

## **Отзыв**

официального оппонента на диссертацию и автореферат  
Сальникова Андрея Сергеевича на тему «Автоматизация измерений,  
построение моделей и библиотек элементов СВЧ монолитных интегральных  
схем на базе отечественных GaAs и GaN технологий», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны,  
СВЧ устройства и их технологии.

### **Актуальность темы**

Основным направлением развития отечественной электроники на период до 2020 года является создание нового поколения изделий твердотельной электронной компонентной базы для аппаратуры аэрокосмического, ядерного, научного, промышленного и специального назначения.

Появление и развитие субмикронных технологий на структурах АЗВ5 с граничной частотой транзисторов до 200 ГГц, обеспечило возможность создания новых классов изделий твердотельной СВЧ электроники (ТСВЧЭ) – монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ и миллиметрового диапазонов. Между тем, отечественные предприятия (полупроводниковые фабрики), располагающие современными субмикронными технологическими процессами изготовления оказались не готовы предоставлять дизайн-центрам правила проектирования и библиотеки активных (транзисторов) и высокочастотных пассивных СВЧ элементов, пригодные для проектирования СВЧ МИС с использованием современных лицензионных САПР.

Создание новых типов полупроводниковых приборов ТСВЧЭ на новых материалах и физических принципах (HEMT, pHEMT и др.) требует создания новых и развития существующих моделей, адекватно описывающих СВЧ и шумовые характеристики приборов, а также методик экстракции их параметров. Между тем существующие “классические” модели активных элементов разработаны для приборов предыдущего поколения (MESFET), а также не подкреплены методиками экстракции (восстановления) параметров.

Создание библиотеки СВЧ элементов требует последовательного решения сложных научно-технических задач: исследования и разработки перспективных полупроводниковых приборов, разработки специальных тестовых элементов для характеристики материалов и элементов, разработки методик автоматизированных

измерения тестовых элементов с использованием зондового и контрольно-измерительного оборудования, методик экстракции параметров моделей активных и пассивных элементов СВЧ МИС.

Поэтому задача разработки методик и программного обеспечения для автоматизированных измерений, исследования и совершенствования моделей и создание библиотек элементов СВЧ МИС на основе отечественных GaAs и GaN гетероструктурных технологий для повышения эффективности автоматизированного проектирования, безусловно, является актуальной.

Среди новых и наиболее интересных научных и практических результатов, полученных автором, следует отметить следующие:

1. Получила развитие методика построения параметрических моделей пассивных сосредоточенных элементов СВЧ МИС на основе совместного использования СВЧ измерений и электромагнитного моделирования, использующая небольшое количество изготовленных тестовых элементов для определения электрофизических параметров материалов и верификации модели.

2. Показано, что метод обратных средневзвешенных расстояний (ОСР) может быть успешно использован для построения поведенческих моделей пассивных и активных компонентов СВЧ МИС. Этот метод впервые предложен для анализа СВЧ элементной базы.

3. На основе метода ОСР построены поведенческие модели пассивных и активных элементов МИС для отечественных GaAs и GaN технологий, характеризующиеся достаточной точностью, быстроедействием и малым временем построения модели.

4. Разработано программное обеспечение (ПО) для автоматизации измерений, хранения и статистического анализа данных, построения поведенческих моделей элементов СВЧ МИС.

5. Предложена методика, позволяющая разрабатывать библиотеки элементов СВЧ МИС на базе GaAs и GaN технологий с учетом особенностей отечественных предприятий – изготовителей современной СВЧ элементной базы.

6. Разработаны библиотеки элементов для нескольких отечественных GaAs и GaN технологий изготовления СВЧ МИС в частотном диапазоне до 40 ГГц. На основе

отечественной GaAs mHEMT технологии разработаны МИС копланарных усилителей Ka-диапазона.

Полученные автором результаты подтверждают научную новизну и практическую ценность работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и 9 приложений. Материал диссертации хорошо структурирован по главам, приведенные в диссертации выводы основаны на результатах моделирования и экспериментальных данных. Текст диссертации отличается стройностью и логичностью изложения.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, а также представлены ее основные положения.

**В первой главе** проведен обзор технологий создания, автоматизации измерений СВЧ МИС и их элементов и др. Рассматривается процесс проектирования СВЧ МИС и роль библиотек элементов, описываются трудности, с которыми сталкиваются на разных этапах построения библиотек элементов.

В заключение главы на основе литературного обзора формулируются основные задачи исследования.

**Во второй главе** рассматривается методика построения параметрических моделей пассивных сосредоточенных элементов СВЧ МИС, совместно использующая для получения исходных данных как экспериментальные измерения малого числа изготовленных тестовых элементов для типовых конструктивных решений, так и результаты электромагнитного (ЭМ) моделирования гораздо большего количества «виртуальных» элементов. Повышение точности параметрических моделей в промежуточных конструктивных состояниях элемента, а также более простое определение параметров физической структуры и материалов обеспечиваются путём применения в качестве промежуточного звена между измерениями и ЭМ моделированием простых ЭС-моделей пассивных элементов. Методика рассмотрена на примере построения модели тонкопленочного резистора на основе силицида вольфрама.

Исследуется возможность построения поведенческих параметрических моделей активных и пассивных компонентов СВЧ МИС. С этой целью рассмотрены три метода многомерной аппроксимации. Метод искусственных нейронных сетей общеизвестен и широко распространен в разных областях науки и техники. Метод радиальных

базисных функций (РБФ) является частным случаем нейронной сети, активирующая функция которой относится к классу РБФ. Метод ОСР – это детерминированный алгоритм интерполяции функций с неравномерной сеткой данных, легко обобщаемый на произвольную размерность переменных. В данном методе на значение аппроксимирующей функции в каждой точке влияют все точки исходных данных с весами, уменьшающимися по мере удаления от этих точек. Метод разработан для интерполяции геоинформационных данных и, по мнению автора, до сих пор не использовался для построения моделей электронных компонентов. Проведен также сравнительный анализ эффективности использования ИНС и ОСР методов при анализе поведенческих моделей активных и пассивных компонентов СВЧ МИС. При этом показано, что ОСР метод является оптимальным при использовании поведенческих моделей для разработки элементов СВЧ МИС.

В **третьей главе** приведены практические результаты разработки методик, алгоритмов и программного обеспечения для характеристики компонентов СВЧ МИС. Приводятся результаты разработки тестовых структур для определения электрофизических параметров материалов и измерения характеристик элементов СВЧ МИС, изготовленных по отечественным GaAs и GaN технологиям. Разработанные тестовые структуры могут использоваться для параметрического контроля технологии изготовления СВЧ МИС.

Представлены алгоритмы и программное обеспечение для автоматизации процесса измерения вольт-амперных характеристик СВЧ транзисторов с помощью управляемого источника питания. Данный подход позволяет проводить измерения ВАХ и S-параметров без изменения конфигурации измерительного стенда.

В **четвёртой главе** рассмотрена общая методика разработки библиотек элементов СВЧ МИС, отдельные объекты библиотеки элементов, примеры разработки библиотек для отечественных GaAs и GaN технологий изготовления МИС и их использование в процессе проектирования.

Разработанные библиотеки элементов использовались при практическом проектировании СВЧ малошумящих и мощных усилителей на основе GaAs и GaN технологий, в том числе для элементов 0,13 мкм GaAs mHEMT технологии ИСВЧПЭ РАН при проектировании копланарных усилителей диапазона частот 30-38 ГГц. Результа-

ты, полученные с помощью разработанных моделей, и данные экспериментальных исследований находятся в удовлетворительном соответствии.

**В заключении** обобщены основные результаты, полученные в диссертации.

**В Приложениях** приведены более подробные сведения о методах и результатах исследований, описание экспериментального оборудования и документы о результатах исследований.

**К недостаткам** диссертации следует отнести следующее:

1. Автором не проведено сравнение точности предложенных моделей элементов, с точностью моделей, разработанных на основе полного набора тестовых элементов, т.е. оценка точности моделей в зависимости от количества тестовых структур; не указана область применимости предложенной методики создания моделей элементов; не ясно, для каких типов элементов, диапазона номиналов пригодна методика, какие имеются ограничения на конструктивное исполнение элементов.

2. Термин «поведенческая модель», как правило, относится к СФ-блокам и не вполне корректно применен к моделям отдельных элементов на основе табличных представлений S-параметров (для таких моделей более подходит термин «табличная»). Не достаточно обоснован вывод о необходимости развития и использования поведенческих моделей активных и пассивных компонентов (в противовес физическим, формальным и др.), не достаточно полно приведено описание поведенческой шумовой модели СВЧ pHEMT транзистора.

3. Тезис автора о том, что основным недостатком имеющегося зарубежного программного обеспечения (ПО) является его высокая стоимость, обуславливает необходимость более полного сопоставления технико-экономических показателей зарубежного ПО WinCal (ф. Cascade Microtech, США), IC-Cap (ф. Keysight Technologies, США) с предложенными автором разработками.

4. В работе не проанализированы вопросы радиационной стойкости разработанных элементов библиотек и изделий, между тем именно радиационные отказы во многих случаях ограничивают применение современных электронных устройств в аппаратуре космического, ядерного и специального назначения.

5. В автореферате диссертации отсутствуют библиографические ссылки на свидетельства о регистрации программ и топологий – их наличие является желательным

для охраны авторских прав и «подкрепляет» новизну работы. Кроме того, в библиографии, помещенной в автореферате, отсутствуют выделения работ в изданиях, рекомендованных ВАК для соискателей ученых степеней, а также работ, реферируемых в зарубежных индексах научного цитирования, например, в Scopus.

Отмеченные недостатки, однако, не влияют на общую положительную оценку работы и имеют рекомендательный характер.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Все основные результаты работы опубликованы и представлены на научно-технических конференциях.

В целом диссертационную работу отличают большой объем проведенных исследований, ориентация на практический результат и хорошее оформление. Актуальность решаемых задач, научная новизна и практическая ценность полученных результатов позволяет заключить, что рецензируемая работа отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Сальников А. С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» за разработку методов и средств проектирования МИС СВЧ диапазона на основе перспективных полупроводниковых материалов.

Профессор кафедры Электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,  
доктор технических наук

Никифоров Александр Юрьевич

*Подпись А. Ю. Никифорова заверяю  
специально*



Адрес организации: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.  
Телефон: +7 (499) 324-9034.  
Электронная почта: aynik@spels.ru.