

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.415.03, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР) МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 24.05.2023 г. № 234

О присуждении Попову Артему Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Построение моделей наногетероструктурных полевых транзисторов для усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем» по специальностям 1.3.5 – «Физическая электроника» и 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» принята к защите 09 марта 2023 г. (протокол заседания № 233) диссертационным советом 24.2.415.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), Министерство образования и науки Российской Федерации, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40, приказ о создании совета № 1030/нк от 30.12.2013 г.

Соискатель Попов Артем Александрович, 30 июня 1994 года рождения, в 2018 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). В 2022 г. окончил аспирантуру ТУСУРа, работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории автоматизации разработки микроэлектронных устройств «50ohm Lab» ТУСУРа.

Диссертация выполнена на кафедре физической электроники ТУСУРа.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Троян Павел Ефимович, ТУСУР, кафедра физической электроники, заведующий кафедрой.

Научный консультант – кандидат технических наук Сальников Андрей Сергеевич, ТУСУР, лаборатория автоматизации разработки микроэлектронных устройств «50ohm Lab», заведующий лабораторией.

Официальные оппоненты:

Айзенштат Геннадий Исаакович, доктор технических наук, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», лаборатория 41, начальник лаборатории;

Будяков Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Центр инновационных разработок ВАО», заместитель генерального директора по научной работе,
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, в своём положительном отзыве, подписанном Занавескиным М.Л., кандидатом физико-математических наук, начальником отдела Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ, Деминим В.А., кандидатом физико-математических наук, первым заместителем руководителя Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ по науке, Емельяновым А.В., кандидатом физико-математических наук, начальником отдела Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ, утверждённом Дьяковой Ю.А., первым заместителем директора Центра по науке, указала, что рассмотренная диссертационная работа Попова А.А. 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».

Соискатель имеет 69 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 33 работы, из них 8 в журналах из списка ВАК, 11 в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

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. **Popov, A.A.** A new extraction flow of the small-signal switch-HEMT model based on the parasitic resistance scanning algorithm / A.A. Popov, 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.

4. **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.

5. **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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: всего 8 отзывов, все положительные.

1) Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», подписанный доктором технических наук, заведующим кафедрой радиотехнических устройств Ганигиным Сергеем Юрьевичем. В отзыве отмечаются следующие недостатки работы:

1. Ограниченность исследования в выборе моделируемого типа транзистора, а именно HEMT-транзистора. Было бы полезно рассмотреть и другие типы транзисторов, чтобы получить более общее представление о моделировании транзисторов для устройств СВЧ диапазона.

2. Хотя в работе представлены практические рекомендации и результаты, не были проведены полноценные эксперименты на реальных устройствах.

2) Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ», подписанный кандидатом технических наук, доцентом кафедры радиотехнических приборов и антенных систем Курушиным Александром Александровичем. Имеется замечание: Из автореферата не ясно, какое программное обеспечение использовалось автором для электромагнитного анализа полей в мм диапазоне волн и какой уровень электромагнитных полей имеет место в полупроводниковой гетероструктуре исследуемых транзисторов. Возможно, что и модели СВЧ транзисторов должны включать компоненты с распределенными параметрами.

3) Отзыв из АО «НПП «Радиосвязь», подписанный доктором технических наук, генеральным директором Галеевым Ринатом Гайсеевичем. Имеется замечание: Автор не приводит наименование среды разработки в которой проводился электромагнитный анализ топологии транзистора.

4) Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», подписанный доктором технических наук, профессором кафедры средств связи и

информационной безопасности Майстренко Василием Андреевичем. Имеются вопросы и замечания:

1. Из текста автореферата не ясно, была ли при проведении экспериментальных исследований проанализирована устойчивость разрабатываемых системы ?

2. В автореферате на стр. 23, 24, не очень убедительно звучит утверждение автора о том, что расхождения измеренных и рассчитанных характеристик в частотном диапазоне 9–11 ГГц имеют значения менее -20 дБ, [что с практической точки зрения является показателем хорошего уровня согласования как по входу, так и по выходу], является неубедительным.

3. На рис. 18а и 19, а изображения фотографий слабо различимы.

5) Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», подписанный доктором физико-математических наук, профессором института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Васильевским Иваном Сергеевичем. Имеются замечания:

1. В качестве меры сходимости модели проводится оценка отклонения измеренных S-параметров транзистора от модельных. Опыт показывает, что изменение параметров техпроцесса может приводить к изменению других характеристик, и оценки S-параметров может быть недостаточно. Было бы правильнее оценивать по нескольким параметрам, например, аппроксимации ВАХ, Y-параметров (действительной и мнимой части).

2. В третьем разделе приводится список эффектов, которые учитываются в ASM-HEMT, но не указывается, например, «кинк-эффект», наблюдаемый экспериментально в транзисторах НИЯУ МИФИ, но не описываемый моделью, например, на графиках ВАХ, приведенных автором (рис. 10а).

6) Отзыв из АО «Светлана-Рост», подписанный кандидатом физико-математических наук, заместителем генерального директора по развитию Филаретовым Алексеем Гелиевичем. Имеются замечания:

1. Представляется излишним подробное освещение методики сдвига плоскостей калибровки. Эти методики являются давно известными, общепринятыми и необходимыми при экстракции параметров моделей СВЧ-элементов.

2. Из текста автореферата неясно, чем отличается предложенная методика построения модели ASM-HEMT от методик из официальной документации модели.

3. Работа представленной нелинейной модели транзистора показана «в точке» – при одной фиксированной ширине затвора транзистора с минимумом рассмотренных смещений. Проверка модели в нелинейном режиме освещена несколько неполно, нет

данных о работе транзистора при большом сигнале ни в тракте 50 Ом, ни при переменной нагрузке.

7) Отзыв из АО «ЭНПО СПЭЛС», подписанный кандидатом технических наук, руководителем дизайн-центра Усачевым Николаем Александровичем. Имеются замечания:

1. Не приведены данные о размере выборки исследованных образцов СВЧ ПТ.

2. В явном виде отсутствуют сведения о преимуществах выбора модели ASM-HEMT для расчета характеристик GaAs pHEMT транзисторов по сравнению с типовыми моделями Agilent EEHEMT, Angelov. В части не ясно обеспечивает ли применение модели ASM-HEMT количественный выигрыш в точности вычислений, быстродействии?

3. Не определены (экспериментальным или расчетным образом) частотные зависимости минимального коэффициента шума СВЧ ПТ.

8) Отзыв из АО «НИИ «Октава», подписанный кандидатом технических наук, ведущим инженером Раковым Юрием Николаевичем. Без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что Айзенштат Г.И. является признанным специалистом в области физики и технологии полупроводниковых приборов на основе арсенида галлия; Будяков А.С. является высококвалифицированным специалистом в области разработки интегральных устройств СВЧ-диапазона. Оппоненты имеют публикации в соответствующей диссертации сфере исследования и способны объективно оценить данную работу. Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в качестве ведущей организации обоснован тем, что этот институт является одним из крупнейших научных центров мира, междисциплинарной национальной лабораторией, в которой ведутся как фундаментальные, так и прикладные исследования в важнейших областях современной физики и технологий, а его квалифицированные сотрудники добились значительных результатов в области интегральной СВЧ-электроники и способны аргументированно определить практическую и научную ценность работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны методики построения линейных и нелинейных моделей HEMT-транзисторов для проектирования усилительных и управляющих функциональных блоков СВЧ монолитных интегральных схем;

предложены поправки в уравнениях модели ASM-HEMT, позволяющие снизить среднюю ошибку аппроксимации численной зависимости квазиуровня Ферми от

потенциала затвора и использовать модифицированную модель для расчёта статических и динамических характеристик арсенид-галлиевого СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов;

разработан новый алгоритм экстракции параметров малосигнальной модели НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим затвором, позволяющий определить физически обоснованные значения внешних сопротивлений эквивалентной схемы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложен подход, позволяющий на основе применения электромагнитного анализа топологии транзистора, включенного по схеме с общим истоком, определить значения всех внешних ёмкостей малосигнальной эквивалентной схемы;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** математические методы (в частности, метод наименьших квадратов) и экспериментальные методики (в частности, метод длинной линии) в предложенном алгоритме экстракции параметров малосигнальной модели НЕМТ-транзистора, включенного по схеме с общим затвором;

проведена модификация уравнений аналитической компактной модели ASM-НЕМТ, позволяющая использовать модель для расчёта характеристик СВЧ-транзисторов, изготовленных на основе арсенида галлия.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены новые методики и алгоритмы построения моделей усилительных и переключаемых СВЧ-транзисторов в ООО «50ом Технолоджиз», г. Томск;

результаты диссертации **использованы** при выполнении научно-исследовательских работ в ТУСУРе в интересах отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности;

построенные малосигнальные и нелинейные модели НЕМТ-транзисторов **использованы** при разработке СВЧ МИС буферных и малошумящих усилителей, а также ступенчатых аттенюаторов и фазовращателей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

результаты экспериментального исследования характеристик транзисторов и СВЧ монолитных интегральных схем получены на сертифицированном оборудовании, поверенном в установленном порядке;

