

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Диссертация Попова Артема Александровича посвящена разработке методик построения линейных и нелинейных моделей НЕМТ-транзисторов для проектирования схем, выполняющих функции усиления и коммутации СВЧ-сигнала.

Актуальность работы. В последние десятилетия, непрерывный прогресс в области создания разнообразных радиоэлектронных устройств, работающих в СВЧ и КВЧ диапазонах обусловлен, в первую очередь, бурным развитием технологий создания монолитных интегральных схем (МИС) на гетероструктурах. В качестве активных элементов в этих схемах используются полевые или гетеробиполярные транзисторы.

Для проектирования СВЧ устройств необходимы точные математические модели СВЧ транзисторов, которые должны описывать их поведение в заданном диапазоне частот, для соответствующих режимов по постоянному току; модели должны правильно отражать различные нелинейные эффекты и т.д. При этом, создаваемые модели транзисторов должны быть жестко привязаны к конкретной фирме - изготовителю МИС, чтобы учесть все конструктивные особенности транзисторов, нюансы технологии изготовления, конфигурацию и состав гетероэпитаксиальных слоев.

К настоящему времени опубликовано огромное число работ, посвященное методикам построения моделей НЕМТ-транзисторов, однако, до сих пор не прекращаются попытки создать либо более точные модели, либо модели, для построения которых требуются более простые алгоритмы измерений и вычислений, которые сопровождаются завершенными программными продуктами и легко встраиваются в известные САПР, предназначенные для проектирования МИС.

В диссертации А.А. Попова сделана попытка создать новые универсальные методики построения линейных и нелинейных моделей для коммутационных и усилительных НЕМТ-транзисторов с пошаговой инструкцией их построения и с полным описанием специальных измерительных тестов и процедур экстракции элементов эквивалентных схем транзистора. Создание новых методик построения моделей с детальной проработкой всех процедур является крайне актуальной задачей, которая требует своего решения сразу после решения на предприятиях технологических проблем.

Структура диссертации. Диссертация А.А. Попова состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 193 использованных источников.

В первом разделе представлен аналитический обзор научно-технической литературы по теме диссертации. В этом разделе проведена классификация моделей СВЧ-транзисторов. Рассмотрены известные подходы к построению малосигнальных моделей коммутационных транзисторов, включенных по схеме с общим затвором. Дан детальный анализ процедур построения малосигнальных моделей для транзисторов, включенных по схеме с общим истоком и предназначенных для усилительных блоков. В обзоре подробно рассмотрены вопросы построения нелинейных моделей, в частности, обстоятельно описаны компактные физические модели ASM-HEMT и MVSG.

На основании критического анализа литературных источников сформулированы цель и задачи работы

Второй раздел посвящен разработке алгоритмов построения малосигнальных моделей СВЧ-транзисторов. В первых параграфах раздела предложена методика экстракции параметров коммутационного транзистора, где для расчёта внешних ёмкостей транзистора применяется электромагнитное моделирование топологии прибора, а для экстракции внешних сопротивлений используется, предложенный автором алгоритм сканирования (итерационного перебора) значений этих сопротивлений. Предложенный алгоритм базируется на ряде критериев, сформулированных и обоснованных диссертантом.

В других параграфах второго раздела автор рассмотрел две методики построения моделей для НЕМТ-транзисторов, предназначенных для усилительных

блоков. Предложена комбинированная методика экстракции параметров малосигнальной шумовой модели СВЧ-транзистора, позволяющая построить модель как в плоскостях отсчёта контактных площадок, так и в плоскостях самого транзистора с помощью процедуры деэмбеддинга. Предложена также методика экстракции всех внешних ёмкостей на основе результатов ЭМ-анализа топологии тестового СВЧ-транзистора, позволяющая учесть распределённый характер паразитных элементов ЭС.

Третий раздел диссертации посвящен модификации известной компактной нелинейной модели ASM-HEMT с целью использования этой физической модели не только для GaN-транзисторов, но и для HEMT-транзисторов на основе арсенида галлия. Путем численного решения трансцендентного уравнения для двумерной структуры транзистора с гетеропереходом AlGaAs-GaAs найдена связь между уровнем Ферми и концентрацией двумерного газа в канале, что позволяет строить вольтамперную характеристику транзистора. Автору удалось найти аналитические выражения для аппроксимации расчетных зависимостей концентрации носителей в канале от уровня Ферми.

В четвертом разделе автор приводит примеры построения, верификации и валидации моделей СВЧ транзисторов, разработанных на разных отечественных предприятиях (АО «НИИПП», ЦКП НИЯУ МИФИ, АО «Светлана-Рост»). Рассмотрены примеры валидации малосигнальной модели коммутационного СВЧ-транзистора при анализе параметров секций цифрового аттенюатора и фазовращателя, а также валидация малосигнальной модели усилительного транзистора при анализе параметров созданных малозумящих усилителей.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Оценка научной новизны и достоверности результатов. К числу наиболее важных результатов, имеющих научную новизну, можно отнести следующие.

1. Предложен новый алгоритм экстракции, применение которого позволяет получить 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, основанная на результатах электромагнитного моделирования

топологии прибора, учитывающая распределённый характер внешних элементов транзистора, включенного по схеме с общим истоком.

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

Предложенный автором алгоритм экстракции внешних сопротивлений малосигнальной схемы коммутационного транзистора является оригинальным. Первые публикации, описывающие этот алгоритм принадлежат А.А. Попову. Новыми являются результаты модели усилительного транзистора, где экстракция емкостей HEMT-транзистора осуществляется с использованием только электромагнитного моделирования.

И, наконец, полученные автором аналитические выражения, описывающие связь уровня Ферми с концентрацией носителей в канале GaAs HEMT транзистора также являются оригинальными.

Достоверность результатов работы не вызывает сомнений. Результаты прошли апробацию на конференциях различного уровня и опубликованы в рецензируемых журналах, имеются свидетельства о регистрации топологий МИС.

Исследования в диссертации выполнены корректно, а экспериментальный материал получен с использованием самого современного исследовательского оборудования. В связи с этим научные положения, выносимые на защиту, можно считать доказанными и обоснованными.

Практическая значимость диссертации заключается в следующем:

1. Предложены новые алгоритмы экстракции параметров малосигнальных моделей коммутационных и усилительных HEMT-транзисторов. Детальная проработка автором этих алгоритмов позволяет легко повторить все необходимые процедуры для построения моделей без привлечения специалистов высшей квалификации.

2. На основе предложенных методик построены линейные и нелинейные модели усилительных и коммутационных GaAs HEMT-транзисторов, изготовленных на различных отечественных предприятиях и созданы МИС буферных усилителей на разные диапазоны, а также узлы аттенуаторов и фазовращателей на ключевых транзисторах.

3. Результаты внедрения результатов диссертации подтверждаются актом внедрения (приложение А).

Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 33 научных работах, в том числе в 8 журналах, рекомендованных ВАК, в 11 изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, результаты доложены на 10 международных конференциях.

Общие замечания к диссертации А.А. Попова.

1. В первом научном положении А.А. Попов подчеркивает, что предложенный им алгоритм сканирования сопротивлений позволяет определить физически обоснованные значения внешних сопротивлений в эквивалентной схеме коммутационного НЕМТ-транзистора. Данная формулировка, как следует из диссертации, означает, что внешние сопротивления должны быть положительны (стр.63), что, по-моему, является само-собой разумеющимся требованием. В то же время, полученные значения внешних и внутренних сопротивлений не подтверждаются альтернативными измерениями, хотя для этого достаточно было провести несколько дополнительных измерений на разных стадиях изготовления транзистора.

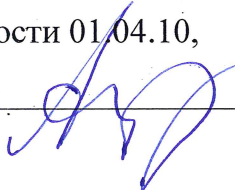
2. Модифицированная компактная модель ASM-НЕМТ для СВЧ-транзисторов на основе GaAs, построенная А.А. Поповым, реализована для транзисторов с гетеропереходом AlGaAs/GaAs, в то время как в течение последних нескольких лет все зарубежные и отечественные компании, выпускающие GaAs МИС, работают на рНЕМТ-структурах с переходом AlGaAs/InGaAs. Это значит, что для внедрения модели А.А. Попова на фирмах, производящих современные GaAs МИС, необходимо изменить и пересчитать найденные автором выражения для ASM-НЕМТ модели.

Указанные недостатки не снижают научных достоинств диссертации. Полученные в диссертации результаты являются новыми и представляют несомненный научный интерес. Структура и логика изложения материала диссертации выглядят достаточно обоснованными в контексте раскрытия поставленной цели и задач исследования. Цели и задачи исследования,

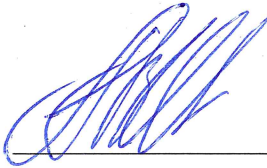
сформулированные автором, достигнуты. Работа написана ясным и строгим научным языком. Стиль и оформление не вызывают замечаний.

Считаю, что представленная диссертация А.А. Попова на тему «Построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов для усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем», безусловно, отвечает всем критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней. Работа соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013г. в редакции от 18.03.2023г., а сам А.А. Попов, несомненно заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.5 – «Физическая электроника» и 2.2.14- «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Официальный оппонент

доктор технических наук по специальности 01.04.10,  
начальник лаборатории АО «НИИПП»  Г.И. Айзенштат

АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»  
634034, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 99а,  
Тел. (382-2) 288-288, E-mail: niipp@niipp.ru

Заместитель генерального директора  
по научной работе АО «НИИПП»  А.В. Васильев

«14» апреля 2023 г.



М.П.