующим внутренним выводам внешней ЭС, параметры которой были определены на первом этапе. При этом в симуляторе электронных схем необходимо включить функцию расчёта шумовых характеристик для сопротивлений внешней ЭС. После определения значений эквивалентных шумовых температур полученная малосигнальная шумовая модель может воспроизводить малосигнальные и шумовые параметры СВЧ-транзистора как в плоскостях отсчёта контактных площадок (если в схеме модели присутствует внешняя ЭС), так и в плоскостях отсчёта самого транзистора (если в схеме модели отсутствует внешняя ЭС).

Применение предложенной методики экстракции внешних ёмкостей на основе результатов ЭМ-анализа топологии СВЧ-транзистора, включенного по схеме с ОИ, позволяет учесть распределённый характер внешних ёмкостей, а также рассчитать значение ёмкости контактной площадки электрода истока. Основная идея методики основана на рассмотренном ранее подходе, где для расчёта внешних ёмкостей коммутационного СВЧ-транзистора применяется ЭМ-моделирование топологии прибора. По аналогии с данным подходом ЭМ-структура топологии транзистора, включенного по схеме с ОИ, без активного слоя гетероструктуры также может быть представлена в виде системы из трёх металлических проводников, изолированных друг от друга. Тогда все внешние ёмкости малосигнальной эквивалентной схемы могут быть рассчитаны из результатов электромагнитного моделирования структур, представленных на рисунке 5.

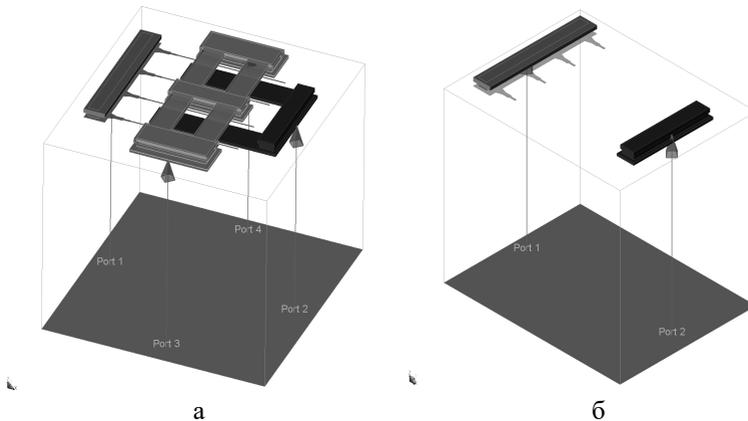


Рисунок 5 – Трёхмерные структуры для ЭМ-моделирования без учёта слоя мезы: а – топология транзистора, включенного по схеме с ОИ; б – фрагменты электродов затвора и стока

Первая структура (рисунок 5а) позволяет рассчитать значения внешних ёмкостей контактных площадок электродов, а также межэлектродные ёмкости. Вторая структура (рисунок 5б) позволяет определить ёмкость между фрагментами электродов затвора и стока, к которым непосредственно

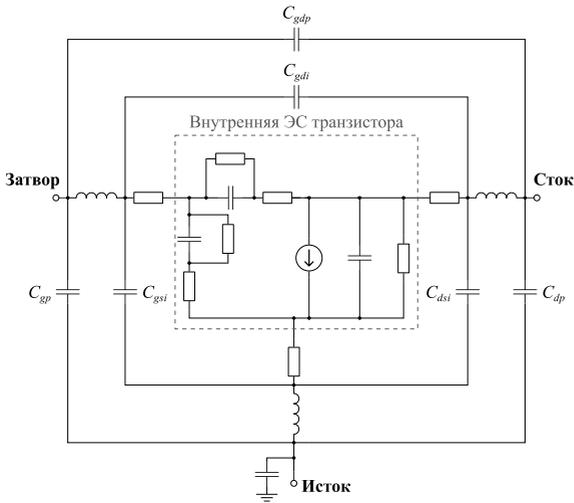


Рисунок 6 –
Малосигнальная ЭС
транзистора,
учитывающая
распределённый
характер внешних
элементов и ёмкость
истока

подключаются подводящие линии. Структура итоговой малосигнальной ЭС транзистора с учётом распределённого характера внешних ёмкостей и наличием ёмкости контактной площадки истока представлена на рисунке 6. В соответствии с конфигурацией малосигнальной ЭС в процессе экстракции последовательных внешних элементов (индуктивностей и сопротивлений) следует поэтапно исключить влияние внешних ёмкостей C_{gp} , C_{dp} , C_{gdp} и C_{gsi} , C_{dsi} , C_{gdi} . При этом экстракция внешних сопротивлений и индуктивностей, а также параметров внутренней ЭС может осуществляться с помощью рассмотренной ранее комбинированной методики. Результаты верификации малосигнальных моделей, построенных с применением рассмотренной методики на основе ЭМ-анализа, представлены в четвёртом разделе диссертации.

В третьем разделе приводится детальный анализ уравнений стандартизованной физической компактной модели ASM-HEMT для GaN HEMT-транзисторов, рассматриваются способы модификации данных уравнений для возможности расчёта характеристик СВЧ-транзисторов, изготовленных по арсенид-галлиевой технологии. Также в разделе приводится содержание разработанной методики построения модифицированной компактной модели и рекомендации по её автоматизации в современных средах схемотехнического моделирования.

По результатам анализа уравнений модели ASM-HEMT были предложены выражения, позволяющие повысить точность аппроксимации численной зависимости положения квазиуровня Ферми $E_f^{unified}$ и поверхностной концентрации носителей заряда $n_s^{unified}$ в канале арсенид-галлиевого HEMT-транзистора от потенциала затвора:

$$n_s^{unified} = \frac{2V_{th} \cdot \frac{C_g}{q} \cdot \frac{V_{go}}{2V_{th}}}{G(V_{go})}, \quad (1)$$

$$E_f^{unified} = V_{go} - \frac{q}{C_g} n_s^{unified} = V_{go} - \frac{2V_{th} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{V_{go}}{2V_{th}} \right) \right]}{\frac{1}{H(V_{go})} + \frac{C_g}{qD} \cdot \exp \left(-\frac{V_{go}}{2V_{th}} \right)}, \quad (2)$$

где V_{th} – тепловой потенциал; q – заряд электрона; C_g – удельная ёмкость, обусловленная зарядом под затвором; V_{go} – разность между потенциалом на затворе и напряжением отсечки; D – эффективная плотность состояний; $G(V_{go}), H(V_{go})$ – функции для «сшивания» кусочных аппроксимаций.

Данные выражения основаны на методе «сшивания» аналитических аппроксимаций, справедливых на определённых участках численных зависимостей. Результаты аппроксимации численных решений в широком диапазоне напряжений на затворе представлены на рисунке 7. Рассчитанные значения средней ошибки аппроксимации численных зависимостей составили 7,77% для $E_f = f(V_g)$ и 1,1% для $n_s = f(V_g)$ соответственно. Данные выражения впоследствии использовались в модели ASM-HEMT для расчёта характеристик арсенид-галлиевого HEMT-транзистора.

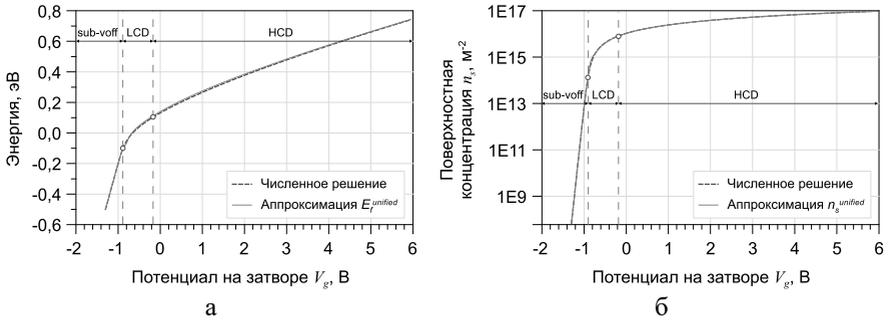


Рисунок 7 – Результаты аппроксимации численного решения $E_f = f(V_g)$ (а) и $n_s = f(V_g)$ (б) с помощью выражений (1) и (2) в широком диапазоне напряжений на затворе

При анализе уравнений модели ASM-HEMT было рассмотрено основное выражение для тока стока транзистора:

$$I_d = \mu C_g N F \frac{W}{L} (V_{go} - \psi_m + V_{th}) \psi_{ds}, \quad (3)$$

где μ – подвижность носителей заряда; NF – число затворов транзистора; W – единичная ширина затвора; L – длина затвора; ψ_m – значение поверхностного потенциала в центре канала транзистора; ψ_{ds} – разность поверхностных потенциалов стока и истока.

Для учёта эффектов, присущих реальным приборам, в данное уравнение вносятся соответствующие поправки. Далее приведён список эффектов, которые учитываются в модели ASM-HEMT:

- зависимость подвижности носителей от напряжённости вертикального электрического поля;
- деградация подвижности при высоких значениях напряжённости продольного электрического поля;
- модуляция длины канала;
- понижение барьера за счёт напряжения на стоке (DIBL-эффект);
- наклон подпороговой характеристики;
- насыщение скорости носителей заряда.

Также при анализе уравнений модели ASM-HEMT были рассмотрены принципы получения выражений для описания зарядов на электродах транзистора, способы учёта эффекта саморазогрева и нелинейного характера сопротивлений стока/истока и выражения для тока затвора. По результатам исследования модели ASM-HEMT была предложена методика её построения.

В четвёртом разделе приведены результаты построения, верификации и валидации малосигнальных и нелинейных моделей, построенных с помощью методики, предложенных в диссертационном исследовании. В качестве экспериментальных данных выступали результаты характеристики СВЧ-транзисторов, изготовленных по трём технологиям GaAs pHEMT с различной проектной нормой, а также результаты измерений СВЧ-устройств, разработанных с использованием построенных моделей.

Для СВЧ-транзистора в копланарном исполнении с общей шириной затвора 4×40 мкм, изготовленного в АО «НИИПП» (г. Томск) по технологии 0,15 мкм GaAs pHEMT, были построены малосигнальные модели в трёх рабочих точках. На рисунке 8 представлены результаты построения малосигнальных моделей с помощью предложенной комбинированной методики. Средняя интегральная ошибка моделирования S-параметров в плоскостях контактных площадок составила не более 4,5%, а в плоскостях самого транзистора – не более 3,5%.

Представленные результаты измерений S-параметров СВЧ-транзистора 4×40 мкм также использовались при построении малосигнальных моделей с помощью методики, в которой внешние ёмкости ЭС экстрагировались на основе ЭМ-анализа топологии прибора. При этом остальные параметры ЭС определялись с помощью предложенной комбинированной методики. Сравнение результатов измерений и моделирования S-параметров в выбранных рабочих точках представлено на рисунке 9.

Визуальное сравнение измеренных и рассчитанных характеристик, представленных на рисунках 8 и 9, свидетельствует о том, что ЭС, учитывающая распределённый характер внешних ёмкостей (рисунок 6), лучше согласуется с результатами измерений в области высоких частот, в то время

как в нижнем частотном диапазоне отличия от традиционной ЭС (рисунок 4) незначительны.

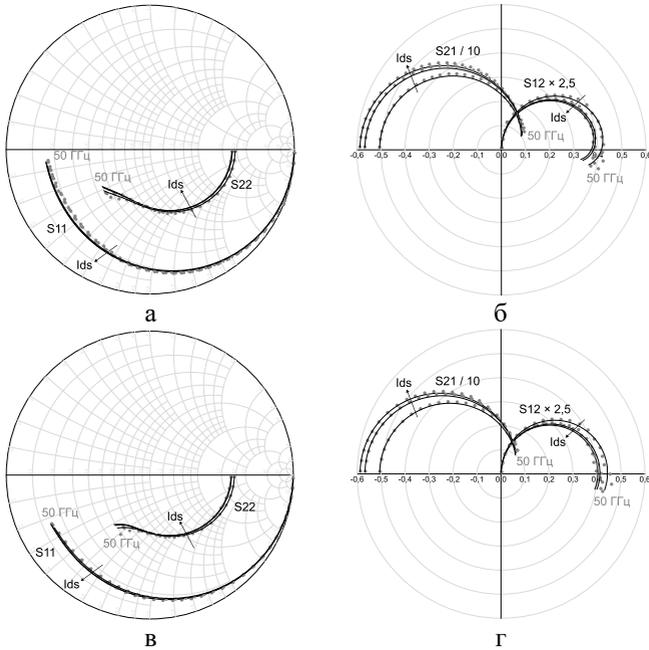


Рисунок 8 – Сравнение результатов измерений (символы) и моделирования (сплошная линия) S-параметров в рабочих точках $V_{ds} = 3$ В, $I_{ds} = 15, 20, 25$ мА в плоскостях отсчёта контактных площадок (а, б) и в плоскостях транзистора (в, г)

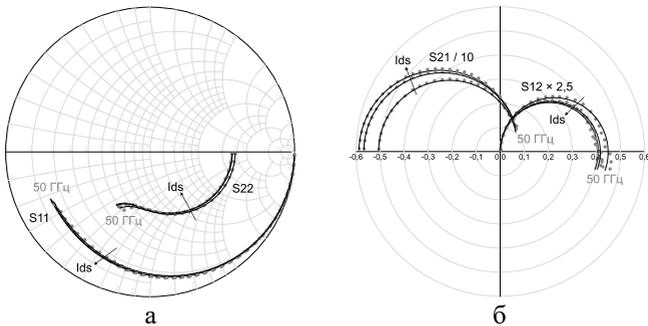


Рисунок 9 – Сравнение результатов измерений (символы) и моделирования (сплошная линия) S-параметров в рабочих точках $V_{ds} = 3$ В, $I_{ds} = 15, 20, 25$ мА в случае эквивалентной схемы, учитывающей распределённый характер внешних ёмкостей

По результатам количественной оценки точности малосигнальных моделей было установлено, что учёт распределённого характера внешних ёмкостей позволяет снизить интегральную ошибку моделирования S-параметров до уровня менее 2,5%.

Для рассматриваемого транзистора 4×40 мкм также была построена модифицированная модель ASM-HEMT. Экстракция параметров модели осуществлялась по предложенной методике на основе результатов измерений статических вольтамперных характеристик и S-параметров во множестве рабочих точек. Сравнение результатов измеренных и рассчитанных статических характеристик приведено на рисунке 10.

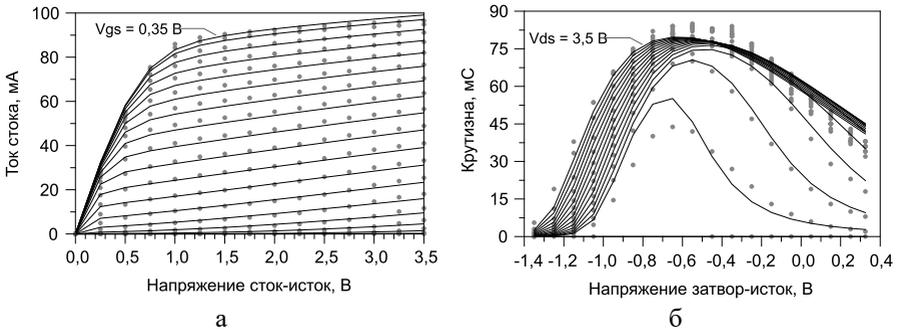


Рисунок 10 – Сравнение результатов измерений (символы) и моделирования (сплошная линия) выходной ВАХ (а) и крутизны (б)

Верификация нелинейной модели по S-параметрам проводилась в рабочих точках, наиболее часто использующихся при разработке маломощных усилителей: при V_{gs} от $-0,9$ В до $-0,7$ В с шагом $0,1$ В и V_{ds} от 2 В до 3 В с шагом $0,5$ В. На рисунке 11 представлено сравнение результатов измерений и моделирования S-параметров в выбранных рабочих точках.

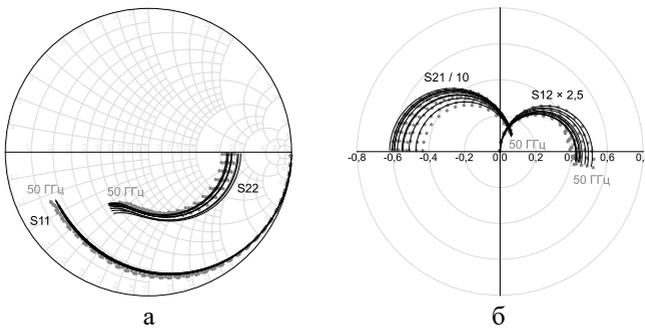


Рисунок 11 – Сравнение результатов измерений (символы) и моделирования (сплошная линия) параметров рассеяния S_{11}, S_{22} (а) и S_{12}, S_{21} (б)

С использованием построенных моделей были разработаны и изготовлены тестовые МИС усилителей диапазона частот 7–17 ГГц и 17–24 ГГц. Фотографии изготовленных кристаллов и частотные характеристики усилителей представлены на рисунках 12–13. Стоит отметить, что расчёт выходной мощности малошумящего усилителя P_{1dB} по уровню компрессии коэффициента усиления на 1 дБ проводился с использованием построенной модифицированной нелинейной модели ASM-HEMT.

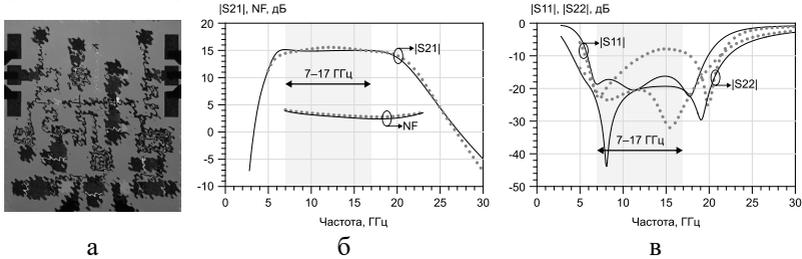


Рисунок 12 – Разработанная СВЧ МИС буферного усилителя диапазона частот 7–17 ГГц: фотография изготовленного кристалла (а); измеренные (символы) и рассчитанные (сплошная линия) характеристики $|S_{21}|$, NF (б) и $|S_{11}|$, $|S_{22}|$ (в)

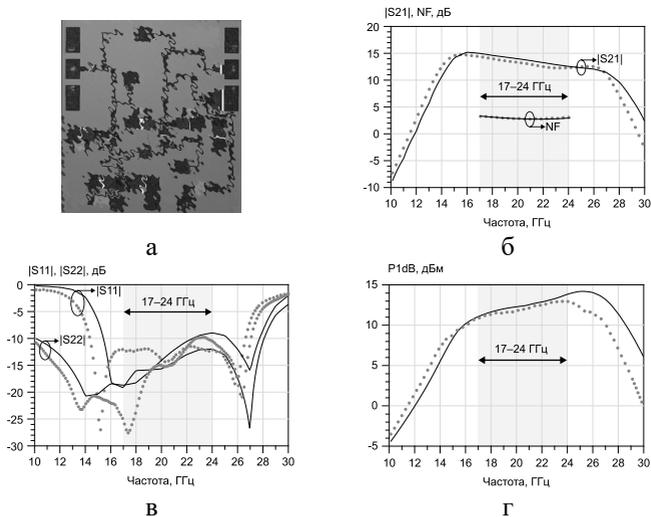


Рисунок 13 – Разработанная СВЧ МИС малошумящего усилителя диапазона частот 17–24 ГГц: фотография изготовленного кристалла (а); измеренные (символы) и рассчитанные (сплошная линия) характеристики $|S_{21}|$, NF (б), $|S_{11}|$, $|S_{22}|$ (в) и P_{1dB} (г)

Полученные данные изготовления МИС усилителей свидетельствуют о том, что коэффициенты усиления и шума, а также выходная мощность по уровню компрессии коэффициента усиления на 1 дБ достаточно точно совпадают в рассматриваемых диапазонах частот, что свидетельствует об адекватности используемых линейных и нелинейных моделей транзисторов.

В данном разделе также приведены результаты верификации построенной малосигнальной шумовой модели СВЧ-транзистора в микрополосковом исполнении с общей шириной затвора 4×50 мкм, изготовленного в ЦКП НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» (г. Москва) по технологии 0,15 мкм GaAs pHEMT. Внешние ёмкости малосигнальной ЭС определялись по предложенной методике на основе ЭМ-анализа топологии прибора, а все остальные элементы ЭС – с помощью комбинированной методики. При этом интегральная ошибка моделирования S-параметров в рабочих точках, соответствующих режимам $V_{ds} = 3$ В, $I_{ds} = 10, 20, 30$ мА, составила менее 3%. Сравнение результатов измерений и моделирования S-параметров СВЧ-транзистора 4×50 мкм представлено на рисунке 14.

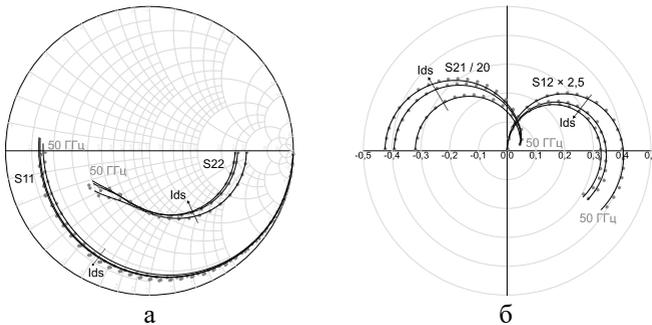


Рисунок 14 – Сравнение результатов измерений (символы) и моделирования (сплошная линия) S-параметров СВЧ-транзистора 4×50 мкм в рабочих точках $V_{ds} = 3$ В, $I_{ds} = 10, 20, 30$ мА

С использованием построенных моделей были разработаны тестовые МИС двухкаскадного и трёхкаскадного малозумящих усилителей диапазона частот 8–12 ГГц. Эскизы топологии, принципиальные схемы и частотные характеристики усилителей представлены на рисунках 15–16. На момент подготовки диссертационной работы разработанные схемы МШУ находились на этапе изготовления, вследствие чего в тексте приводятся только результаты расчёта их характеристик. Тем не менее, учитывая результаты верификации и валидации малосигнальных шумовых моделей можно сделать вывод, что предложенные методики экстракции позволяют выполнять построение моделей GaAs pHEMT-транзисторов с ОИ, изготовленных на различных предприятиях.

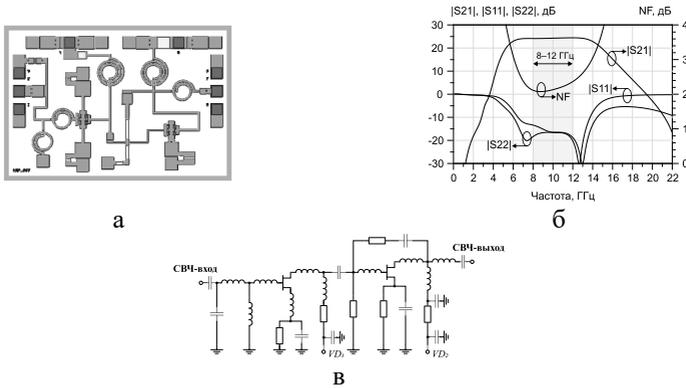


Рисунок 15 – Разработанная СВЧ МИС двухкаскадного малошумящего усилителя диапазона частот 8– 12 ГГц: а – эскиз топологии; б – рассчитанные частотные характеристики; в – принципиальная схема

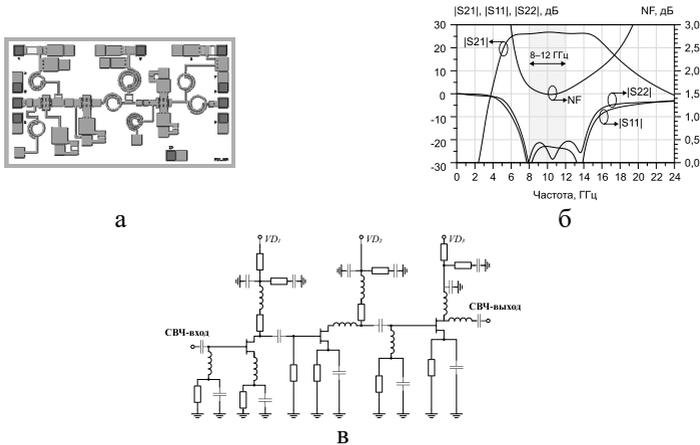


Рисунок 16 – Разработанная СВЧ МИС трёхкаскадного малошумящего усилителя диапазона частот 8– 12 ГГц: а – эскиз топологии; б – рассчитанные частотные характеристики; в – принципиальная схема

Для коммутационного СВЧ-транзистора в микрополосковом исполнении с общей шириной затвора 4×75 мкм, изготовленного в АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург) по технологии 0,25 мкм GaAs pHEMT, были построены малосигнальные модели при напряжении смещения $V_{ds} = 0$ В в двух состояниях: включенном ($V_g = 0$ В) и выключенном ($V_g = -3$ В). На рисунке 17 представлено сравнение результатов измерений и моделирования S-параметров тестовой структуры коммутационного СВЧ-транзистора с высокоомным резистором в цепи затвора для двух состояний. Результаты моделирования S-параметров тестовых структур с высокоомным резистором в

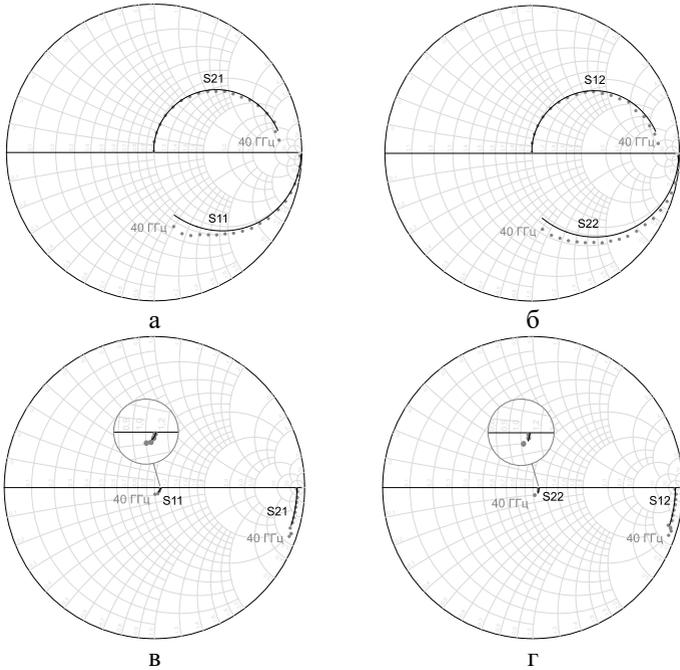


Рисунок 17 – Сравнение результатов измерений (символы) и моделирования (сплошная линия) S-параметров структуры с высокоомным резистором в цепи затвора в выключенном (а, б) и включенном (в, г) состояниях

цепи затвора хорошо согласуются с экспериментальными данными, но с ростом частоты точность моделей ухудшается. Для уточнения полученной малосигнальной модели в высокочастотной области могут использоваться численные методы оптимизации. Однако в настоящем диссертационном исследовании проводилась валидация модели, при построении которой численные методы оптимизации не применялись. С использованием построенных моделей были разработаны секции ступенчатого аттенюатора и фазовращателя. Фотографии изготовленных кристаллов, принципиальные схемы и частотные характеристики секций представлены на рисунках 18–19. Полученные экспериментальные S-параметры 2 дБ секции ступенчатого аттенюатора хорошо согласуются с результатами моделирования как по модулям коэффициентов передачи и отражения, так и по фазовому сдвигу в опорном состоянии и состоянии ослабления. Для 90 град. секции ступенчатого фазовращателя экспериментальные характеристики также хорошо согласуются с результатами моделирования в требуемом диапазоне частот как по модулю коэффициента передачи, так и по уровню фазового сдвига.

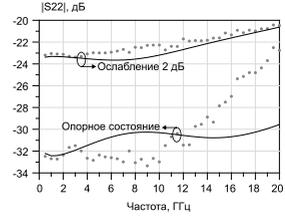
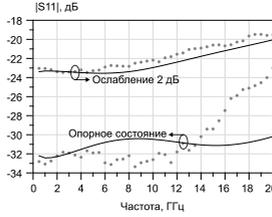
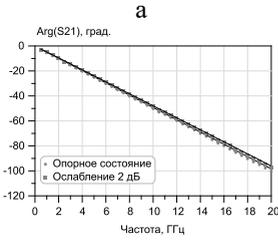
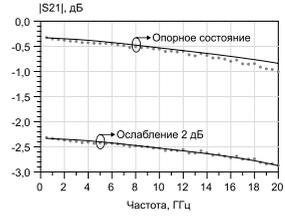
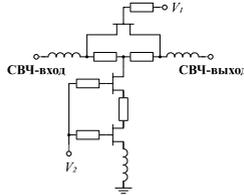
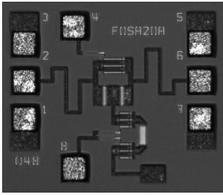


Рисунок 18 – Разработанная 2 дБ секция ступенчатого аттенюатора диапазона частот 0,5 – 20 ГГц: а – фотография кристалла; б – принципиальная схема; в–е – частотные характеристики

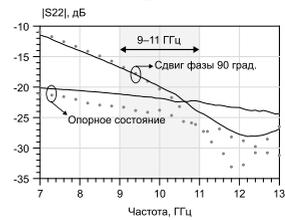
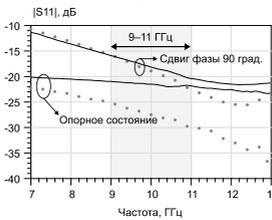
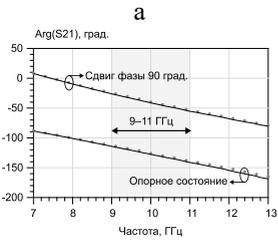
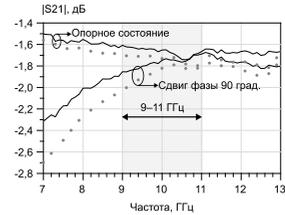
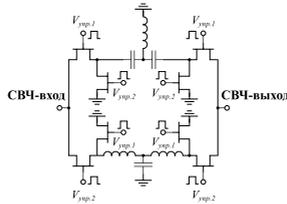


Рисунок 19 – Разработанная 90 град. секция ступенчатого фазовращателя диапазона частот 9 – 11 ГГц: а – фотография кристалла; б – принципиальная схема; в–е – частотные характеристики

Для модулей коэффициентов отражения в опорном состоянии наблюдается расхождение, однако как измеренные, так и рассчитанные характеристики в рассматриваемом частотном диапазоне имеют значение

менее –20 дБ, что с практической точки зрения является показателем хорошего уровня согласования как по входу, так и по выходу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен 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 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. Предложен вариант модификации уравнений физической нелинейной модели ASM-НЕМТ для моделирования арсенид-галлиевых НЕМТ-транзисторов.

4. Построены малосигнальные и нелинейные модели НЕМТ-транзисторов для разработки усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ МИС.

5. На основе построенных малосигнальных и нелинейных моделей НЕМТ-транзисторов разработаны и изготовлены тестовые СВЧ МИС маломощных усилителей, ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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.

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 pHEMT- 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 pHEMT 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 сверхвысококачественных 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. **Popov, A.** 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. **Popov, A.** 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 μm 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, **A.A. Popov**, A.A. Gorelov, N.I. Kargin // Electronics. – 2021. – Vol. 10, No 22. – P. 2775. – DOI: 10.3390/electronics10222775.

12. **Popov, A.A.** A new extraction flow of the small-signal switch-HEMT model based on the parasitic resistance scanning algorithm / А.А. Попов, И.М. Добуш, А.С. Сальников // 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, **A.A. Popov**, 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.

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. Popov**, 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.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661465 Российская Федерация. Программный модуль САПР для экстракции параметров малосигнальных моделей транзисторов Smart HEMT Modeling : № 2019660415 : заявл. 23.08.2019 : опубли. 02.09.2019 / Д.В. Билевич, А.Е. Горьяинов, И.М. Добуш, А.А. Калентьев, **А.А. Попов**, А.С. Сальников ;

заявитель Общество с ограниченной ответственностью "50ом Технолоджиз". – EDN: DNQLSB.

21. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2020630225 Российская Федерация. Монолитная интегральная схема GaAs pHEMT 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.

22. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2021630149 Российская Федерация. Монолитная интегральная схема GaAs pHEMT 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.

23. 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.