

РАЗРАБОТКА GaAs И SiGe СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, БИБЛИОТЕК ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ САПР В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

► Л.И.Бабак, М.В.Черкашин, Ф.И.Шеерман, И.М.Добуш,
А.А.Коколов, А.С.Сальников, А.А.Калентьев,
Д.В.Гарайс, А.Е.Горяинов, Д.А.Жабин
ТУСУР

Рассматривается выполненный в Томском университете систем управления и радиоэлектроники комплекс исследований и разработок в области создания GaAs и SiGe СВЧ монолитных интегральных схем, библиотек элементов и модулей САПР. Представлено краткое описание разработанных методов и программных продуктов для автоматизации изменений, построения моделей активных и пассивных элементов, а также проектирования СВЧ МИС. Приведены характеристики разработанных библиотек элементов, а также СВЧ МИС на основе отечественных и зарубежных GaAs- и SiGe-технологий, включая малошумящие усилители, усилители мощности, смесители и управляющие устройства.

DEVELOPMENT OF GaAs AND SiGe MMICS, PROCESS DESIGN KITS, AND EDA MODULES AT TOMSK STATE UNIVERSITY OF CONTROL SYSTEMS AND RADIOELECTRONICS

L.I.Babak, M.V.Cherkashin, F.I.Sheerman, I.M.Dobush, A.A.Kokolov, A.S.Salnikov, A.A.Kalentyev, D.V.Garays, A.E.Goryainov, D.A.Zhabin
TUSUR

The research in the area of development of GaAs and SiGe MMICs, process design kits (PDKs), and EDA modules that carried out at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics is presented. The techniques and software tools for the measurement automation, active and passive elements' model building, and MMIC design (synthesis) are described. Characteristics of PDKs (element model libraries) as well as GaAs/SiGe MMICs developed are considered including low noise and power amplifiers, mixers, and control circuits.

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность по разработке СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), библиотек элементов МИС, а также модулей САПР ведется в Научно-образовательном центре "Нанотехнологии" (НОЦ НТ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). НОЦ НТ функционирует в ТУСУРе с 2009 года. Основными областями исследований и разработок НОЦ НТ являются: развитие технологий СВЧ МИС на основе гетероструктурных GaAs и GaN материалов; проектирование и зондовые измерения GaAs/GaN/SiGe СВЧ МИС; разработка программного обеспечения (ПО) для автоматизированного проектирования и управления измерениями СВЧ МИС. Кроме того, в НОЦ НТ ведется деятельность по подготовке кадров высшей квалификации и специалистов в этих областях. В состав НОЦ НТ входят технологический участок, участок измерений СВЧ МИС, дизайн-центр по проектированию СВЧ МИС, лаборатория разработки программного обеспечения, а также инженерный участок обеспечения.

На **технологическом участке** развернута пилотная технологическая линия по изготовлению СВЧ-транзисторов и МИС на основе GaAs и GaN, состоящая из современного оборудования для нанолитографии, электронно-лучевого напыления, нанесения фоторезиста, контроля пластин и фотошаблонов в видимом и УФ диапазонах излучения и др. Линия позволяет выполнять цикл основных технологических операций изготовления активных элементов (формирование затвора и др). Остальные операции изготовления СВЧ-транзисторов и МИС выполняются на производственных технологических линиях предприятий-партнеров ТУСУРа в г. Томске. Основным элементом пилотной линии НОЦ НТ является нанолитограф Raith-150 Two с разрешением до 20 нм, что позволяет изготавливать СВЧ-транзисторы с шириной затвора менее 100 нм и граничными частотами свыше 100 ГГц.

На **участке измерений СВЧ МИС** развернута автоматизированная установка для измерений и характеристики МИС и элементов до частот 40–50 ГГц. Она представляет собой специализированный аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий измерения СВЧ-устройств и компонентов на полупроводниковой пластине с использованием зондовой станции. Комплекс используется для решения двух основных задач:

- оценка характеристик готовых СВЧ МИС и функциональных элементов на пластине;
- характеристики элементов СВЧ МИС, то есть получение набора экспериментальных данных, позволяющих полностью описать свойства функционального элемента и построить на этой основе его математическую модель. Установка управляется программным обеспечением (в том числе собственной разработки) и содержит следующее основное оборудование:
 - три зондовых станции фирмы Cascade Microtech для измерения характеристик МИС и элементов на СВЧ и постоянном токе (диаметр пластин до 200 мм);
 - два векторных анализатора цепей компаний Keysight Technologies (серия ENA) и Rohde&Schwarz (ZWA);
 - анализатор спектра (Keysight Technologies) с возможностью измерения шумовых характеристик;
 - генератор гармонических СВЧ-сигналов (Keysight Technologies);
 - два программируемых тюнера (Focus) с возможностью настройки по трем гармоникам сигнала;
 - модули для реализации импульсного режима измерений и др.

Кроме того, сотрудники НОЦ НТ имеют доступ к векторному анализатору цепей серии PNA-X (Keysight Technologies), что дает возможность измерять широкий круг разнообразных характеристик СВЧ МИС и компонентов, включая X-параметры в режиме большого сигнала.

Указанный автоматизированный комплекс обеспечивает измерение большого набора параметров активных и пассивных компонентов МИС в различных режимах работы: статических характеристик (ВАХ), параметров рассеяния, шумовых и мощностных характеристик, формы и спектральных составляющих сигнала и др., реализует автоматические load-pull измерения (измерения при изменении импедансов нагрузок активных элементов) и измерения в импульсном режиме. Это позволяет, в частности, полностью характеризовать СВЧ-транзисторы и тем самым определять полный набор шумовых параметров малошумящих транзисторов, находить оптимальные нагрузочные импедансы по основной и высшим гармоникам для реализации высокоэкономичных режимов мощных приборов, верифицировать нелинейные и шумовые модели активных элементов и т.д.

Дизайн-центр ведет деятельность в следующих направлениях:

- проектирование и разработка СВЧ МИС и систем на кристалле (СнК) на основе отечественных и зарубежных GaAs/GaN/SiGe-технологий, включая маломощные усилители (МШУ), усилители мощности (УМ), смесители, генераторы, управляемые напряжением (ГУН), управляющие устройства и др.;
- разработка моделей пассивных и активных элементов СВЧ МИС, включая нелинейные и шумовые модели СВЧ-транзисторов;
- разработка библиотек моделей для различных технологий изготовления СВЧ МИС, которые интегрируются в коммерческие САПР.

Для проектирования СВЧ МИС в дизайн-центре используются программные продукты Microwave Office, ADS, Cadence и др. Имеется лицензия на программы Software Development Kit (SDK) и Model Wizard, позволяющие осуществить построение и интеграцию моделей элементов МИС в систему Microwave Office. Кроме того, используются собственные оригинальные программные продукты для проектирования СВЧ МИС и построения моделей элементов.

Направления деятельности **лаборатории разработки программного обеспечения**:

- создание ПО для автоматизации управления зондовыми измерениями СВЧ МИС;
- разработка ПО для автоматизированного построения моделей пассивных и активных СВЧ-компонентов, включая элементы СВЧ МИС;
- разработка интеллектуального ПО для автоматизированного проектирования СВЧ-устройств и МИС, включая автоматическую генерацию (синтез) схем и топологий согласующих цепей и усилителей.

1. ИЗМЕРЕНИЯ, СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ И БИБЛИОТЕК ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ МИС

Измерение параметров элементов СВЧ МИС

Процесс измерения характеристик СВЧ МИС и функциональных элементов отличается большой сложностью ввиду высоких рабочих частот и трудности доступа к элементам с весьма малыми размерами. При этом высокоточные измерения требуются не только для оценки результирующих характеристик МИС

и функциональных элементов, но главным образом для построения достоверных моделей этих элементов. Особенности СВЧ-измерений являются: необходимость калибровки измерительной установки для исключения систематических ошибок (влияние потерь и переотражений в кабелях, разъемах, переходах и т. д., несовпадение плоскостей отсчета измеряемого устройства с плоскостями измерений и др.); необходимость исключения влияния контактных площадок и других измерительных элементов на результаты измерений (деэмбединг). В связи с трудоемкостью процедур СВЧ-измерений, в том числе калибровки и деэмбединга, они должны быть автоматизированы. Автоматизация целесообразна также в том случае, когда требуется многократное повторение однотипных измерений. Например, при построении нелинейной модели СВЧ-транзистора необходимо выполнить измерение его параметров рассеяния во многих рабочих точках по постоянному току. Важными задачами при большом объеме измерений являются сбор, хранение, обработка и анализ результатов.

В НОЦ НТ для решения указанных задач разработаны и разрабатываются программные модули, интегрированные с аппаратной частью измерительного комплекса [1]:

- программа Measurement (управление процессом измерений, автоматизированное измерение ВАХ и параметров рассеяния полупроводниковых приборов в нескольких режимах по постоянному току);
- программа Deembedding (исключение влияния контактных площадок);
- программы DataBase и Statistics (хранение, систематизация и статистический анализ результатов измерений с применением специализированной базы данных; находятся в разработке).

На основе указанного выше измерительного оборудования и ПО разработаны, освоены и верифицированы методики, обеспечивающие:

- зондовые векторные измерения до 50 ГГц: а) с использованием калибровочных мер на измерительной подложке; б) с использованием калибровочных мер непосредственно на полупроводниковой пластине;
- векторные измерения в коаксиальном тракте до 26 ГГц: а) с использованием калибровочных мер на измерительной плате; б) на основе построения модели контактного устройства с разъемами.

Разработка моделей элементов GaAs и GaN СВЧ МИС

Для проектирования СВЧ-устройств на основе монокристаллических технологий необходимы точные математические модели элементов МИС. Этот вопрос особенно актуален при разработке МИС на базе отечественных технологий. Создание моделей базируется на высокоточных измерениях, физическом или электромагнитном (ЭМ) моделировании характеристик СВЧ-элементов.

В НОЦ НТ осуществляется построение следующих типов моделей активных и пассивных элементов для конкретных технологий изготовления СВЧ МИС:

- физико-технологические и ЭМ-модели;
- компактные линейные, нелинейные и шумовые модели (т.е. модели в виде эквивалентных схем);
- поведенческие (формальные) модели в виде нейронных сетей, многомерных аппроксимирующих функций и др.

Физическое моделирование элементов МИС в НОЦ НТ осуществляется с помощью программной системы Sentaurus TCAD Synopsys [2]. При использовании этого пакета выполнено моделирование характеристик различных конструкций GaAs и GaN НЕМТ наногетероструктур, а также мощных СВЧ-транзисторов на их основе. Это позволило определить пути оптимизации конструкций гетероструктур и транзисторов, улучшения их характеристик. Результаты моделирования подтверждены экспериментальным измерением параметров изготовленных тестовых транзисторов.

Для моделирования пассивных компонентов СВЧ МИС в большинстве случаев используется более быстрое ЭМ-моделирование, основанное на численном решении уравнений электродинамики (программы Axiem, Momentum и др.). Физическое и ЭМ-моделирование элементов МИС требуют больших затрат машинного времени. Поэтому результаты такого моделирования совместно с данными измерений используются для построения других типов моделей, более эффективных с точки зрения использования в САПР СВЧ-устройств.

В частности, гораздо более быстродействующими и экономичными по сравнению с физическими моделями являются модели в виде эквивалентных схем (ЭС-модели). При построении такой модели СВЧ-компонента необходимо решить две задачи: выбор (синтез) структуры

ЭС и расчет параметров (экстракция) элементов ЭС. Особый интерес для проектирования СВЧ МИС представляют параметрические ЭС-модели, в которых учитываются зависимости характеристик компонента от конструктивных параметров (например, геометрических размеров) и/или внешних условий (температура, накопленная доза радиации и т.п.).

Для построения моделей СВЧ-компонентов, как правило, применяется специализированное программное обеспечение (например, IC-CAP и др.). Однако данные САПР обладают высокой стоимостью. Кроме того, процедуры выбора структуры модели и экстракции элементов ЭС часто являются сложными и времязатратными.

В связи с этим в НОЦ НТ разработаны оригинальные методики построения моделей пассивных и активных СВЧ-элементов, которые реализованы в собственных программных продуктах:

- аналитические и численно-аналитические процедуры экстракции параметров ЭС и построения параметрических моделей пассивных СВЧ-компонентов – полупроводниковых и тонкопленочных резисторов, МДМ-конденсаторов, спиральных катушек индуктивности и др. [3, 4] (реализованы в программном модуле Extraction-P);
- новая методика экстракции параметров мало-сигнальной модели MESFET и НЕМТ транзистора с учетом нелинейного характера сопротивления стока, позволяющая повысить точность моделирования малосигнальных S-параметров в различных рабочих точках [5] (реализована в программном модуле Extraction-L).

Наиболее сложным является построение нелинейных ЭС-моделей СВЧ-транзисторов. В литературе, как правило, отсутствует подробное описание методик экстракции параметров распространенных видов таких моделей, а строятся они с использованием дорогостоящего ПО (IC-CAP, AmCAD) и оптимизационных методов. В НОЦ НТ для GaAs и GaN НЕМТ транзисторов на основе аналитических и численных процедур разработана полностью формализованная методика экстракции всех 68 параметров нелинейной модели ЕЕНЕМТ, в том числе с учетом нелинейного сопротивления стока. Построение модели осуществляется на основе измеренных статических ВАХ и малосигнальных S-параметров транзистора. Для ее верификации используется сравнение рассчитанных на большом сигнале

нагрузочных (load pull) диаграмм и амплитудных характеристик транзистора с данными измерений.

Для иллюстрации точности этой методики на рис.1 и 2 представлены результаты сравнения рассчитанных с помощью построенной нелинейной модели ЕЕНЕМТ и измеренных характеристик отечественного 0,15 мкм GaN НЕМТ транзистора с общей шириной затвора $W_g = 4 \times 100$ мкм.

Поведенческие модели представляют СВЧ-компонент в виде "черного ящика" без учета его физической природы. Такие модели также быстродействующие, однако, в отличие от физических и ЭС-моделей, процедуры их построения гораздо проще, являются универсальными (т.е. не зависят от типа компонента) и могут быть формализованы (автоматизированы). Поведенческие модели строятся на основе как непосредственных измерений, так и физического или ЭМ-моделирования характеристик компонента. С математической точки зрения построение параметрической поведенческой модели является задачей многомерной аппроксимации. В качестве входных (независимых) переменных выступают изменяемые параметры компонента СВЧ МИС (частота, конструктивные параметры, напряжения смещения и т.д.), в качестве

выходных (зависимых) – моделируемые характеристики, например, параметры рассеяния.

В НОЦ НТ разработаны, исследованы и реализованы в виде ПО методики построения нескольких разновидностей поведенческих моделей активных и пассивных СВЧ-элементов, в том числе моделей в виде искусственных нейронных сетей (ИНС), многомерных полиномов и сплайнов, а также моделей на основе детерминированного алгоритма интерполяции функций с неравномерной сеткой данных (метод обратного средневзвешенного расстояния – ОСР) [6]. На этой основе построены поведенческие модели пассивных и линейных активных элементов МИС для отечественных GaAs- и GaN-технологий, характеризующиеся достаточной точностью и быстродействием. При этом метод ОСР позволяет значительно (до 500 раз) сократить время построения поведенческой модели относительно получившего распространение метода ИНС при сравнимой точности и быстродействии модели.

Так как процедуры экстракции нелинейных ЭС-моделей СВЧ-транзисторов весьма сложны и трудоемки, для преодоления этой трудности разработаны алгоритмы построения поведенческих (универсальных табличных) моделей произвольных нелинейных приборов (транзисторов)

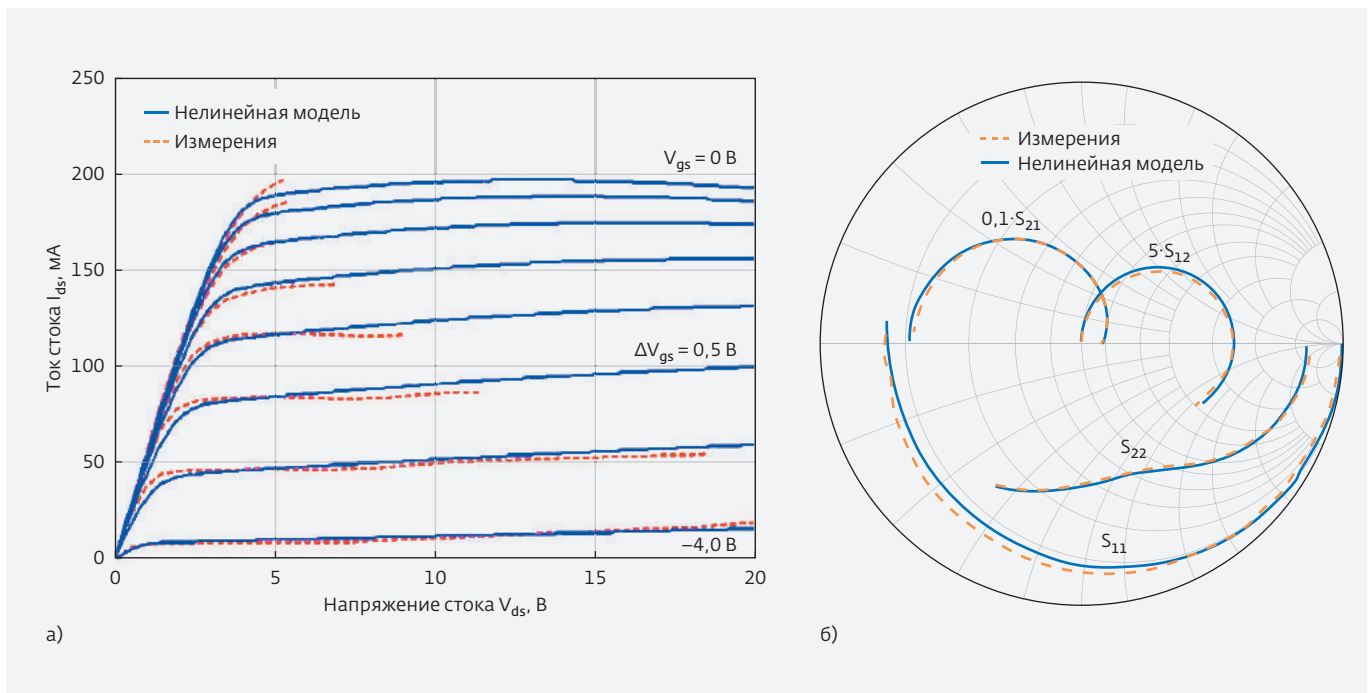


Рис.1. Характеристики 0,15 мкм GaN НЕМТ транзистора (измерение и моделирование): а) выходные ВАХ; б) малосигнальные S-параметры в диапазоне 0,1–40 ГГц при $V_g = -3,25$ В, $V_{ds} = 15$ В, $I_{ds} = 35$ мА

на основе многомерных сплайнов [7]. Эти модели позволяют одновременно описать измеренные малосигнальные параметры рассеяния приборов в широком диапазоне частот и режимов по постоянному току, ВАХ и нелинейные (мощностные, спектральные) характеристики в заданном диапазоне входных воздействий, процедуры их построения автоматизированы.

Указанные выше программные модули включены в состав системы INDESYS-MS (Intelligent Design System – Measurement Suite) для управления СВЧ-измерениями и построения моделей СВЧ-компонентов. Эффективность разработанных методик и ПО для построения моделей подтверждена при создании библиотек элементов МИС для гетероструктурных GaAs- и GaN-технологий.

Разработка библиотек элементов для GaAs- и GaN-технологий изготовления СВЧ МИС

Успешное проектирование СВЧ МИС возможно только при условии создания библиотек элементов (точнее, библиотек электрических и топологических моделей элементов МИС), отражающих особенности технологии изготовителя, и интеграции этих библиотек в распространенные системы моделирования СВЧ-устройств.

Разработка библиотеки является актуальной задачей при организации опытного и промышленного выпуска СВЧ МИС на базе отечественных технологий. При этом библиотека элементов позволяет наиболее просто передать сведения о технологии проектировщикам МИС как внутри предприятия-изготовителя интегральных схем, так и сторонним организациям. Построение библиотек – сложная и трудоемкая научно-практическая задача, требующая наличия высокоточного измерительного оборудования и специализированного программного обеспечения, знаний и опыта в области СВЧ-измерений, математического моделирования и проектирования СВЧ МИС.

Зарубежные организации-изготовители СВЧ МИС, ориентированные на решение технологических задач, собственными силами либо в сотрудничестве с разработчиками САПР целенаправленно проводят работу по созданию и поддержанию в актуальном состоянии библиотек элементов. Однако на российских предприятиях деятельность по разработке и всесторонней верификации библиотек элементов для отечественных GaAs- и GaN-технологий СВЧ МИС не развита. Полноценные библиотеки элементов, пригодные для передачи сторонним

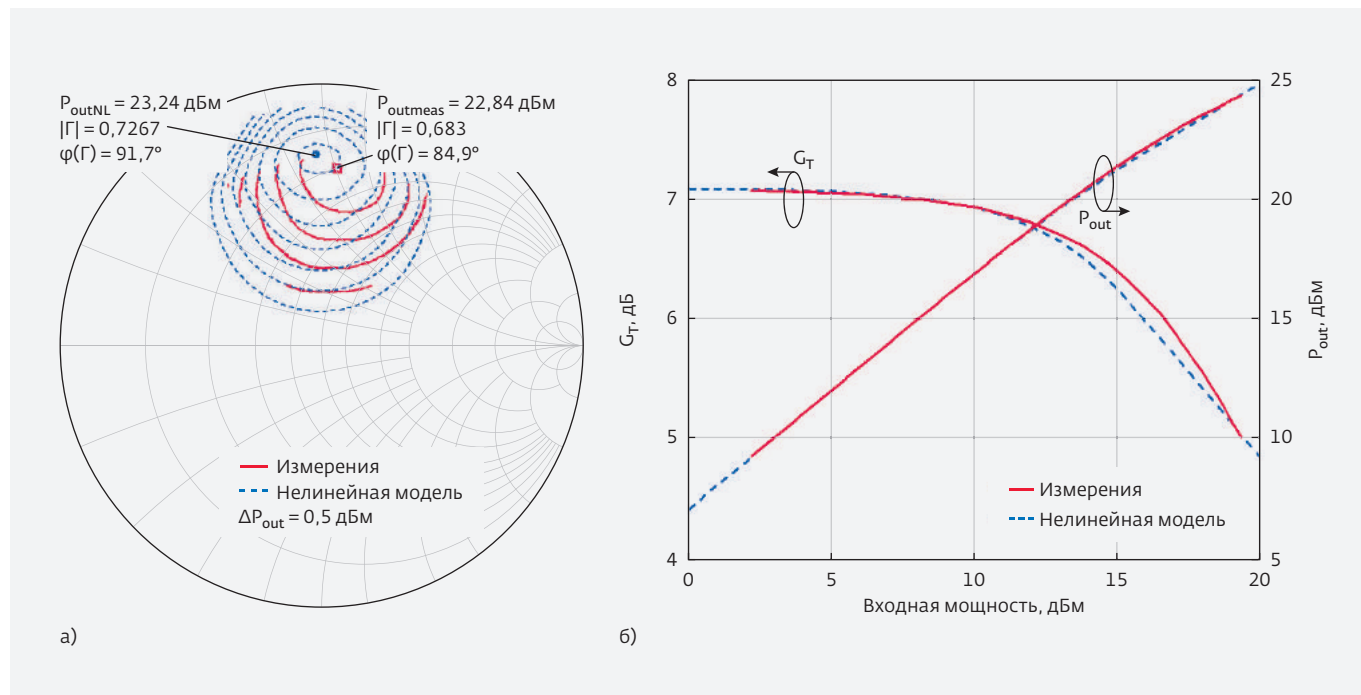


Рис.2. Большесигнальные характеристики 0,15 мкм GaN НЕМТ транзистора на частоте 23 ГГц (измерение и моделирование): а) нагрузочные диаграммы; б) коэффициент усиления и выходная мощность

организациям-проектировщикам, практически отсутствуют, это не позволяет на современном уровне организовать разделение труда между разработчиками и изготовителями СВЧ МИС.

В НОЦ НТ на систематической основе разрабатываются библиотеки элементов гетероструктурных СВЧ МИС и имеется соответствующее лицензионное программное обеспечение. На базе проведенных исследований и полученного опыта была предложена и практически опробована методика создания библиотек элементов СВЧ МИС, изготовленных по GaAs- и GaN-технологиям [8]. Основными объектами библиотеки элементов являются взаимосвязанные электрическая модель, топология, трехмерное представление для ЭМ-анализа, справочная информация и дополнительные параметры. Топология

и электрическая модель СВЧ-элемента автоматически изменяются при изменении его геометрических параметров. Такие библиотеки позволяют в полной мере использовать все возможности современных САПР и значительно ускорить и упростить процесс проектирования СВЧ МИС. В НОЦ НТ освоена, исследована и развита методика построения топологических моделей (ячеек) в САПР Microwave Office, базирующаяся на применении программных продуктов Software Development Kit (SDK) и Model Wizard фирмы Applied Wave Research [8]. С целью построения параметризованных топологических моделей для всех типов монолитных элементов реализуются и интегрируются в среду Microwave Office программные модули на языке C++, описывающие набор стандартных геометрических

Таблица 1. Характеристики библиотеки элементов для 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии

№п/п	Наименование элемента	Группа элементов	Тип элемента (модели)	Максимальное СКО модели в группе, %
1	NL (4 модели)	Nonlinear	Транзисторы (нелинейная модель)	ВAX – 10,9 S-параметры – 11,7
2	A (10 моделей)	Small Signal	Транзисторы (малосигнальная модель)	3,77–5,43
3	SW1 (5 моделей)	Switch HEMT	Транзисторы (модель в ключевом режиме)	Закр. режим – 5,9 Откр. режим – 1,7
4	VIA, DCPAD, RFPORT	Interconnects	Сквозное отверстие в подложке, контактные площадки для DC и RF	
5	MLIN, MTRACE... (12 моделей)	Microstrips	Отрезок линии передачи, изгибы, тройники, скачок ширины линии и другие неоднородности линии передачи	Не оценивалась
6	MIMCAP	Passive	Масштабируемая модель МДМ-конденсатора	4,27
7	TFRES	Passive	Масштабируемая модель тонкопленочного резистора	1,71
8	W_S_T_ (8 моделей)	Inductors	Модели фиксированной квадратной спиральной катушки индуктивности	7,5
9	SQRIND	Inductors	Масштабируемая модель квадратной спиральной индуктивности	5,3 до частоты первого резонанса
10	DICE	Substrate	Рамка кристалла	Служебный элемент
11	MSUB	Substrate	Подложка	Служебный элемент

примитивов и зависимости их размеров от геометрических параметров. Модели позволят в реальном масштабе времени отображать топологию и создавать фотошаблоны МИС.

Сотрудниками НОЦ НТ были разработаны библиотеки для GaAs- и GaN-технологий ряда отечественных организаций, в том числе 0,15 мкм GaAs рНЕМТ технологии ОАО НИИПП (г. Томск), 0,25 мкм GaN НЕМТ технологии ОАО НИИПП, 0,13 мкм GaAs мНЕМТ технологии ИСВЧПЭ РАН (г. Москва), 0,35 мкм GaAs гетероструктурной технологии ЗАО НПФ "Микран" (г. Томск). Библиотеки разработаны для коммерческой САПР Microwave Office в частотном диапазоне до 40 ГГц. В качестве примера в табл.1 сведены основные характеристики библиотеки элементов для 0,15 мкм GaAs рНЕМТ технологии. Для представленных в таблице элементов разработаны разные виды электрических моделей, а также топологические модели; если не указано иначе, приведена среднеквадратичная ошибка (СКО) S-параметров моделей.

Разработанные библиотеки элементов использовались при проектировании СВЧ МИС на основе GaAs- и GaN-технологий.

2. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (СИНТЕЗА) СВЧ-ЦЕПЕЙ И УСТРОЙСТВ

Современные САПР, предназначенные для проектирования СВЧ-устройств (например, ADS, Microwave Office, Genesys и др.) решают только задачи моделирования, то есть расчета характеристик по уже заданной принципиальной схеме и топологии устройства. Выбор схемы и топологии МИС осуществляется на основе эвристического подхода с использованием опыта разработчика, упрощенных инженерных методик расчета, методом проб и ошибок и т.д. Обычным является применение многократного моделирования различных вариантов схем и топологий при разных сочетаниях параметров элементов, а также многократной оптимизации МИС. Такой процесс проектирования СВЧ МИС является длительным, трудоемким, не гарантирует наилучших результатов и требует дефицитных квалифицированных кадров.

В НОЦ НТ в течение ряда лет разрабатываются методы, алгоритмы и ПО для автоматизированного выбора (генерации, синтеза)

принципиальных схем и топологий линейных, маломощных и мощных транзисторных СВЧ-усилителей, а также пассивных согласующих (СЦ), корректирующих (КЦ) цепей и фильтров. В основу решения задачи положен ряд предложенных новых подходов, в том числе декомпозиционный метод синтеза активных полупроводниковых СВЧ-устройств, оригинальные интерактивные процедуры "визуального" проектирования пассивных цепей на базе технологии "визуальных вычислений", автоматический синтез пассивных и активных СВЧ-цепей на основе генетических алгоритмов (ГА) и др. [9-17]. Для повышения эффективности проектирования сочетаются принципы искусственного интеллекта, а также интерактивные "визуальные" процедуры, объединяющие интеллектуальные способности человека и вычислительные возможности компьютера.

На базе указанных подходов разработано ПО, которое используется для автоматизированного проектирования (синтеза) СВЧ-цепей и устройств [11-17]:

- Microwave Look – пакет программ, позволяющий осуществить проектирование широкополосных и узкополосных линейных, маломощных и мощных транзисторных СВЧ-усилителей по комплексу требований к усилению, форме АЧХ, шуму, выходной мощности, согласованию и устойчивости. Пакет основан на интерактивном "визуальном" подходе к проектированию усилителей с двухполюсными и реактивными четырехполюсными КЦ (ЧКЦ). Он включает следующие совместимые между собой программы: Locus (программа визуального проектирования пассивных КЦ и СЦ); Locus-MMIC (интегрированная программная среда для "визуального" проектирования согласующих и корректирующих цепей СВЧ МИС; функционирует совместно с системой Microwave Office); Amp (программа визуального проектирования СВЧ-усилителей с двухполюсными цепями коррекции и обратной связи); Region (программа визуального проектирования СВЧ-усилителей с реактивными ЧКЦ на входе и выходе).
- Genesyn – программа автоматического синтеза СЦ, КЦ и фильтров на основе ГА. Обеспечивает проектирование реактивных и диссипативных цепей лестничной структуры на сосредоточенных и распределенных элементах при произвольной форме частотной характеристики передачи мощности и при комплексных импедансах генератора и нагрузки.

Таблица 2. Технические характеристики МИС широкополосных усилителей

№	Тип усилителя	Технология	Организация	А/ГГц	G, дБ	F, дБ	P _{out} , дБм	S ₁₁ , дБ; S ₂₂ , дБ
МИС усилителей на основе GaAs-технологии								
1	МШУ (проект)	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	Win	1,2...1,8	27±0,5	1,3	–	–9,5; –10
2	МШУ	0,18 мкм GaAs рНЕМТ	ОММИС	2...10	11,7±1,1	2,15	13	–9,5; –11,5
3	МШУ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	Win	3...20	10,7±0,7	2,6	10,5/ 18 ГГц	–10; –9,8
4	МШУ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	ИСВЧПЭ	9...12	15±1,0	2,3	6	–10; –8
5	МШУ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	ИСВЧПЭ	6...12	20±1,0	< 1,4 дБ (4^8.. 12ГГц)	7	–7,5; –10
6	МШУ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	ИСВЧПЭ	6...12	28±1,0	< 1,6 дБ (4^8.. 12ГГц)	7	–10; –12
7	МШУ	0,1 мкм GaAs мНЕМТ	ОММИС	27...31	20±1,0	1,7	–	–12; –12
8	МШУ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	ИСВЧПЭ	30...40	16,8±1,4	2,3 (моделир.)	–	–8; –8
9	Линейный	0,13 мкм GaAs мНЕМТ	ИСВЧПЭ	34...38	9±1,0	–	7	–9; –5
10	Линейный	0,13 мкм GaAs мНЕМТ	ИСВЧПЭ	33...38	20±0,5	–	6	–10; –6
11	Линейный	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	Win	33...47	13±0,8	–	–	–6; –6
12	УМ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	Win	9...12	13,9±1,4	–	19,2/ 10 ГГц	–12,5; –14,5
13	УМ	0,15 мкм GaAs рНЕМТ	Win	26...37	9.3±1,7	–	21,7/ 37 ГГц	–7,5; –6
МИС усилителей на основе SiGe-технологии								
14	МШУ (проект)	0,25 мкм SiGe BiCMOS	–	1,3...1,7	17±0,25	1,5	–19,5	–8; –10
15	МШУ (проект)	0,25 мкм SiGe BiCMOS	–	1...4	15 ±0,5	4,7	–1,3	–9; –13

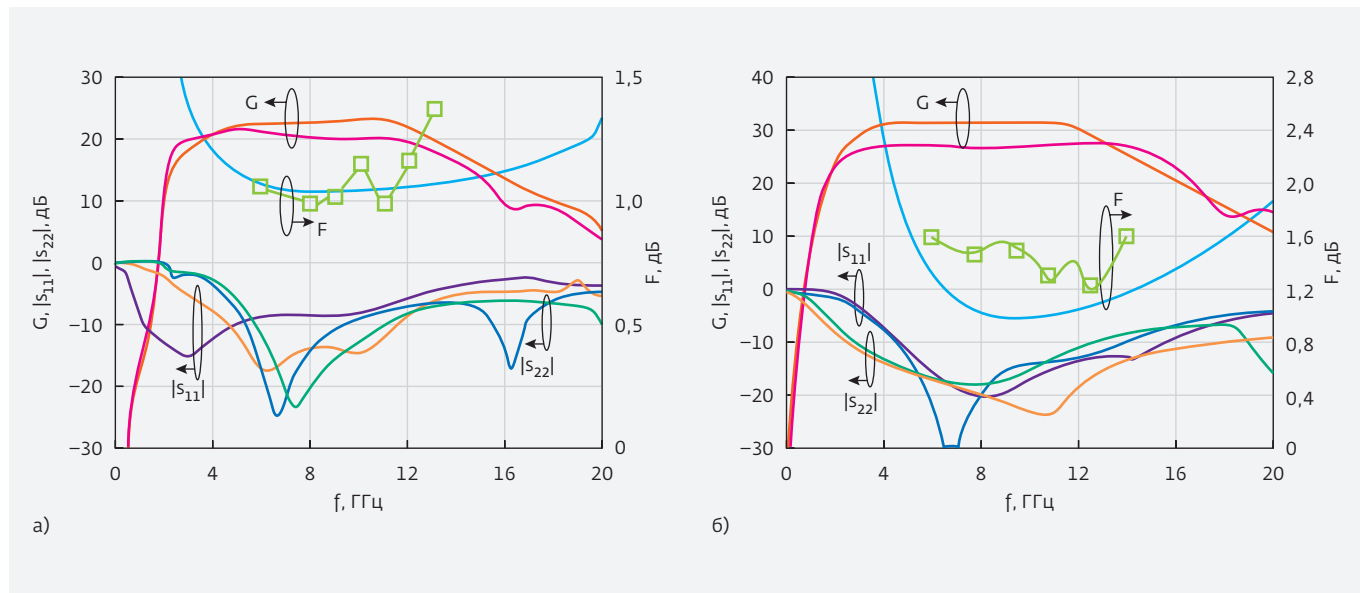


Рис.3. Комплект МИС МШУ диапазона 6–12 ГГц: а) характеристики двухкаскадного МШУ (моделирование – пунктирная линия, измерения – сплошная линия); б) характеристики трехкаскадного МШУ; в) топология трехкаскадного МШУ (размер 2,4×1,4 мм)

• Geneatr – программа автоматического синтеза транзисторных СВЧ-усилителей на основе ГА. Обеспечивает проектирование широкополосных и узкополосных линейных и маломощных усилителей по комплексу характеристик. При проектировании СВЧ МИС программы обеспечивают следующие возможности:

- 1) позволяют в автоматическом или интерактивном режиме синтезировать принципиальную схему устройства по поставленным требованиям при учете полного комплекса характеристик;
- 2) обеспечивают полный контроль схемы и значений элементов синтезируемых устройств;
- 3) разрешают учесть на этапе синтеза потери и паразитные параметры монолитных интегральных элементов;
- 4) осуществляют экспорт полученных решений в САПР Microwave Office. Разработанные программы представляют собой модули, расширяющие возможности коммерческой САПР, и при взаимодействии с системой Microwave Office позволяют также автоматически сгенерировать первоначальный вариант топологии СВЧ-устройства [18].

Перечисленное ПО было успешно применено при разработке МИС усилителей и других СВЧ-устройств. Оно позволило значительно облегчить и сократить время проектирования, повысить качественные показатели устройств.

3. РАЗРАБОТКА СВЧ МИС НА ОСНОВЕ GaAs-ТЕХНОЛОГИЙ

Коллектив сотрудников НОЦ НТ имеет многолетний опыт в разработке полупроводниковых СВЧ-устройств для радиоэлектронных устройств и систем различного назначения. При этом в рамках проектов с отечественными и зарубежными организациями разработано значительное

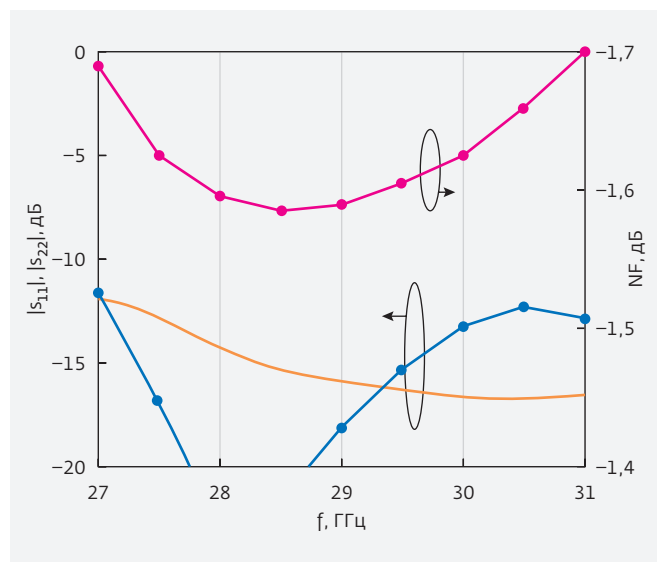


Рис.4. Характеристики шума и согласования МИС МШУ диапазона 27–31 ГГц

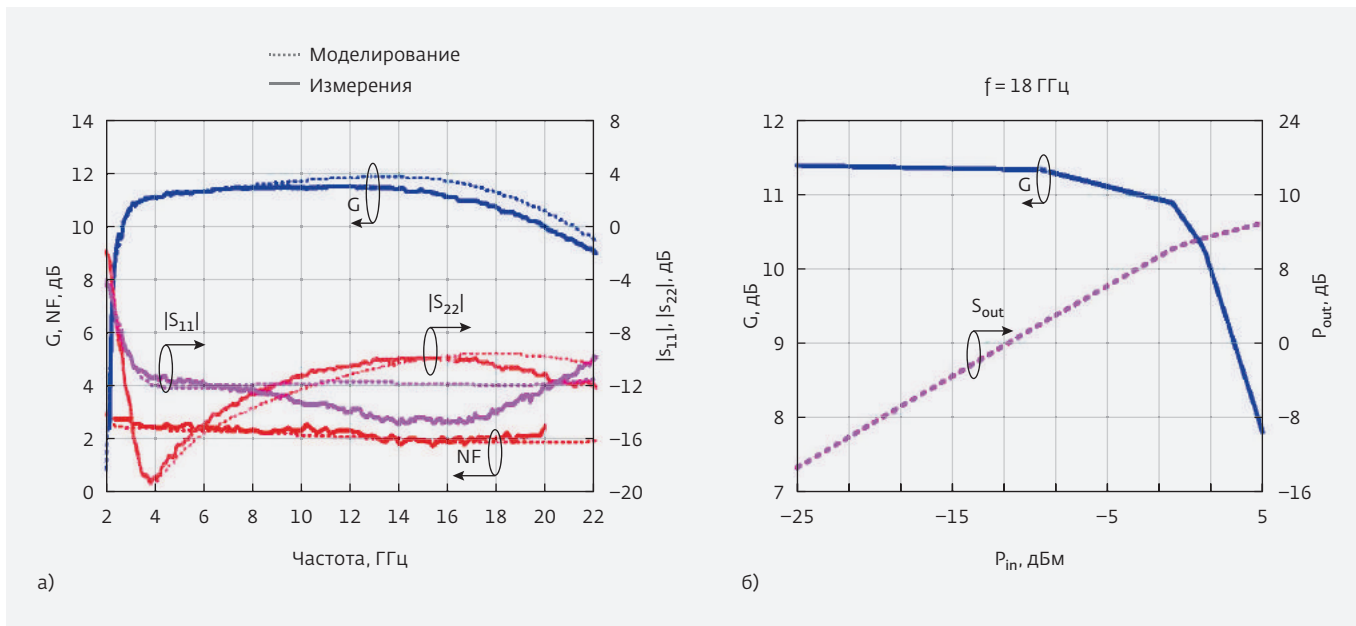


Рис.5. Характеристики МИС МШУ диапазона 3–20 ГГц (размер 1,3 × 0,7 мм²): а) частотные характеристики (моделирование и измерения); б) зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности на частоте 18 ГГц (измерения)

число МИС в частотных диапазонах от 1 до 47 ГГц на основе GaAs-технологий, прежде всего – МИС МШУ и УМ. Основные характеристики МИС широкополосных усилителей приведены в табл.2. Опытные партии МИС изготавливались на технологической базе организации ИСВЧПЭ РАН (г. Москва), компаний ОММИС (Франция) и Win Semiconductors (Тайвань).

Выделим следующие практические разработки на базе отечественных монокристаллических технологий изготовления СВЧ МИС. На основе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии ИСВЧПЭ РАН совместно с этой организацией и НПФ "Микран" в 2007 году разработана и изготовлена одна из первых в России гетероструктурных МИС МШУ X-диапазона с коэффициентом шума 2,3 дБ (табл.2, №4). На основе этой же технологии выпущен комплект МИС двух- и трехкаскадных МШУ диапазона 6–12 ГГц с характеристиками на уровне лучших зарубежных образцов [19] (табл.2, №5 и №6, рис.3). Коэффициент шума разработанных усилителей равен 1,4–1,6 дБ, в то время как у их аналогов – МИС МШУ TGA2511, TGA2512, HMC564 и HMC565 фирм Triquint и Hittite (США) он составляет от 1,5 до 2,3 дБ.

На основе 0,13 GaAs mHEMT технологии ИСВЧПЭ РАН изготовлен комплект монокристаллических копланарных усилителей диапазона 30–37 ГГц (табл.2, №9 и №10) [20].

Ряд монокристаллических СВЧ-усилителей был разработан совместно с зарубежными организациями в рамках совместных проектов по программам INTAS. Монокристаллический сверхширокополосный МШУ диапазона частот 2–10 ГГц разработан вместе с исследовательским институтом XLIM Лиможского университета на основе 0,18 мкм GaAs pHEMT технологии ED02AH фирмы ОММИС, Франция [13] (табл.2, №2). Монокристаллический трехкаскадный МШУ диапазона 27–31 ГГц для системы космической связи разработан совместно с институтом XLIM и Французским космическим агентством CNES на основе 0,1 мкм GaAs mHEMT технологии D01MH фирмы ОММИС [21] (табл.2, №7, рис.4). Его особенностями являются низкий коэффициент шума (1,7 дБ), а также выполнение одновременно фильтрующих функций, что позволяет снизить требования к другим блокам системы. Схемы СЦ и КЦ были синтезированы с помощью программы Genesyn.

Несколько МИС МШУ и УМ были спроектированы и изготовлены по 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии компании Win Semiconductors (табл.2, №3, 11–13). На рис.5 показаны измеренные частотные характеристики, а также зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности для МИС МШУ диапазона 3–20 ГГц.

Таблица 3. Параметры ЦАТТ (моделирование)

Частотный диапазон, ГГц	1–4,5
Разрядность, бит	5
Диапазон ослабления, дБ	31
Шаг ослабления, дБ	1
Потери в опорном состоянии, дБ	2,9
Максимальная ошибка ослабления для основных состояний ЦАТТ, дБ	±0,3
S11 , S22 дБ	-15
Паразитная фазовая конверсия, град.	±2,5
$P_{вх\ 1дБ}$, дБм	15
ИП _з , дБм	33
Напряжение управления, В	0/2,5
Размер, мм ²	1,16×0,3

Таблица 4. Параметры смесителя (моделирование)

Частотный диапазон ВЧ, ГГц	1–4,5
Частотный диапазон ПЧ, ГГц	0,05–0,5
Коэффициент преобразования, дБ	-9±0,5
Коэффициент шума, дБ	9,5
Развязка "Вход гетеродина – ВЧ", дБ	>40
Коэффициент отражения по входу ВЧ, дБ	-10
Коэффициент отражения по гетеродину, дБ	-6
Мощность гетеродина, дБм	13–15
$P_{вх\ 1дБ}$, дБм	10–13
ИП _з , дБм	19–22
Размер, мм ²	1,74×0,6

4. РАЗРАБОТКА СВЧ МИС НА ОСНОВЕ SIGE-ТЕХНОЛОГИЙ

В 2015 году в НОЦ НТ начаты работы по проектированию СВЧ МИС для универсального многодиапазонного приемника (L-, S- и C-диапазоны) в виде "системы на кристалле" (СнК). К настоящему времени на базе 0,25 мкм SiGe-технологии спроектированы МИС следующих широкополосных СВЧ-устройств (частотный диапазон 1–4,5 ГГц): МШУ, смеситель, цифровой управляемый аттенюатор (ЦАТТ), а также схема управления ЦАТТ. Последнее устройство обеспечивает управление аттенюатором по параллельному или последовательному интерфейсам.

Результаты моделирования МШУ приведены в табл.2 (№ 15), а остальных устройств – в табл. 3 и 4. В данный момент изготовление указанных МИС запущено на фабрике. После отработки топологии устройств они будут объединены на одном кристалле, образуя СнК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен выполненный в НОЦ "Нанотехнологии" ТУСУРа комплекс исследований и разработок в области создания GaAs и SiGe

СВЧ монолитных интегральных схем, библиотек элементов и модулей САПР. Представлено краткое описание разработанных методов и программных продуктов для автоматизации измерений, построения моделей активных и пассивных элементов, а также проектирования СВЧ МИС. Приведены характеристики разработанных библиотек элементов, а также СВЧ МИС на основе отечественных и зарубежных GaAs- и SiGe-технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Добуш И.М., Степачева А.В., Сальников А.С., Коколов А.А, Самуилов А.А., Бабак Л.И.** Программы для автоматизации измерений, деэмбеддинга и построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов // 21-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011): Материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 214–215.
2. **Торхов Н.А., Бабак Л.И., Божков В.Г., Разжувалов А.Н., Сальников А.С.** Физическое моделирование мощных НЕМТ на основе GaN/AlGaIn наногетероструктур // Доклады ТУСУР. 2012.

- №2 (26). Ч. 2. С.145-151. (ISSN 1818-0442).
3. **Горяинов А.Е., Степачева А.В., Добуш И.М., Бабак Л.И.** Программа для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012). Севастополь, 10-14 сентября 2012 г.: Материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. Т. 1. С. 129-130.
 4. **Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И.** Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P // Доклады ТУСУР. 2012. №2 (26). Ч. 2. С. 98-103.
 5. **Коколов А.А., Торхов Н.А., Добуш И.М., Бабак Л.И.** Экспериментальное исследование и моделирование GaN НЕМТ Ка-диапазона на подложке SiC // Изв. вузов. Физика. №8/3, г. Томск, 2013 г. С. 116-120. (ISSN 0021-3411).
 6. **Сальников А.С.** Исследование поведенческих моделей элементов СВЧ МИС // 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 2-7 сентября 2014 г.: Матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2010. Т. 1. С.119-120.
 7. **Дмитриенко К.С., Бабак Л.И.** Построение табличной нелинейной модели рНЕМТ-транзистора // 19-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 2009 г.: Матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 119-120.
 8. **Шеерман Ф.И., Бабак Л.И.** Создание библиотек моделей элементов СВЧ монолитных интегральных схем для системы Microwave Office // 19-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 2009 г.: Матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 107-108.
 9. **Babak L.I.** Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig., vol. 2, Phoenix, AZ, May 2001, pp. 1167-1170.
 10. **Бабак Л.И.** Структурный синтез СВЧ полупроводниковых устройств на основе декомпозиционного подхода // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. №8. С. 160-165.
 11. **Babak L.I., Cherkashin M.V., Sheyerman F.I., Fedorov Yu.V.** Design of Multistage Low-Noise Amplifiers Using "Visual" CAD Tools. – IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – Baltimore, USA. June 2011. P. 1-4.
 12. **Бабак Л.И., Черкашин М.В., Зайцев Д.А.** Программа "визуального" проектирования корректирующих и согласующих цепей СВЧ устройств // 15-я Межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005): материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2005. Т. 2. С. 423-424.
 13. **Cherkashin M.V., Eyllier D., Babak L.I., Billonnet L. and al.** Design of a 2-10 GHz feedback MMIC LNA using "visual" technique / Proc. 35th European Microwave Conf. Proc., Paris, France, October, 2005. PP. 1153-1156.
 14. **Бабак Л.И., Черкашин М.В., Поляков А.Ю., Бодунов К.С., Дягилев А.В.** Программы "визуального" проектирования транзисторных СВЧ усилителей // 15-я Межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005): матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2005. Т. 2. С. 425-426.
 15. **Бабак Л.И., Вьюшков В.А.** Программа синтеза согласующих цепей на основе генетического алгоритма // 16-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2006): Матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2006. Т. 1. С. 209-210.
 16. **Babak L.I., Kokolov A.A., Kalentyev A.A., Garays D.V.** A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis // Proceedings of the 7th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMW 2012), Oct. 2012, Amsterdam, The Netherlands, P. 381-384.
 17. **Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Бабак Л.И., Коколов А.А., Добуш И.М.** Структурный синтез свч транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием параметрических моделей монолитных элементов // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Кры-МиКо'2012). Севастополь, 10-14 сентября 2012 г.: Матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. Т. 1. С. 131-132.
 18. **Калентьев А.А., Добуш И.М., Жабин Д.А., Гарайс Д. В., Бабак Л.И.** Методика автоматизированного синтеза СВЧ МШУ с учетом особенностей топологии // 25-я Международ-

- ная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6-12 сентября 2015 г.
19. **Мокеров В.Г., Бабак Л.И., Федоров Ю.В., Черкашин М.В., Шеерман Ф.И. и др.** Разработка комплекта монолитных маломощных усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологии // Доклады ТУСУР. – 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 105-117.
20. **Бабак Л.И., Федоров Ю.В., Черкашин М.В. и др.** Копланарные монолитные усилители Ka-диапазона на основе 0,13 мкм GaAs mHEMT технологии // Доклады ТУСУР. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 20-24.
21. **Арменго В., Лапорт К., Джарри Б., Бабак Л.И., Черкашин М.В. и др.** Монолитный маломощный усилитель диапазона 27-31 ГГц с фильтрующими свойствами для системы космической связи // 19-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 2009 г.: Матер.конф. – Севастополь: Вебер, 2009. Т. 1. С. 47-48.