

УДК 620.3: 004.94

Ю.А. Шурыгин, д-р техн. наук, Л.И. Бабак, канд. техн. наук, Н.Д. Малютин, д-р техн. наук,
Т.Н. Зайченко, д-р техн. наук

Технологии производства СВЧ полупроводниковой наноэлектроники и компьютерного моделирования устройств микро- и наносистемной техники

Представлены результаты работ в области создания технологий производства и проектирования изделий полупроводниковой СВЧ-электроники, выполняемых в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Предложена концепция компьютерного моделирования устройств микро- и наносистемной техники на базе метода компонентных цепей.

The results in the branch of creation of semiconductor microwave electronics manufacturing and designing technologies which are carried out in Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics are presented. The concept of micro/nano electronics devices computer modeling on the base of components circuit method is proposed.

Введение

Развитие электронной компонентной базы и технологий создания электронных средств являются приоритетными направлениями политики всех промышленно развитых стран. Стратегические направления совершенствования связаны с использованием приборов и устройств микро- и наносистемной техники (МНСТ).

СВЧ полупроводниковая наноэлектроника в ТУСУРе и Томске

В научном сообществе существует различное отношение к нанотехнологиям и перспективам их применения в промышленности, в том числе осторожное и критическое [1]. Но, безусловно, достижение конкурентоспособности в области телекоммуникаций, информационных систем, авионики и т.д. связаны с освоением промышленного выпуска гетероструктурных СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) и радиоэлектронных средств (РЭС) на их основе.

Многими специалистами г. Томск позиционируется как потенциальный центр развития СВЧ-электроники в России. Это связано с сохранением и развитием научных коллективов в томских вузах, наличием эффективно действующих промышленных предприятий этого профиля (НПФ Микран, ООО «Субмикронные технологии», ОАО

«НИИ полупроводниковых приборов»), благоприятной ситуацией с подготовкой кадров. В настоящее время реализуется крупный проект, направленный на организацию промышленного производства СВЧ МИС и радиоэлектронных систем, в том числе в рамках Томской особой экономической зоны и проекта «Фабрика интеллекта». Проект предполагает строительство специализированной фабрики мирового уровня для производства GaAs СВЧ МИС с производительностью 500 пластин в месяц. Осуществление проекта совместно со строительством в г. Новосибирске фабрики молекулярно-лучевой эпитаксии для производства гетероструктур позволит удовлетворить основной объем потребности страны в GaAs МИС для современных РЭС. Объем производства МИС будет составлять 1...1,5 млрд. руб. при числе новых рабочих мест свыше 500.

В 2008 г. в рамках федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008 – 2010 годы» в ТУСУРе был организован научно-образовательный центр «Нанотехнологии» (НОЦ НТ). Деятельность НОЦ НТ направлена на поддержку решения этой главной задачи – организации в г. Томске промышленного производства СВЧ МИС и современных РЭС разного назначения [2].

Основными задачами НОЦ НТ являются:

- проведение научных исследований в области СВЧ-наноэлектроники, нанофотоники, нанотехнологий и наноматериалов – разработка современных опытных технологии изготовления гетероструктурных СВЧ МИС, проектирование и изготовление опытных партий МИС различного назначения с топологической нормой до 30...50 нм (частотный диапазон до 200...300 ГГц), передача технологий и МИС в производство;
- подготовка кадров высшей квалификации и специалистов в этих областях (в том числе специалистов для производства СВЧ МИС).

В состав НОЦ НТ входят: технологический участок (участок нанотехнологии), участок измерений параметров гетероструктур и МИС, дизайн-центр по проектированию СВЧ МИС, участок инженерного обеспечения чистых помещений. Раз-

вернута опытная технологическая линия по изготовлению СВЧ МИС на основе GaAs, InP и GaN, включающая оборудование для нанолитографии, электронно-лучевого напыления, нанесения фоторезиста, контроля пластин и фотошаблонов и др. Ударной позицией технологической линии является нанолитограф Raith-150 Two с разрешением до 20 нм, что обеспечит изготовление СВЧ-транзисторов и МИС с граничными частотами до 300 ГГц. Развернута уникальная полностью автоматизированная установка для прецизионных измерений СВЧ МИС до частот 50 ГГц. Это специализированный аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий измерения гетероструктур и компонентов СВЧ МИС на полупроводниковой пластине с использованием зондовой станции фирмы Cascade и автоматических тюнеров фирмы Focus. Комплекс позволит впервые в России организовать работы по полной характеристике и построению точных моделей элементов СВЧ МИС.

Дизайн-центр по проектированию СВЧ МИС уже функционирует несколько лет и выполняет работы по проектированию СВЧ МИС и разработке библиотек моделей. Имеется необходимое техническое и программное обеспечение, в том числе единственная в России лицензия на использование специализированных программных продуктов фирмы Applied Wave Research (США). Кроме того, в дизайн-центре разрабатываются собственные оригинальные программные продукты для проектирования СВЧ МИС и построения моделей элементов, которые применяются в отечественных и зарубежных организациях. Наличие лицензионного программного обеспечения, а также высокая квалификация и опыт сотрудников дизайн-центра позволяют вести указанную деятельность на профессиональном уровне.

Основными направлениями исследований НОЦ НТ являются:

- разработка технологий изготовления гетероструктурных СВЧ МИС;
- разработка методов измерения параметров гетероструктур, характеристики СВЧ МИС и функциональных элементов;
- создание библиотек моделей элементов СВЧ МИС;
- разработка программного обеспечения для автоматизированного проектирования СВЧ-устройств и управления измерительными комплексами;
- разработка на базе MESFET-, pHEMT- и mHEMT-технологий СВЧ МИС для РЭС различного назначения.

В области СВЧ-наноэлектроники ТУСУР имеет многолетний опыт сотрудничества с россий-

скими и зарубежными организациями. На основе отечественных и зарубежных гетероструктурных нанотехнологий разработано большое число монолитных СВЧ-усилителей и других устройств в частотном диапазоне от 1 до 40 ГГц. Для ряда технологий построены модели активных и пассивных элементов МИС, обеспечивающие возможность точного проектирования СВЧ-устройств. Разработан комплекс программ автоматизированного синтеза СВЧ-устройств, основанный на новых подходах, таких как декомпозиционный синтез, визуальные вычисления и генетические алгоритмы. Комплекс позволяет значительно сократить трудоемкость и время проектирования, улучшить качественные характеристики СВЧ-устройств, а также снизить требования к квалификации разработчиков.

Партнерами НОЦ являются:

- отечественные организации: ЗАО «НПФ «Микран», ФГУП «НИИ полупроводниковых приборов» (оба г. Томск), Институт сверхвысоко-частотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва);
- зарубежные организации: исследовательский институт СВЧ и оптической связи XLIM при Лиможском университете (г. Лимож, Франция), Французское космическое агентство CNES (г. Тулуза, Франция); Голландский астрономический центр ASTRON (г. Двингеллоо, Нидерланды); фирма OMMIC (г. Орсе, Франция); фирма Applied Wave Research (США).

Основные результаты работы НОЦ НТ заключаются в следующем:

- на базе 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии разработана и изготовлена первая в России опытная партия гетероструктурных монолитных маломощных усилителей (МШУ) диапазона 6-12 ГГц, используемого для АФАР в авионике (совместно с ИСВЧПЭ РАН и НПФ «Микран», 2007 г.);
- на базе 0,13 мкм GaAs pHEMT-технологии разработан первый в России комплект гетероструктурных монолитных МШУ диапазона 6 – 12 ГГц, параметры которых находятся на уровне лучших зарубежных аналогов (коэффициент шума 1,4...1,6 дБ) (совместно с ИСВЧПЭ РАН, 2008 г.);
- на базе 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии изготовлен первый в России гетероструктурный монолитный МШУ миллиметрового диапазона волн (30...37 ГГц) (совместно с ИСВЧПЭ РАН, 2009 г.);
- в рамках Европейской программы INTAS выполнено несколько международных проектов, направленных на разработку СВЧ МИС с экс-

тремальными характеристиками для применения в области космических и радиоастрономических исследований, а также на создание методов и программного обеспечения для автоматизированного проектирования СВЧ МИС;

- совместно с XLIM и CNES (Франция) разработан монолитный МШУ диапазона 27...31 ГГц с коэффициентом шума (1,7 дБ) и фильтрующими функциями, что позволило улучшить характеристики системы космической связи (0,1 мкм GaAs mHEMT-технология фирмы OMMIC, Франция);
- совместно с ASTRON (Голландия) по этой же технологии разработан монолитный МШУ диапазона 0,3...1,2 ГГц для гигантского радиотелескопа, который строится в рамках Европейского проекта SKADS.

За рубежом выпуск новых СВЧ МИС сдерживается не ограниченными возможностями производственной базы, а отсутствием достаточного количества квалифицированных проектировщиков. Организация образовательного процесса ориентирована на привлечение студентов старших курсов и аспирантов для проведения проектных работ по созданию МИС СВЧ и других устройств. Ключевым звеном в обучении является освоение методов проектирования МИС с помощью САПР Microwave Office и др. на основе знания технологии НОЦ. Еще одно направление обучения – методы и аппаратура характеристики параметров МИС с применением зондовой станции. Кроме этого, студенты, магистранты и аспиранты могут проводить ознакомительные лабораторные работы на технологическом участке.

Для эффективного использования возможностей НОЦ НТ необходима предварительная подготовка обучающихся, что требует значительной переработки вариативной составляющей учебных планов в сторону формирования базовых и специальных компетенций по физике полупроводников, технологии гетероструктурных МИС, методам измерений (характеризации) и другим предметам.

Концепция компьютерного моделирования функционально сложных и физически неоднородных устройств на базе метода компонентных цепей

Технологический процесс изготовления приборов и устройств МНСТ с микро- и наномеханическими системами (МЭМС, НЭМС) характеризуется высокой стоимостью и трудоемкостью. Поэтому этап их компьютерного проектирования является особо значимым, а задачи разработки эффективных процедур синтеза и анализа – актуальными.

Как известно, моделирование процесса функционирования сложных электронных средств осуществляется на системном, алгоритмическом, структурном, функционально-логическом, схемотехническом и компонентном уровнях, а в моделях компонентов микроуровня имеет место взаимосвязь функциональных, конструкторско-технологических и физико-топологических моделей. Заметим, что в классических работах в области САПР модели, описывающие процесс функционирования, или поведение исследуемых объектов, называют функциональными, а в современных работах, посвященных моделированию МЭМС и НЭМС, – поведенческими. Для моделирования на микроуровне применяются методы, алгоритмы и программы конечно-элементного анализа; при моделировании на макроуровне – анализа электронных схем. Устройства МНСТ как информационно-управляющие системы, выполняющие широкий спектр функций получения, хранения, обработки информации и управления, характеризуются функциональной и структурной сложностью. Системный подход к исследованию структурно сложных объектов базируется на методе многоуровневого моделирования. При этом МЭМС и НЭМС, интегрирующие для своего функционирования различные химические и физические явления (электрические, механические, гидравлические, тепловые и др.), относятся к классу физически неоднородных. Физическая неоднородность МЭМС и НЭМС существенно усложняет процедуру моделирования, а, следовательно, и синтеза, поэтому разработка эффективных методов и программных средств моделирования является фундаментальной научной задачей.

В настоящее время существуют специализированные системы моделирования и проектирования МЭМС [3] – CoventorWare и EM3DS (Coventor Inc.), IntelliSuite (IntelliScience Corp.), MEMCAD (Microcosm Technologies Inc.), MEMS Pro (Tanner Research Inc.), NODAS (Carnegie Mellon's University MEMS LAB). Реализованное в них поведенческое моделирование базируется на комплексировании со SPICE-алгоритмами и программами. Данные программные средства являются разработками зарубежных фирм. Их полные версии, предназначенные не для учебных целей, а для промышленного применения, являются весьма дорогостоящими программными продуктами. Поэтому на практике находит применение альтернативный способ моделирования, заключающийся в адаптации к задачам анализа МЭМС классических программ в области САПР электронных схем, программных ком-

плексов для конечно-элементных расчетов и систем математических вычислений. При моделировании на микроуровне применяется универсальные программы конечно-элементного анализа – ANSYS (ANSYS, Inc.), NASTRAN (MSC.Software Corp.), Abaqus (Dassault Systèmes), COMSOL Multiphysics (ранее FemLab, COMSOL Inc.) и др., позволяющие решать задачи механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций, механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики. При моделировании МЭМС на макроуровне используются программные средства:

- схемотехнического моделирования радиоэлектронной аппаратуры, являющиеся составной частью интегрированных САПР; в данном случае модель неэлектрической части МЭМС строится на базе метода аналогий;
- общематематического назначения; например, комплекс программ SUGAR (University of California, Berkeley), являющийся библиотекой элементов МЭМС для системы MatLab (MathWorks, Inc.).

Вышеперечисленные программные средства позволяют исследовать функциональные модели неоднородных МЭМС на макроуровне, но не ориентированы на решение задач моделирования приборов и устройств МНСТ в рамках САПР сквозного проектирования, что обусловлено реализованными в них методами моделирования.

В России в настоящее время уделяется большое внимание вопросам технологической независимости, в том числе в области информационных технологий и разработки программных продуктов. Обзор литературы и практика моделирования показывают, что при моделировании функционально и структурно сложных электронных средств возникают проблемы в реализации метода многоуровневого моделирования. Это обусловлено необходимостью комплексирования объектно-ориентированных программных средств и разработкой межпрограммных интерфейсов, в связи с чем эффективность и удобство процесса проектирования снижаются. Особенно остро данная проблема стоит для объектов неоднородной физической природы, таких как МЭМС и НЭМС. В наноразмерных объектах изменяется традиционное соотношение между действующими силами, требуется учет сил вязкости, поверхностного натяжения, сухого трения, электростатические и магнитные силы. Соответственно для анализа физических процессов требуется моделирова-

ние мультифизических сред, использование методов и профессиональных языков различных предметных областей. Так в ряде работ по моделированию элементов электромеханики и МЭМС авторы идут по пути применения САПР РЭС и метода электрических аналогий. Данный подход является трудоемким, поскольку связан с формированием эквивалентных электрических схем замещения.

На основании вышесказанного может быть сделан вывод о том, что выбор для реализации в вычислительном ядре программных средств моделирования МНСТ классических методов анализа схем не позволит решить задачу многоуровневого моделирования, а, следовательно, и эффективно организовать процесс моделирования функционально сложных и физически неоднородных средств МНСТ в рамках САПР сквозного проектирования электронных средств. В этой связи в настоящей работе в качестве теоретической основы компьютерного моделирования функционально сложных электронных средств, приборов и устройств МНСТ неоднородной физической природы предлагается использовать метод компонентных цепей (МКЦ) [4].

МКЦ предназначен для моделирования во временной и в частотной областях физически неоднородных устройств и систем, исходная информация о которых задана в форме компонентной цепи (КЦ), являющейся моделью структуры исследуемого объекта. В качестве основной структурной сущности, так же как и в работах В.П. Сигорского [5], в МКЦ принят многополюсный компонент с произвольным числом связей, которым инцидентны топологические координаты и переменные связей. Отличие состоит в том, что у компонента в МКЦ предусмотрены переменные связей различной физической природы и четыре типа связей. К ним относятся: связи энергетического типа, которым соответствует пара топологических координат (номер узла и номер ветви) и пара дуальных переменных (потенциального и потокового типа); связи информационного типа, которым соответствует одна топологическая координата (номер узла) и одна переменная (потенциального типа), связи скалярного типа, к которым относятся связи энергетического и информационного типов, и связи векторного типа, являющиеся объединением связей скалярного типа. Математическая модель компонента – это уравнение либо система уравнений относительно его переменных связей и внутренних переменных. Математическая модель КЦ в целом – система уравнений, состоящая из моделей компонентов, уравнений

базового узла и узловых топологических законов сохранения для переменных потокового типа [4, 6]. Алгоритмическая модель компонента инвариантна относительно метода формирования и решения модели КЦ. Благодаря отсутствию ограничений на количество связей компонента, характер и число переменных связей МКЦ позволил реализовать компонентную декомпозицию, матрично-топологическую интерпретацию, формализованное цепное представление широкого класса электропреобразовательных и механических устройств и программную систему компьютерного моделирования MAPC (Моделирование и Автоматический Расчет Систем) [7]. Библиотека компонентов системы MAPC включает базовые элементы, необходимые для создания моделей МЭМС – элементы электроники, пружины, массы, демпферы и т.д.

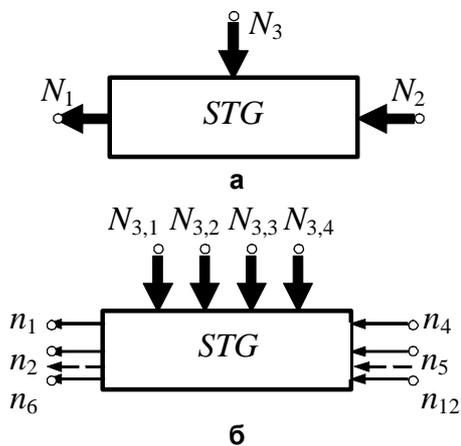


Рис. 1. Формализованное представление компонента «стержень» с векторными связями (а) и с частичным расщеплением векторных связей на скалярные (б)

Концепция моделирования МЭМС базируется на возможности реализации их моделей на основе методики компьютерного моделирования стержневых систем, разработанных в [8]. Базовым элементом данной методики является компонент «стержень» (рис. 1). Потенциальные переменные его векторных связей (данные связи отображены утолщенными линиями) с узлами N_1, N_2 имеют смысл линейных и угловых перемещений стержня, а потоковые – сил и моментов (все в неподвижной системе координат). Переменные векторной связи с узлом N_3 играют роль внешних воздействий. Параметры модели – размеры стержня, модули упругости и сдвига. Практическая реализация моделей МЭМС и НЭМС связана с разработкой компонентов преобразования неэлектрических и электрических величин и способов и алгоритмов их цепного представления, в том числе автоматизированного.

Выводы

Реализация программного средства моделирования структурно сложных и физически неоднородных средств МНСТ возможна на единой методической основе в виде метода компонентных цепей.

Литература

1. *Теряев Е.Д., Филимонов Н.Б., Петрин К.В.* Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями // Матер. 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – СПб: ГНЦ РФ «Электроприбор», 2008. – С. 9 – 20.
2. *Научно-образовательный центр «Нанотехнологии» ТУСУРа: новые возможности развития образовательного процесса в области СВЧ-электроники/ Ю.А. Шурыгин, Л.И. Бабак, Н.Д. Малютин и др.* // Современное образование: перспективы развития многопрофильного университета. Матер. Международ. науч.-метод. конф., Томск. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – С. 3 – 5.
3. *Яшин К.Д., Лацапнев Е.В., Осипович В.С.* Системы автоматизированного проектирования МЭМС // Информационные технологии . – 2007. – № 11. – С. 22 – 28.
4. *Арайс Е.А., Дмитриев В.М.* Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1982. — 160 с.
5. *Сигорский В.П., Петренко А.И.* Алгоритмы анализа электронных схем. – М.: Сов. Радио, 1976. – 608 с.
6. *Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н.* Шурыгин Ю.А. Применение метода компонентных цепей для компьютерного моделирования электронных компонентов, узлов и систем// Электроника и связь. – 2009. – № 2-3. – Ч. 1. – С. 106–109.
7. *Среда моделирования MAPC / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко и др.* – Томск.: Изд-во В-Спектр, 2007. – 296 с.
8. *Зайченко Т.Н.* Автоматизированное моделирование систем оцувствления адаптивных роботов: Дис. канд. техн. наук.: 05.13.16 / Том. гос. ун-т.– Томск, 1992.– 235 с.