

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Попова Артема Александровича на тему «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».

Развитие технологий и методов совершенствования электронной компонентной базы (ЭКБ), в частности, СВЧ монолитных интегральных схем, имеет важнейшее цивилизационное и стратегическое значение. Построение физических и поведенческих моделей элементов для систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, имеющих высокую точность для широкого класса технологических процессов, является актуальной проблемой в области дизайна ЭКБ, требующей как проведения научных исследований, так и решения достаточно сложных технических и методических задач.

Диссертационная работа Попова А.А. посвящена вопросам построения малосигнальных и нелинейных моделей наногетероструктурных полевых СВЧ-транзисторов, изготовленных по арсенидной АЗВ5 технологии. В работе отражены отличительные особенности методик экстракции малосигнальных моделей транзисторов в зависимости от схемы включения. Важным аспектом новизны работы является учёт в модели физически обусловленных параметров и уравнений для их взаимосвязи, вместо ранее распространённого эмпирического подхода, обладающего меньшей обоснованностью. Так, проведён подробный анализ уравнений физической компактной модели ASM-HEMT, позволивший автору адаптировать и впоследствии использовать данную модель для расчёта характеристик GaAs pHEMT-транзистора за счёт аппроксимации положения уровня Ферми. Особую ценность представляет собой комплексное и методически выверенное исследование моделирование на основе верификации использованных моделей для нескольких технологий отечественных опытных производств АЗВ5 монолитных интегральных схем. Полученные результаты применимы для построения линейной и нелинейной малосигнальных моделей, а также для оценки шумовых параметров СВЧ транзисторов и МИС.

Автореферат диссертации даёт полное представление о проделанной Поповым А.А. работе, содержит все ключевые выводы, сделанные в ходе исследования.

Как следует из автореферата, к наиболее существенным результатам диссертации, обладающим научной новизной и полученным лично соискателем, можно отнести следующее:

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 нелинейной модели ASM-HEMT для СВЧ-транзистора на основе GaAs.

По диссертации возникли следующие замечания:

- 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).
- 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).

Следует отметить, что приведённые замечания не снижают ценности и значимости диссертационной работы и носят характер рекомендаций.

В целом, из автореферата следует, по своей научной ценности и практической значимости диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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».

Васильевский Иван Сергеевич

Доктор физико-математических наук, доцент

Профессор института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Тел.: (495) 7885699 доб. 8170

Адрес электронной почты: ivasilevskii@mail.ru



Иван Сергеевич Васильевский

«02» мая 2023 г.

