

Магистерская программа: «Автоматизация проектирования микро- и нанoeлектронных устройств для радиотехнических систем»



Нанотехнологии – инструменты и результаты

Нанотехнологии - инструменты:

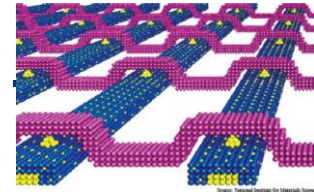
- ✓ **Переход к наноразмерам (< 100 нм)**
- ✓ **Управление свойствами вещества путем манипуляции атомами и молекулами**
- ✓ **Воспроизведение наноструктур живой природы (липосомы, ДНК и др.)**

Нанотехнологии - результаты:

- ✓ **Новые эффекты**
- ✓ **Новые свойства материалов**
- ✓ **Новые устройства**

Нанотехнологии – достижения и перспективы

- ✓ На порядки более быстрая и малогабаритная электроника (нанопровода, одноэлектронные нанотранзисторы, квантовые процессоры, и др.) встроенные компьютеры и нейрочипы
- ✓ новые типы наноустройств – элементы радиофотоники, наноразмерные электронно-механические системы (НЭМС) и др.
- ✓ информационные технологии (на порядки больший объем хранения и быстрый доступ к информации без проводов)
- ✓ энергосбережение (практически вечные батарейки, светодиоды, солнечные батареи)
- ✓ наномашины (моторы, насосы, турбины, датчики, нанолаборатории)
- ✓ медицина - нанороботы, доставляющие лекарства к больному органу человека.
- ✓ несминаемая, «умная» одежда и т.д.



Наноэлектроника в радиоэлектронных и телекоммуникационных системах

Новые типы радиоэлектронных средств на основе микро- и наноэлектронных устройств, в том числе сверхбыстродействующих и сверхвысокочастотных (СВЧ) интегральных схем.

Применение:

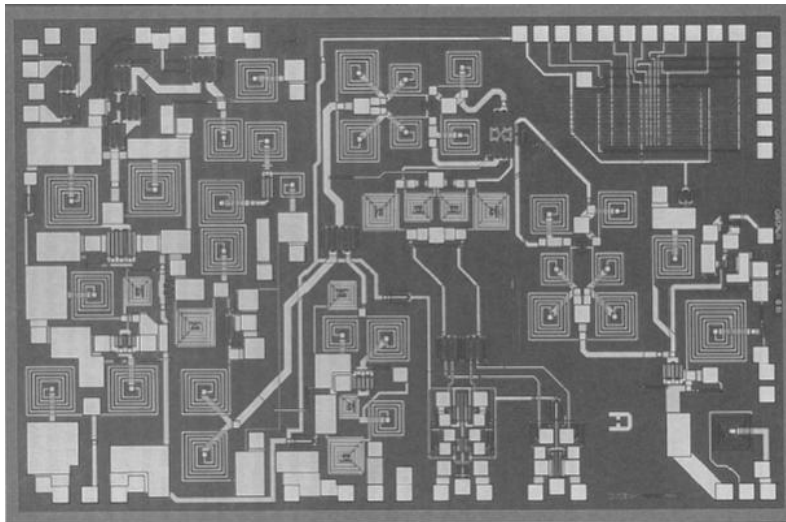
- ✓ космическая и мобильная связь;
- ✓ радиолокация, навигация, GPS, Глонасс;
- ✓ телекоммуникации;
- ✓ авионика, высокоточные электронные средства вооружений;
- ✓ системы безопасности, борьбы с терроризмом;
- ✓ интернет вещей, высокоскоростное телевидение;
- ✓ робототехника, БПЛА, беспилотные автомобили;
- ✓ «умная» одежда и др.

Нанoeлектроника в радиоэлектронных и телекоммуникационных системах

Применение нанoeлектронных технологий позволяет выполнить радиоэлектронные системы в виде одной миниатюрной интегральной схемы размером в единицы или доли миллиметров, делает их во много раз более быстродействующими и экономичными.

Достоинства:

- ✓ повышение скорости обработки и передачи информации (до 100 Гбит/с и более);
- ✓ повышение функциональности и интеллектуальности, возможности систем «видеть», «чувствовать» и принимать правильные решения за время, недоступное для человека.



Монолитная интегральная схема (МИС) приемо-передатчика диапазона 2,4 – 2,483 ГГц (размер 3,3× 5,2мм)

Магистерская программа – ТУСУР (направление 09.04.01)

Профиль: «Автоматизация проектирования микро- и нанoeлектронных устройств для радиотехнических систем»

Факультет вычислительных систем (ФВС), кафедра «Компьютерные системы в управлении и проектировании» (КСУП).

Открыта магистратура по тематике разработки радиочастотных интегральных схем, систем на кристалле (СнК) и радиотехнических средств на их основе.

Охватывает комплекс дисциплин, необходимых для разработки аналоговых ВЧ и СВЧ МИС, аналого-цифровых СнК и СВЧ модулей.

Это первый этап совместного образовательного проекта с РТФ. На втором этапе будет открыт соответствующий бакалавриат по профилю «Автоматизация проектирования интегральных схем и нанoeлектронных устройств» (2018 г.).

Особенность образовательной программы: Уникальное для России сочетание знаний и компетенций:

- ✓ Нанoeлектроника и интегральная оптоэлектроника
- ✓ схемотехника интегральных схем и систем на кристалле;
- ✓ техника СВЧ;
- ✓ радиоэлектронные и телекоммуникационные системы на базе современной микро- и оптоэлектронной компонентой базы;
- ✓ автоматизированное проектирование и САПР.

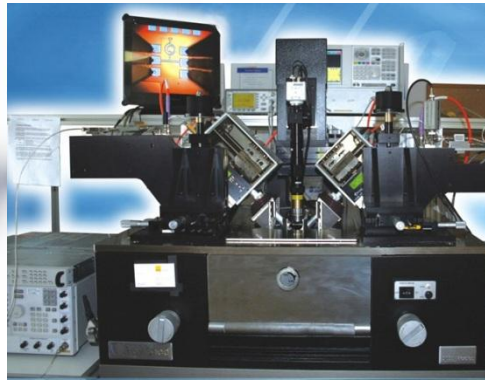
Магистерская программа – ТУСУР

Этапы создания ИС, СМК и радиоэлектронных систем на их основе

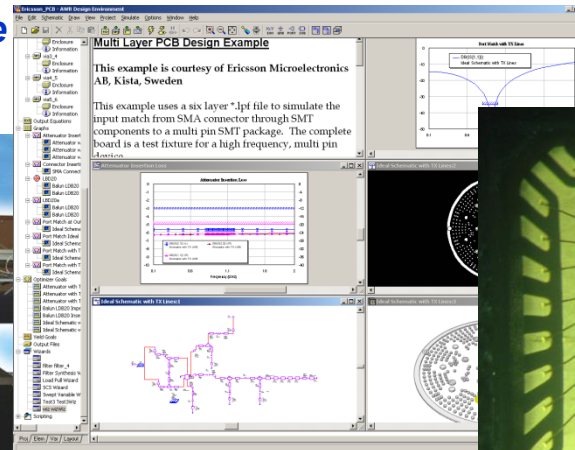
Полупроводниковые технологии



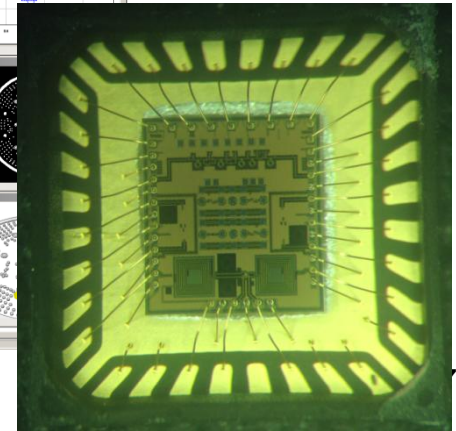
Измерения и построение моделей элементов ИС



Проектирование



Изготовление ИС, СМК и радиоэлектронных систем



Характер деятельности выпускников

- ✓ Работа в дизайн-центрах, проектных бюро и лабораториях
- ✓ Разработка интегральных схем (ИС) и систем на кристалле (СМК) на базе новых полупроводниковых материалов (GaAs, GaN, Si, SiGe и др.) с использованием последних достижений микро- и нанoeлектроники
- ✓ Создание современных радиотехнических систем и комплексов на этой основе

Содержание магистерской программы

- Физические основы микро- и наноэлектроники
- Технологии изготовления СВЧ полупроводниковых приборов и МИС
- СВЧ техника и измерения
- Модели элементов МИС
- Схемотехника: радиоэлектронные и оптоэлектронные устройства на базе технологий МИС, аналоговые и цифровые схемы
- Автоматизированное проектирование МИС и СнК
- Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы на основе МИС и СнК, в том числе с фазированными антенными решетками (ФАР) и цифровыми ФАР
- Конструирование и технологии изготовления СВЧ модулей на основе МИС и СнК

Вступительные испытания – в форме собеседования (основы электроники и схемотехники, проектирование радиоэлектронных схем с помощью САПР).

Магистерская программа – ТУСУР

Трудоустройство

Актуальность специальности обусловлена модернизацией отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности, в связи с чем ощущается значительная нехватка специалистов.

Выпускников ждут на крупных предприятиях, в частных фирмах, НИИ и конструкторских бюро, занимающихся разработкой и выпуском интегральных схем, созданием радиоэлектронных систем и комплексов для телекоммуникаций, спутниковой и мобильной связи, радиолокации и навигации, авионики, космической отрасли, оборонной промышленности и др.

Известные компании и предприятия Сибири, Урала и центрального региона (есть заявки на целевое обучение):

- ✓ АО НИИПП, ЗАО «НПФ Микран», ООО «ЛЭМЗ-Т» (г. Томск)
- ✓ АО «Информационные спутниковые системы» (г. Красноярск), АО «ЦКБ Автоматика» (г. Омск), АО «УПКБ Деталь» (г. Каменец-Уральский)
- ✓ АО «Светлана-Электроприбор» (г. Санкт-Петербург)
- ✓ АО «Лианозовский электромеханический завод (ЛЭМЗ)», ГК «Алмаз-Антей», «НПП «Исток», «НПП Пульсар» (г. Москва) и др.

Магистерская программа – ТУСУР

Лабораторная и исследовательская база

Обучение в магистратуре проводится с использованием уникальной лабораторной и исследовательской базы, современного измерительного оборудования и лицензионного программного обеспечения.

Научно-учебно-исследовательские подразделения:

- ✓ НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР (НОЦ НТ)
- ✓ НОЦ «ТУСУР-Кейсайт» (НОЦ ТК)
- ✓ Комплекс научно- и учебно-исследовательских лабораторий.

НОЦ НТ - состав

- ✓ Технологический участок: исследовательская линия по изготовлению СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на основе GaAs и GaN (наноитография - Raith-150 Two, электронно-лучевое напыление, нанесение фоторезиста и др.)
- ✓ Участок измерений СВЧ приборов, МИС и устройств: автоматизированный комплекс (3 зондовые станции, СВЧ измерительное оборудование).

Технологический участок



Участок измерений



Измерения СВЧ МИС

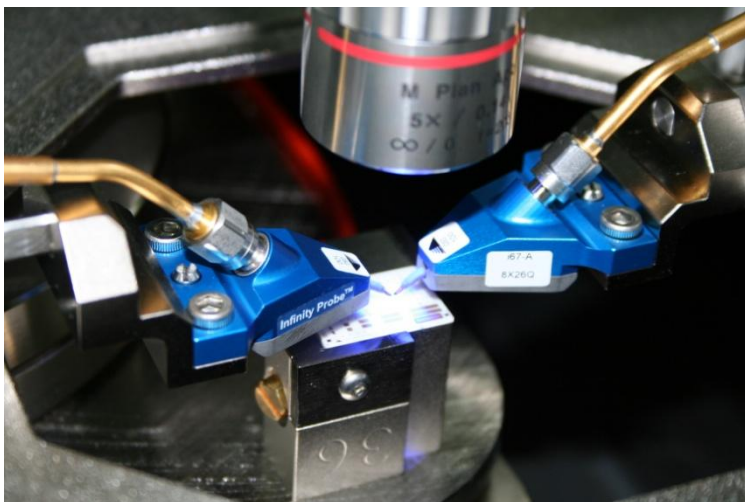


НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР – измерительное оборудование

Автоматизированный
комплекс для зондовых
измерений параметров
СВЧ МИС.



Комплекс обеспечивает
возможность точных
измерений СВЧ МИС и
характеризации элементов
до частот 40-50 ГГц.



Магистерская программа – ТУСУР

НОЦ «ТУСУР-Кейсайт»

НОЦ ТК открыт в 2015 г. совместно с известной компанией Keysight Technologies (США) и оборудован с помощью этой компании. Успешным выпускникам магистратуры предоставляется международный сертификат, обеспечивающий возможность работать в подразделениях компании в России и за рубежом.

Состав:

- ✓ Учебно-исследовательская лаборатория испытаний СВЧ модулей и устройств
- ✓ Учебно-исследовательская лаборатория САПР СВЧ устройств и др.

Комплекс лабораторий

- ✓ Дизайн-центр по проектированию СВЧ МИС
- ✓ Лаборатория сборки СВЧ модулей
- ✓ Лаборатория разработки программного обеспечения

Лаборатория испытаний СВЧ
модулей и устройств



Лаборатория сборки
СВЧ модулей



Станция для сборки
СВЧ модулей



Научно-исследовательская работа

Магистранты имеют возможность участвовать в выполнении НИР и ОКР с российскими и зарубежными организациями:

- ✓ хозяйственные договоры
- ✓ государственные контракты
- ✓ федеральные целевые программы
- ✓ гранты РФФИ
- ✓ гранты международных организаций (INTAS) и др.

Российские заказчики и партнеры

- ✓ НПП «Пульсар» (г. Москва), НПП «Исток» (г. Фрязино)
- ✓ АО НПП «ЛЭМЗ» (г. Москва), ООО «ЛЭМЗ-Т» (г. Томск)
- ✓ АО «ИСС» (г. Красноярск)
- ✓ ОАО «НИИ Полупроводниковых приборов» (НИИПП, г. Томск)
- ✓ ЗАО НПФ «Микран» (г. Томск)
- ✓ ОАО «Октава» (г. Новосибирск)
- ✓ Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва), и др.

В 2009-2016 гг. было выполнено свыше 20 НИР и ОКР.

На 2017 г. запланирован объем НИОКР около 55 млн. руб.

Научно-исследовательская работа

Зарубежные заказчики и партнеры

- ✓ Исследовательский институт оптической и СВЧ связи XLIM Лиможского университета (Франция)
- ✓ Французское космическое агентство CNES (Франция)
- ✓ Голландский астрономический центр ASTRON (Нидерланды)
- ✓ СВЧ лаборатория Университета «Тор Вергата» (Италия);
- ✓ Компания Keysight Technologies (США)

Основные международные проекты

- ✓ Программное обеспечение для автоматизированного проектирования СВЧ МИС (INTAS, 3 проекта, 140 000 евро)
- ✓ СВЧ МИС для использования в гигантском радиотелескопе SKADS (ASTRON, Голландия)
- ✓ СВЧ МИС для систем космической связи (CNES, Франция)
- ✓ Высокоэффективный СВЧ усилитель мощности на основе GaN (Университет «Тор Вергата», Италия), и др.

Тематики текущих проектов (госбюджет)

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.»

«Разработка и исследование технологий проектирования и производства СВЧ приемопередающих модулей с цифровой обработкой сигналов для перспективных РЛС с многоканальными ЦФАР, а также других радиотехнических систем на основе ЭКБ высокой степени интеграции типа «Система на кристалле» (2015-2017 гг.) – **68 млн. руб.**

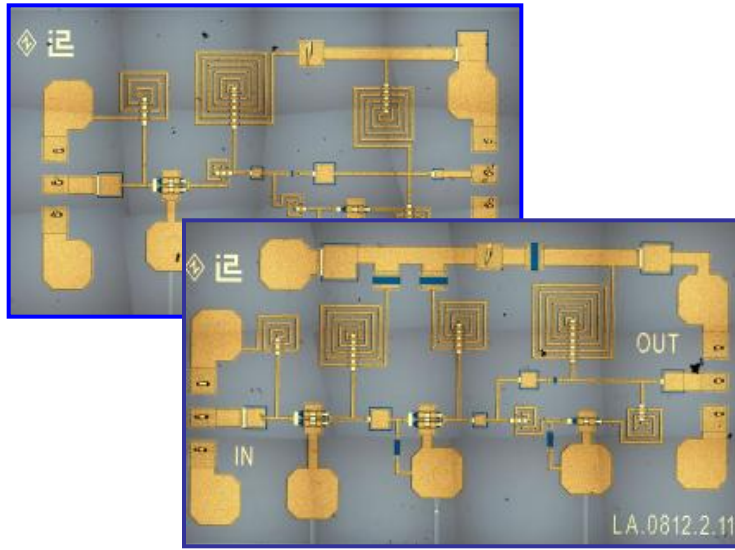
Конкурсный отбор научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и научных лабораторий организаций высшего образования Минобрнауки РФ

«Исследование и разработка элементов высокоинтегрированных приёмных модулей К-диапазона типа «система на кристалле», выполняемых по кремниевым наногетероструктурным технологиям, для систем связи» (2017-2019 гг.) – **45 млн. руб.**

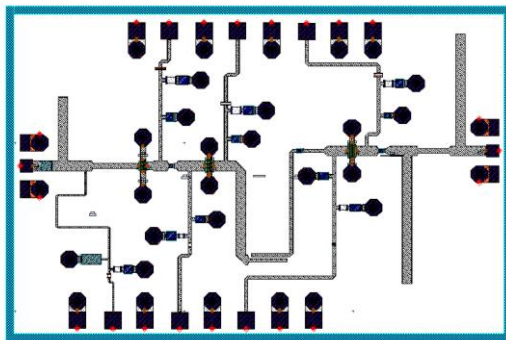
«Исследование методов построения интегрированных микроэлектронных и радиофотонных устройств на базе гетероструктурных технологий для перспективных межвидовых комплексов локации, навигации и связи с многоканальными фазированными антенными решётками» (2017-2019 гг.) – **43,5 млн. руб.**

СВЧ МИС на основе GaAs технологий

Монолитные маломощные усилители (МШУ) X- и Ka-диапазонов на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии ИСВЧПЭ РАН



Совместно с ИСВЧПЭ РАН разработаны МИС двухкаскадного и трехкаскадного МШУ диапазона 8-12 ГГц с параметрами на уровне зарубежных коммерческих образцов (0,15 мкм GaAs pHEMT-технология).



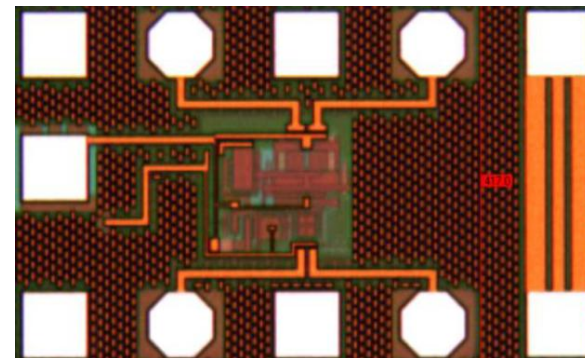
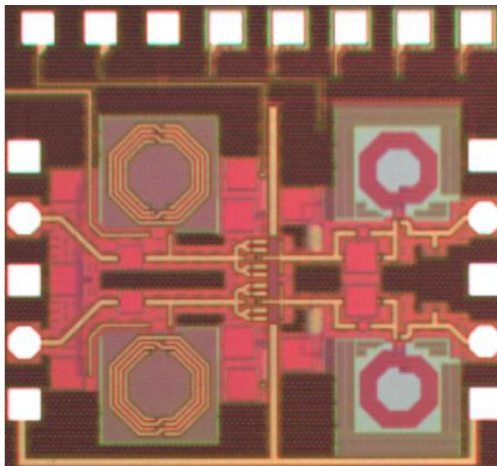
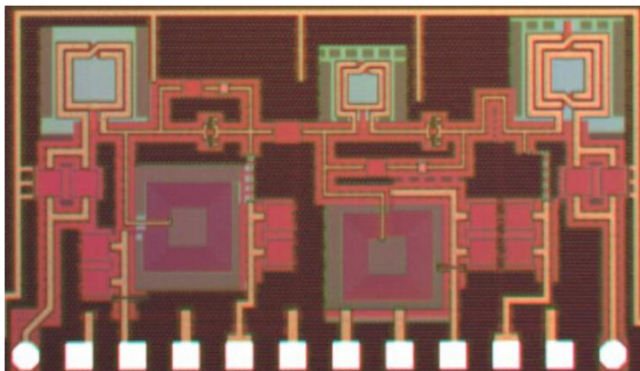
Совместно с Французским космическим агентством CNES разработана МИС МШУ диапазона 27-31 ГГц с коэффициентом шума 1,7 дБ и фильтрующими свойствами (0,13 мкм GaAs mHEMT-технология).

Автоматический синтез согласующе-фильтрующих цепей МШУ выполнен с помощью программы gMatch.

СВЧ МИС на основе SiGe технологий

Широкополосные усилители мощности (УМ) диапазона 1-5 ГГц и усилитель промежуточной частоты (УПЧ) диапазона 50-500 МГц для ППМ

Фотографии МИС усилителей

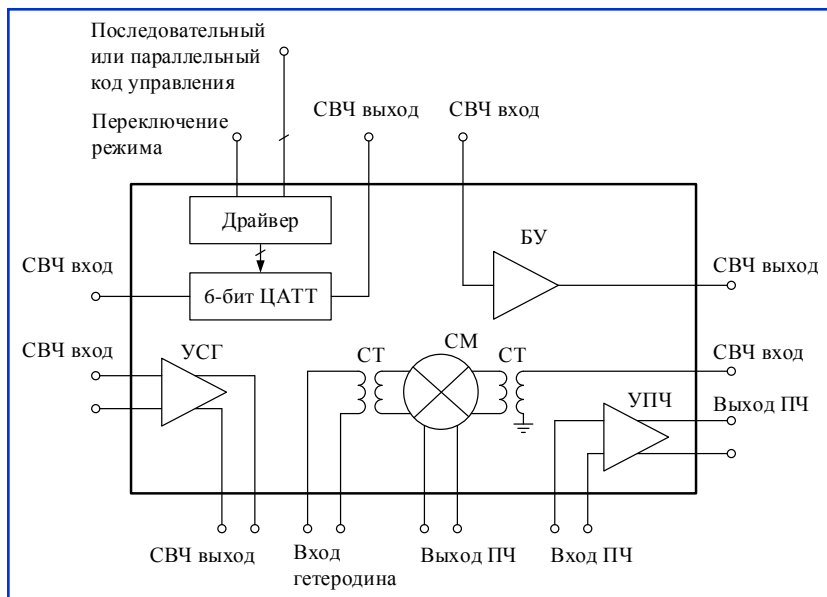


Параметры усилителей (измерения)

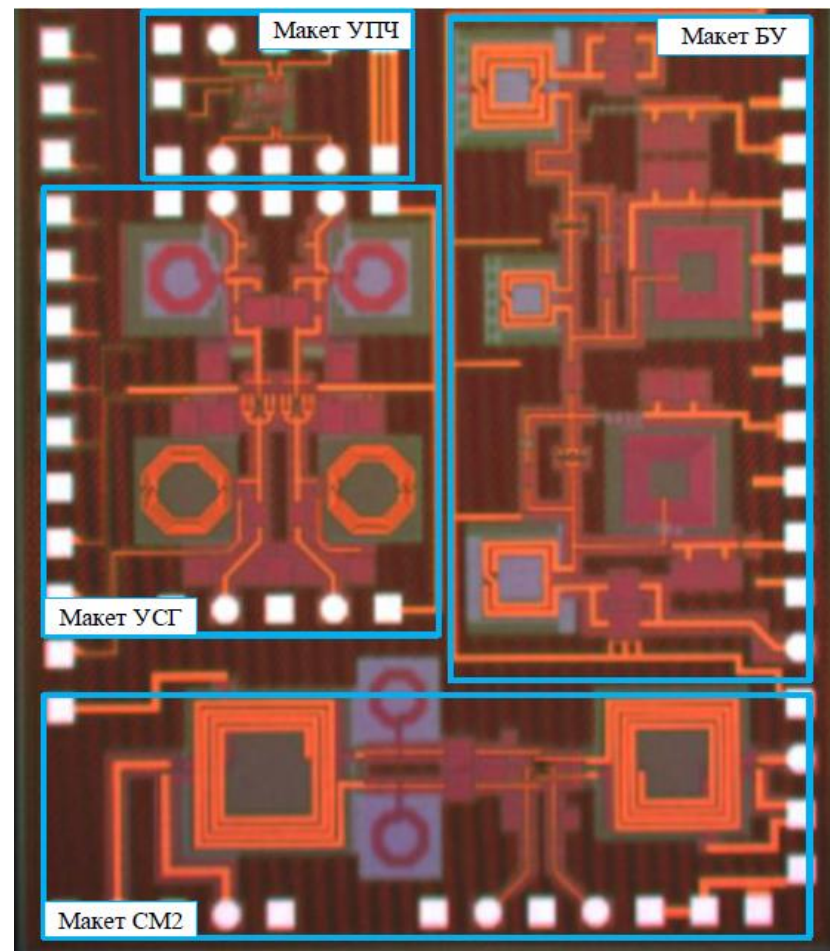
Вариант МИС	Δf , ГГц	G , дБ	$ S_{11} $, дБ $ S_{22} $, дБ	$P_{\text{вых } 1\text{дБ}}$, дБм	Размер, мм ²
УМ на CMOS транзисторах (недифференциальный)	1-5	16,5..18	-11; -8	13	1,9×0,95
УМ на HBT транзисторах (дифференциальный)	1,5-5	14,5..15,5	-10..-14; -6..-9	17..18	1,2×0,9
УПЧ (дифференциальный)	10-500	33..34	-21; -22	11	0,5×0,7

Разработка МИС широкополосного тракта для многоканальных приемо-передатчиков L-, S- и C-диапазонов по принципу «система на кристалле» (СНК)

Структурная схема тестового кристалла СнК-2



Фотография тестового кристалла СнК-2 (2,7x2,25 мм²)

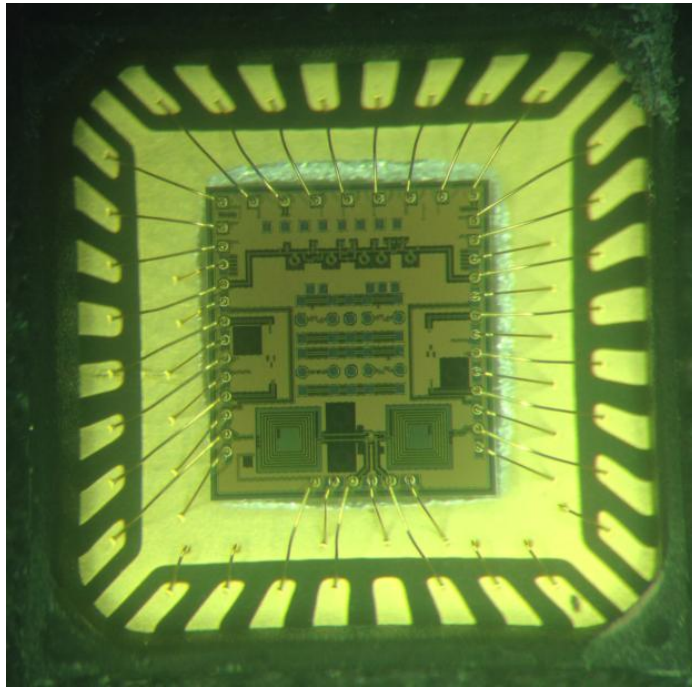


Тестовый кристалл СнК-2 содержит сложные функциональные блоки, используемые в приемной и передающей частях многоканальных приемо-передающих модулей L-, S- и C-диапазонов с ЦОС.

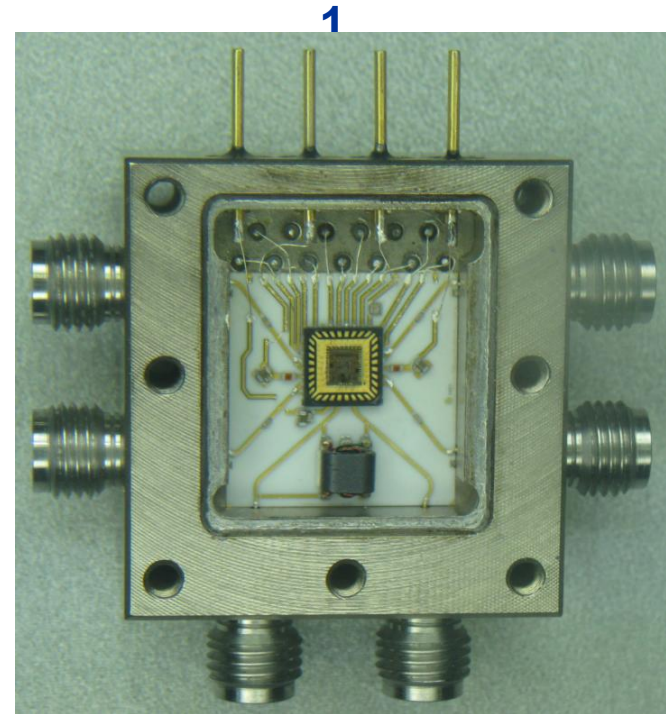
Состав СнК-2: смеситель СМ-2, буферный усилитель (БУ), усилитель сигнала гетеродина (УСГ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ), ЦАТТ-2, схема управления.

Разработка МИС широкополосного тракта для многоканальных приемо-передатчиков L-, S- и C-диапазонов по принципу «система на кристалле»

Тестовый кристалл СнК-1 в корпусе



Испытательный модуль с тестовым кристаллом СнК-1



Применение: ППМ для перспективных РЛС с цифровыми фазированными решетками (ЦФАР).

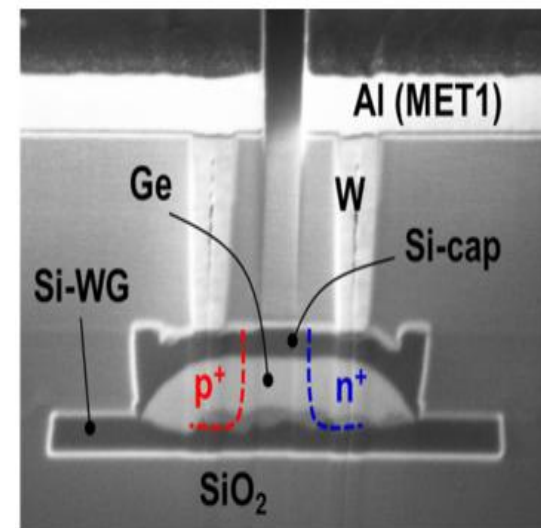
Технологии кремниевой нанофотоники

Перспективный подход: создание методами микроэлектронных технологий радиофотонных интегральных схем (РФИС), в которых на одной кремниевой ИС площадью в единицы мм² объединяются радиофотонные и электронные компоненты (нанофотоника, или Silicon Photonics).

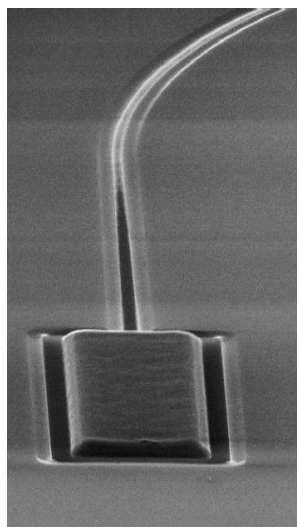
Достоинства:

- ✓ резкое уменьшение габаритов и веса;
- ✓ расширение полосы частот;
- ✓ надежность, технологичность и др.

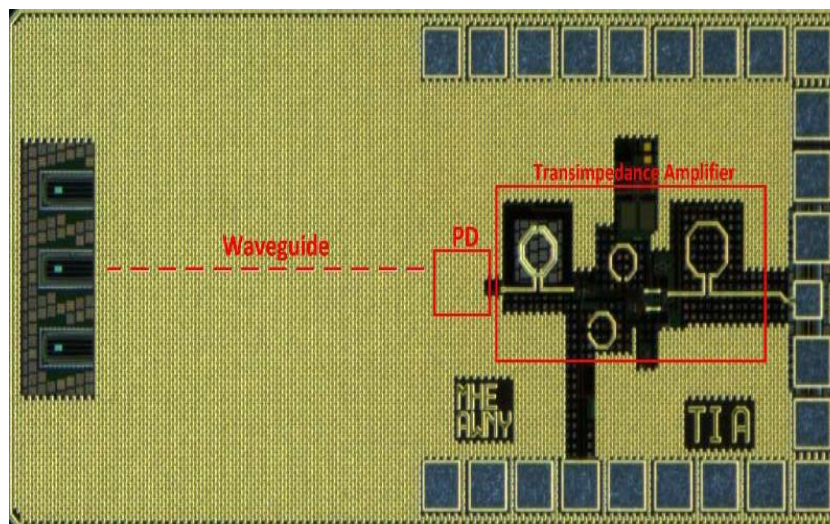
Сечение фотодиода



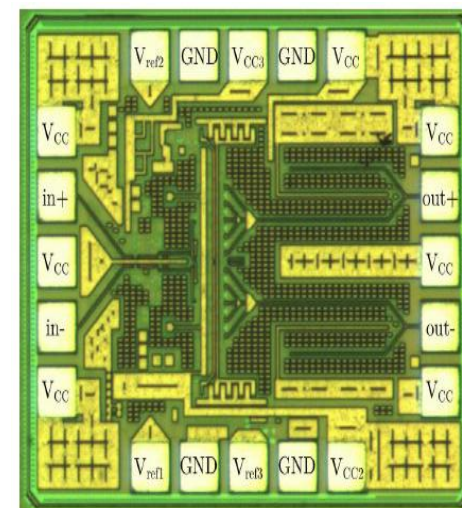
Фотодиод



Трансимпедансный усилитель, интегрированный с фотодиодом ($\Delta f=53$ ГГц, компания INP)

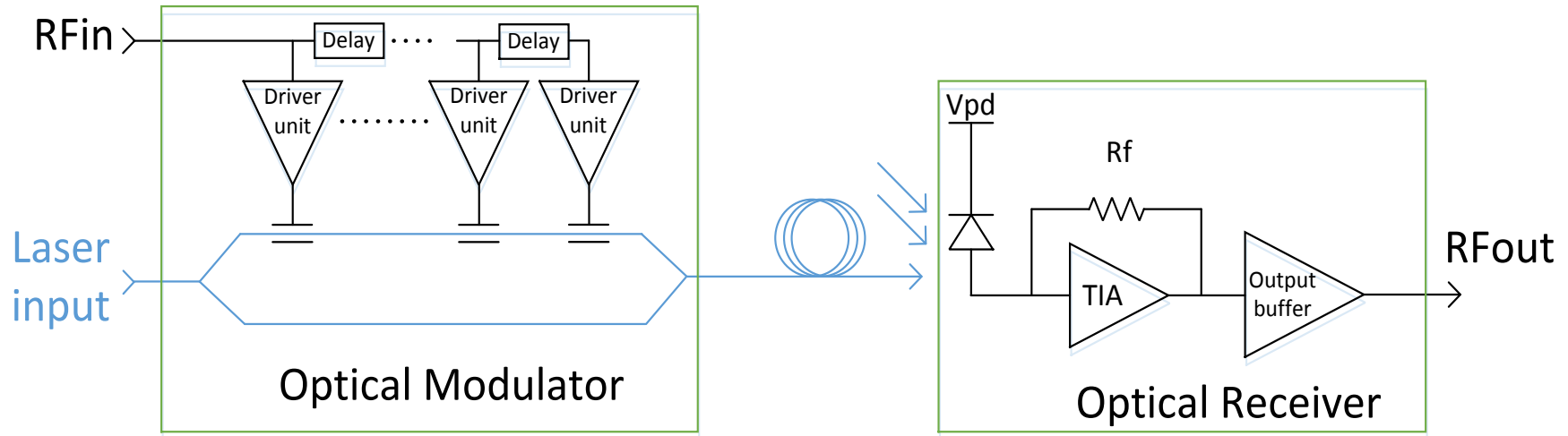


Драйвер модулятора ($\Delta f=40$ ГГц)



Разработка радиофотонных ИС приемника и передатчика на основе SiGe технологии

Структурные схемы радиофотонного передатчика и приемника



Радиофотонный приемник и передатчик предполагается выполнить полностью на интегральной SiGe технологии компании IHP.

Состав передающей РФИС (оптический модулятор): модулятор Маха-Цендера, драйвер модулятора, линии задержки.

Состав приемной РФИС: оптический волновод, фотодиод, трансимпедансный усилитель, выходной буферный усилитель.

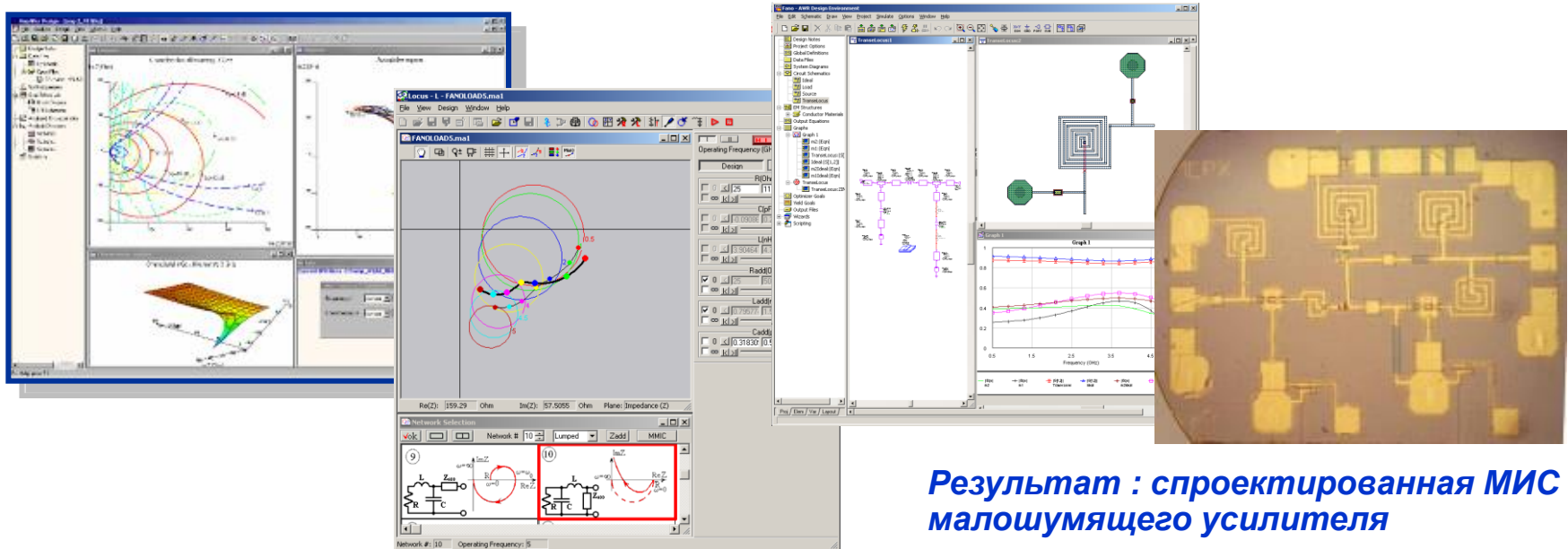
Технические характеристики:

- Полоса ВЧ сигнала: >20 ГГц.
- Оптический диапазон: $\lambda = 1550$ нм (лазер внешний).
- Чувствительность фотодиода: 1 А/Вт.
- Темновой ток фотодиода: 100 нА при $V_{pd} = 1$ В, 400 нА при $V_{pd} = 2$ В.
- Суммарная площадь РФИС: 10-12 мм².

Интеллектуальная система автоматизированного проектирования СВЧ МИС

В НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР разрабатывается интеллектуальная система автоматизированного проектирования СВЧ МИС. Она позволяет генерировать схемы и топологии устройств на основе принципов искусственного интеллекта.

Система разрешает повысить производительность труда проектировщиков.



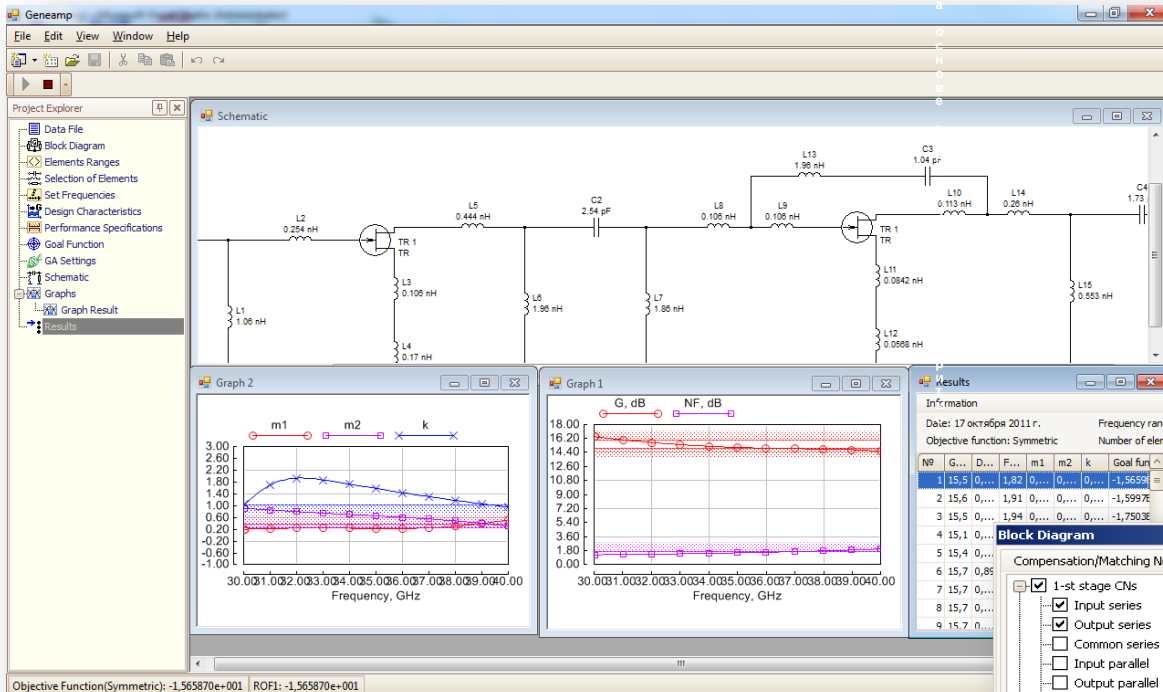
Результат : спроектированная МИС маломощного усилителя

В России и за рубежом отсутствует программное обеспечение с аналогичными возможностями.

GENEAMP – Программа синтеза СВЧ линейных и малошумящих усилителей (в разработке)

- ✓ Высокое качество и практическая реализуемость усилителей
- ✓ Автоматический выбор типов (размеров) и режимов транзисторов
- ✓ Быстрота проектирования
- ✓ Простота применения
- ✓ Любое число каскадов

Выбор структурной схемы усилителя



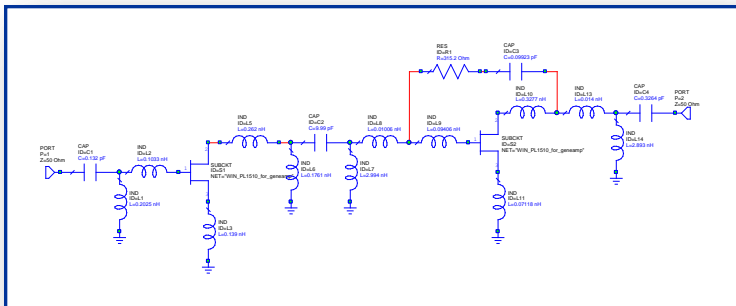
Принципиальная схема и частотные характеристики усилителя

The 'Block Diagram' dialog box is shown, allowing the user to select the structure of the amplifier. It includes sections for 'Compensation/Matching Network', 'Elements Type', 'Network Options', 'LC Resonators', 'Two-element section as branch oneport', and 'Matching Network Type'. The 'Block Diagram' section shows a schematic with blocks for INPUT MN, 1-ST STAGE, INTERSTAGE MN, 2-ND STAGE, and OUTPUT MN. The 'Matching Network Type' section has radio buttons for 'Synthesized', 'Gain optimized (Gp max)', and 'Noise optimized (F min)'. The 'Network Options' section has checkboxes for 'Low-pass', 'High-pass', 'No series capacitors', 'No shunt inductors', and 'No short-circuit stubs'. The 'LC Resonators' section has checkboxes for 'No shunt resonators', 'No series resonators', and 'Resonator frequency below/above pass bound'. The 'Two-element section as branch oneport' section has a checkbox for 'Use RC and RL as branch oneports'. The 'Compensation/Matching Network' section has checkboxes for '1-st stage CNs', 'Input series', 'Output series', 'Common series', 'Input parallel', 'Output parallel', 'Series feedback', 'Parallel feedback', '2-nd stage CNs', and 'Matching Networks'. The 'Number of elements' and 'Number of branches' are set to 1. The 'Apply for all MNs', 'Apply for all CNs', and 'Apply for all stages' buttons are visible.

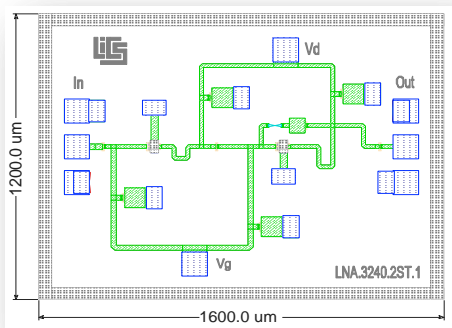
Программа позволяет на основе генетического алгоритма автоматически генерировать несколько вариантов принципиальных схем СВЧ транзисторных усилителей по требованиям к комплексу характеристик.

GENEAMP – Пример проектирования монолитного МШУ диапазона 32-40 ГГц

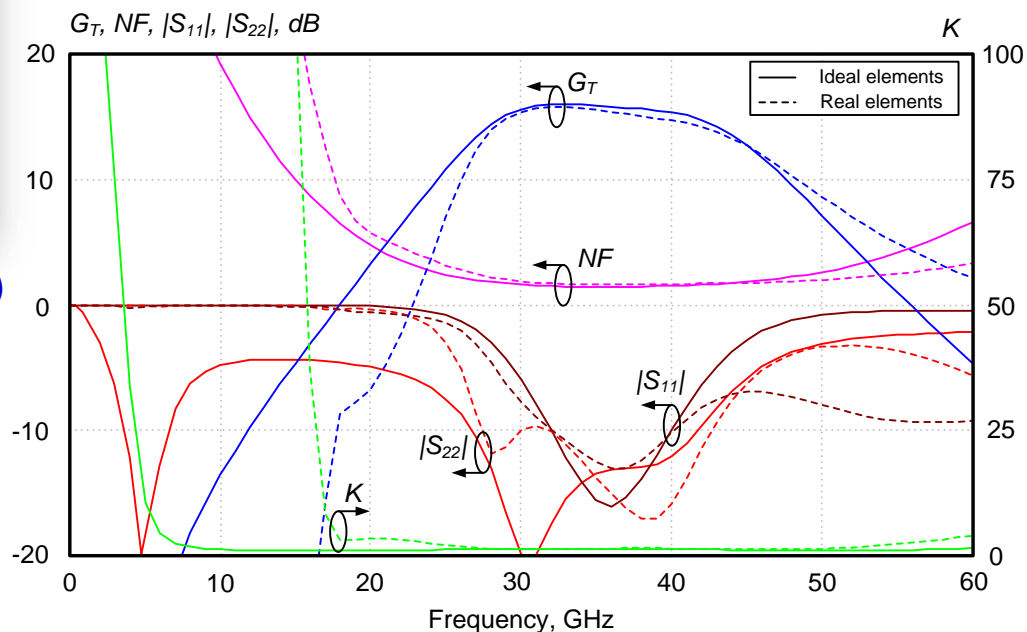
Автоматически сгенерированная схема МШУ



Топология МИС МШУ (размер 1,6x1,2 мм)



Частотные характеристики МШУ (моделирование)



Параметры МИС МШУ находятся на уровне лучших зарубежных образцов:

Характеристики	Диапазон частот, GHz	G, dB	ΔG , dB	NF, dB	$ S_{11} $	$ S_{22} $	Время синтеза, мин:сек
Требования	32–40	15,5	0,5	1,5	0,33	0,33	-
Результаты синтеза		15,46	0,451	1,54	0,245	0,233	21:28

Магистерская программа – ТУСУР

Подготовка кадров

Обучение ведут преподаватели высшей квалификации, имеющие опыт практических разработок, в числе которых 2 доктора и 7 кандидатов наук.

Реализована цепочка подготовки кадров:

Магистратура → аспирантура → кандидат наук, ведущий специалист и (или) преподаватель.

Подготовлено 11 кандидатов наук.

5 сотрудников получили звания Лауреатов Томской области в сфере науки и образования

В 2016 г. 5 сотрудников получили стипендии Президента РФ.

Контактная информация

*Руководитель магистерской программы –
Леонид Иванович Бабак*

Зам. директора НОЦ «Нанотехнологии», д.т.н., проф. каф. КСУП.

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
(ТУСУР).

634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Телефон: +7(3822) 414-717, +7-960-969-91-52

E-mail: leonid.babak@mail.ru