

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

УДК 621.396.33:528.8

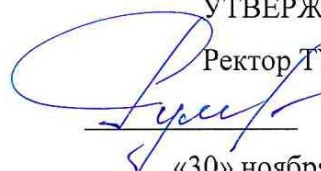
Рег. № АААА-А19-119121190007-0

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ТУСУР

Рулевский В.М.

«30» ноября 2020 г.



ОТЧЕТ

по теме: «ПОДДЕРЖКА И РАЗВИТИЕ ЦЕНТРА КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ  
ИМПУЛЬС (ТУСУР) НАУЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПО НАПРАВЛЕНИЮ  
"ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБОТКА И ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МИКРО - И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, УСТРОЙСТВ И МОДУЛЕЙ" ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
РЕАЛИЗАЦИИ ПРИОРИТЕТОВ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ».  
НАЗВАНИЕ ЭТАПА: РАСШИРЕНИЕ ПЕРЕЧНЯ И КОМПЛЕКСНОСТИ ОКАЗЫВАЕМЫХ  
УСЛУГ, ВЫПОЛНЕНИЕ КОМПЛЕКСА УСЛУГ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ,  
РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
(заключительный)

Книга 1

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г.

(внутренний номер соглашения 05.621.21.0029)

Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0029

Руководитель проекта

д.т.н., главный научный сотрудник,




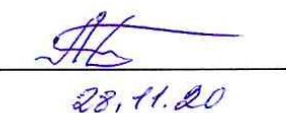
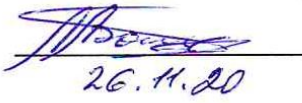
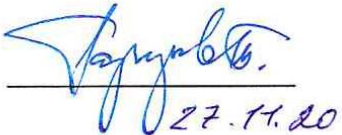
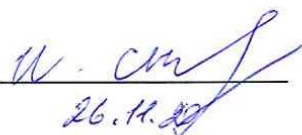
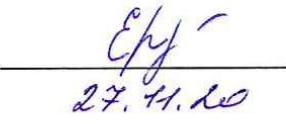
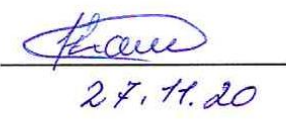
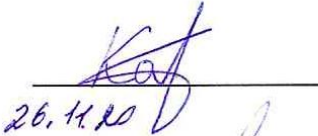
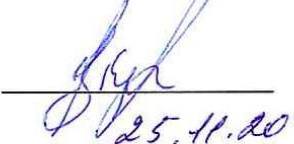
директор ЦКП «Импульс»


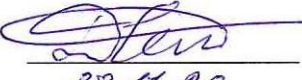

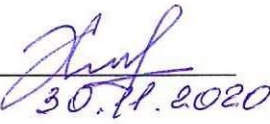



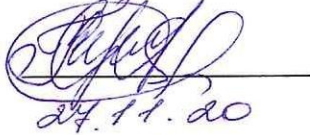
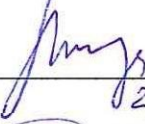


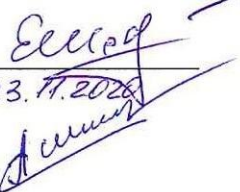



Н.Д. Малютин

Томск 2020

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники		
Руководитель проекта, главный научный сотрудник, директор НИИ СЭС докт. техн. наук	 28.11.20	Малютин Н.Д. (введение, разделы 1-11, ПРИЛОЖЕНИЯ А-У)
Исполнители:		
Инженер НОЦ НТ	 28.11.20	Алькова М.А. (разделы 3, 8, ПРИЛОЖЕНИЯ К, П, Р)
Мл. научн. сотр. СКБ «Смена» канд. техн. наук	 29.11.20	Артищев С.А. (разделы 1, 4)
Директор НИИ МЭС, профессор каф. КСУП докт. техн. наук	 28.11.20	Бабак Л.А. (разделы 1, 5, 7, 10)
Ст. науч. сотр. СКБ «Смена»	 26.11.20	Бомбизов А.А. (разделы 1, 5, 7, 10)
Гл. науч. сотр. зав. каф. ТУ, докт. техн. наук	 27.11.20	Газизов Т.Р. (разделы 5, 7)
Доцент каф. РЭТЭМ, канд. хим. наук	 26.11.20	Екимова И.А. (раздел 1, 5)
Мл. научн. сотрудник НИИ СЭС, канд. техн. наук	 27.11.20	Ерофеев Е.В. (раздел 4, 7)
Лаборант	 27.11.20	Иванчикова Е.А. (раздел 7, ПРИЛОЖЕНИЕ Л)
Доцент каф. КИПР, канд. техн. наук	 26.11.20	Карабан В.Н. (разделы 1, 9)
Инженер «Нанотехнологии»	НОЦ  25.11.20	Кулинич И.В. (разделы 1, 4, 6, 7)


Лаборант	 27.11.2020	Малютин Г.А. (разделы 2, 7)
Младший научный сотрудник	 28.11.20	Миненко Д.Е. (раздел 2, ПРИЛОЖЕНИЯ Б, В)
Старший научн. сотрудник НОЦ «НОНЛТ», канд. физ.-мат. Наук	 30.11.20	Перин А.С. (разделы 4, 7)
Профессор, докт. техн. наук	 30.11.2020	Семенов Э.В. (раздел 4)
Профессор каф. КСУП, докт. техн. наук	 23.11.2020	Сычев А.Н. (раздел 5)
Младший научн. сотрудник НИИ СЭС	 27.11.2020	Тренкаль Е.И. (разделы 1, 5)
Техник I категории	 28.11.20	Труфанова А.С. (раздел 1)
Техник I категории	 27.11.20	Труфанова Н.С. (раздел 1)
Заведующий кафедрой РЭТЭМ докт. техн. наук	 25.11.2020	Туев В.И. (разделы 1, 2, 6)
Лаборант	 23.11.2020	Чепко Т.А. (раздел 7)
Доцент каф. КСУП, канд. техн. наук	 29.11.20	Шеерман Ф.И. (раздел 1, 6, 10)
Директор НОЦ «Нанотехнологии», канд. техн. наук	 23.11.2020	Шестериков Е.В. (разделы 1, 4, 10)
Инженер	 26.11.2020	Шкарупо А.П. (разделы 1, 2, ПРИЛОЖЕНИЕ А)

Аспирант

  
30.11.2020

Шарифов И.Д.  
(раздел 1, ПРИЛОЖЕНИЕ  
А)

Нормоконтролер

  
30.11.2020

Штенина Л.С.  
(все разделы)

## РЕФЕРАТ

Отчет книга 1: 404 с., 262 рис., 96 табл., 83 источника, книга 2: 284 с. 18 приложений  
ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ И МИКРОСХЕМ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В отчете по этапу 2, заключительному, нашли отражение результаты работ, выполненных сотрудниками ТУСУР, работающих с применением оборудования ЦКП «Импульс» и объединенных по четырем направлениям функционирования ЦКП: технологическое обеспечение работ в области нано - микроэлектроники и радиофотоники; измерения на СВЧ; аддитивные технологии; импульсные измерения.

Выполнены следующие работы второго этапа за счет средств гранта:

1. Дооснащение ЦКП современным дорогостоящим научным и метрологическим оборудованием стоимостью свыше 1 млн. рублей.
  2. Разработка и освоение новых методик исследований и/или измерений, в том числе с применением УНУ.
  3. Доработка сайта ЦКП в соответствии с требованиями.
  4. Проведение работ по реализации стратегии развития ЦКП по развитию технологий и методов измерений.
  5. Проведение исследований по заказам внутренних и внешних пользователей услуги ЦКП.
  6. Реализация мероприятий по подготовке кадров и развитию компетенций.
- Работы второго этапа за счет внебюджетных средств:
7. Подготовка публикаций по тематике исследований ЦКП и заявок на РИД.
  8. Участие в мероприятиях по рекламе деятельности ЦКП и УНУ.
  9. Составление перечня и закупка вспомогательного оборудования и ПО.
  10. Разработка технических требований на характеристики вновь осваиваемой технологии изготовления и прототипирования СВЧ ИС.

На втором этапе в связи с возникшими затруднениями непрерывного использования оборудования ЦКП этого периода по не зависящим от исполнителей причинам была усилена аналитическая работа, направленная на разработку технических заданий, новых проектов, обзоров. Этому способствовала деятельность Министерства науки и высшего образования, Российского научного фонда, а также запросы крупных и малых предприятий. В результате удалось компенсировать потери «машинного» времени разработкой новых проектов, к реализации которых привлекаются ресурсы ЦКП «Импульс».

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Радиофотоника** (*microwave photonics*) – объединяющий обширный комплекс областей науки и техники, связанных главным образом с проблемами передачи, приёма и преобразования сигнала с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона и фотонных приборов и систем.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Приведен перечень обозначений и сокращений, применяемых в данном отчете о ПНИЭР.

<b>ИС</b>	– интегральная схема
<b>КШ</b>	– коэффициент шума
<b>ЛЧМ</b>	– линейно-частотно модулированный (сигнал)
<b>МИС</b>	– монолитная интегральная схема
<b>МСТ</b>	–микросистемная техника
<b>МЭС</b>	– микроэлектронные системы
<b>МЭМС</b>	– микроэлектромеханические системы
<b>СВЧ</b>	– сверхвысокие частоты
<b>УНУ</b>	– уникальная научная установка
<b>ЦКП</b>	– центр коллективного пользования
<b>ЭЖД</b>	– эскизная конструкторская документация
<b>ЭМ</b>	– электромагнитная (волна)
<b>ЭМС</b>	– электромагнитная совместимость
<b>ЭОМ</b>	– электрооптический модулятор
<b>ЭПД</b>	– эскизная программная документация

## СОДЕРЖАНИЕ

### Книга 1

ВВЕДЕНИЕ .....	14
1 Дооснащение ЦКП современным дорогостоящим научным и метрологическим оборудованием стоимостью свыше 1 млн. рублей.....	17
1.1 Освоение и применение закупленного в 2019 г. оборудования.....	17
1.1.1 Планетарная шаровая мельница PULVERISETTE 7 Premium Line .....	17
1.1.2 Лазерный анализатор размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec .....	26
1.1.3 Электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO .....	34
1.1.4 Профилометр оптический 3D .....	40
1.1.5 Анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров .	44
1.1.6 Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A .....	61
1.1.7 Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq .....	65
1.1.8 Установка плазмохимического травления STE ICP200E SemiTEq .....	69
1.2 Дооснащение ЦКП «Импульс» в 2020 году .....	75
1.2.1 Система прецизионного шнекового дозирования с набором аксессуаров.....	76
1.2.2 Кластер FDM, SLA и композитной 3D печати (общее описание) .....	84
1.2.2.1 Стереолитографический 3D-принтер.....	85
1.2.2.2 3D-принтер для композитной печати с компьютерной системой проектирования и управления .....	86
1.2.2.3 Крупноформатный FDM 3D-принтер Picaso Designer XL .....	87
1.2.3 Установка плазмохимического осаждения диэлектриков в плазме индуктивного и емкостного разрядов и система подачи и утилизации газов установок плазмохимического травления и осаждения .....	89
1.2.4 Контрольно-измерительная аппаратура СВЧ .....	90
Выводы по разделу 1 .....	97
2. Разработка и освоение новых методик исследований и/или измерений, в том числе с применением УНУ .....	99
2.1 Методика зондовых измерений СВЧ интегральных микросхем.....	100
2.2 Методика проведения испытаний интегральных микросхем на отладочных платах .....	103
2.3 Разработка методики измерения относительной диэлектрической проницаемости материалов подложек в широкой полосе частот.....	109
2.4 Методика измерения вязкости растворов (чернил).....	116
Выводы по разделу 2 .....	119
3. Доработка сайта ЦКП.....	121

Выводы по разделу 3 .....	131
4. Проведение работ по реализации стратегии развития ЦКП по развитию технологий и методов измерений.....	132
4.1 Формирование проектов РФ «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня» .....	132
4.1.1 Квантовый и баллистический электронный транспорт в полупроводниковых наноструктурах с усиленным электрон-электронным взаимодействием.....	132
4.1.2 Статические и динамические наноструктуры в кристаллическом углероде для приложений электроники и фотоники .....	132
4.1.3 Разработка технологий модифицирования поверхности полимерных пьезоэлектрических материалов методом осаждения ультратонких покрытий для приложений реконструктивно-восстановительной хирургии .....	133
4.1.4 Разработка научных основ создания субмикроскопического нанооптоэлектро-механического акселерометра .....	134
4.1.5 Влияние субструктуры на термоэлектрические свойства нанокристаллических композиционных материалов на основе халькогенидов металлов .....	134
4.1.6 Моделирование и исследование интегрального радиодифракционного когерентного приемника и его элементов на основе полупроводниковых технологий кремний-на-изоляторе, кремний-германий и фосфид индия для высокоскоростных систем передачи данных до 400 Гб/с.....	135
4.1.7 Оптические приемопередатчики на основе фотонно-электронных интегральных схем на платформе InP для перспективных систем связи 5G/6G и радиодифракционной фотоники .....	135
4.1.8 Разработка технологии изготовления многослойных печатных плат на алюминиевых основаниях для устройств электронной техники, получаемых посредством 3D печати с применением создаваемых высокотеплопроводящих диэлектрических слоев из низкотемпературной керамики с токопроводящими топологиями.....	135
4.1.9 Решение задач температурной стабилизации объектов в замкнутом объеме инертного газа с применением аддитивных технологий .....	136
4.1.10 Разработка физико-химических основ создания многофункциональных оптоэлектронных устройств на основе пленок ниобата лития.....	136
4.1.11 Физико-технологические основы создания модуляторов лазерного излучения по схеме Маха-Цендера на базе эпитаксиальных Al <sub>0.5</sub> B <sub>0.5</sub> -гетероструктур .....	137
4.2 Расширение круга пользователей услугами «ЦКП «Импульс» .....	137
4.3 Разработка специализированного программного обеспечения.....	153
4.4 Разработка средств измерений по направлению «Нелинейная рефлектометрия».....	154
Выводы к разделу 4 .....	156



5. Проведение исследований по заказам внутренних и внешних пользователей услугами ЦКП .....	157
5.1 Внутренние пользователи .....	157
5.1.1 Лаборатория Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости .....	159
5.1.2 Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники кафедры Физическая Электроника.....	161
5.1.2.1 Исследование плазмостойкости диэлектрических и металлических пленок.....	162
5.1.2.2 Разработка процесса плазмохимического травления InP/InGaAsP гетероструктур.....	166
5.1.3 Центр НТИ «Технологии беспроводной связи и Интернета вещей» (со Сколковским институтом науки и технологий) .....	169
5.1.3.1 Имитационная модель передающего тракта базовой станции 5G .....	170
5.1.3.2 Моделирование функциональности URLLC сетей 5G на основе сетевого симулятора NS-3 .....	173
5.1.3.3 Разработка программ дополнительного профессионального образования.....	175
5.1.4 Лаборатория печатных технологий кафедры Конструирование узлов и деталей радиоаппаратуры.....	177
5.1.5 Лаборатория интеллектуальных компьютерных систем .....	180
5.1.6 НИИ Систем электрической связи .....	180
5.2 Расширение перечня и комплексности оказываемых услуг, а также круга пользователей для обеспечения максимальной загрузки оборудования ЦКП и обеспечения эффективного участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации .....	185
Выводы по разделу 5 .....	188
6. Реализация мероприятий по подготовке кадров и развитию компетенций.....	189
6.1 Семинар АО «НПФ «Микран» по автоматизации измерения векторных параметров .....	189
6.2 Семинар Keysight Technologies.....	190
6.3 Подготовка диссертаций и выполнение исследований.....	190
Выводы к разделу 6 .....	194
7. Подготовка публикаций по тематике исследований ЦКП и заявок на РИД.....	196
7.1 Публикации .....	196
7.2 Результаты интеллектуальной деятельности .....	214
Выводы по разделу 7 .....	222
8. Участие в мероприятиях по рекламе деятельности ЦКП и УНУ .....	223
8.1 Интернет .....	223
8.2. Баннер ЦКП «Импульс» на сайте ТУСУР.....	227

8.3 Участие в симпозиумах и конференциях с докладами, включающими ссылки на использование оборудования ЦКП «Импульс» .....	227
Выводы к разделу 8 .....	228
9. Составление перечня и закупка вспомогательного оборудования и ПО ..	229
Выводы по разделу 9 .....	233
10. Разработка технических требований на характеристики вновь осваиваемой технологии изготовления и прототипирования СВЧ ИС .....	234
10.1. Исследование вариантов построения и моделирование интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрактов Ку-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN .....	234
10.1.1 Состояние СВЧ электронной компонентной базы и полупроводниковых технологий изготовления приемопередающих модулей в России и за рубежом .....	234
10.1.2 ЭКБ и технологии изготовления СВЧ приемопередающих модулей.....	237
Технологии СВЧ ГИС .....	238
Технологии СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС.....	238
Технологии СВЧ МИС и многокристальных модулей .....	239
Технология «Система на кристалле» .....	240
10.1.3 Технологии высокоинтегрированной сборки и компоновки СВЧ приемопередающих модулей .....	241
10.1.4 Основные особенности технологических процессов Si/SiGe/GaAs/GaN .....	244
10.1.5 Технологии на основе кремния (КМОП) и соединения кремний-германий (БиКМОП).....	246
10.1.6 Кремниевые КНИ процессы на полуизолирующих подложках.....	256
10.1.7 Технологические процессы на базе полупроводниковых соединений AlB5263	
10.2 Исследование вариантов построения радиотракта и проектирование отдельных узлов .....	270
10.2.1 Малошумящие усилители .....	270
Малошумящий усилитель на основе 0,13 мкм КНИ технологии X-FAB.....	274
МШУ на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии WIN .....	283
10.2.2 Анализ воздействия дестабилизирующих факторов на МШУ .....	285
Однокаскадный МШУ на основе 0,13 мкм КНИ (X-FAB) .....	285
Двухкаскадный МШУ на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT (WIN PD2500).....	287
10.2.3 Анализ технических решений по обеспечению прочности комплектов МИС к воздействующей мощности.....	287
10.2.4 Усилители мощности.....	293
Разработка УМ до 5 Вт на основе GaN технологии .....	294

Разработка УМ до 5 Вт на основе GaAs технологии.....	299
Разработка УМ до 100 мВт .....	313
10.2.5 Анализ воздействия дестабилизирующих факторов на УМ.....	317
УМ до 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии (WIN) .....	317
УМ до 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN).....	318
УМ до 100 мВт на основе КНИ технологии.....	323
10.2.6 Анализ реализации детектора падающей и отраженной мощности .....	324
10.2.7 Модулятор питания .....	328
10.2.8 Анализ вариантов реализации УМ с высоким КПД.....	331
10.2.9 Управляющие устройства .....	335
Пассивный 6-битный ФВ .....	335
Активный 6-битный ФВ.....	337
Формирователь квадратурных сигналов (ФКС) .....	338
Векторные фазовращатели.....	339
Анализ воздействия дестабилизирующих факторов на ФВ .....	341
Влияние технологического разброса .....	342
Расчет 16 дБ секции ЦАТТ .....	342
10.2.10 Разработка драйвера управления переключателями на основе PIN-диодов и GaAs pHEMT транзисторов.....	344
10.2.11 СВЧ переключатели.....	347
Разработка СВЧ переключателей на основе 0,25 мкм GaAs технологии.....	347
SPST СВЧ переключатели на основе GaAs PD2500.....	347
SPDT СВЧ переключатели на основе GaAs PD250.....	350
10.2.12 Разработка СВЧ переключателей на основе 0,13 мкм КНИ.....	355
10.2.13 Выводы по СВЧ переключателям .....	357
10.3 Пассивные устройства.....	359
10.3.1 Симметрирующие устройства .....	359
СТ Маршанда с боковой связью.....	359
СТ Маршанда с лицевой связью.....	360
СТ на основе связанных катушек индуктивности с боковой связью.....	361
СТ с лицевой связью.....	362
СТ на связанных линиях .....	363
10.3.2 Сумматоры/Делители .....	365
4-х канальный делитель мощности Вилкинсона на сорседоточенных элементах .....	365
2-х и 4-х канальный дифференциальный делитель мощности.....	366
10.4 Генераторы управляемые напряжением .....	370
10.5 Смесители .....	373
Оценка характеристик интегральных смесителей на примере кремниевых технологий.	
Сравнение активных и пассивных СМ.....	373

Разработка квадратурных смесителей .....	378
Квадратурный смеситель на основе 0,13 мкм КНИ технологии .....	378
Квадратурный смеситель на основе 0,5 мкм GaAs НЕМТ технологии .....	385
Выводы по разделу 10 .....	390
<b>11 Значения показателей результатов использования гранта .....</b>	<b>392</b>
11.1 Удельный вес лабораторного и аналитического оборудования в возрасте до 5 лет в общей стоимости лабораторного и аналитического оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием .....	392
11.2 Число организаций-пользователей научным оборудованием центра коллективного пользования .....	392
11.3 Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей, выполняющих работы с использованием оборудования ЦКП .....	392
11.4 Объем привлеченных внебюджетных средств .....	392
11.5 Выполнение п.2.11 Технического задания «Увеличение доли внешних заказов услуг и работ ЦКП» .....	393
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>394</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>397</b>
 <b>Книга 2</b>	
ПРИЛОЖЕНИЕ А Программное обеспечение Profilm оптического профилометра из состава УНУ .....	408
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Методика зондовые измерения СВЧ интегральной микросхем ИС1 .....	442
ПРИЛОЖЕНИЕ В Методика проведения испытаний интегральных микросхем ИС1 и ИС2 на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2 .....	457
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Лабораторные работы по современным технологиям и системам автоматизированного измерения на СВЧ .....	504
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Договор на оказание услуг .....	524
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Заявка на проведение научных исследований и/или оказание услуг .....	531
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Перечень выполняемых типовых работ и (или) оказываемых услуг .....	532
ПРИЛОЖЕНИЕ И Положение о Центре коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» .....	534
ПРИЛОЖЕНИЕ К Копии публикаций сотрудников лабораторий молодых ученых со ссылками на ЦКП «Импульс» .....	545
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Материалы конгресса 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020) .....	555
ПРИЛОЖЕНИЕ М Копия статьи «Особенности интерференции синфазных и противофазных волн» .....	566
ПРИЛОЖЕНИЕ Н Материалы доклада на симпозиуме по фундаментальным исследованиям электрических систем .....	575

ПРИЛОЖЕНИЕ О Перспективные измерительные платформы в области микроэлектроники, радиофотоники и систем телекоммуникации .....	579
ПРИЛОЖЕНИЕ П Копии публикаций сотрудников со ссылкой на ЦКП «Импульс» .....	593
ПРИЛОЖЕНИЕ Р Копии интернет-сообщений о работе ЦКП «Импульс».....	632
ПРИЛОЖЕНИЕ С Методика измерения вязкости .....	639
ПРИЛОЖЕНИЕ Т Пример Соглашения с внутренним пользователем услуг ЦКП .....	656
ПРИЛОЖЕНИЕ У Измерение параметров радиофотонного тракта .....	658

## ВВЕДЕНИЕ

Направления наиболее актуальных исследований, пересекающихся с целями образования ЦКП, в настоящее время просматриваются в программах конференций и форумов, проводимых как в России, так и за ее рубежами [1–6]. К таким направлениям относятся: цифровая сотовая сеть пятого поколения [7]; разработка комплексных решений с применением устройств радиофотоники и СВЧ узлов миллиметрового диапазона [8]; создание САПР, позволяющих проектировать приемно-передающие модули, включающие элементы радиофотоники и интегральные устройства СВЧ [9].

Разработчики аппаратуры космического и авиационного применения указывают на ряд особенностей современного развития миниатюризации [10]. Отмечается, что СВЧ устройства поддаются миниатюризации труднее, чем цифровые устройства. К ним относятся, прежде всего, приемно-передающие тракты, включающие различные классы устройств – маломощные и мощные усилители, преобразователи, генераторы, устройства перекрестного резервирования. Поэтому остается актуальной задача разработки гибридно-монолитных устройств СВЧ на базе осваиваемых и новых технологий [11–13], как направления на стыке гибридных интегральных схем и направления создания монолитных интегральных схем.

В настоящем отчете отражены результаты, полученные в ходе выполнения работ в соответствии с планом-графиком реализации проекта за счет бюджетных средств:

1. Проведено дооснащение ЦКП современным дорогостоящим научным и метрологическим оборудованием стоимостью свыше 1 млн. рублей.
2. Разработаны и освоены новые методики исследований и измерений, в том числе с применением УНУ.
3. Доработан сайт ЦКП в соответствии с требованиями к сайтам ЦКП.
4. Проведены работы по реализации стратегии развития ЦКП по развитию технологий и методов измерений в выбранных направлениях.
5. Получены новые результаты исследований по заказам внутренних и внешних пользователей услугами ЦКП.
6. Реализованы мероприятия по подготовке кадров и развитию компетенций сотрудников ЦКП.

Результаты второго этапа, полученные за счет внебюджетных источников:

7. Подготовлены публикации по тематике исследований ЦКП и заявки на РИД.
8. Проведены мероприятия по рекламе деятельности ЦКП и УНУ.
9. Составлен перечень и проведена закупка вспомогательного оборудования и ПО.
10. Разработаны технические требования на характеристики вновь осваиваемой технологии изготовления и прототипирования СВЧ ИС и других изделий.

Цель работы и перечень решаемых задач по проекту:

– развитие и глубокая модернизация технологического и научного оборудования действующего ЦКП "Импульс" исследовательско-технологического типа (далее – ЦКП) по направлению "Технологии, разработка и измерения СВЧ микро - и оптоэлектронных интегральных схем, устройств и модулей" в соответствии со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, в том числе в кооперации с ведущими отечественными и мировыми научными центрами, организациями и предприятиями;

– расширение перечня и комплексности оказываемых услуг, а также круга пользователей для обеспечения максимальной загрузки оборудования ЦКП и обеспечения эффективного участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, включая услуги по технологическим работам, быстрому прототипированию, проектированию и измерениям изделий кремниевой и АЗВ5 СВЧ микроэлектроники и радиофотоники, а также по продвижению аддитивных технологий изготовления СВЧ компонентов и узлов;

– обеспечение внедрения упрощенной модели доступа и использования оборудования ЦКП научными и образовательными организациями вне зависимости от их ведомственной принадлежности и формы собственности;

– развитие компетенций сотрудников ЦКП и заинтересованных организаций путем обучения студентов, магистрантов и аспирантов, проведения образовательных программ переподготовки, стажировок и семинаров для отечественных специалистов в области технологий, разработки и измерений СВЧ микро- и оптоэлектронных интегральных схем (ИС), устройств и модулей.

Отдельной важной задачей является предоставление услуг, современного оборудования, технологического, методического, метрологического и кадрового обеспечения новым лабораториям в период их начального развития и в последующем, а также имеющимся в г. Томске дизайн-центрам по разработке изделий СВЧ микроэлектроники, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, включая дизайн-центр "Микроэлектронные системы" НИИ микроэлектронных систем ТУСУР, дизайн-центры организаций АО "НПФ Микран", ООО "ЛЭМЗ-Т" и др. Этим подготавливаются условия для создания в соответствии с проектом Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. (Стратегия-2030) в Сибирском регионе (возможно, в г. Томске и, в том числе, на базе ТУСУР) центра технологических компетенций, регионального дизайн-центра и проектных команд, системы подготовки кадров технологов и проектировщиков в области СВЧ микроэлектроники.

В настоящем заключительном отчете отражены вопросы, решение которых начато на первом этапе выполнения проекта [14] и обозначено техническим заданием и планом-графиком по Соглашению № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г.



# **1 Дооснащение ЦКП современным дорогостоящим научным и метрологическим оборудованием стоимостью свыше 1 млн. рублей**

## **1.1 Освоение и применение закупленного в 2019 г. оборудования**

В 2020 г. осваивалось закупленное в 2019 г. оборудование при выполнении работ, как для внутренних, так и внешних пользователей. Приводимые ниже описания используются в ЦКП в процессе знакомства пользователей услугами, при обучении сотрудников, студентов и аспирантов. Для работы на установках ЦКП привлекаются назначенные сотрудники и магистранты, прошедшие предварительное обучение.

В рамках работ по оснащению технологической базы ЦКП «Импульс» на первом этапе было поставлено следующее лабораторное оборудование для выполнения работ по направлению «Аддитивные технологии»:

- а) планетарная шаровая мельница "Pilverisette 7" Premium Line;
- б) электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO;
- в) лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 NanoTec;

Эти три позиции представляют собой технологическую линейку компании Fritsch, предназначенную для изготовления функциональных паст, используемых в аддитивной технологии изготовления радиоэлектронных устройств, в том числе СВЧ-узлов.

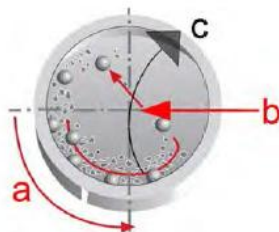
### **1.1.1 Планетарная шаровая мельница PULVERISETTE 7 Premium Line**

#### *Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Микромельница используется для получения нанопорошков для подготовки чернил при реализации аддитивных технологий. Основным функциональным назначением планетарной микромельницы PULVERISETTE 7 Premium Line является измельчение твердых, хрупких и волокнистых материалов до получения размера частиц в нанодиапазоне.

Измельчение исходного материала возникает за счет планетарного принципа, который заключается в том, что перемалывание и дробление происходит путем высокоэнергичного удара размольных шаров и частично трением между шарами и стенкой размольного стакана. Для этого размольные стаканы с измельчаемым материалом и шарами циркулируют на вращающемся планетарном диске в противоположную сторону вокруг своей оси. Начиная с определенной скорости, размольный стакан и опорный диск вращаются в противоположных направлениях таким образом, что центробежные силы поочередно действуют в одном и обратном направлениях. При этом шары пересекают стакан по диагонали с максимальной скоростью и измельчают материал на противоположной стенке стакана, т.е. наблюдается эффект трения и эффект удара, когда шары ударяются о противоположную стенку размольного стакана.

На рисунке 1.1 показан схематичный процесс измельчения материала.

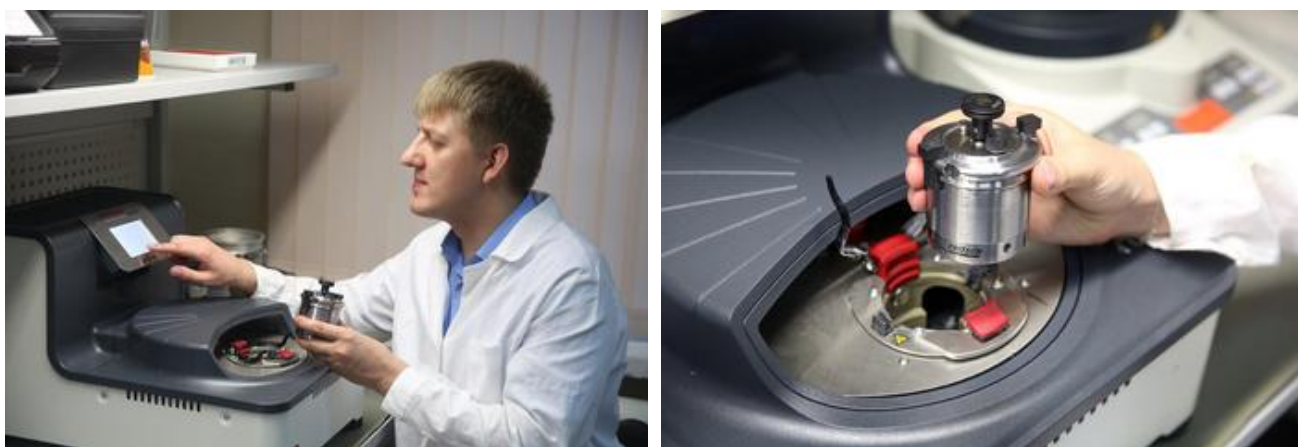


a – перекачивание мелющих шаров; b – центробежная сила;  
c – вращение опорного диска.

Рисунок 1.1 – Схематичный процесс измельчения материала

Исходя из функциональных возможностей планетарной микромельницы помимо измельчения допустимо синтезирование паст и эмульсий.

На рисунке 1.2 показано фото рабочего места планетарной микромельницы.



а)

б)

а – планетарная микромельница; б – установка размольного стакана

Рисунок 1.2 – Фото рабочего места планетарной микромельницы

В таблице 1.1 приведены технические характеристики планетарной микромельницы.

Таблица 1.1 – Технические характеристики планетарной микромельницы

Принцип действия	Удар
Оптимально для вида материала	твердый, среднетвердый, хрупкий
Количество размольных мест	2
Дробящие части	Размольные стаканы и размольные шары
Материалы дробящих частей	Агат, спеченный корунд, нитрид кремния, оксид циркония, нержавеющая сталь, закаленная сталь, твердый сплав карбида вольфрама
Размеры размольных стаканов	20, 45, 80 мл
Диаметр размольных шаров	0,1 - 20 мм
Макс. начальный размер частиц (в зависимости от материала)	5 мм
Мин. количество пробы	1 мл
Макс. количество пробы	60 мл

Продолжение таблицы 1.1

Конечная степень измельчения (в зависимости от материала)	< 0,1 мкм
Типичная продолжительность измельчения до аналитической степени измельчения	3 мин
Процесс измельчения	в сухой/жидкой среде
Измельчение в атмосфере защитного газа	да
Измерение давления газа и температуры	да
Число оборотов планетарного диска	100 - 1100 об/мин
Передаточное соотношение планетарный диск / размольный стакан	$i_{\text{относительно}} = 1 : -2$
Эффективный диаметр планетарного диска	140 мм
Центробежное ускорение ( $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ )	95 г
Разъемы	USB
Полная потребляемая мощность согласно DIN EN ISO 3746 (в зависимости от измельчаемого материала, размольных стаканов/шаров и заданного числа оборотов)	100-240 В/1~, 50-60 Гц, 1200 Вт
Вес	44 кг
Габариты (Ш × Г × В)	40 × 58 × 36 см, настольное оборудование

*Применение*

Планетарная микромельница PULVERISETTE 7 Premium Line с двумя размольными местами может применяться универсально и идеально подходит для измельчения без потерь до конечной степени измельчения 100 нм твердых, среднетвердых и хрупких материалов. Измельчение может производиться в зависимости от желаемой конечной степени измельчения в сухой среде, в суспензии или в атмосфере защитного газа.

Для предотвращения чрезмерного трения твердость используемого размольного стакана и мелющих шаров должна быть выше, чем твердость используемого материала. Рекомендуется размольный стакан и мелющие шары выбирать из одного материала. Одними из износостойких к истиранию выделяются шары и стаканы из нержавеющей стали, процентное содержание стакана: 17 – 19% Cr и 8 + 10% Ni, а шаров: 12,5 – 14,5% Cr + 1% Ni. Использование данного материала позволяет размалывать средне-твердые и хрупкие образцы.

Помимо измельчения, существует возможность смешивания и гомогенизации эмульсий и паст, а также механическое активирование и легирование в области исследования материалов.

*Пример использования*

Испытуемый материал необходимо заранее подготовить до нужного размера, таким образом, чтобы испытуемый материал подходил под выбранный диаметр размольных шаров в соотношении 1:10.

План проведения экспериментальных исследований получения порошка при помощи PULVERISETTE 7 Premium Line:

- 1) Выбор размольного стакана и мелющих шаров на основе исследуемого материала;
- 2) Выбор размера мелющих шаров;
- 3) Загрузка на дно размольного стакана мелющих шаров;
- 4) Добавление исследуемого материала в размольный стакан;
- 5) Подготовка противовеса, масса размольного стакана и противовеса должны совпадать;
- 6) Загрузка противовеса в планетарную микромельницу;
- 7) Загрузка размольного стакана в планетарную микромельницу;
- 8) Установка режима измельчения исследуемого материала;
- 9) Проведение измельчения исследуемого материала;

Первым исследуемым материалом являлось тугоплавкое стекло. Для такого материала необходимо использовать стакан из нержавеющей стали, так как стекло является хрупким материалом. Первоначально использовались мелющие шары диаметром 10 мм (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Загрузка в размольный стакан тугоплавкое стекло

Режим измельчения при диаметре шаров 10 мм показан в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Режим измельчения тугоплавкого стекла

№ итерации	Время, мин	Скорость об./мин.
1	2	850
2	2	850
3	2	850

Полученный порошок стекла показан на рисунке 1.4.



*a)*

*б)*

*в)*

*a* – 1-ая итерация; *б* – 2-ая итерация; *в* – 3-я итерация

Рисунок 1.4 – Полученный порошок тугоплавкого стекла

На рисунке 1.4 показано, что не весь материал измельчился с первой итерации, также было замечено, что во время перемалывания материала крупные частицы остаются на дне размольного стакана, и существует необходимость в постоянном перемешивании исследуемого материала.

После проведения трех итераций по измельчению легкоплавкого стекла были проведены еще две итерации, но диаметр мелющих шаров был равен 5 мм. Режим измельчения показан в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Режим измельчения тугоплавкого стекла

№ итерации	Время, мин	Скорость об./мин.
1	2	1000
2	2	1000

Полученный порошок стекла показан на рисунке 1.5.



*a)*

*б)*

*a* – 1-ая итерация; *б* – 2-ая итерация

Рисунок 1.5 – Полученный порошок тугоплавкого стекла

План проведения экспериментальных исследований синтеза пасты путем смешивания материалов при помощи PULVERISETTE 7 Premium Line:

- 1) Выбор размольного стакана и мелющих шаров;
- 2) Выбор размера мелющих шаров;
- 3) Загрузка на дно размольного стакана мелющих шаров;
- 4) Добавление порошка в размольный стакан;
- 5) Добавление в размольный стакан связующее;
- 6) Подготовка противовеса, масса размольного стакана и противовеса должны совпадать;
- 7) Загрузка противовеса в планетарную микромельницу;
- 8) Загрузка размольного стакана в планетарную микромельницу;
- 9) Установка режима для смешивания пасты;
- 10) Синтезирование пасты.

Следующим этапом было получение пасты из исследуемого материала с добавлением жидкой составляющей. Как правило, в состав различных паст входит порошок и жидкая среда. В данном случае использовался порошок тугоплавкого стекла и растительное масло, равное по плотности терпинеолу, которое является органическим связующим в пастах.

При проведении первого эксперимента использовался размольный стакан и шары из нержавеющей стали, диаметр мелющих шаров был выбран 10 мм. На дно стакана поместили шары, после чего добавили порошок (15 мл) и растительное масло (15 мл). Время смешивания в планетарной микромельнице установили 2 минуты при 500 об./мин. Результат смешивания показан на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Полученная паста на основе тугоплавкого стекла

Изготовленная паста получилась жидкой консистенции, которая не подходит под заявленные характеристики принтера, так как будет вытекать из сопла и растекаться на подложке. Следующей задачей являлось исследование на однородность.

При исследовании полученной пасты на однородность необходимо на предметное стекло поместить навеску полученной пасты массой 0,1 гр. и накрыть вторым предметным стеклом. Необходимо расположить пасту таким образом, чтобы капля была в центре пластины и занимала минимальную площадь. После чего на предметные стекла поместить груз массой 250 гр для получения равномерного распределения капли по все поверхности и выдерживать в течении 15 минут. По истечению времени, не разнимая предметных стекол, поместили исследуемый образец под микроскоп. На рисунке 1.7 приведена фотография полученной однородности исследуемой пасты.

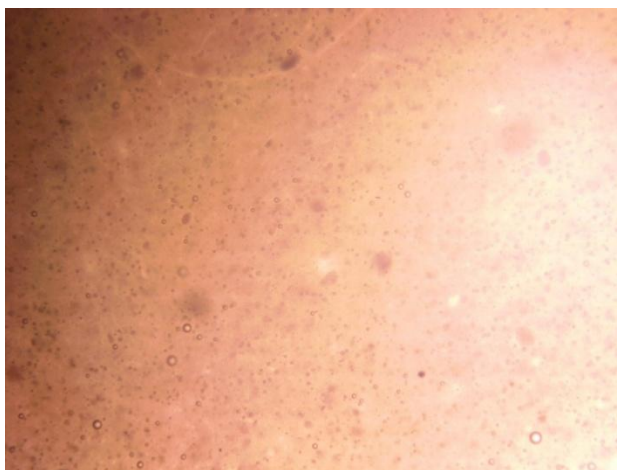


Рисунок 1.7 – Исследование пасты на однородность

Исходя из рисунка, можно сделать вывод, что полученная паста не является однородной, это может быть связано с тем, что при перемешивании использовались мелющие шары диаметром 10 мм. Таким образом, при проведении последующих экспериментальных исследований использовать мелющие шары диаметром 5 мм.

При проведении второго эксперимента использовались мелющие шары 5 мм. Масса порошка из тугоплавкого стекла составила 20 мл, а масса растительного масла 10 мл. Время перемешивания заняло 2 минуты при 500 об./мин. На рисунке 1.8 показан полученный результат перемешивания.



Рисунок 1.8 – Полученная паста на основе тугоплавкого стекла

Затем в полученную пасту было добавлено 15 мл порошка (рисунок 1.9). Время перемешивания также заняло 2 минуты при 500 об./мин.

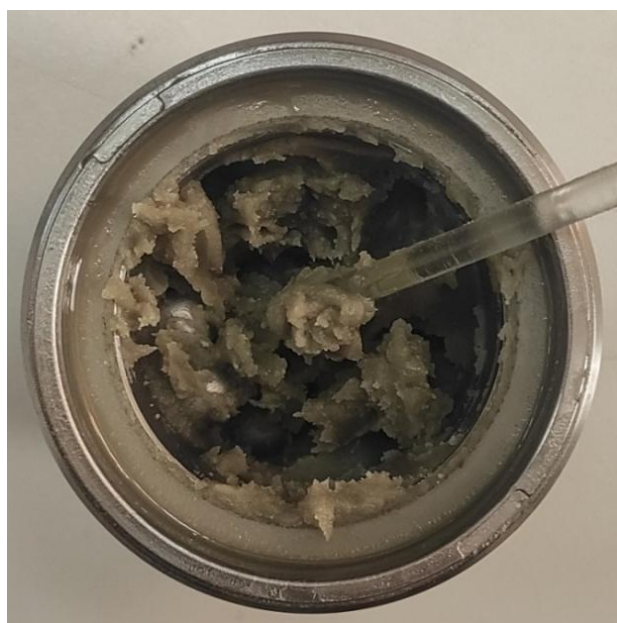


Рисунок 1.9 – Полученная паста при добавлении 35 мл порошка

На рисунке видно, что полученная консистенция получилась слишком густой и возникла необходимость добавления 5 мл растительного масла (рисунок 1.10).





Рисунок 1.10 – Полученная паста при добавлении 35 мл порошка и 15 мл масла

На рисунке 1.11 показан результат исследования пасты на однородность.

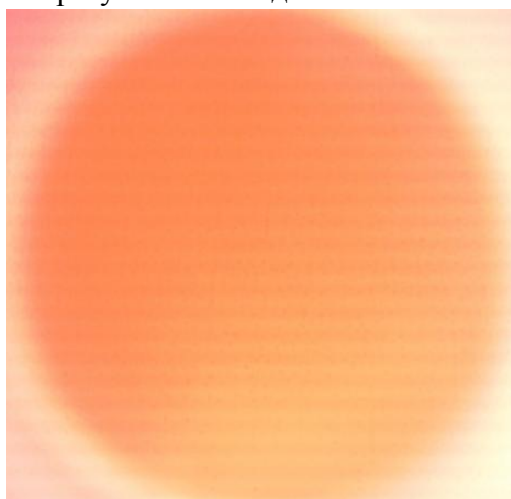


Рисунок 1.11 – Исследование полученной пасты на однородность

Исходя, из рисунка можно делать вывод, что полученная паста является однородной и не содержит ярко выраженных фрагментов. Также данную пасту можно сравнить по вязкости с диэлектрической пастой «Дельта-пасты».

Для оценки условной вязкости полученной пасты необходимо на предметное стекло поместить навеску полученной пасты массой 0,1 гр. и накрыть вторым предметным стеклом. Необходимо расположить пасту таким образом, чтобы капля была в центре пластины и занимала минимальную площадь. После чего на предметные стекла поместить груз массой 250 гр. для получения равномерного распределения капли по все поверхности и выдерживать в течение 15 минут. По истечению времени, не разнимая предметных стекол, измерить диаметральный размер пятна в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Результат оцен-

ки условной вязкости полученной пасты равен 24 мм, такое же значение имеет диэлектрическая паста ПД-12.

### 1.1.2 Лазерный анализатор размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec

*Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

ANALYSETTE 22 NanoTec предназначен для анализа распределения частиц суспензий, эмульсий и твердых сыпучих материалов. Основным блоком в ANALYSETTE 22 является измерительная ячейка, в которую попадает лазерный луч для установления распределения размера частиц. Анализ распределения частиц можно проводить при помощи сухого диспергирования и диспергирования в жидкой среде.

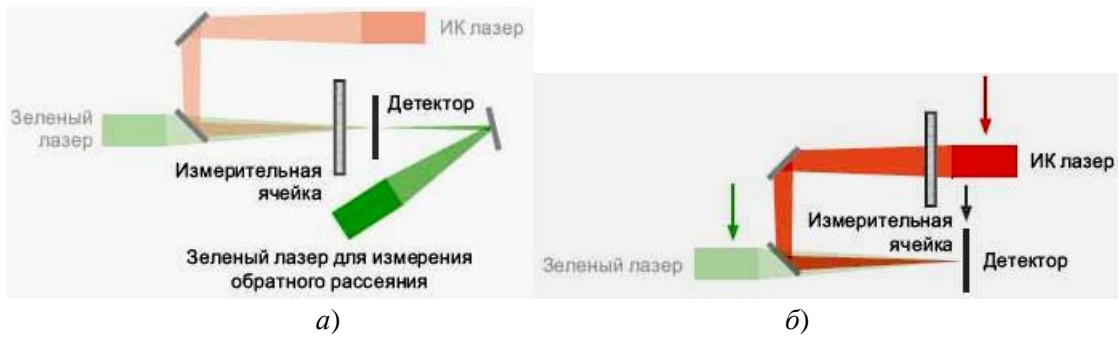
Конструктивно лазерный анализатор размера частиц разделен на отдельные модули, что удобно при перевозке, перестановке и размещении прибора. Основания модулей литые, с амортизирующими ножками для исключения влияния вибраций, оптическая система установлена на прочной и надежной подвижной платформе, приборы имеют удобный современный дизайн (рисунок 1.12).



1 – измерительный блок; 2 – блок жидкого диспергирования;  
3 – блок сухого диспергирования.

Рисунок 1.12 – Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec

Основой комплекта гранулометра служит измерительный блок 1 (рисунок 1.12), в котором один полупроводниковый лазер с излучением зеленого цвета используется для измерения частиц малого размера, а инфракрасный полупроводниковый лазер для измерения более крупных частиц (рисунок 1.13 а, б). Но для определения размеров частиц вплоть до нанодиапазона требуется детектирование излучения, рассеянного в обратном направлении.



а) – расположение для измерения в нижнем диапазоне размеров частиц; б) – расположение для измерения в верхнем диапазоне размеров частиц.

Рисунок 1.13 – Расположение лазеров в измерительной ячейке

Analysette 22 использует проверенную обратную конструкцию Фурье с изменяемыми положениями измерительной ячейки, которая запатентована Fritsch GmbH. При этом измерительная ячейка и образец частицы размещаются на одной линии со сходящимся лазерным лучом. В версии NanoТес анализатора Analysette 22 также анализируется свет обратного рассеяния, который устанавливает более низкий предел измерения, равный 10 нм. NanoТес 2 включает в себя два полупроводниковых лазера: первый лазер имеет длину волны 532 нм, мощность 10 мВт и второй лазер – длина волны 850 нм, мощность 20 мВт.

На рисунках 1.14 и 1.15 показаны фотографии рабочих мест при сухом и жидком диспергировании.



Рисунок 1.14 – Сухое диспергирование



Рисунок 1.15 – Диспергирование в жидкой среде

#### *Характеристики оборудования*

В таблице 1.4 приведены технические характеристики лазерного измерителя размеров частиц.

Таблица 1.4 – Технические характеристики лазерного измерителя размеров частиц

Диапазоны измерений	Диспергирование в жидкой среде: 0,01 – 2000 мкм Диспергирование в сухой среде: 0,1 – 2000 мкм Возможные диапазоны измерений: 0,01 – 45 мкм / 0,08 – 45 мкм / 15 – 2000 мкм / 0,01 – 2000 мкм / 0,08 – 2000 мкм
Лазер	Три полупроводниковых лазера: 2 – зеленый ( $\lambda = 532$ нм, 7 мВт), 1 – ИК ( $\lambda = 940$ нм, 9 мВт). Линейная поляризация. Средний срок службы 10000 часов
Количество классов размеров частиц	Макс. 165
Оптическая конструкция	Инверсная конструкция Фурье. Перемещаемая измерительная ячейка
Линзы Фурье	Фокусное расстояние 260 мм и 560 мм (зеленый или инфракрасный). Диаметр лазерного пучка в линзе Фурье 10 мм
Юстировка лазерного луча	Автоматическая
Класс защиты лазера	1 (согласно EN 60825)

Продолжение 1.4

Датчик	2 сегмента: 1 для вертикального и 1 для горизонтального направления поляризации лазерного излучения 57 элементов
Типичная продолжительность измерения	5 – 10 с (регистрация результатов одного измерения) 2 мин (полный цикл измерения)
Блок диспергирования в жидкой среде	Объем жидкости 300 – 500 см <sup>3</sup> . Центробежный насос с регулируемой производительностью. Ультразвук с регулируемой мощностью (макс. 60 Вт). Используемые материалы в контуре пробы: нержавеющая сталь, тефлон, стекло BK7, шланги из Noreprene®.
Блок диспергирования в сухой среде	Объем пробы < 1 – 100 см <sup>3</sup> . Высокочастотный лотковый питатель. Сопло Вентури с кольцевым зазором. Требуемое подключение сжатого воздуха: мин. 5 бар, 125 л/мин, без масла, влаги и твердых частиц. Требуется внешнее вытяжное устройство.
Необходимый компьютер	Стандартный ПК с ОС Windows, мин. 500 мБ свободного места на жестком диске, 1 Гб RAM, Windows XP (актуальный Service Pack), Windows 7, порт USB, монитор мин. 19"
Габариты (Ш × Г × В)	68 × 62 × 35 – 55 см (измерительный блок NanoTec plus в зависимости от конфигурации) 32 × 62 × 44 см (блок диспергирования в жидкой среде) 36 × 65 × 37 см (блок диспергирования в сухой среде)
Вес	48 – 52,6 кг (измерительный блок NanoTec plus в зависимости от конфигурации) 30,8 кг (блок диспергирования в жидкой среде) 25 кг (блок диспергирования в сухой среде)

*Применение*

ANALYSETTE 22 NanoTec предназначен для определения размера и степени измельчения частиц суспензий, эмульсий и твердых сыпучих материалов.

Лазерный свет при обнаружении частиц (пыль, суспензии и т.д.) отклоняется от своего исходного направления и рассеивается под определёнными углами, которые определяются размером и оптическими свойствами частиц. Рассеянный свет собирается с помощью, так называемой линзы Фурье, а зависящее от угла распределение интенсивности рассеянного света измеряется датчиком в пределах фокальной плоскости линзы (рисунок 1.16). Используя полученный таким образом спектр Фурье, распределение размеров частиц рассчитывается в своего рода обратном процессе с помощью инверсии. Посредством специальных алгоритмов MaScontrol проводится анализ согласно теории Фраунгофера или метода Ми.

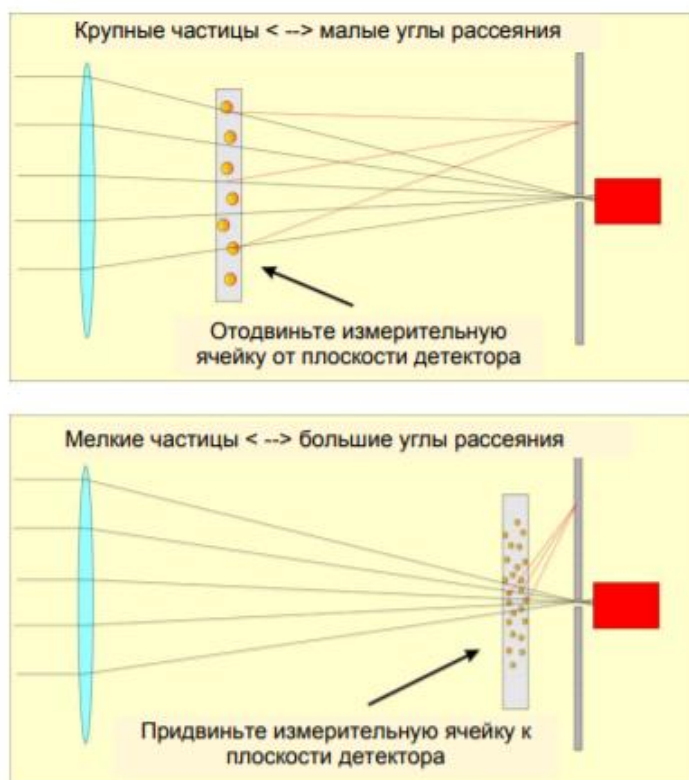


Рисунок 1.16 – Перемещение измерительной ячейки для распределения размеров частиц

Положение ячейки с образцом между линзой Фурье и датчиком определяет установленный диапазон размера частиц. Для диапазона точных измерений измерительная ячейка расположена в нескольких миллиметрах от точки фокуса линзы Фурье, в то время как большие расстояния между ячейкой и датчиком используются для выполнения грубых измерений.

### ***Диспергирование в жидкой среде (рисунок 1.17)***

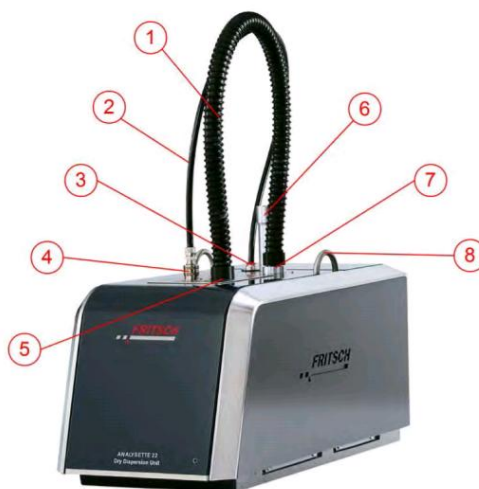
Практически для 80% всех проб диспергирование в жидкой среде является идеальным методом для получения отличного результата. Для этого материал пробы вносится в замкнутый контур с циркулирующей жидкостью. Встроенный, свободно программируемый излучатель ультразвука обеспечивает быстрое и эффективное разрушение агломератов – с точно подобранным режимом для каждой пробы. Если блок диспергирования постоянно подключен к источнику воды, он может автоматически промываться и заполняться чистой жидкостью после каждого измерения.



1 – баня для образца; 2 – вставка с измерительной ячейкой.  
 Рисунок 1.17 – Конструкция блока для диспергирования в жидкой среде

### *Сухое диспергирование*

Диспергирование в сухой среде отлично подходит для не слишком тонких, хорошо сыпучих материалов, которые вступают в реакцию с водой или другими жидкостями. Материал пробы из вибрационного лоткового питателя поступает во всасывающую воронку измерительной ячейки, откуда он направляется непосредственно в сопло Вентури, через которое пропускается сжатый воздух с регулируемым давлением (рисунок 1.18). При прохождении через сопло агломераты разрушаются, после чего сразу производится измерение распределения частиц по размерам в лазерном луче. Обычно для диспергирования в сухой среде требуется значительное количество пробы – однако одновременно это обуславливает лучшую представительность анализа.



1 – шланг для вытяжки пыли; 2 – шланг для сжатого воздуха; 3 – соединительный разъём для шланга для сжатого воздуха, вставка с измерительной ячейкой; 4 – соединительный разъём для шланга для сжатого воздуха, блок для диспергирования; 5 – соединительный разъём для блока для диспергирования; 6 – воронка вставки с измерительной ячейкой; 7 – соединительный разъём для вытяжки для вставки с измерительной ячейкой; 8 – вставка с измерительной ячейкой

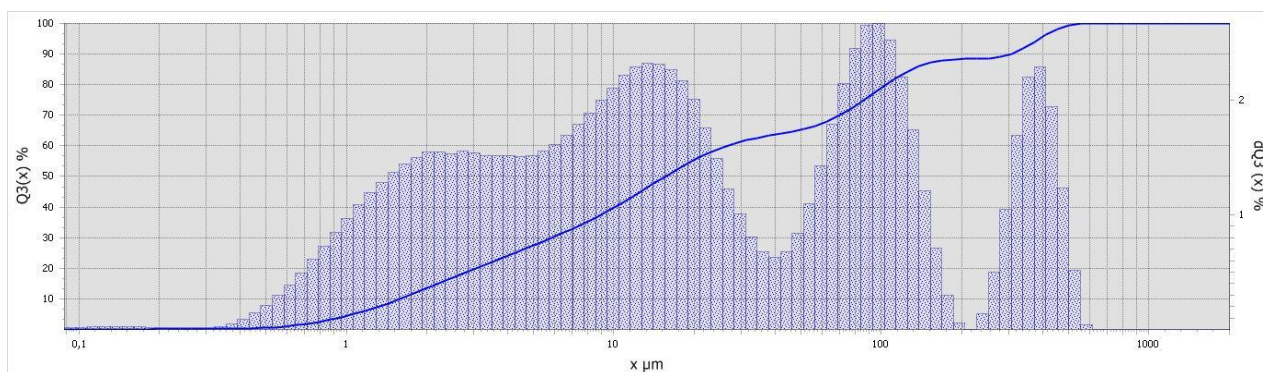
Рисунок 1.18 – Конструкция блока сухого диспергирования

### Пример использования

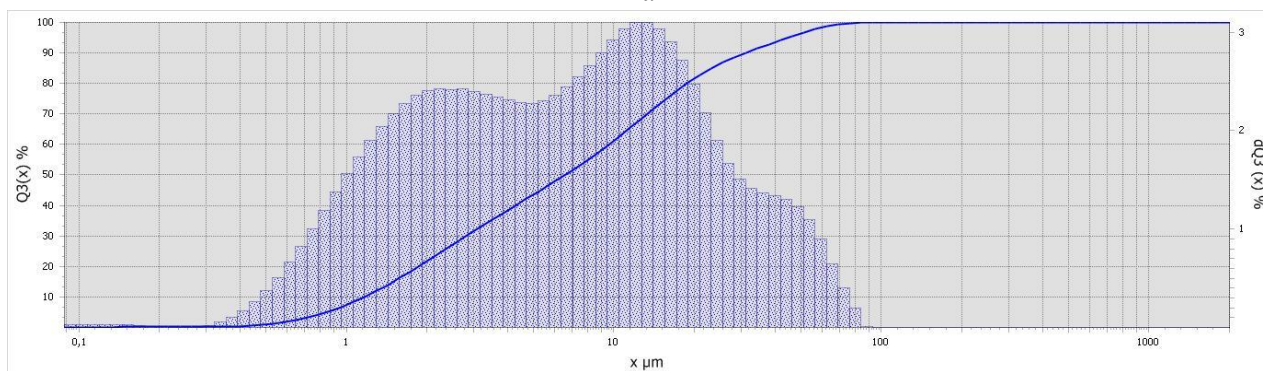
План проведения экспериментальных исследований по определению размера и степени измельчения частиц при помощи Analysette 22 NanoTec:

- 1) Включение лазерного измерителя размеров частиц за 10 минут до начала проведения экспериментальных исследований для прогрева лазера;
- 2) Создание папки и директивы для фиксирования полученных результатов исследований;
- 3) Запуск процедуры промывания в ультразвуковой ванне;
- 4) Выбор проведения измерений в диапазоне от 0,01 до 2100 мкм (2 лазера);
- 5) Добавление в ультразвуковую ванну с водой на 2/3 исследуемый материал;
- 6) Получение результатов.

Первым исследуемым материалом в определении размера, и степени измельчения порошка было тугоплавкое стекло. Результат определения размера и степени измельчения порошка для каждой итерации показан на рисунке 1.19.

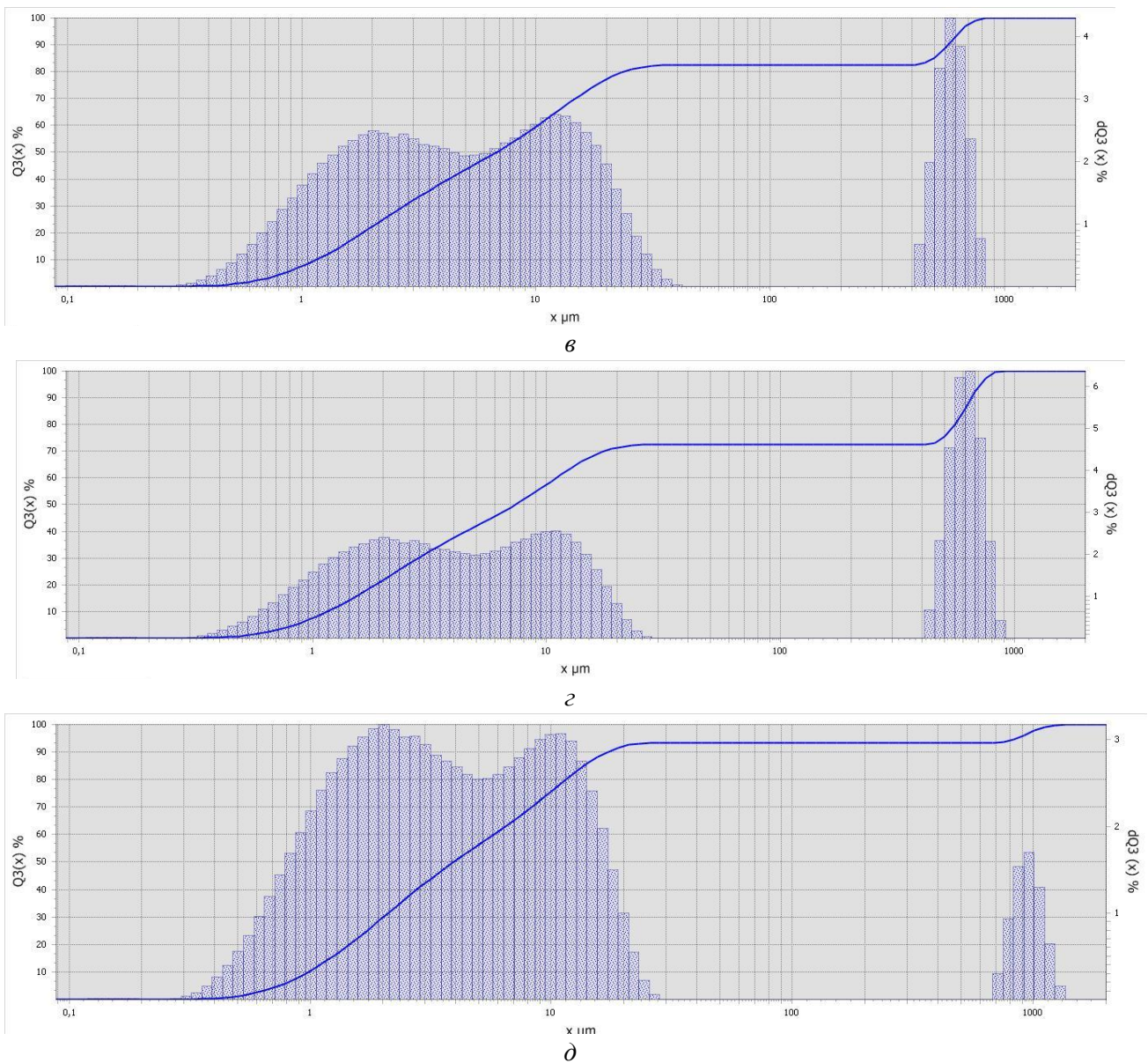


*а*



*б*





*a* – 1-я итерация; *б* – 2-я итерация; *в* – 3-я итерация; *г* – 4-я итерация;  
*д* – 5-я итерация

Рисунок 1.19 – Полученный размер частиц тугоплавкого стекла при пяти итерациях

Вторым материалом при определении размера и степени измельчения частиц был алюминиевый сплав АМг3. Полученный результат показан на рисунке 1.20.

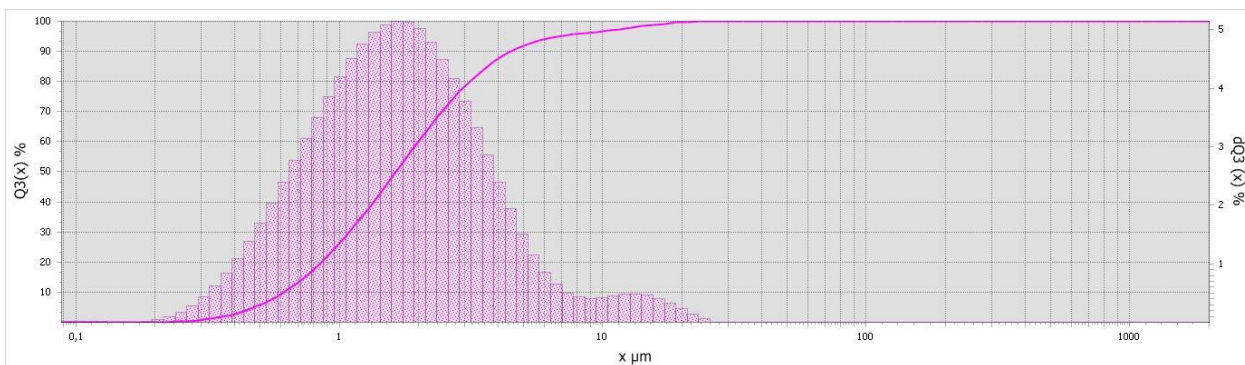


Рисунок 1.20 – Размер частиц сплава АМг3

Следующим материалом был поликор ВК-96, результат показан на рисунке 1.21.

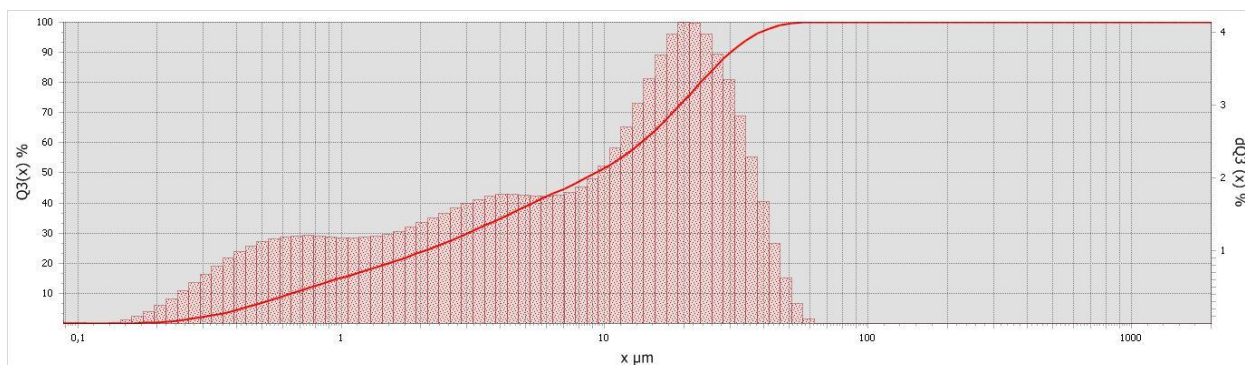


Рисунок 1.21 – Размер частиц поликор ВК-96

### 1.1.3 Электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO

#### *Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

ANALYSETTE 3 Pro является вертикально колебательным лабораторным ситовым грохотом для точного разделения и сортировки материалов по размерам частиц. Гранулометрический анализ может быть проведен как для сухих порошков, так и для взвешенных в жидкости частиц. В зависимости от объема образца и его гранулометрического состава подбираются различные наборы сит.

Собственная частота вибрационной системы изменяется в зависимости от количества сит и объема просеиваемого материала или набора размольной гарнитуры. Поэтому при постоянной частоте, например, при частоте электрической сети 50 Гц, амплитуда ситового грохота не может выдерживаться оптимально. Управляемая процессором электронная система ситового грохота регулирует амплитуду просеивания, которая может быть точно установлена и воспроизведена. Это выполняется, изменением частоты просеивания, которая отличается от собственной частоты системы.

Рекомендуемая амплитуда вибрации набора сит находится между 0,1 мм и 3,0 мм, и может быть достигнута при относительно небольшой энергии. Поэтому возможна непрерывная эксплуатация без значительного нагрева прибора. На рисунке 1.22 показана фотография рабочего места вибрационного ситового грохота.

#### *Применение*

ANALYSETTE 3 Pro позволяет выполнять анализ размера частиц всех видов твердых, гранулированных материалов и суспензий с помощью сухого и/или влажного рассеивание на плетеных ситах из металлической проволоки, ситах из пластика или прецизионных микроситах, выполненных гальваническим способом.

Возможны разнообразные функции управления рассевом типа:

- контроль амплитуды на цифровом дисплее;
- рассев с интервалом;

- микропрецизионный рассев;
- режим "Stand by" – режим экономии электроэнергии.

ANALYSETTE 3 является «подбрасывающим грохотом», в котором электромагнитный привод приводит сита к вертикальной вибрации. При этом рассеиваемый материал периодически подбрасывается с ткани сита и в падении прогоняется через установленные аналитические сита.

Последовательный интерфейс позволяет подсоединить виброгрохот к компьютеру, что дает возможность использования программы «Авторассев». Эта комбинация с программой «Авторассев» удовлетворяет требованиям гранулометрического анализа в соответствии с DIN ISO 9000.

В зависимости от распределения размеров частиц и размера отверстия сита, просеивание происходит максимум 200 мг (в случае редких сит: от 100 мкм до 1 грамма).

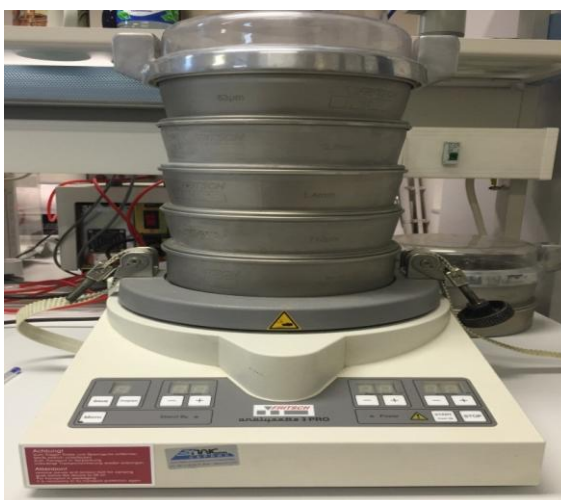


Рисунок 1.22 – Фотография рабочего места

В таблице 1.5 приведены технические характеристики вибрационного ситового грохота.

Таблица 1.5 – Технические характеристики вибрационного ситового грохота

Методы анализа	Рассев
Движение рассева	В двух координатах
Рассев в сухой среде	
Диапазон измерения	20 мкм – 63 мкм*
Макс. количество пробы прим.	для сит < 63 мкм: до 2 кг* для сит < 100 мкм: до 100*
Время рассева прим.	3 – 20 мин*
Рассев в жидкой среде	
Диапазон измерения	20 мкм – 10 мм*
Макс. количество пробы прим.	20 – 100 г*
Время рассева прим.	3 – 10 мин*
Микро-прецизионный рассев	
Диапазон измерения	5 мкм – 100 мкм

Продолжение таблицы 1.5

Макс. количество пробы прим.	0,05 - 0,5 g*
Время рассева прим.	30 – 60 мин*
Подробная информация	
Диаметр сита	100 мм, 200 мм или 8"
Макс. количество сит в просеивающей башне	10 (50 мм высота), 16 (25 мм высота)
Макс. вес просеивающей башни	3 кг
Макс. высота просеивающей башни	550 мм
Амплитуда	0,1 – 3 мм
Регулировка амплитуды	Автоматическая
Автоматический ситовой анализ с аналитическим программным обеспечением AUTOSIEVE	Да
Калиброванное средство контроля согласно ISO 9001	Да
Разъем	Да
Прерывистый режим работы	Да
Память для 10 комбинаций параметров	Да
Полная потребляемая мощность	100–240 В/1~ 50–60 Гц, 50 Вт
Уровень шума на рабочем месте согласно DIN EN ISO 3746 (в зависимости от рассеиваемого материала и конфигурации прибора)	прим. $L_{pAd} = 63$ дБ
Вес	21 кг
Габариты (Ш × Г × В)	37 × 40 × 20 см, настольное оборудование

\* в зависимости от загружаемого материала и установленных сит

*Пример применения*

Последовательность проведения экспериментальных исследований по разделению и сортировки материалов по размеру частиц при помощи ANALYSETTE 3 Pro:

- 1) Установка сит;
- 2) Подготовка пробы для рассева на микропрецизионных ситах;
- 3) Рассев пробы на микропрецизионных ситах;
- 4) Очистка микропрецизионных сит;
- 5) Анализ полученных результатов с помощью ANALYSETTE 22 NanoTec.

Исследуемым материалом являлось тугоплавкое стекло. Исходя из размера частиц тугоплавкого стекла, который колеблется от 0,3 мкм до 800 мкм, использовались микропрецизионные сита. Все измерения при таких ситах проводятся в режиме Micro, амплитуда вибрации при этом имеет значения 0,1..0,5 мм.

На рисунке 1.23 показан процесс установки сит.



Рисунок 1.23 – Установка сита

После чего необходимо добавить в систему воды до верхнего уровня установленного промежуточного кольца (рисунок 1.24), далее устанавливать остальные сита.



Рисунок 1.24 – Добавление воды

После установки сит была подготовлена проба из тугоплавкого стекла, масса находилась в пределах 50–200 мг (рисунок 1.25). Далее проба помещалась в ультразвуковую ванну на необходимое для диспергирования время.



Рисунок 1.25 – Подготовка пробы с добавлением воды

После диспергирования проба помещалась в верхнее микропрецизионное сито и остатки тугоплавкого стекла со стенок смывались струей воды (рисунок 1.26).



Рисунок 1.26 – Процесс добавления пробы на сита

После проведения экспериментальных исследований происходила отмывка сит, первым этапом в очистке был смыв струей воды, после чего происходила сушка сеткой вверх. Процесс очистки сит показан на рисунке 1.27.



*a)*

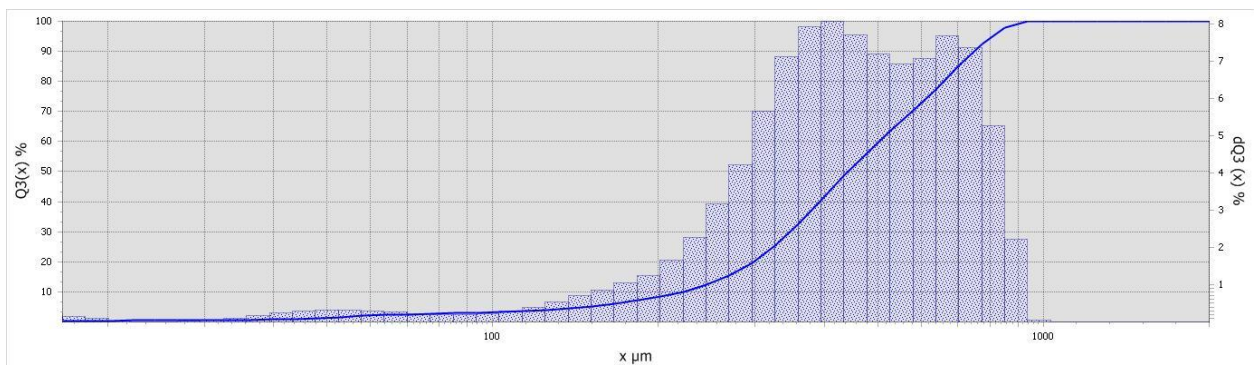


*б)*

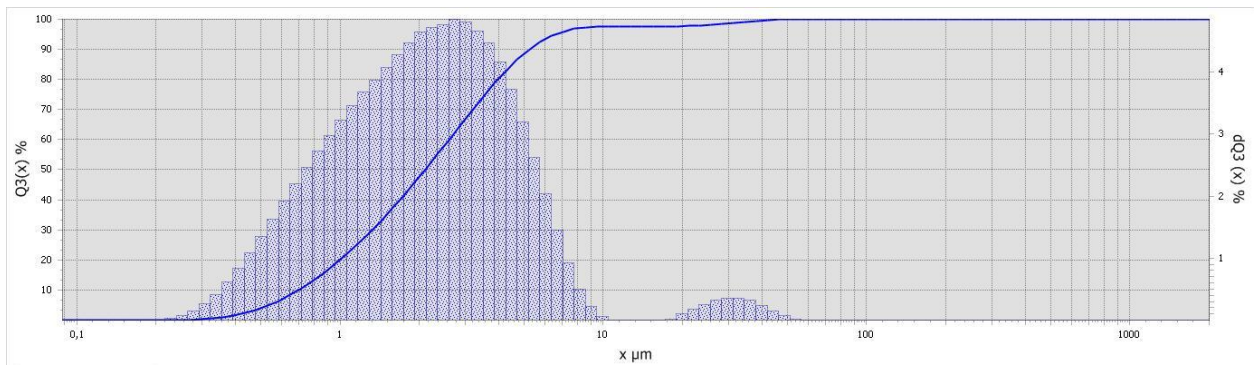
*a* – промывка; *б* – сушка

Рисунок 1.27 – Процесс очистки сит

Для оценки полученных результатов при помощи ANALYSETTE 22 NanoTec измерили размер частиц и степень измельчения. Исследуемый порошок получился двух фракций, результат экспериментальных измерений показан на рисунке 1.28.



*a*



*б*

*a* – размер частиц от 100 до 1000 мкм; *б* – размер частиц от 0,2 до 10 мкм

Рисунок 1.28 – Результат просеивания

### 1.1.4 Профилометр оптический 3D

#### *Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Прибор поставлен в 2019 г. Предназначен для измерения профиля и толщины пленок, наносимых с помощью аддитивных технологий: печать с помощью принтеров, электровакуумное напыление, аэрозольное распыление и т.п.). Внешний вид комплекта, составляющего 3D оптический профилометр, вид показан на рисунке 1.29.

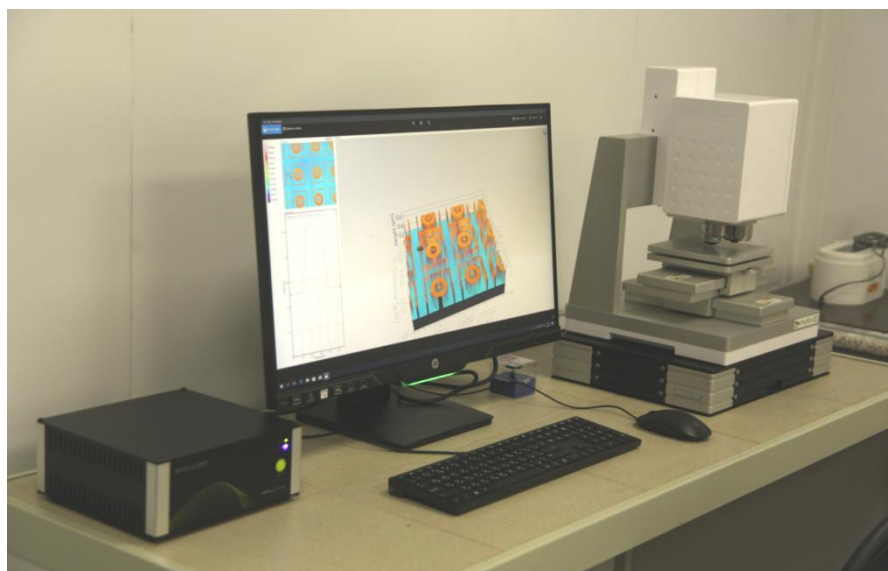


Рисунок 1.29 – Комплект, составляющий 3D оптический профилометр, модель Profilm3D

#### *Характеристики*

Характеристики 3D оптического профилометра, модель Profilm3D, описаны в спецификации на поставку, страна производитель – США, представлены ниже.

Profilm3D является оптическим профилометром с технологией VSI (вертикальное сканирование) и автофокусом и с технологией PSI (интерферометрия фазового сдвига).

В состав входят:

4х-позиционный револьвер для объективов с ручным поворотом;

XY автоматический столик;

интерферометрический объектив, Nikon 10x;

интерферометрический объектив, Nikon 50x;

антивибрационная платформа с блоком управления;

калибровочная пластина;

вычислитель.

#### **Метрологические характеристики:**

1. Диапазон значений измеряемой толщины в режиме WLI (интерферометрия белого



света): 50 нм – 10 000 000 нм (10 мм). Погрешность измерения толщины – в соответствии с сертификатом калибровки.

2. Диапазон значений измеряемой толщины PSI (интерферометрия фазового сдвига): 0,1 нм – 3000 нм). Погрешность измерения толщины, в соответствии с сертификатом калибровки.

#### **Технические характеристики:**

1. Вертикальная скорость сканирования 12 мкм/сек
2. Диапазон коэффициента отражения образцов: не менее 0,05–100%
3. Диапазон перемещений XY автоматического столика: 100×100 мм.
4. Грубое перемещение по оси Z: 100 мм
5. Точное перемещение по оси Z: 500 мкм
6. Разрешение камеры: 5 Мегапикселей
7. Габаритные размеры:
  - длина 300 мм;
  - ширина 300 мм;
  - высота 550 мм;
  - масса 15 кг.

#### **Интерферометрический объектив, Nikon 10x**

1. Поле зрения: 2,0×1,7 мм
2. Минимально описываемый пикселем диаметр: 0,88 мкм

#### **Интерферометрический объектив, Nikon 50x**

1. Поле зрения: 0,4×0,34 мм
2. Минимально описываемый пикселем диаметр: 0,176 мкм

#### **Антивибрационная платформа с блоком управления**

1. Модель – Accurion Nano30.

Активная компенсация по шести степеням свободы.

Активная изоляция в диапазоне от 1 Гц до 200 Гц.

Пассивная изоляция свыше 200 Гц.

Модель блока управления – Accurion Nano30.

2. Изоляционная производительность при колебаниях >5Гц: 23 dB (93%).
3. Изоляционная производительность при колебаниях >15Гц: 40 dB (99%).
4. Время реагирования: 300 мс.
5. Максимальная сила коррекции по вертикали: ±8 Н.
6. Максимальная сила коррекции по горизонтали: ±4 Н
7. Максимальный уровень компенсации при 2Гц и 8кг: 55 мкм/сек.
8. Максимальный уровень компенсации при 6Гц и 8кг: 350 мкм/сек.
9. Габариты и масса антивибрационной платформы Accurion Nano\_30.

10. Габариты и масса блока управления антивибрационной платформой Accuion Nano\_30.

### **Profilm-Analysis Software**

1. Программное обеспечение для анализа Profilm - бессрочная лицензия, без сшивки
2. Включает два года Profilm Online – Advanced.
3. **UPG-Stitching** – Апгрейд ПО Profilm-Analysis Software для сшивки изображений.
4. **UPG-ColorImaging** – Опция цветного изображения Color Imaging (включая UPG Total Focus- изображения с большой глубиной резкости).



Рисунок 1.30 – Работа на профилометре Profilm3D

### *Пример применения*

Успех применения профилометра, как показал опыт, зависит от освоения программного обеспечения. Поэтому все пользователи, независимо от того, являются ли они собственно операторами, изучают программное обеспечение, т.к. перечень необходимых исследований зависит от знаний о возможностях измерений и обработки получаемой информации. Описание программного обеспечения приведено в ПРИЛОЖЕНИИ А Программное обеспечение Profilm.

В качестве примера приводится прототип ДНК-микрочипа. Для печати прототипа ДНК-микрочипа использовано печатающее устройство Sonoplot GIX Microplotter II (Sonoplot) – оборудование УНУ ТУСУР. С помощью этого принтера получены пленки на основе серебросодержащих чернил толщиной от 1 мкм, шириной и зазоров топологических элементов от 50 мкм.

В качестве подложки прототип ДНК-микрочипа использовано предметное стекло размером 25×75×1 мм с биополимерным покрытием, обеспечивающим прочное связывание ДНК-зондов с поверхностью [84]. ДНК человека помещена в буферный раствор в концентрации 100 нг/мкл (ДНК-зонд).

Макет ДНК-микрочипа включает в себя матрицу  $6 \times 7$ , состоящую из 42 дискретно нанесенных точек. Диаметр точек 50-60 мкм, расстояние между точками – 200 мкм.

Для оценки пространственных параметров матрицы использован профилометр Profilm3D.

С использованием профилометра Profilm3D проведена оценка пространственных параметров полученных участков ДНК (точек). Общая картина расположения точек приведена на рисунке 1.31.

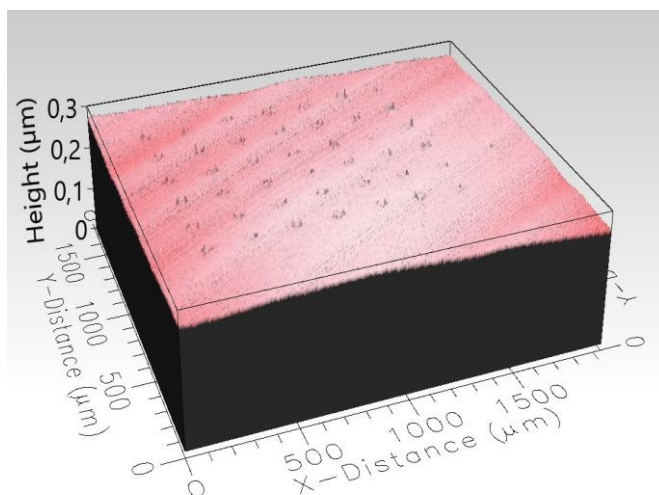


Рисунок 1.31 – Макет ДНК-микрочипа

На рисунке 1.32 приведена профилограмма четырех близкорасположенных точек в левом нижнем углу макета микрочипа.

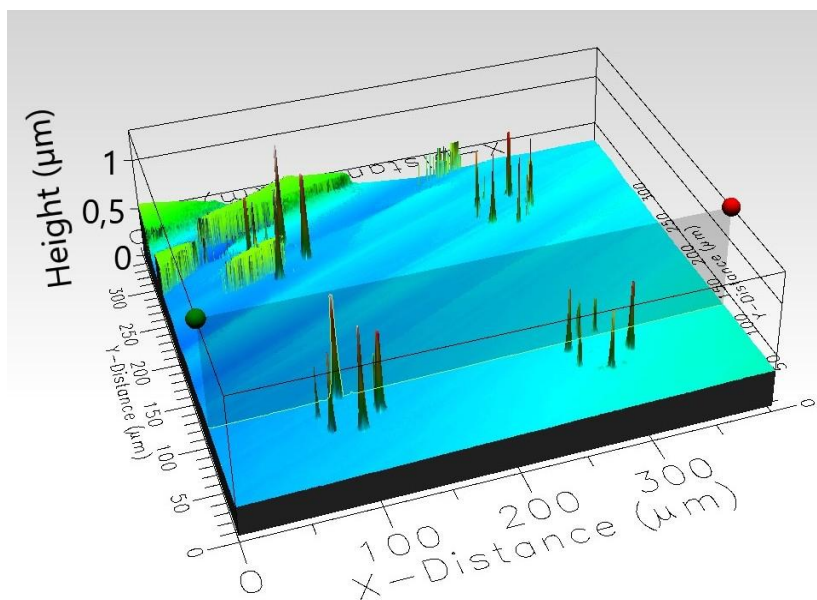


Рисунок 1.32 – Профилограмма участка ДНК-микрочипа

Установлено, что распределение фрагментов ДНК внутри точек неравномерно. При высыхании точек наблюдается «эффект кофейного пятна» [15], состоящего из 4–7 частей ДНК-материала по периферии капли.

Изготовленный макет исследован лазерным сканером для чтения флуоресцентных сигналов с микрочипов SureScan (Agilent Technologies) (рисунок 3).

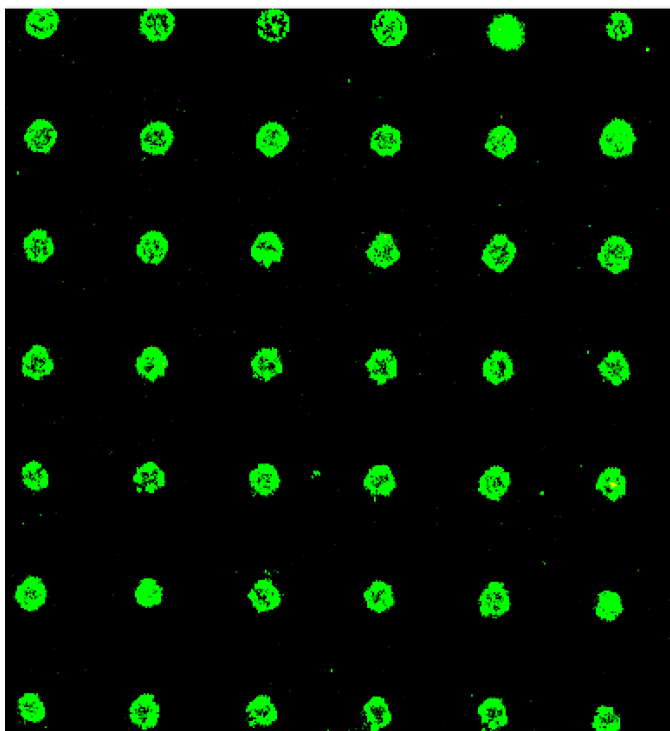


Рисунок 1.33 – Изображение с лазерного сканера для чтения флуоресцентных сигналов

Фрагментарность точек оказывает негативное влияние на последующий анализ интенсивности флуоресценции, поэтому желательно иметь точки с равномерным заполнением молекулами ДНК.

Предварительные эксперименты показали, что увеличение концентрации ДНК в наносимом на подложку ДНК-зонде приводит к засвечиванию получаемого с помощью лазерного сканера изображения. Таким образом, получение равномерного распределения ДНК внутри точки за счет увеличения концентрации ДНК невозможно. В качестве альтернативы может быть использован другой растворитель для ДНК-зонда, который за счет повышения вязкости не приведёт к смещению молекул ДНК к периферии точки.

Использование профилометра при оценке качества печати ДНК-микрочипа позволило установить следующее:

- 1) при использовании буферного раствора ярко проявляется «эффект кофейного пятна» – смещение молекул ДНК к периферии точки;
- 2) наблюдается устойчивое разделение точки на 4-7 областей по периферии;
- 3) дальнейшее исследование должно быть направлено на получение более равномерного распределения ДНК внутри точки.

### **1.1.5 Анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров**

*Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

При выборе прибора для дальнейшего продвижения измерений на СВЧ исходили из необходимости получить наиболее современную и перспективную платформу векторного анализатора цепей, которая дает возможность трансформировать ее в составе стендов как можно большего числа измерений. В конце 2019 год на состоявшемся семинаре с представителями фирмы Keysight Technologies по измерениям радиофотоники обсуждался вопрос о применении анализатор цепей N5247B-423 для оптических измерений. Представителями Keysight Technologies было представлено такое решение. Оно было подтверждено в 2020 году уже с конкретной конфигурацией дополнительных устройств: лазеров, электрооптических модуляторов, оптических приемников и устройств управления поляризацией световых волн. Такое развитие приборной базы не повлечет больших затрат финансовых средств, но будет очевидным образом стимулировать применение модуляторов, разрабатываемых в ТУСУР, и других устройств радиофотоники для создания измерительных стендов оптических диапазонов. Внешний вид векторного анализатора цепей на рабочем месте измерения СВЧ параметров показан на рисунке 1.34.



Рисунок 1.34 – Рабочее место с векторным анализатором цепей N5247B

*Основные характеристики анализатора*

PNA-X – это векторный анализатор цепей (ВАЦ) с широкими функциональными возможностями, сочетающий в едином корпусе встроенный измерительный блок для измерений S-параметров, один или два источника сигналов на основе синтезаторов частот для подачи входного воздействия на исследуемые устройства (ИУ), твердотельный накопитель данных, USB-интерфейсы и LCD сенсорный дисплей с диагональю 12.1”. Модели N5247B имеет усиленные соединители измерительных портов стандарта 1,85 мм (вилка) с опорным импедан-

сом 50 Ом. В стандартный комплект поставки ВАЦ включены: мышь, клавиатура (с англоязычной раскладкой, США) и помощь в освоении прибора на месте эксплуатации в течение 1 дня (PS-S20-PNA).

ВАЦ предназначен для проведения измерений параметров рассеяния (S-параметров) СВЧ устройств в коаксиальном тракте. Комплектация приобретенного ВАЦ, помимо стандартных измерений, позволяет тестировать нелинейные устройства (смесители, преобразователи частоты), проводить измерения коэффициента шума с высокой точностью, а также целого ряда других параметров: коэффициент интермодуляционных искажений, уровень точки однодецибельной компрессии и др.

Структурная схема приобретенного ВАЦ N5247B с опцией 422 представлена на рисунке 1.35.

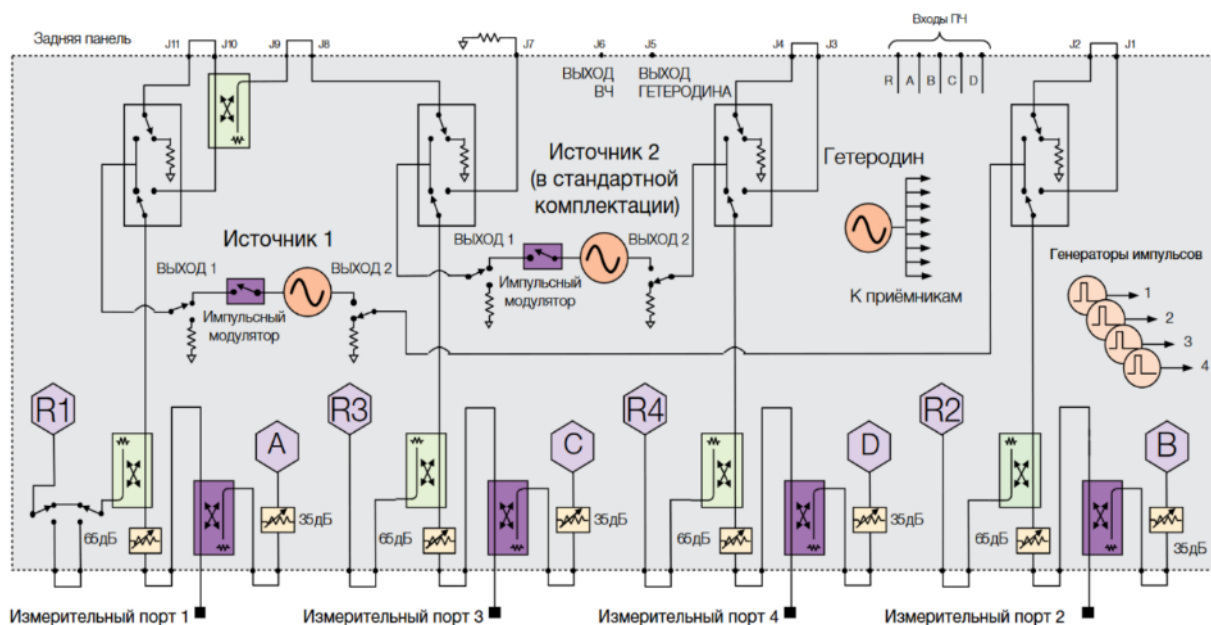


Рисунок 1.35 – Структурная схема ВАЦ N5247B с опцией 422

ВАЦ построен на базе двух источников сигнала, оснащен переключками на передней панели и аттенуаторами. Кроме того, в схеме предусмотрены сумматор для проведения тестирования в режиме двухтонового воздействия, выделенные шумовые приемники, импульсные модуляторы для проведения измерений в импульсных режимах. Все измерительные порты оснащены втулками для подачи постоянного напряжения смещения на исследуемое устройство.

Дооснащение ЦКП «Импульс» данным прибором позволило существенно расширить возможности центра при проведении испытаний СВЧ-интегральных схем. Прибор используется в составе зондовой станции Cascade Summit 12K. Фотография станции с установленным прибором представлена на рисунке 1.36.

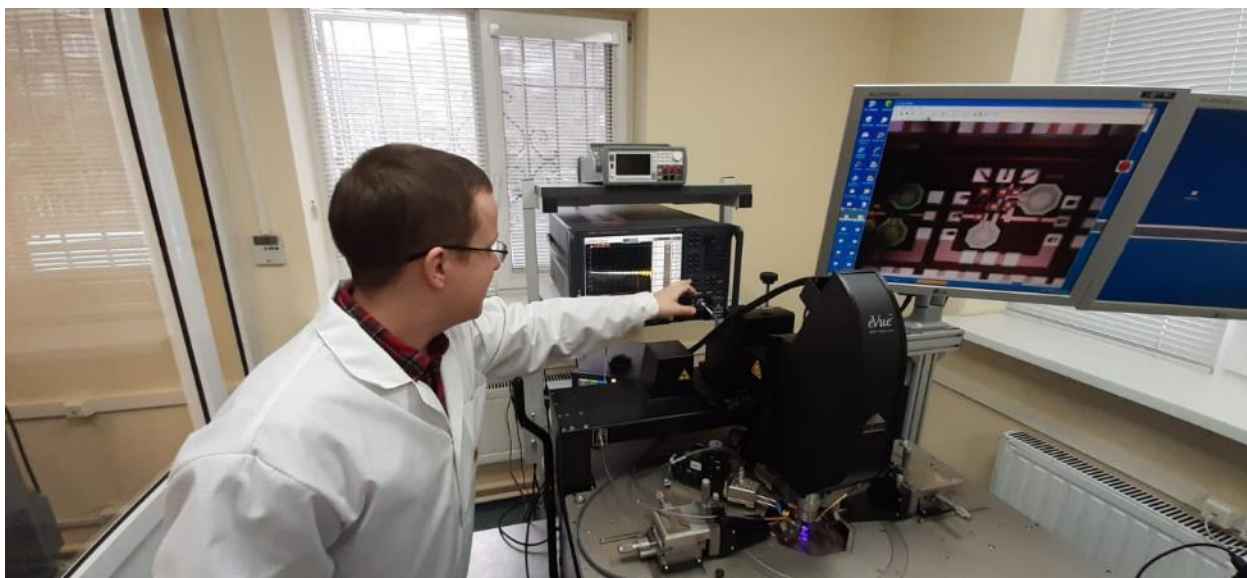


Рисунок 1.36 – ВАЦ N5247B в составе зондовой станции

На рисунке 1.37 представлен процесс измерения кристалла широкополосного буферного усилителя диапазона 1–5 ГГц.

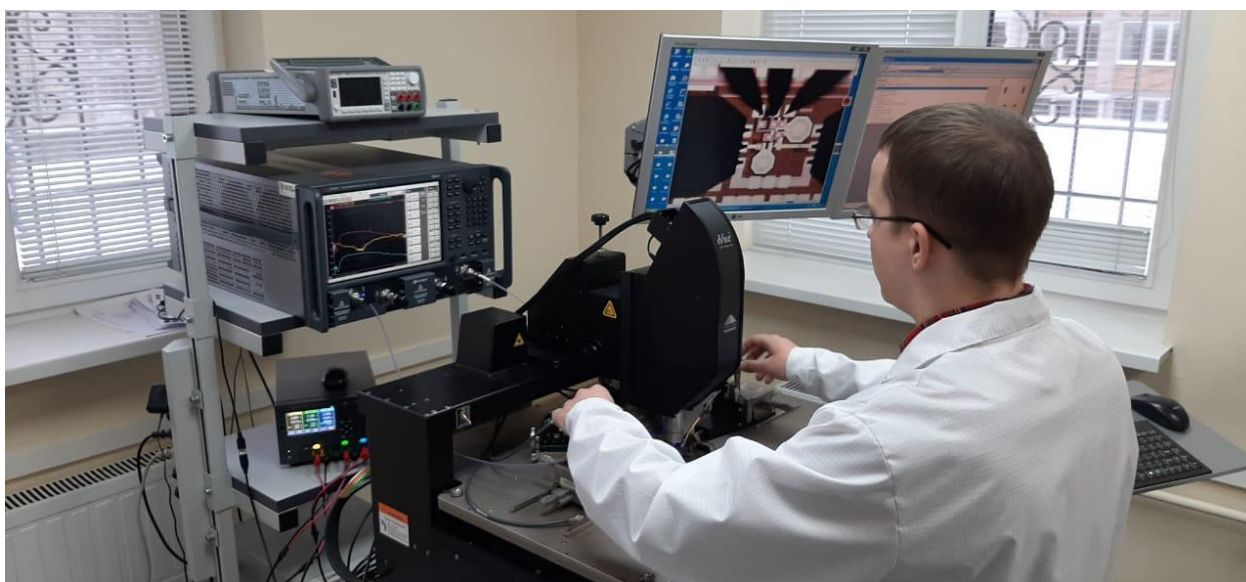


Рисунок 1.37 – Проведение измерений широкополосного буферного усилителя

Комплект поставки N5247B обеспечивает следующие необходимые виды/подвиды измерений из списка запросов внутренних и внешних пользователей по ряду проектов:

- опция анализатор цепей N5247B-423 (4-порта, прямой доступ к измерительным приемникам с передней панели, встроенные втулки питания по всем портам, ступенчатые аттенюаторы генератора и приемника по всем портам, встроенный сумматор для двухтоновых измерений, встроенный электронный тюнера для шумовых измерений);
- опция N5247B-020 (внешние входы промежуточной частоты);
- опция N5247B-021 (импульсный модулятор для первого внутреннего источника);

- опция N5247B-029 (приемник шума до 50 ГГц);
- опция S93029B (измерение коэффициента шума с векторной коррекцией);
- опция S93025B (импульсные измерения);
- опция S93082B (скалярные измерения смесителей);
- адаптер N1966A (ввод/вывод импульсов);
- измеритель мощности U8488A (термопарный, до 67 ГГц, с шиной USB).

#### *Пример применения*

Далее представлены результаты исследований микросхемы буферного усилителя (БУ), сама микросхема имеет обозначение ИС1, проведенных с применением векторного анализатора цепей PNA-X N5247B. В качестве примера приведены данные экспериментальных исследований по методике измерений ИС1, представленной в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Интегральная схема буферного усилителя предназначена для работы в радиочастотных трактах приемо-передающих модулей  $L$ -,  $S$ - и  $C$ -диапазонов, а также в трактах промежуточной частоты более высокочастотных диапазонов. На рисунке 1.38 представлена функциональная схема БУ.

Буферный усилитель имеет вывод  $PwrDwn$  отвечающий за вкл/выкл усиления. Сигнал может управляться как логическими уровнями (“1” – вкл, “0” – выкл), так и прямой подачей напряжения смещения на отдельные контакты.

Вывод  $VDD$  – питание усилителя (+3,3 В), вывод  $VBIAS1/2$  – управление рабочей точкой усилителя (при  $VBIAS1/2 = +1$  В – ток потребления 70 мА, Усилитель выполнен по 0,25 мкм КМОП SiGe-технологии).

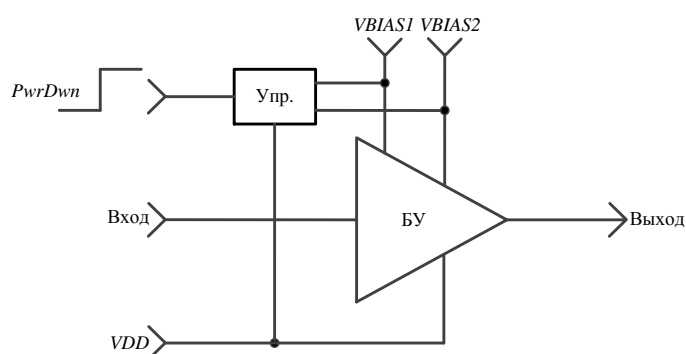


Рисунок 1.38 – Функциональная схема БУ

Проведены зондовые измерения буферного усилителя (ИС1).

На рисунке 1.39 показана фотография ИС1, на которой представлены цифровой аттенуатор и буферный усилитель.



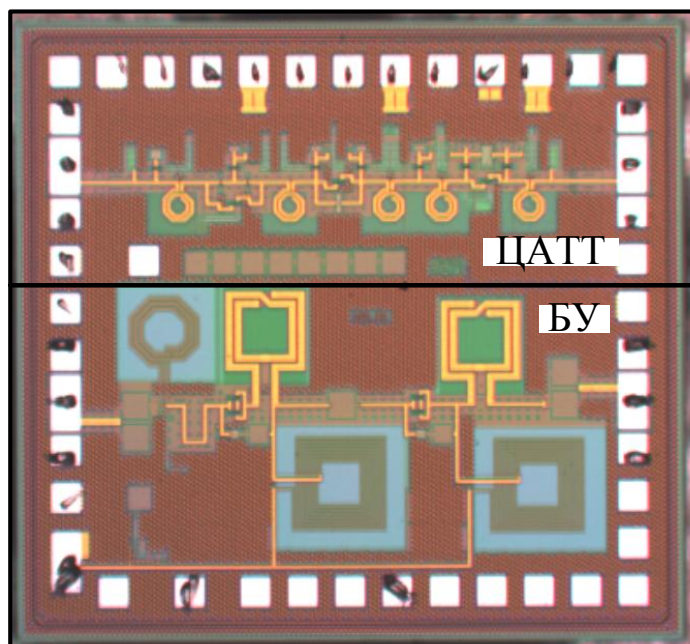


Рисунок 1.39 – Фотография ИС1

Измерения проводились на зондовой станции Cascade. Для измерений S-параметров и коэффициента шума использовался векторный анализатор цепей PNA-X. Перед началом измерений была проведена калибровка на пластине.

Начальные условия для измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1 на кристалле: полоса частот 0,05...10 ГГц, количество точек – 2001, полоса фильтра ПЧ – 1 кГц, входная мощность для измерения S-параметров – минус 15 дБм.

В таблице 1.6 представлены параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1. Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 67 мА; входная мощность ВЧ сигнала -15 дБм. На рисунке 1.40 представлен график параметров рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в полосе до 10 ГГц.

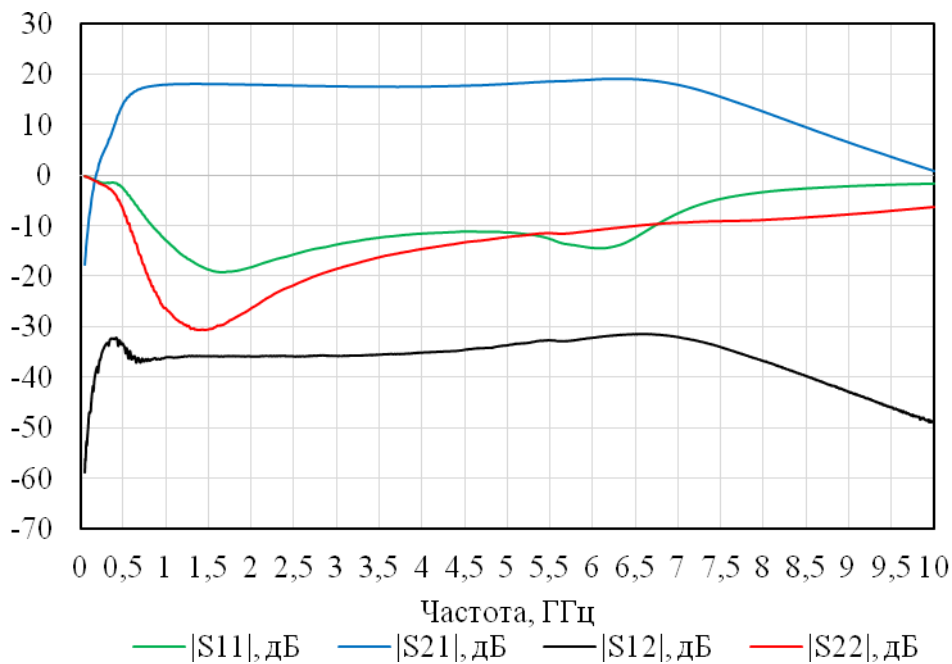


Рисунок 1.40 – Параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в зависимости от частоты

В таблице 1.7 представлены численные значения коэффициента шума БУ ИС1. Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 73 мА; входная мощность ВЧ сигнала –15 дБм. На рисунке 1.41 показан график коэффициент шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в полосе частот до 10 ГГц.

Таблица 1.7 – Коэффициент шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
NF, дБ	5,97	4,04	3,93	4,06	4,10	4,05	3,96	3,9	4,01	4,05

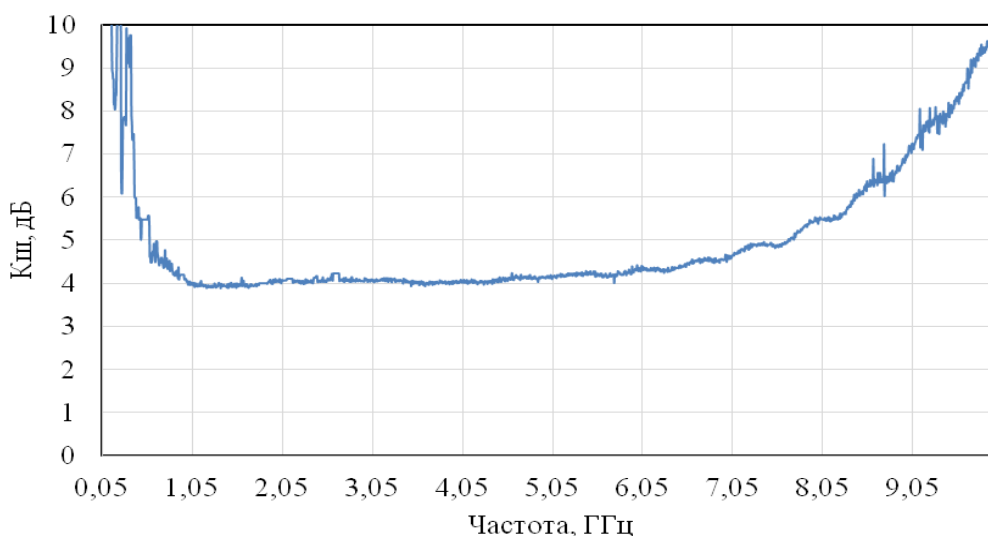


Рисунок 1.41 – График коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в зависимости от частоты

В таблице 1.8 представлены параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 (толщина 200 мкм). Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 69 мА; входная мощность ВЧ сигнала – 15 дБм. На рисунке 1.42 представлен график параметров рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в полосе до 10 ГГц.

Таблица 1.8 – Параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 (толщина 200 мкм)

$f$ , ГГц	$ S_{11} $ , дБ	$\varphi(S_{11})$ , градусы	$ S_{21} $ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , градусы	$ S_{12} $ , дБ	$\varphi(S_{12})$ , градусы	$ S_{22} $ , дБ	$\varphi(S_{22})$ , градусы
0,5	-3,38	-66,22	13,64	74,51	-34,28	-120,58	-7,41	-170,29
1	-14,01	-73,18	17,27	0,76	-37,19	69,87	-30,86	149,55
1,5	-16,47	-42,67	17,42	-37,17	-36,35	21,16	-30,79	-85,80
2	-15,20	-26,99	17,30	-66,65	-36,73	-4,40	-24,44	-79,21
2,5	-13,54	-27,90	17,10	-92,81	-36,58	-22,20	-20,41	-89,88
3	-12,5	-35,73	16,96	-116,71	-36,66	-36,94	-17,71	-102,11
3,5	-11,8	-43,76	16,76	-140,25	-36,50	-49,06	-16,12	-111,00
4	-11,56	-55,83	16,74	-162,71	-35,86	-62,17	-14,74	-123,94
4,5	-12,16	-67,98	16,80	173,94	-35,74	-74,30	-13,95	-138,61
5	-13,05	-81,95	16,97	150,44	-35,28	-85,91	-13,59	-154,11

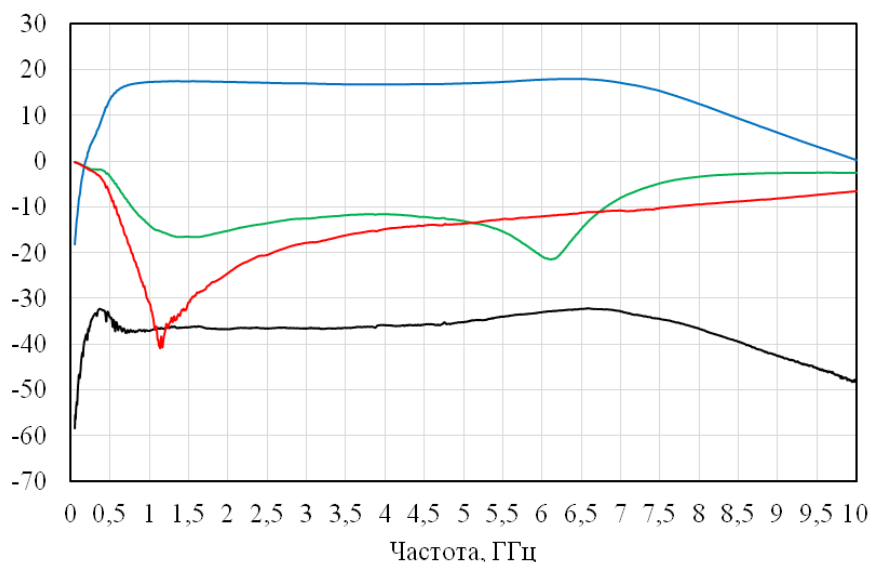


Рисунок 1.42 – Параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 (толщина 200 мкм) в зависимости от частоты

В таблице 1.9 представлены численные значения коэффициента шума БУ ИС1 (толщина 200 мкм). Напряжение питания (VDD): 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2): 1 В; потребление тока: 72 мА; входная мощность ВЧ сигнала: минус 15 дБм. На рисунке 1.43 представлен график Коэффициент шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 (стандартная толщина) в полосе до 10 ГГц.

Таблица 1.9 – Коэффициент шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 (толщина 200 мкм)

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
NF, дБ	5,66	4,03	4,13	4,07	3,99	4,11	4,11	3,9	4,07	4,19

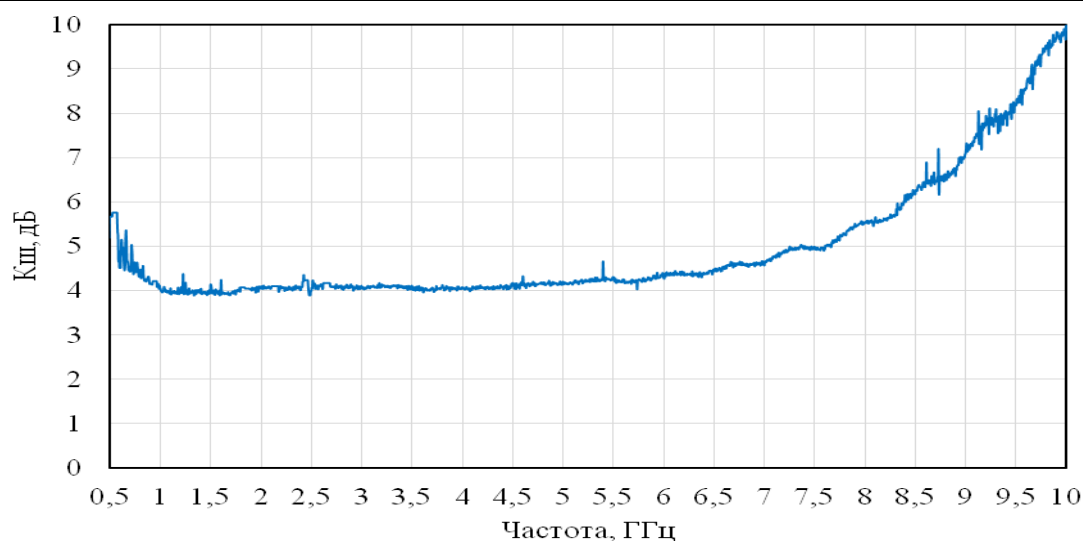


Рисунок 1.13 – График коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 (толщина 200 мкм) в зависимости от частоты

В результате измерения установлено, что интегральная схема буферного усилителя полностью работоспособна, за исключением контактной площадки «PowerDown», отвечающей за логическое управление включенным и выключенным состояниями буферного усилителя. Проблемы могут быть связаны с: 1) некорректная конструкция цифрового буфера, что весьма вероятно, 2) некорректное соединение цифрового «пада» с управляющей шиной смещением по затвору, 3) а также соединение PD с питающей шиной.

В таблице 1.10 представлено сравнение полученных результатов измерения БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 при различной толщине кристалла с техническим заданием.

Таблица 1.10 – Сравнение полученных результатов измерения БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 с техническим заданием

Характеристика	ТЗ			Стандартная толщина		Толщина 200 мкм	
	Мин.	Тип.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	1		5	1	5	1	5
Коэффициент усиления, дБ	14	15	17	17,52	18,1	16,74	17,42
Неравномерность Кп в полосе 1 ГГц, дБ		0,5	0,7	0,1	0,5	0,1	0,4
Коэффициент шума, дБ	3	4,5	5	3,9	4,1	3,9	4,1
Обратный коэффициент передачи, дБ		-30	-25	-35,94	-33,58	-36,73	-35,28

Продолжение Таблицы 1.10

Коэффициент отражения на входе, дБ		-15	-10	-18,73	-11,15	-16,47	-11,56
Коэффициент отражения на выходе, дБ		-15	-10	-30,62	-12,2	-30,9	-13,6
Напряжение питания, В	3,0	3,3	3,6	3,3	3,6	3,3	3,6
Потребляемый ток, мА		60	70	70	80	70	80

*Измерение буферного усилителя (ИС1) в корпусе на печатной плате (МОП)*

Для измерения S-параметров, P1dB, IP3 использовался 4-х портовый R&S ZVA40, для измерения коэффициента шума использовался векторный анализатор цепей PNA-X N5247B. Перед началом измерений была проведена калибровка. Количество испытательных образцов 2, количество корпусов 2 – QFN20, QFN24. На рисунке 1.44 представлены фотографии макетов отладочных плат для ИС1 в корпусах QFN20 и QFN24.

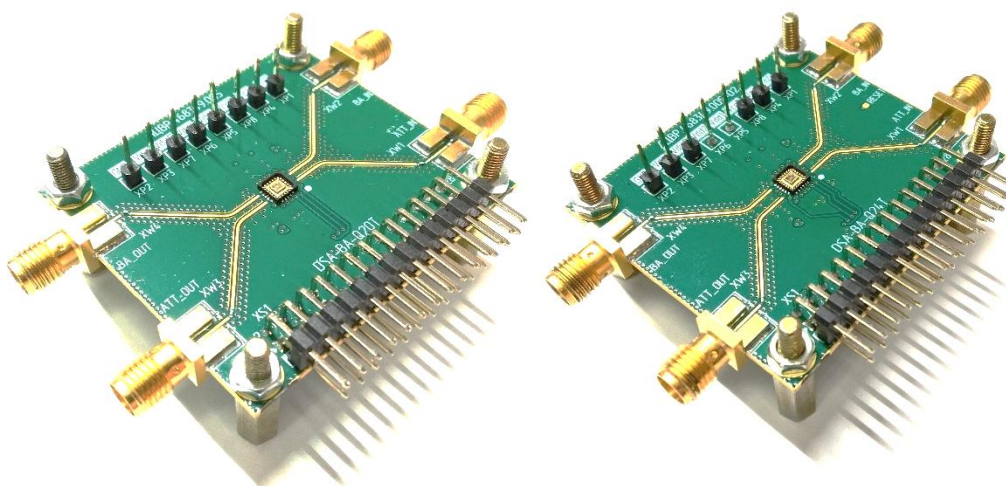


Рисунок 1.44 – Фотографии макетов отладочных плат для ИС1

Начальные условия для измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе на печатной плате для ВАЦ: полоса частот 0,05...10 ГГц, количество точек – 2001, полоса фильтра ПЧ – 1 кГц, входная мощность для измерения S-параметров и Кш– минус 10 дБм, входная мощность для измерения IP3 – минус 15 дБм, включить АТТ 10 дБ на входе измерительного порта ВАЦ, подключенного к выходу БУ во избежание перегрузки измерительного приёмника, для измерения выходной мощности установить развёртку по входной мощности от минус 25 до 5 дБм.

*Измерение буферного усилителя (ИС1) в корпусе QFN20*

В таблице 1.11 представлены параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате. Напряжение питания (VDD): 3,3 В; напряжение

смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2): 1 В; потребление тока: 78 мА; входная мощность ВЧ сигнала: -10 дБм. На рисунке 1.45 представлен график параметров рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате в полосе до 10 ГГц.

Таблица 1.11 – Параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$ S_{11} $ , дБ	-4,55	-14,24	-19,86	-19,33	-18,61	-17,26	-17,75	-23,61	-23,73	-17,92
$ S_{12} $ , дБ	-40,60	-36,53	-35,45	-35,85	-36,30	-36,76	-37,31	-37,87	-38,77	-42,13
$ S_{21} $ , дБ	13,45	17,46	17,40	17,26	17,05	16,88	16,67	16,52	15,97	15,62
$ S_{22} $ , дБ	-7,00	-15,55	-16,19	-15,91	-16,92	-19,82	-23,80	-17,79	-12,94	-11,05

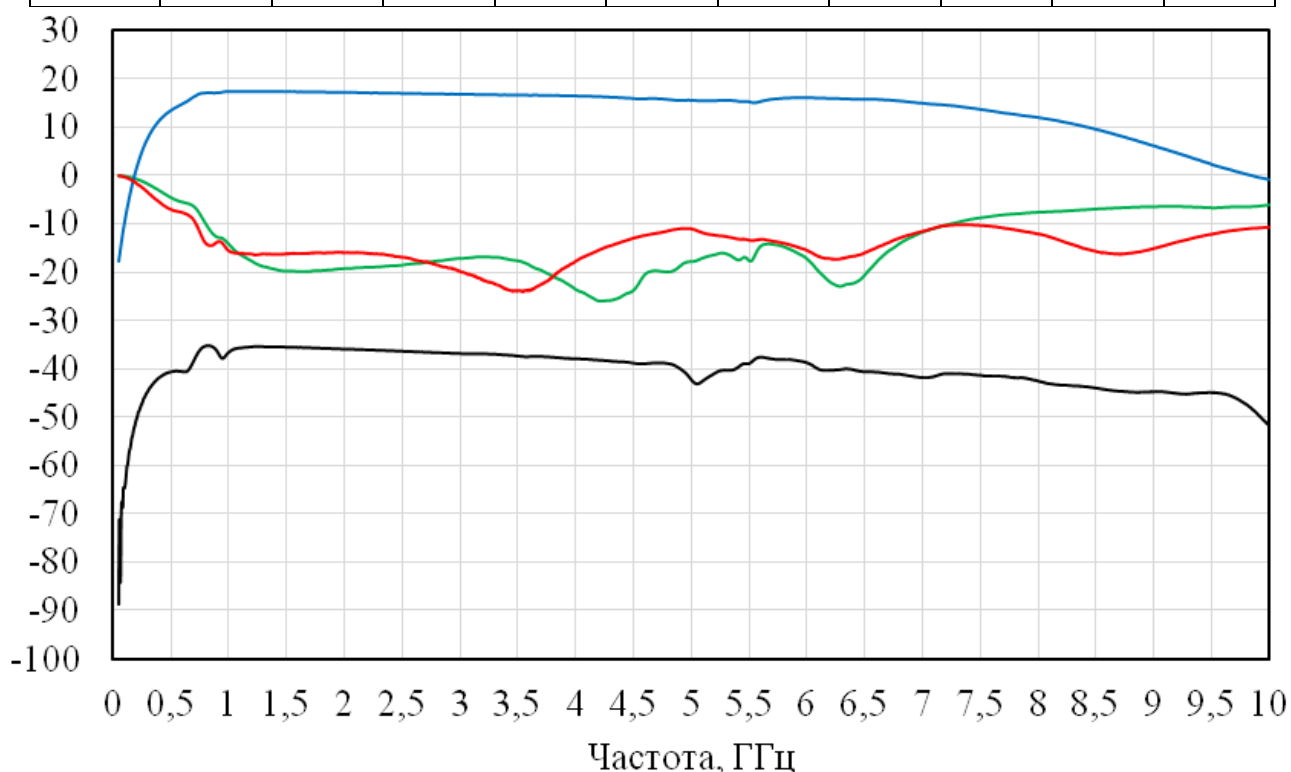


Рисунок 1.45 – График зависимости параметров рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате

В таблице 1.12 представлены численные значения P1дБ БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате. Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 78 мА. На рисунке 1.46 представлен график P1дБ БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате в зависимости от частоты.

Таблица 1.12 – Точка 1 дБ компрессии по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$P_{1дБ}$ , дБм	13,6	13,7	14,1	13,9	13,8	13,2	13,7	13,0	13,1	12,5

В таблице 1.13 представлены численные значения IP3 БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (1 образец). Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 78 мА; входная мощность ВЧ сигнала – 15 дБм. На рисунке 1.47 представлен график IP3 БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате в зависимости от частоты.

В таблице 1.14 представлены численные значения Кш БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (1 образец).

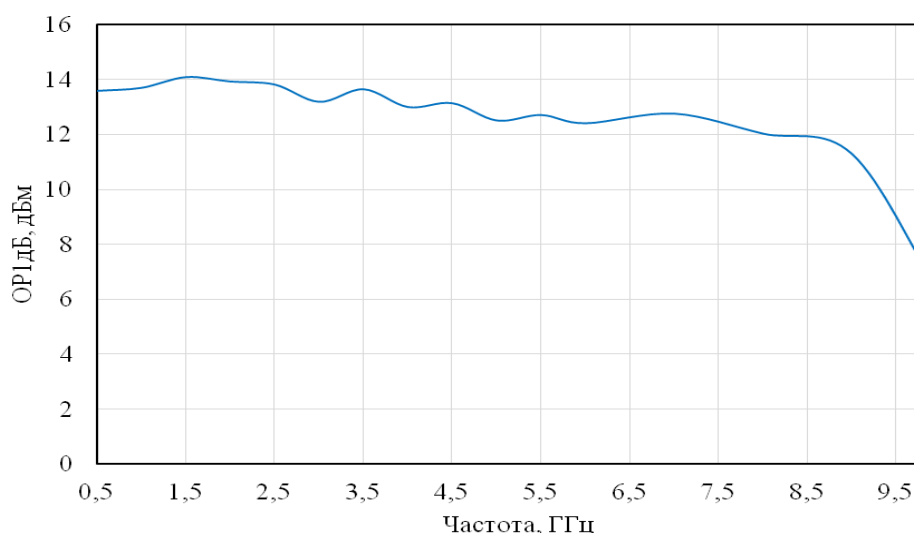


Рисунок 1.46 – График зависимости точки 1 дБ компрессии по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (1 образец) от частоты

Таблица 1.13 – Точка интермодуляционных искажений третьего порядка IP3 по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$IP3$ , дБм	23,58	23,78	24,02	24,28	24,59	24,01	23,98	23,20	23,67	23,26

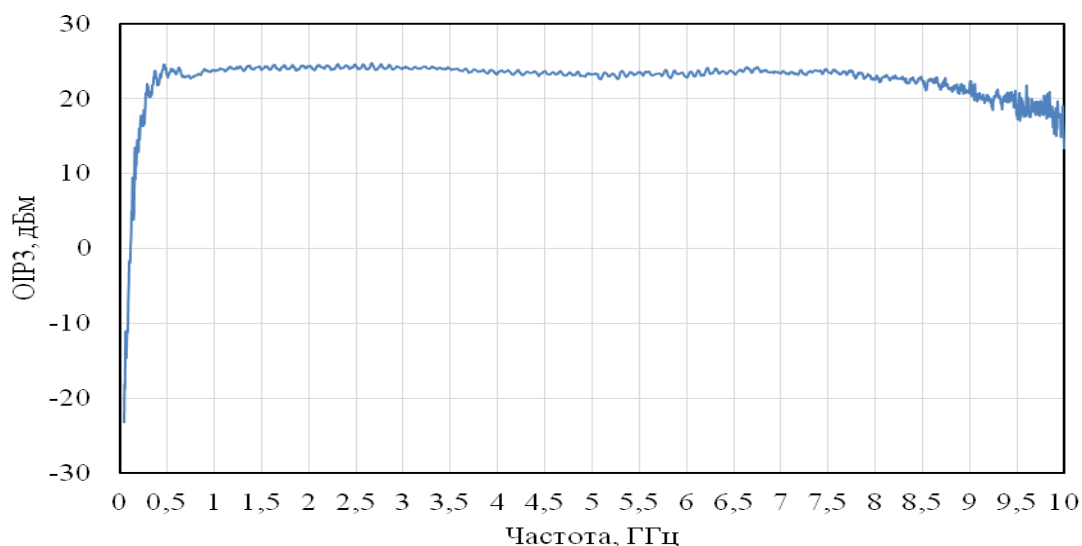


Рисунок 1.47 – График зависимости точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате от частоты

Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 77 мА; входная мощность ВЧ сигнала –10 дБм. На рисунке 1.48 представлен график Кш БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате в зависимости от частоты.

Таблица 1.14 – Коэффициент шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (1 образец)

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Кш, дБ	4,92	4,20	4,24	4,43	4,53	4,54	4,61	4,67	5,11	5,47

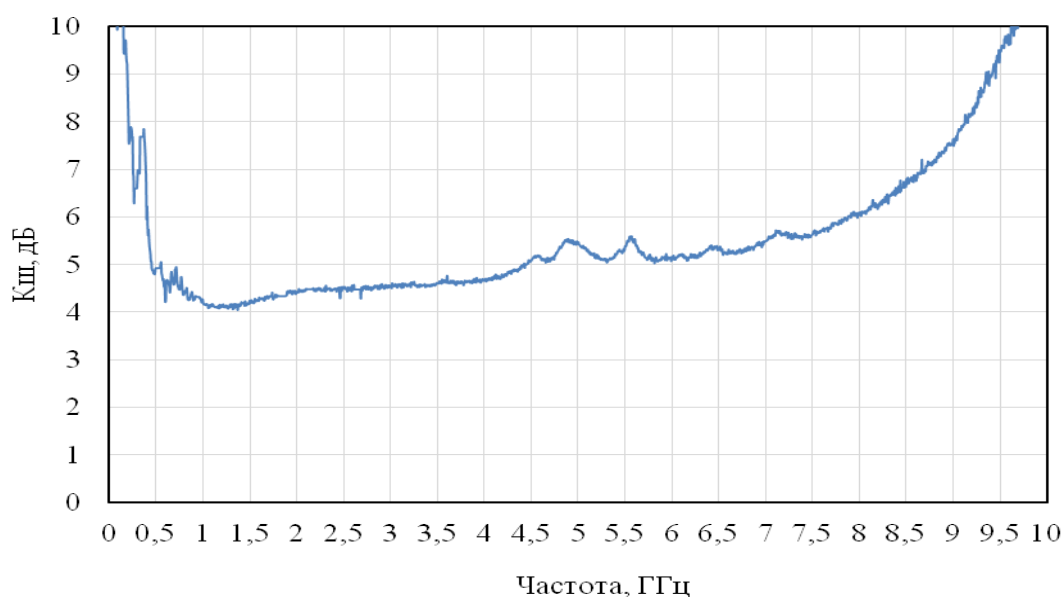


Рисунок 1.48 – График зависимости коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате от частоты



Начальные условия для измерения СВЧ 1-ого и 2-ого образцов интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате одинаковые.

В таблице 1.15 представлены параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец). Напряжение питания (VDD) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2) 1 В; потребление тока 76 мА; входная мощность ВЧ сигнала –10 дБм. На рисунке 1.49 представлен график параметров рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате в полосе до 10 ГГц.

Таблица 1.15 – Параметры рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец)

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$ S_{11} $ , дБ	-4,5	-14,0	-20,0	-19,3	-18,3	-16,9	-17,5	-22,9	-23,1	-17,3
$ S_{12} $ , дБ	-40,4	-36,8	-35,4	-35,8	-36,3	-36,7	-37,2	-37,7	-38,5	-40,5
$ S_{21} $ , дБ	13,5	17,5	17,4	17,2	17,0	16,8	16,6	16,4	15,9	15,4
$ S_{22} $ , дБ	-7,1	-15,7	-16,5	-16,2	-16,9	-19,5	-22,8	-17,6	-13,0	-10,9

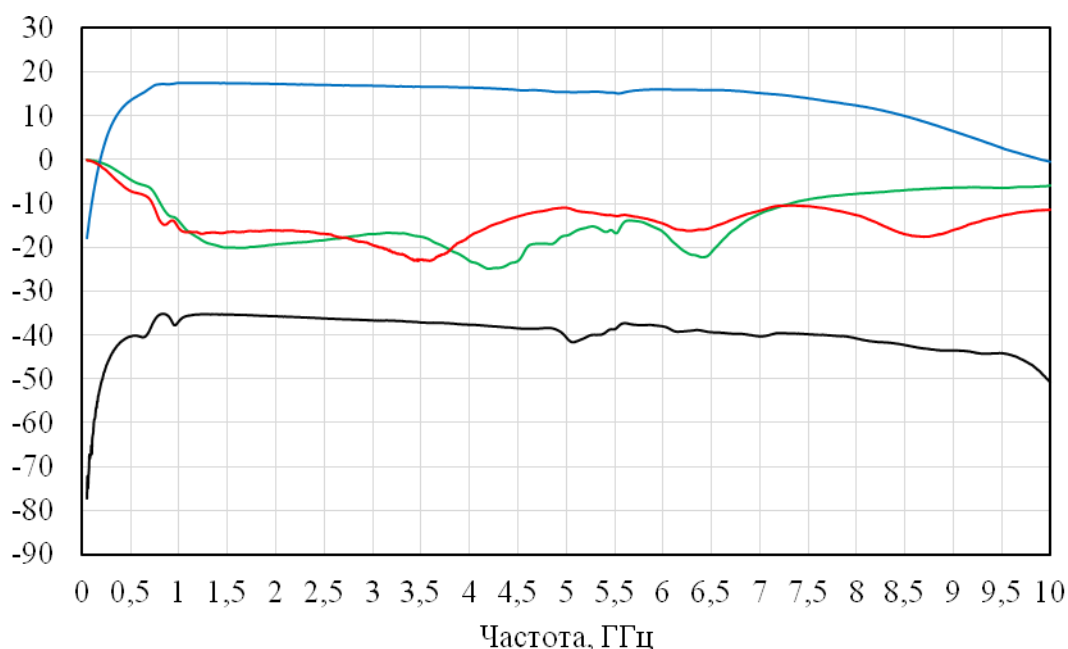


Рисунок 1.49 – График зависимости параметров рассеяния БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец)

В таблице 1.16 представлены численные значения  $P_{1дБ}$  БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец). Напряжение питания ( $V_{DD}$ ) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада ( $V_{BIAS1/2}$ ) 1 В; потребление тока 78 мА. На рисунке 1.50 представлен график  $P_{1дБ}$  БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец) в зависимости от частоты.

Таблица 1.16 – Точка 1 дБ компрессии по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец)

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$P_{1дБ}$ , дБм	13,4	13,6	14,1	13,8	13,7	13,1	13,4	12,8	12,7	12,2

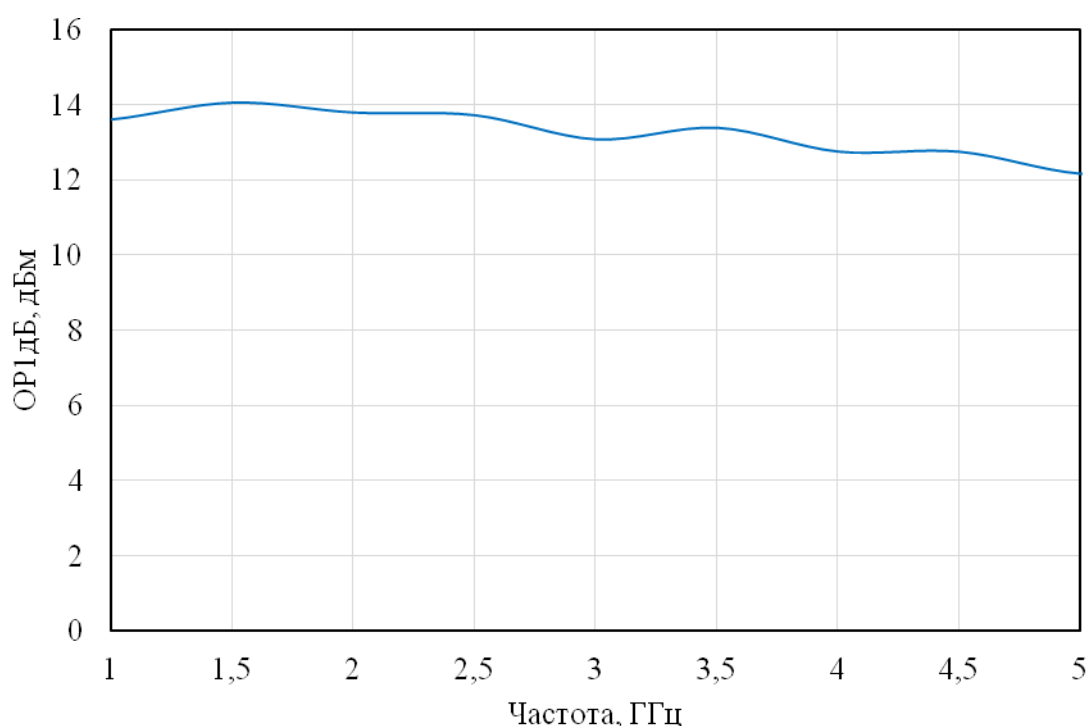


Рисунок 1.50 – График зависимости точки 1 дБ компрессии по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец) от частоты

В таблице 1.17 представлены численные значения  $IP_3$  БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец). Напряжение питания ( $V_{DD}$ ) 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада ( $V_{BIAS1/2}$ ) 1 В; потребление тока 76 мА; входная мощность ВЧ сигнала  $-15$  дБм. На рисунке 1.51 представлен график  $IP_3$  БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец) в зависимости от частоты.

Таблица 1.27 – Точка интермодуляционных искажений третьего порядка IP3 по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец)

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$IP3$ , дБм	23,7	23,7	24,0	24,3	24,3	24,0	24,1	23,3	23,4	23,1

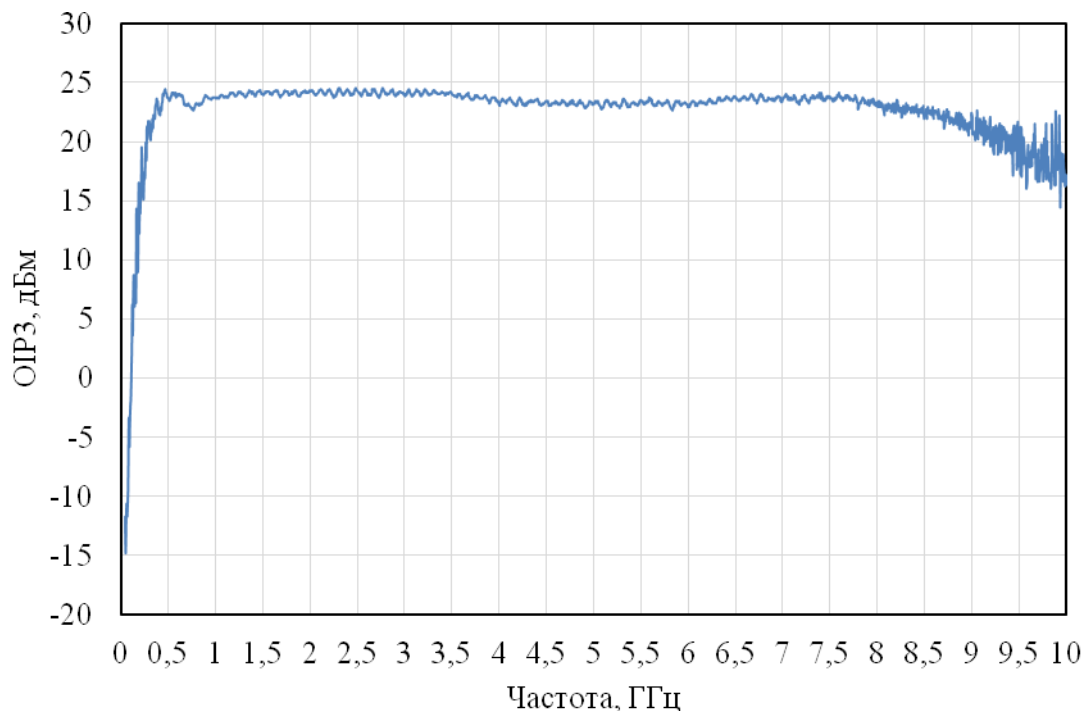


Рисунок 1.51 – График зависимости точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец) от частоты

В таблице 1.19 представлены численные значения Кш БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (**2 образец**). Напряжение питания (VDD): 3,3 В; напряжение смещения первого и второго каскада (VBIAS1/2): 1 В; потребление тока: 74 мА; входная мощность ВЧ сигнала: -10 дБм. На рисунке 1.52 представлен график Кш БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (**2 образец**) в зависимости от частоты.

Таблица 1.19 – Коэффициент шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец)

$f$ , ГГц	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Кш, дБ	5,2	4,23	4,20	4,45	4,54	4,57	4,55	4,60	5,04	5,49

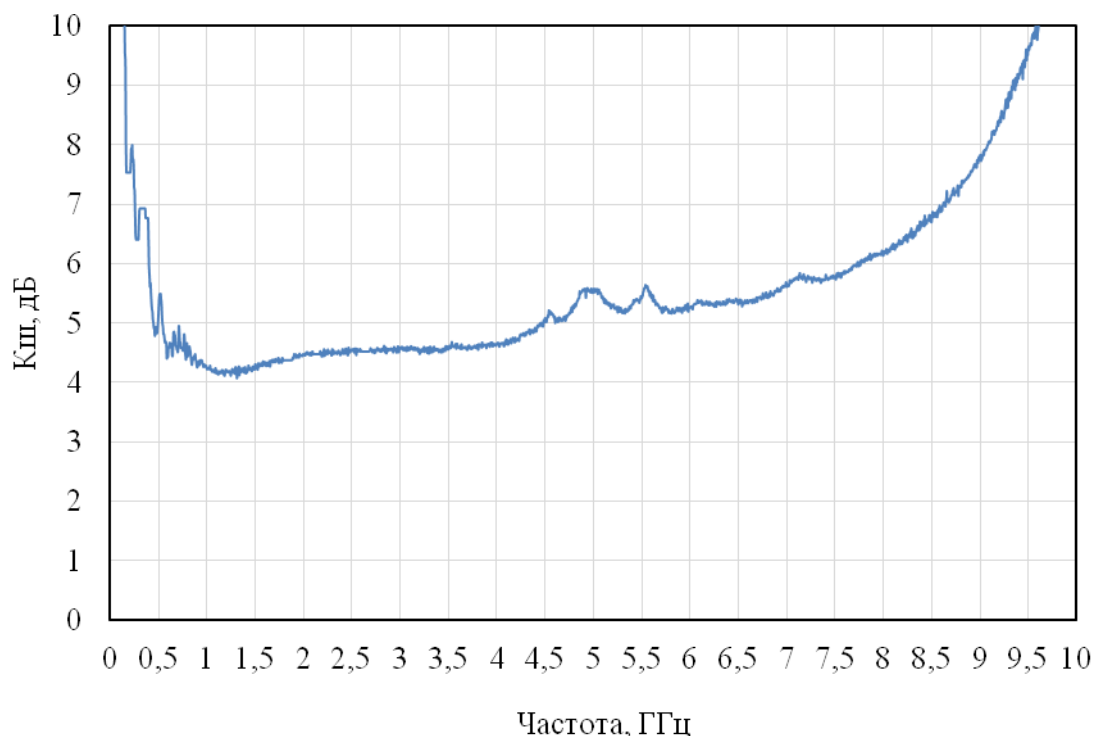


Рисунок 1.52 – График зависимости коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате (2 образец) от частоты

В таблице 1.20 представлено сравнение полученных результатов измерения БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 при различной толщине кристалла с техническим заданием.

Недостаток выходной мощности по P1дБ может быть связан с недостоверностью характеристик транзисторов PDK с реальными характеристиками усилительных элементов. Неравномерность коэффициента передачи, а также повышенный уровень коэффициента шума связаны с конструктивными особенностями печатной платы, корпуса, особенностями сварки кристалла в корпусе.

Таблица 1.20 – Сравнение результатов измерений БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1 в корпусе QFN20 на печатной плате с техническим заданием

Характеристика	ТЗ			QFN20		QFN20	
				1 обр.		2 обр.	
	Мин.	Тип.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.
Рабочий диапазон частот, ГГц	1		5	1	5	1	5
Коэффициент усиления, дБ	14	15	17	15,6	17,5	13,5	17,5
Неравномерность Кп в полосе 1 ГГц, дБ		0,5	0,7	0,2	0,9	0,15	0,5

Продолжение Таблицы 1.20

Коэффициент шума, дБ	3	4,5	5	4,2	5,4	4,2	5,4
Точка 1 дБ компрессии $K_u$ на вых., дБм	13	15	16	12,5	14,1	11,8	14,1
Точка интермодуляционных искажений 3-го порядка на вых., дБм1)	24	25	27	23,2	24,6	23,1	24,3
Обратный коэффициент передачи, дБ		-30	-25	-38,7	-35,5	-42,8	-35,4
Коэффициент отражения на входе, дБ		-15	-10	-26,7	-14,2	-24,7	-14
Коэффициент отражения на выходе, дБ		-15	-10	-24,1	-11,1	-22,8	-10,9
Напряжение питания, В	3,0	3,3	3,6	3,3		3,3	
Потребляемый ток, мА		60	70	76	78	74	78

### 1.1.6 Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A

#### *Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A представляет по существу мощную платформу, выполняющую несколько функций, в частности, независимое осциллографирование одновременно четырех сигналов, обработку всех четырех сигналов, контроль и визуализацию целостности сигналов.

В ЦКП «Импульс» на базе UXR0134A планировалось и уже частично реализовано не только использование основных функций в процессе измерений, но и разработка новых проектов, в которых используется первичная регистрация сигналов и затем осуществляется их обработка пока на «внешнем» программном обеспечении в процессе решения задач измерения нелинейных искажений импульсных сигналов.

Прибор UXR0134A поставлен по договору № ЕИ-80/971/19 в конце 2019 года. Внешний вид осциллографа показан на рисунке 1.53.

#### *Характеристики*

Осциллограф Keysight UXR0134A обладает следующими характеристиками:

- 1) Уровень шума – менее 150 мкВ (что очень важно при измерении малошумящих генераторов и усилителей на пластине зондовым способом);
- 2) Четыре независимых канала измерения (отсутствие режима интерливинга);
- 3) Разрядность АЦП – 10 бит;
- 4) Подтвержденная целостность сигнала благодаря высокому показателю эффективной разрядности (ENOB) АЦП – более 6,8;

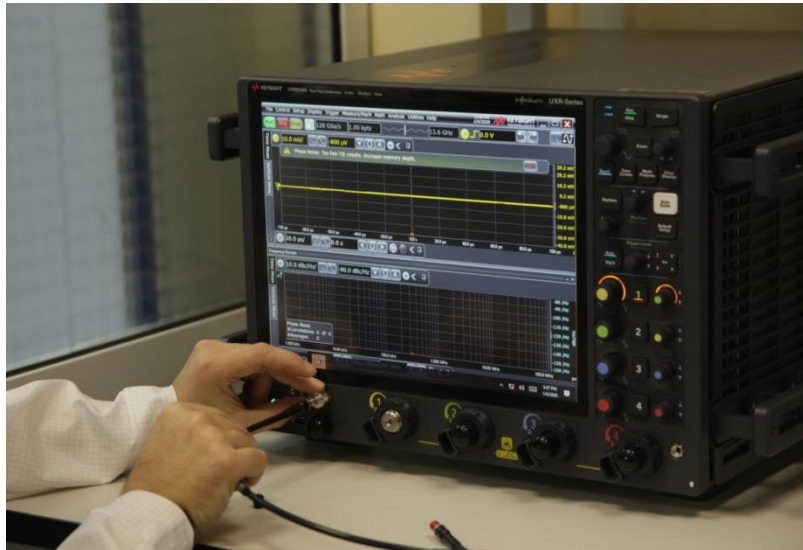


Рисунок 1.53 – Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A

- 5) Возможность расширения полосы пропускания вплоть до 33 ГГц (программным способом) и до 110 ГГц (аппаратным способом);
- 6) Возможность расширения памяти до 2 ГВыб/канал;
- 7) Возможность измерения параметров электрического сигнала (в базе) и оптического сигнала (с использованием блоков электрооптических преобразователей). Высокая точность измерений обеспечивается за счёт выполнения калибровки системы в метрологической лаборатории Keysight. Возможность когерентного анализа оптических сигналов с модуляцией OFDM (используется на магистральных линиях передачи данных);
- 8) Большое количество приложений для анализа/декодирования/синхронизации стандартных протоколов цифровой связи, тестирования на соответствие стандартов;
- 9) Возможность анализа ВЧ/СВЧ сигналов, широкополосных сигналов стандарта 5G, сигналов автомобильных радаров;
- 10) Режим цифрового преобразователя частоты. Позволяет анализировать высокочастотный сигнал, преобразованный на нулевую ПЧ с использованием цифрового квадратурного преобразователя частоты. Данный режим за счёт децимации потока позволяет существенно уменьшить объем анализируемых данных.
- 11) Открытый интерфейс автоматизации, позволяющий удаленно управлять прибором, загружать на внешний ПК результаты измерений.
- 12) Возможность измерять фазовый шум источников сигнала (опция), необходимая для тестирования генераторов. Подавая исследуемый сигнал на несколько входов осциллографа можно выполнять процедуру кросс корреляции, которая позволяет существенно снизить пороговый уровень измеряемого фазового шума.

### Пример применения

Проводились исследования измерительного устройства, разработанного по структурной схеме, показанной на рисунке 1.54. Его функции состоят в формировании сигнала в виде радиоимпульса, приеме отраженного сигнала от цели и его обработке.

Измерительная установка включает в себя:

- персональный компьютер (ПК);
- измерительное устройство, состоящее из узлов:
  - микроконтроллер STM32F103C8T6;
  - приёмопередатчик Xethru X2;
  - формирователь питающего напряжения.

В качестве отражающего объекта использовался перфорированный металлический лист.

Микроконтроллер измерительного устройства предназначен для управления процессом измерения и конфигурацией приёмопередатчика, временным хранением измеряемых данных и их передачи через порт USB на персональный компьютер. Управление измерительным устройством выполняется с помощью разработанного специализированного программного обеспечения.

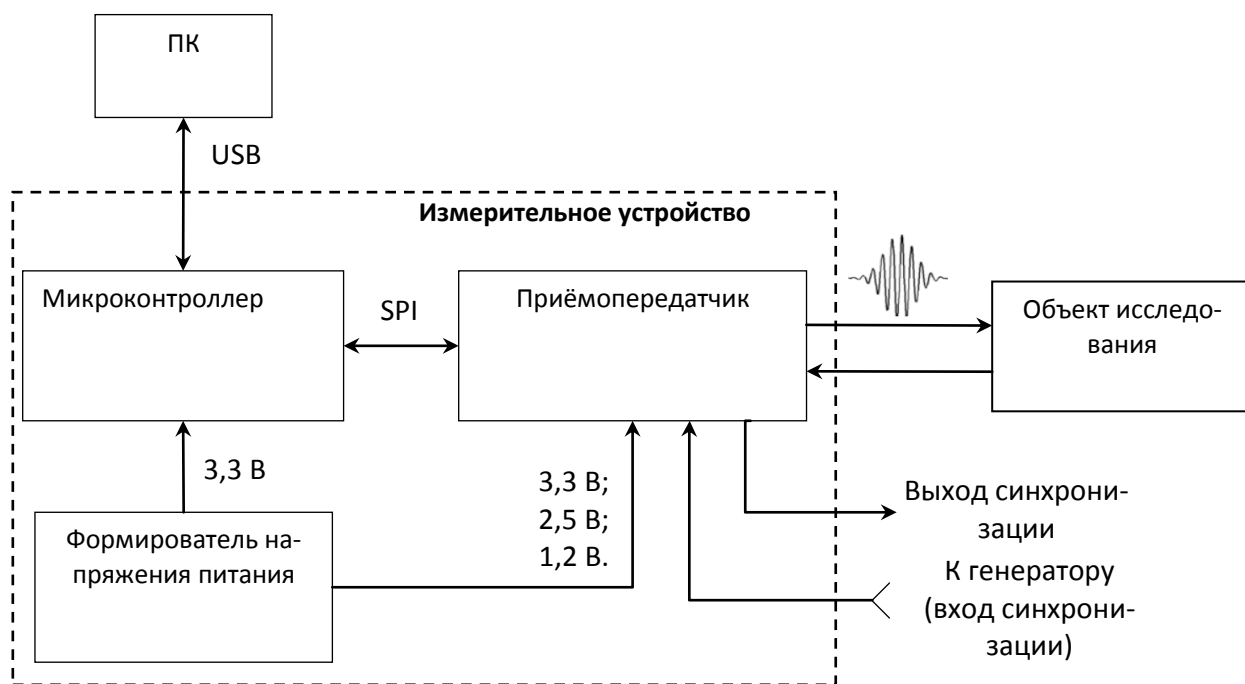


Рисунок 1.54 – Структурная схема измерительного устройства

Приёмопередатчик содержит генератор тестового сигнала, приёмник, вход и выход синхронизации. Тактирование может быть выполнено от внутреннего генератора или от внешнего через вход синхронизации. Технические характеристики приёмопередатчика представлены в таблице 1.21.

Таблица 1.21 – Технические характеристики приёмопередатчика Xethru X2

Параметр	Значение и описание
Длительность сигнала	Зависит от конфигурации, 0,75–1 нс
Центральная частота	Зависит от конфигурации, 5,3–8,8 ГГц
Частота дискретизации	38 ГГц
Чувствительность	0,1 мВ
Динамический диапазон	60 дБ
Максимальная дальность измерения	21,7 м

Приёмопередатчик формирует радиоимпульс с параметрами, зависящими от его конфигурации. В таблице 1.22 представлены возможные варианты параметров выходного сигнала, формируемого генератором.

Таблица 1.22 – Параметры выходного сигнала

Номер конфигурации	Центральная частота, $f$ , ГГц	Полоса частот по уровню $-10$ дБ, ГГц	Выходная мощность, дБм	Амплитуда, В
1	5,3	1,75	10,7	0,69
2	5,4	1,8	10,8	0,69
3	5,7	1,85	11,2	0,72
4	6,1	2,05	11,8	0,71
5	6,4	2,15	12	0,72
6	6,8	2,3	12,6	0,69
7	7,3	2,35	13,3	0,65
8	7,7	2,5	14	0,62
9	7,8	2,5	14	0,62
10	8,2	2,65	14,8	0,57
11	8,8	3,1	16,4	0,54

На рисунке 1.55 представлена фотография измерительного устройства.

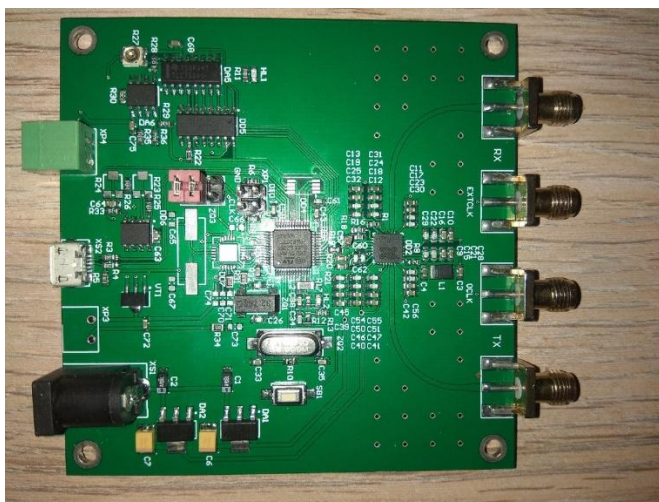


Рисунок 1.55 – Фотография измерительного устройства



Измерения формы сигнала с выхода приемо-передатчика измерительного устройства проводились на осциллографе Keysight Technologies UXR0134A. Осциллограмма показана на рисунке 1.56. Представленная экранная форма позволяет считать основные параметры сигнала: период  $T=1,0133$  нс, амплитуда  $U_0=376,35$  мВ.



Рисунок 1.56 – Осциллограмма сигнала с выхода приемо-передатчика измерительного устройства

### 1.1.7 Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq

*Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Поставка осуществлена в 2019 г. по договору № ЕИ-78/969/19 от 29.11.2019 г.

Установка быстрого термического отжига (БТО) STE RTA 150 предназначена для проведения отжига омических контактов на полупроводниковых пластинах GaAs, GaN, InP диаметром до 150 мм. STE RTA 150 разработана для проведения кратковременных процессов (до 10 минут) с максимальной температурой до 1000°C и максимальной скоростью достижения заданной температуры до 40°C/с. Для приложений, не связанных с вжиганием омических контактов (ОК), возможно использование установки без графитового стола, что позволяет увеличить динамику нагрева до 200°C/с. Для наблюдения за процессом отжига в ней

предусмотрено кварцевое смотровое окно диаметром 100 мм (используется также для установки ИК-пирометра).

Внешний вид установки показан на рисунке 1.58.

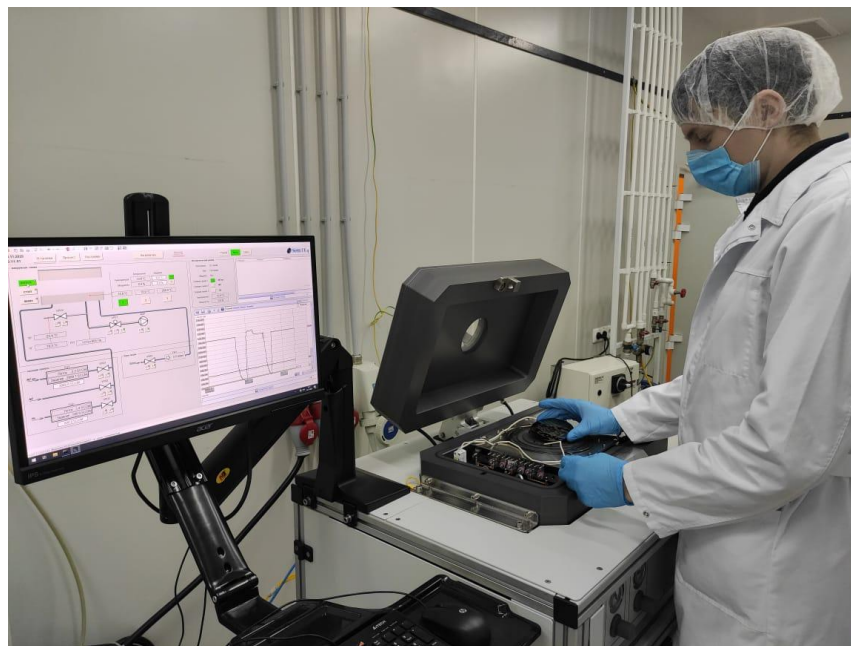


Рисунок 1.58 – Фотография установки БТО STE RTA150

#### *Характеристики. Применение*

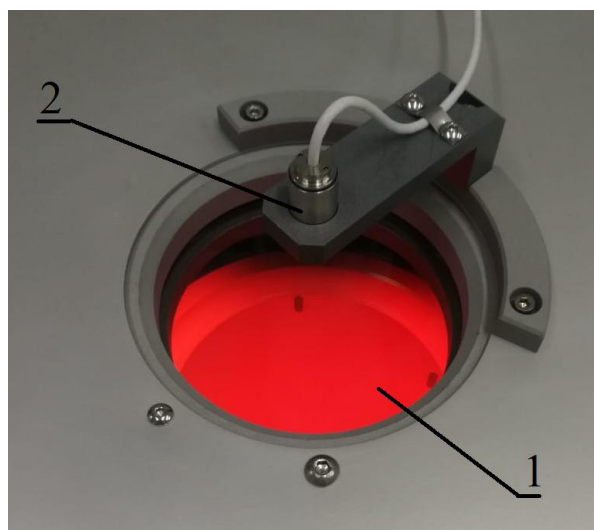
В таблице 1.23 представлены основные характеристики установки БТО.

Таблица 1.23 – Технические характеристики установки БТО

Предельное остаточное давление в камере (реакторе), мм. рт. ст.	<10
Скорость откачки вакуумного насоса, м <sup>3</sup> /час	5
Максимальный диаметр обрабатываемой пластины, мм	150
Максимальная скорость нагрева без графитового столика, С/с	200
Максимальная скорость нагрева с графитовым столиком, С/с	40
Максимальная температура нагрева, °С	1000
Однородность нагрева для пластины диаметром 100 мм, %	2
Количество термопар, шт.	2
Оптический пирометр, шт.	1
Режим автоматического проведения процесса	есть

Основной функцией установки БТО является проведение отжига в твердой фазе тонких пленок металла в полупроводник для формирования омического контакта. Реализация процесса формирования омического контакта БТО осуществляется со скоростью от 20 до

100 °C/с. Установка БТО STE RTA150 позволяет обеспечить высокую однородность нагрева полупроводниковой пластины, имеющей неоднородное поглощение инфракрасного облучения по поверхности. На рисунке 1.60 представлена фотография процесса вжигания металлизации омических контактов при температуре 1000 °C.



1 – Полупроводниковая пластина; 2 – Оптический пирометр.

Рисунок 1.60 – Фотография процесса вжигания ОК при температуре 1000 °C

Чтобы сформировать омический контакт к структурам AlGaN/GaN или InAlN/GaN, AlGaAs/GaAs необходимо провести быстрый термический отжиг (БТО) образцов. Данная операция является самой критичной при формировании омических контактов, так как небольшие изменения в динамике разогрева образца приводят к изменению Rс и морфологии поверхности образца. Отжиг проводится в продуваемом азотом кварцевом реакторе с графитовым держателем, на который устанавливался образец. Нагрев проводился галогенными лампами с общей мощностью 1,5 кВт. Для контроля температуры при быстром термическом отжиге используют пирометры и/или термопары, располагая точки контроля температуры в центре и на краях пластины (рисунок 1.61).

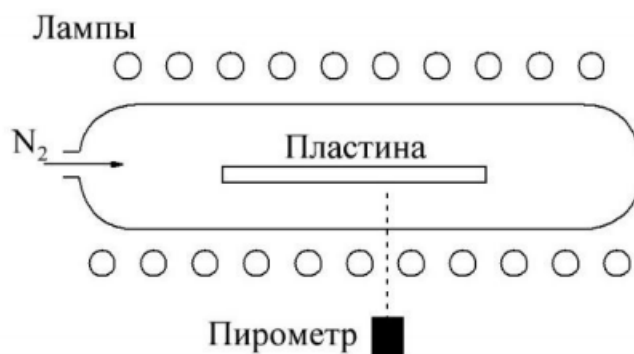


Рисунок 1.61 – Схематическое представление конструкция реактора установки БТО

С помощью установки БТО STE RTA150 были отработаны процессы вжигания металлизации омических контактов для GaAs и GaN СВЧ МИС, сопротивление которых составило 150-200 Ом/кв и 300-350 Ом/кв соответственно.

В работе использовалась установка БТО STE RTA150, оборудованная пирометром и термопарой.

В базовой конфигурации оснастки пластина располагалась на носителе, к краю которого была присоединена термопара.

Процесс отжига включает прокаливание образцов при  $T=200^{\circ}\text{C}$  для обезгаживания поверхности с последующим нагревом образца до  $800^{\circ}\text{C}$  с помощью грубой (ручное задание мощности) и плавной (ПИД-регулятор) подстройки температуры, выдержки в течение выбранного времени с поддержанием постоянной температуры ПИД-регулятором и остывания в потоке газа. Скорость разогрева, помимо задаваемых мощностей, зависит от следующих факторов:

- а) качество и состояние галогенных ламп;
- б) давление в реакторе;
- в) величина потока газа.

Конструкция камеры позволяет расположить рабочую пластину диаметром до 100мм на дне кварцевого реактора, либо на кварцевом держателе для пластин. Поскольку прозрачные пластины SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с металлизацией омических контактов нагреваются неравномерно при засветке лампами установки, так как металл контактов нагревается быстрее, чем окружающая его область пластины, то было необходимо обеспечить равномерный нагрев пластины. Были использованы непрозрачные носители – пластины из пиролитического графита и монокристаллического кремния. Сравнение качества поверхности омических контактов, полученных на пластинах, на которых омическими контактами занято менее 20% площади, с контактами на пластинах, поверхность которых омические контакты занимают 50% площади, показало, что необходимо исключить прямую засветку образца нагревательными лампами. Различные образцы и даже области на пластинах с большой площадью контактов нагреваются неконтролируемо и, судя по рельефу и сопротивлению контактов, скорость и температура отжига на них локально сильно отличаются от образцов с маленькой площадью контактов. Необходимо также исключить воздействие ИК излучения на металл контактов. Для этого на лицевую сторону кремниевой пластины был напылён слой Ti, а на держатель с пластиной был установлен другой графитовый носитель, выполняющий роль экрана от ламп, расположенных над реактором установки. Поскольку скорость нагревания носителя из графита ниже, чем скорость нагревания кремния, это предотвращало риск перегрева образца за счет излучения и теплопередачи через газовую среду.

Выбор газов для процесса отжига ограничен инертными газами (гелием и аргоном) и близким к ним по инертности азотом. Химически активные газы могут повлиять на химические процессы в отжигаемом омическом контакте. Поскольку на границе раздела металлизации омического контакта с полупроводником всегда имеется определенное количество адсорбированных на поверхности  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O}_2$ , при отжиге омических контактов могут образовываться оксиды. Поэтому одним из требований к газовой среде реактора является также минимизация парциального давления кислорода.

Проведенные эксперименты показали, что при коротком процессе нагрева и быстром остывании образцов камера не успевает перегреться. При выборе режимов отжига необходимо выбрать рабочее давление. Поскольку теплопроводность газов при пониженном давлении начинает снижаться при сопоставимости длины свободного пробега в газе с расстоянием между поверхностями, обменивающимися теплом, то было выбрано давление порядка 0,1 атм. – максимальное давление, при котором, по наблюдению скорости натекания, вакуумное уплотнение камеры установки БТО остается герметичным.

### 1.1.8 Установка плазмохимического травления STE ICP200E SemiTEq

#### *Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Установка входит в состав технологического сектора ЦКП «Импульс». Основная функция – проведение операций плазмохимического травления гетероструктур на основе GaAs, GaN, InP.

Установка плазмохимического травления (ПХТ) STE ICP 200E предназначена для травления металлов, диэлектриков и полупроводников в комбинированной плазме ёмкостного или индуцированного разряда. Процесс травления может осуществляться как в хлорной, так и в среде фтора.

#### *Характеристики и применение*

В таблице 1.24 представлены основные характеристики установки.

Таблица 1.24 – Характеристики установка STE ICP 200E

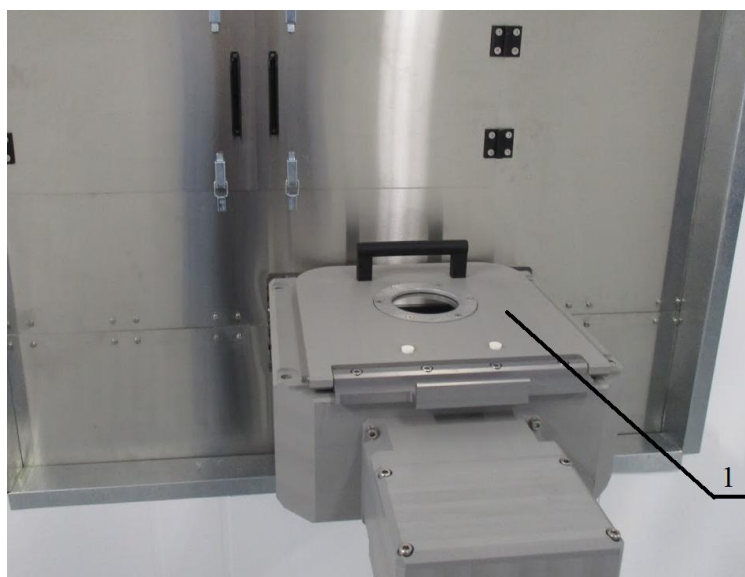
Наименование параметра	Значение
Остаточное давление в камере-реакторе, не более, Па	$6 \times 10^{-4}$
Скорость откачки химически-стойкого турбомолекулярного насоса по $\text{N}_2$ , л/с	1200
Максимальный диаметр полупроводниковых пластин, мм	200
Среда охлаждения образцов во время процесса	жидкий хладагент + He

Продолжение таблицы 1.24

Терморегулирование температуры электрода в диапазоне, °С	от –30 до 80
Количество источников плазмы, шт.	2
Неравномерность травления по диаметру 100 мм пластины, не более, %	±3
Мощность ВЧ, подводимого к источнику индуктивно связанной плазмы (ICP), Вт	10÷1200
Частота ВЧ сигнала генератора источника ICP, МГц	13,56
Мощность ВЧ, подводимого к емкостному источнику плазмы (RIE) в пределах, Вт	10÷600
Частота ВЧ сигнала генератора емкостного электрода, МГц	13,56
Количество устройств автоматического согласования генераторов ICP источника и емкостного электрода	2
Количество газовых линий с контроллером потока газов, шт.	5

Основной функцией установки ПХТ является травление диэлектриков типа  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для проведения технологических операций вскрытия окон при формировании GaAs, GaN, InP, SiGe СВЧ МИС. Травление полупроводников для формирования подзатворной области или сквозных отверстий в полупроводниковой подложке. Травления металлических пленок Cr при формировании фотошаблоны заготовок для контактной и проекционной литографии.

Для проведения процесса плазменного травления полупроводниковая пластина помещается в шлюз (рисунок 1.62), после чего загружается непосредственно в рабочую камеру в область химически активной плазмы, располагаясь на специальном подложкодержателе.



1 – Загрузочный шлюз.

Рисунок 1.62 – Фотография загрузочного шлюза ПХТ STE ICP200E

Основными частицами, участвующими в процессе плазменного травления и влияющими на него, являются свободные атомы, радикалы, ионы и электроны. Вклад этих частиц в плазменное травление различен: химически активные частицы, т. е. свободные атомы и радикалы, вступают в химическую реакцию с поверхностными атомами материалов и удаляют поверхностные слои в результате образования летучих продуктов реакции, а электроны и ионы активируют эту реакцию, увеличивая скорость травления. Активирующее воздействие ионов и электронов определяется энергией, с которой они бомбардируют обрабатываемую поверхность. Значение этой энергии зависит от потенциала обрабатываемой поверхности относительно плазмы. Вследствие различия в подвижности электронов и ионов на поверхности, находящейся в плазме (если она не заземлена и на нее не подается напряжение), возникает отрицательный плавающий потенциал, который зависит от мощности, вкладываемой в разряд, давления и вида газа и при плазменном травлении обычно не превышает нескольких десятков вольт (напомним, что к плазменному травлению относятся процессы, в которых энергия ионов не превышает 100 эВ). Таким образом, величина разности потенциалов между плазмой и обрабатываемой поверхностью не может обеспечить заряженным частицам энергию, достаточную для эффективного физического распыления (при 100 эВ коэффициент распыления не превышает 0,1 атом/ион). Но в то же время энергия ионов и электронов достаточна для разрушения химической связи между поверхностными атомами материала, активации химической реакции и стимулирования процессов десорбции образующихся продуктов. В результате скорость травления возрастает. Кроме этого, положительные ионы сами обладают химической активностью и могут вступать в реакцию.

С помощью установки ПХТ STE ICP 200E были отработаны процессы травления диэлектриков  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Отработаны режима травления сквозных отверстий в полупроводниках GaAs, GaN, отработаны режима травления оптических волноводов на InP подложках. Отработаны режимы травления пленки Cr для получения фотомаски заготовок размер 127x127 мм, 152x152мм.

Для плазмохимического травления гетероструктур на основе GaAs, GaN, InP наибольшее распространение получили процессы с использованием газовых смесей на основе  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  и  $\text{Cl}_2$ . Травление в газовой смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  позволяет получить гладкую поверхность после травления с высоким аспектным соотношением формируемых структур. В то же время недостатками процессов на  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  являются низкая скорость травления вследствие образования и переосаждения пассивирующего полимера, а также проникновение водорода в подложку, что может вызвать деградацию устройств. Дополнительно к этому, имеющиеся в наличии установки плазмохимического травления не позволяли проводить травление с использованием газовых смесей, содержащих  $\text{H}_2$ .

Другим широко используемым подмножеством процессов травления является травление в хлорсодержащей плазме. Для получения профиля структур с высоким аспектным соотношением в состав газовой смеси вводятся пассивирующие добавки  $N_2$ ,  $O_2$  и др. Однако процессам на основе хлора присущи свои недостатки. Образующиеся в процессе травления  $InCl_x$  соединения обладают низкой летучестью при комнатной температуре. Переосаждение  $InCl_x$  на подложку может приводить к высокому уровню шероховатости поверхности формируемых структур. Для решения данной проблемы обычно перед травлением подложка нагревается до  $200^\circ C$  и выше, что повышает требования к термостойкости выбранных для травления маскирующих покрытий. Другим решением является увеличение скорости физической десорбции переосажденного  $InCl_x$  за счет использования энергии ионов плазмы.

Для разработки блока плазмохимического травления гетероструктурных подложек была выбрана газовая смесь на основе  $Cl_2/Ar$  с добавлением пассивирующей добавки  $N_2$  с различным соотношением компонент. В качестве кандидатов на маску для травления были исследованы три типа масок:

- на основе фоторезистивных пленок;
- диэлектрическая пленка нитрида кремния;
- на основе металлических пленок золота.

Технологический процесс плазмохимического метода травления (ПХТ) осуществлялся на установке STE ICP200E (рисунок 1.63)



Рисунок 1.63 – Фотография установки ПХТ STE ICP200E

Разработка включала в себя набор последовательных экспериментов по исследованию термостойкости и плазмостойкости пленок, с последующей оптимизацией режимов плазмо-



химического травления, исследование термостойкости и плазмостойкости фоторезистивных пленок.

В экспериментах были использованы полуизолирующие подложки GaAs. Предварительно был отобран список фоторезистов, позволяющих формировать элементы с критическими размерами 2 мкм и менее, а также обеспечивающих формирование пленок толщиной 2 мкм и более за один слой. На поверхность каждой пластины были нанесены фоторезистивные пленки:

- AZ9260 скорость 4000 об/мин, сушка 110°C (пластины N1 и N8);
- AZ4533 скорость 2000 об/мин, сушка 100°C (пластина N2);
- AZ1518 скорость 1000 об/мин, сушка 100°C (пластина N3);
- AZ P4620 скорость 4000 об/мин, сушка 110°C (пластина N4);
- AR-P 3250 скорость 4000 об/мин, сушка 95°C (пластина N5);
- AZ nLOF 2035 скорость 1500 об/мин, сушка 110°C (пластина N6);
- MAP1225 скорость 1000 об/мин, сушка 110°C (пластина N7).

В качестве опорного режима плазмохимического травления был выбран режим со следующими параметрами: соотношение потоков газовой смеси Cl<sub>2</sub>/Ar составляло 20/80 см<sup>3</sup>/мин; значение мощностей индуктивного разряда ICP (inductively coupled plasma power – ICP power) и емкостной мощности RF (radio frequency power - RF power) составляло 700 и 50 Вт соответственно; давление процесса составляло 5 мТорр. Для однородности прогрева подложек использовалось охлаждение обратной стороны пластин потоком гелия. Образцы с индексом А травились в течение 1 минуты, а образцы с индексом В в течение 2 минут. Образцы с индексом С и D не травились и являлись опорными при различных видах контроля.

После травления выполнялись оценка внешнего вида и измерение остаточной толщины масок. Далее проводилось снятие фоторезистивных масок, и оценка качества удаления пленок фоторезистов подвергшихся воздействию плазмы в процессе травления

Фотографические изображения образцов после проведения операции плазмохимического травления приведены на рисунках 1.64 и 1.65.

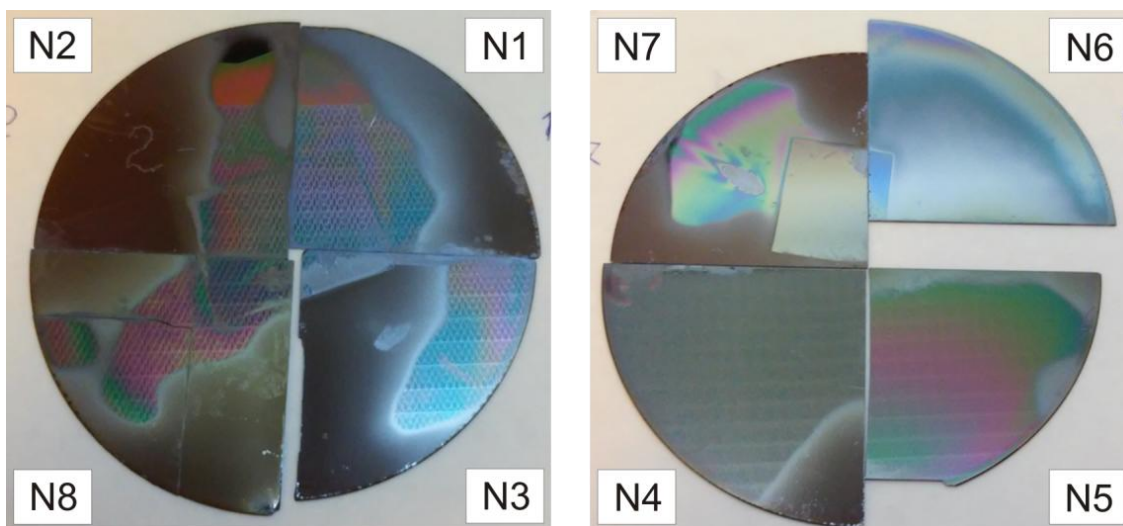


Рисунок 1.64 – Изображения поверхности образцов после плазмохимического травления в течение одной минуты

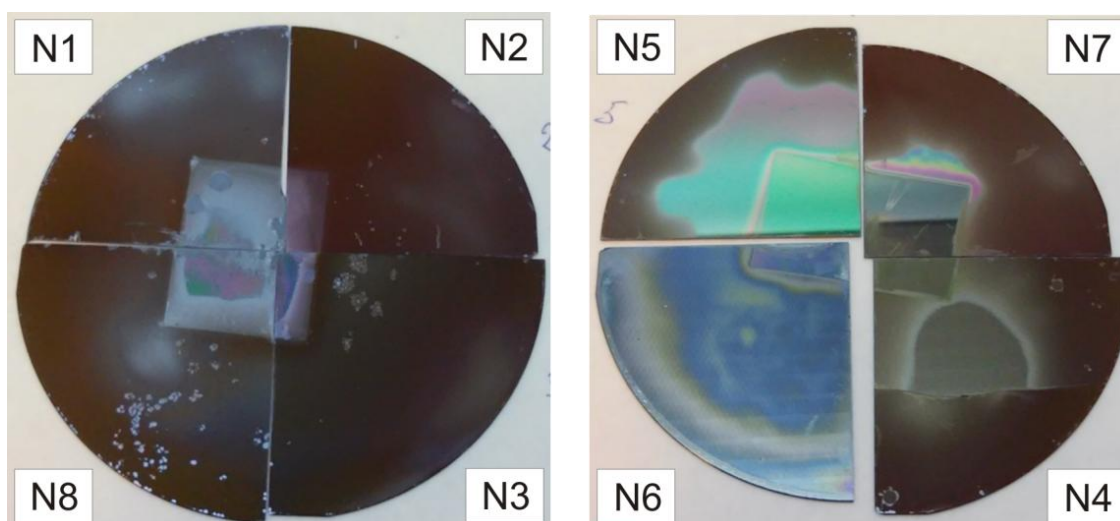


Рисунок 1.65 – Изображения поверхности образцов после плазмохимического травления в течение двух минут

На рисунках видны матовые серые и коричневые области. В данных областях наблюдалась деформация фоторезиста. Характер деформации, наблюдаемый в оптический и электронный микроскоп на всех образцах, где были обнаружены данные области, был одинаков. На рисунке 1.66 на примере MAP1225 показано микроскопическое изображение такой области. На изображениях видно наличие развитого рельефа, достигающего половины толщины пленки. За пределами матовых областей поверхность резиста оставалась гладкой.

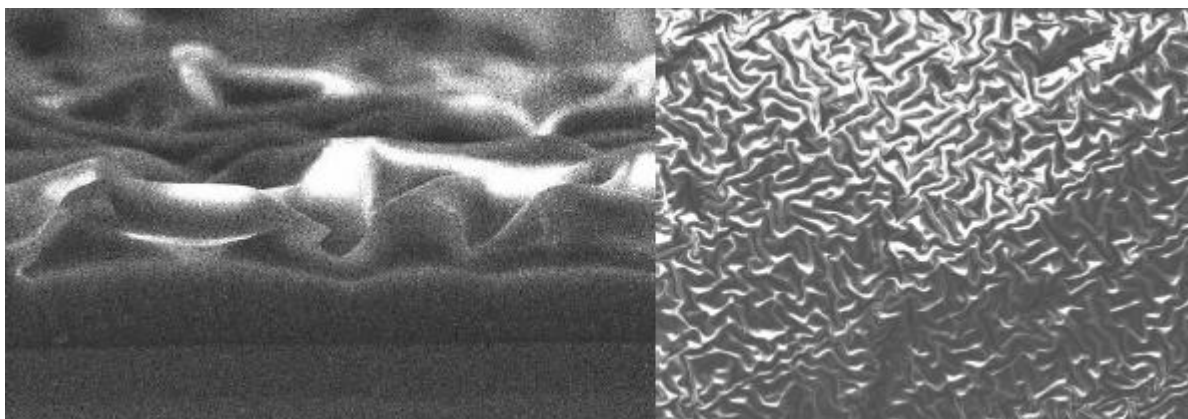


Рисунок 1.66 – Микроскопические изображения поперечного сечения и поверхности образца с резистом MAR1225 после плазмохимического травления в течение одной минуты

Толщины пленок были измерены в разных местах образцов. Для ряда образцов измерения толщины оставшегося после травления фоторезиста не представлялось возможным вследствие возникшего развитого рельефа. Удаление фоторезистивных масок после операции травления выполняли в стандартных растворителях, все маски удалились качественно.

### 1.2 Дооснащение ЦКП «Импульс» в 2020 году

В 2020 г. проведено дооснащение трех секторов ЦКП «Импульс»: развития 3D печатных технологий; технологического и сектора СВЧ измерительного оборудования. Состав оборудования представлен в таблице 1.25.

Таблица 1.25 – Состав оборудования по плану дооснащения ЦКП «Импульс» 2020 года

№ п/п	Наименование	Производитель, страна	Стоимость, руб.	Количество
1	Система прецизионного шнекового дозирования с набором аксессуаров	США	12435164,00	1
2	Кластер FDM, SLA и композитной 3D печати с набором расходных материалов в составе: - стереолитографический 3D-принтер; -3D-принтер для композитной печати; -3D-принтер; - компьютерная система проектирования и управления 3D печатью.		2764555,00	1

Продолжение Таблицы 1.25

3	Установка плазмохимического осаждения диэлектриков в плазме индуктивного и емкостного разрядов и система подачи и утилизации газов установок плазмохимического травления и осаждения	ЗАО «Научное и технологическое оборудование», Россия	30000000	1
4	Контрольно-измерительная аппаратура СВЧ в составе: -кабель СВЧ фазостабильный, соед. тип NMD 3,5 мм (розетка), NMD 3,5 (вилка), 700 мм; - набор калибровочных мер с соединителями типа IX вар.3.	АО «НПФ Микран», Россия	2818944	1

### 1.2.1 Система прецизионного шнекового дозирования с набором аксессуаров

Целью лаборатории принтерных технологий ТУСУР является решение комплекса научно-технических задач по созданию отечественной принтерной (аддитивной) технологии изготовления СВЧ гибридных интегральных схем (ГИС) и других элементов и устройств. Поскольку ЦКП «Импульс» обеспечивает лаборатории технические возможности реализации аддитивных технологий, руководством лаборатории с участием проректора по ИР и инновациям Лоцилова А.Г. и руководством ЦКП «Импульс» согласовывались планы закупок современного оборудования исходя из следующей концепции: на первоначальном этапе использовать существующие лучшие образцы технологического оборудования, на этапе развития перейти к разработке собственного оборудования и технологий.

Разрабатываемые аддитивные технологии в электронике позволят:

- исключить необходимость изготовления физических шаблонов, характерных для трафаретной (screen printing) технологии;
- снизить потери исходных материалов на формирование топологии;
- существенно сократить время создания элементов и устройств СВЧ электроники;
- обеспечить возможность изготовления многослойных/объемных СВЧ гибридных интегральных схем в едином технологическом цикле;
- снизить себестоимость и обеспечить возможность быстрого прототипирования гибридных интегральных схем СВЧ диапазона.

К основным научно-техническим проблемам, сдерживающим внедрение печатной аддитивной технологии изготовления СВЧ ГИС, относится:

1) отсутствие адекватных математических моделей, позволяющих выполнять синтез и оптимизацию чернил (материалов функциональных слоев), пригодных для принтерного нанесения, технологий их получения и применения;

2) достижимые пределы параметров элементов, изготовленных печатным способом, не установлены, их поиск и научное обоснование еще предстоит осуществить;

3) технологическое оборудование, предназначенное для изготовления печатных плат принтерным способом, только начинает внедряться в практику, при этом известные технические решения не оптимизированы для изготовления СВЧ ГИС.

Получение новых научных знаний, а также выполнение прикладных опытно-конструкторских и технологических работ позволит осуществить переход к следующему технологическому укладу в данном направлении, который в значительной степени базируется на концепции цифрового производства.

В 2020 году было принято решение закупить систему печати со шнековым дозированием наносимого материала в виде пасты типа Catalina от компании GPD Global, которая позволяет реализовать процессы аддитивных технологий с наиболее высокой точностью.

На втором этапе реализации проекта поддержки ЦКП «Импульс» приобретено и поставлено технологическое оборудование по договору № 2020.321809 от 6 мая 2020 г., которое включает в себя следующие ключевые позиции:

- а) система прецизионного шнекового дозирования с набором аксессуаров;
- б) кластер FDM, SLA и композитной 3D печати с набором расходных материалов.

Внешний вид системы Catalina и рабочего места для проведения работ с ее использованием показаны на рисунке 1.67.

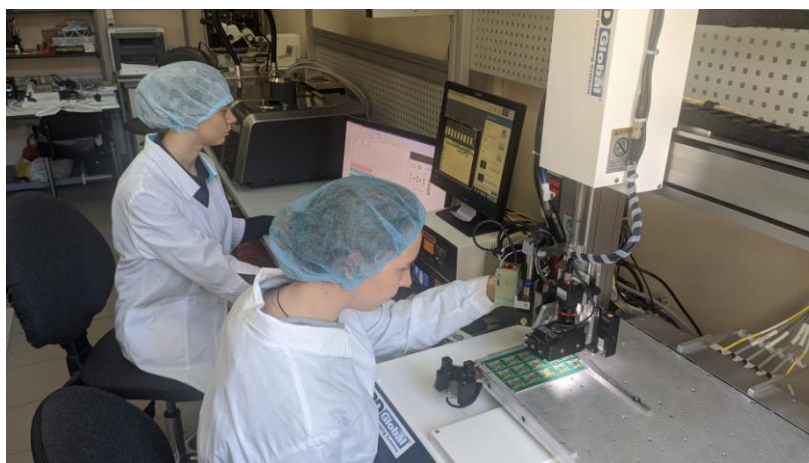


Рисунок 1.67 – Система прецизионного шнекового дозирования Catalina

Системы шнекового дозирования в настоящее время получили развитие благодаря тому, что они способны работать с материалами широкого диапазона вязкости и с высокой производительностью. Система Catalina от компании GPD Global – настольный шнековый дозатор для нанесения на заготовки различных материалов: паяльных паст, клеев, компаундов и др. Система предназначена для применения в мелкосерийном производстве и научно-исследовательских лабораториях.

На рисунке 1.68 показан внешний вид и состав шнекового дозатора.



1 – координатограф; 2 – рабочая область; 3 – дозирующая головка; 4 – видеокамера;  
5 – контроллер дозирования; 6 – контроллер термостатирования.

Рисунок 1.68 – Внешний вид и состав шнекового дозатора Catalina

Система состоит из следующих ключевых блоков:

- 1) координатограф;
- 2) система дозирования;
- 3) система термостатирования;
- 4) машинное зрение.

В таблице 1.26 приведены технические характеристики принтера Catalina.

Таблица 1.26 – Технические характеристики Catalina

Характеристика	Значение
Максимальный размер рабочей зоны	400x400x150 мм
Вращение дозирующей головки	360°
Максимальная скорость перемещения по осям X,Y	800 мм/сек
Максимальная скорость перемещения по оси Z	400 мм/сек
Разрешение по осям X,Y,Z	0,001 мм
Повторяемость по осям X,Y,Z	+/- 0,01 мм

### *Применение*

Принтер Catalina GPD Global позволяет получить напечатанные устройства с разрешением печати от 100 мкм (при определенной вязкости чернил). В принтере имеется функция автоматического выравнивания и поиска реперных точек (отверстий) с помощью камеры высокого разрешения, называемая техническим зрением. Для этого принтер комплектуется специальным контроллером с монитором. Перед началом работы производится калибровка поверхности лазером, который отслеживает путь дозирования и измеряет отклонение от идеальной поверхности, тем самым предотвращая возможные сбои в работе и поломку иглы из-за разной толщины или дефектов подложки. В качестве материалов благодаря прецизионному шнековому механизму дозирования можно использовать любые диэлектрические и электропроводящие чернила, различной вязкости и назначения. Для более точной работы предусмотрены два отдельных блока управления: первый предназначен для настройки температурных режимов рабочей платформы и дозатора, а второй для управления давлением, скоростью вращения и более тонкой регулировки механизма дозирования.

### *Пример применения*

В качестве примера приведены сведения о печати микрополосковых линий передачи. В рамках данной работы использовался материал на основе оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) – поликор марки ВК-100. Технические характеристики материала представлены в таблице 1.27.

Материалом для дозирования и формирования микрополосковых линий являлась проводниковая паста Conductive Ink, Voltera (Канада), технические характеристики приведены в таблице 1.28.

Таблица 1.27 – Технические характеристики материала

Наименование параметра	Значение параметра
Содержание $Al_2O_3$ , %	99,7
Цвет	Полупрозрачная
Водопоглощение, %	0
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,96
Прочность на изгиб, МПа	310,8
Коэффициент линейного расширения 20 – 900 °С	$80 \times 10^{-7}$
Диэлектрическая проницаемость на 1 ГГц, 25 °С	9,8
Тангенс угла диэлектрических потерь 1 ГГц, 20 °С	$1 \times 10^{-4}$

Продолжение Таблицы 1.25

Удельное объемное электрическое сопротивление 150°C, Ом·см	$2 \times 10^{14}$
Шероховатость полированной поверхности, мкм	0,1
Шероховатость шлифованной поверхности, мкм	1,6
Размер, Ш × Д × Т, мм	24x60x1

Таблица 1.28 – Технические характеристики пасты Conductive Ink, Voltera

Наименование параметра	Значение параметра
Внешний вид	Вязкая однородная масса серого цвета
Материал проводящей фазы	Серебро
Основа органического связующего	1-метил-2-пирролидон, фенол
Кинетическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с	> 40 (23 °C) > 20,5 (40 °C)
Удельное поверхностное сопротивление при толщине 50 мкм, мОм/□	20

План проведения экспериментальных исследований:

- 1) Установка емкости с чернилами и подключение к шнековому дозатору;
- 2) Установка подложки;
- 3) Калибровка поверхности и иглы;
- 4) Подключение и настройка видеокамеры;
- 5) Настройка термостота;
- 6) Настройка контроллера дозатора;
- 7) Настройка подогрева дозатора;
- 8) Создание топологии;
- 9) Печать.

Первоначально необходимо установить емкость с чернилами в блок дозирования и подключить к шнеку. На рисунке 1.69 показан шнековый дозатор в разобранном и собранном виде с установленной иглой диаметром 300 мкм.





а)



б)

*а* – шнек в разобранном виде; *б* – собранный шнек с установленной иглой.

Рисунок 1.69 – Шнековый дозатор

На рисунке 1.70 представлена установка и подключение емкости с чернилами и шнека.

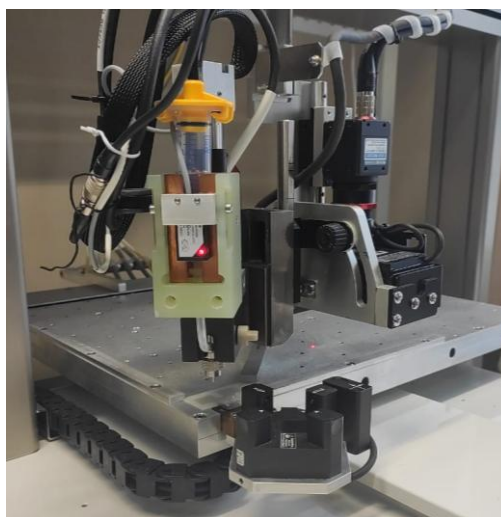


Рисунок 1.70 – Установка емкости с чернилами к шнеку

Затем проводится калибровка положения иглы по поверхности при помощи блока управления лазером. На поверхность наводится лазер и на блоке выставляются нулевые значения, т.е. задается начало координат. При выставлении нулевых значений координаты записываются в программу. Для проведения калибровки иглы необходимо было привести иглу на центр чтобы при помощи лазеров смогли оцентрировать иглу по координатам (рисунок 1.71).

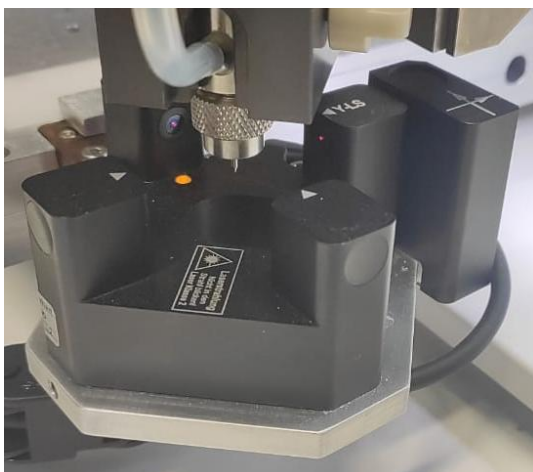


Рисунок 1.71– Калибровка иглы

В комплекте поставки были иглы с диаметрами 0,0762 мм, 0,1016 мм, 0,127 мм. В процессе пусконаладочных работ был произведен запуск установки прецизионного дозирования и произведена пробная печать проводников на подложке.

В процессе пробных запусков использовалась игла с отверстием 0,1016 мм. В качестве подложки был использован поликор. Материал – диэлектрическая паста пд-12. В результате были нанесены фигуры, изображенные на рисунке 1.72. Все линии были нанесены при помощи одной и той же иглы. Ширина первой линии составляет 0,4 мм, а второй 0,8 мм. Это было достигнуто путем изменения скорости вращения шнека и давления в пневмоприводе. Стоит отметить, что ширина нанесенного материала в 4–8 раза больше, чем диаметр сопла.



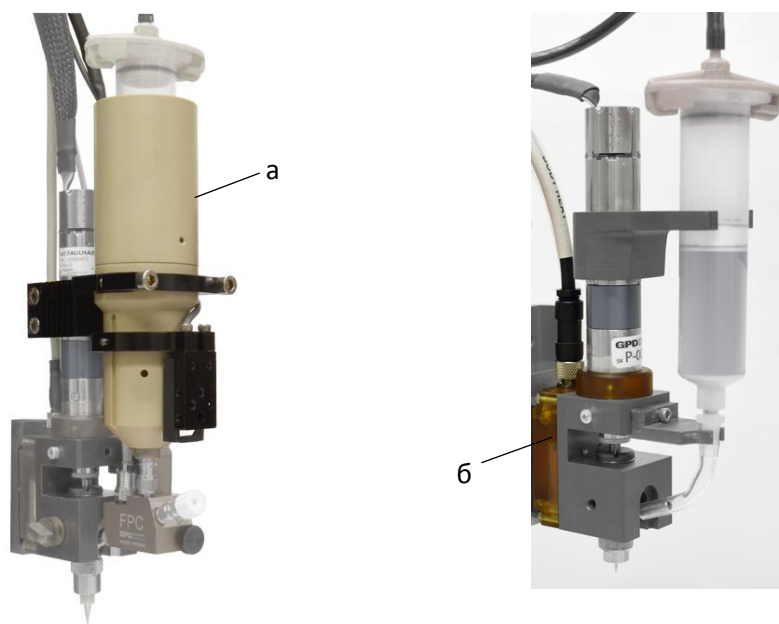
1– линия толщиной 0,4 мм; 2– линия толщиной 0,8 мм;  
3 – прямоугольник

Рисунок 1.72 – Подложка с напечатанными проводниками

Непосредственное управление самим дозированием осуществляется в контроллере дозатора, которое заключается в регулировке давления пневмопривода на шприц для первичного продавливания пасты в шнековый картридж и управление сервоприводом для вращения шнека.

Температурный контроллер позволяет обеспечивать должный температурный режим элементов системы дозирования для осуществления равномерного затвердевания наносимо-

го материала. Максимальная температура подогрева 120°C. Сами нагревающие элементы устанавливаются на шприц и на шнековый картридж (рисунок 1.73).



а) устройство подогрева шприца; б) устройство подогрева картриджа.

Рисунок 1.73 – Обеспечение температурного режима элементов системы дозирования

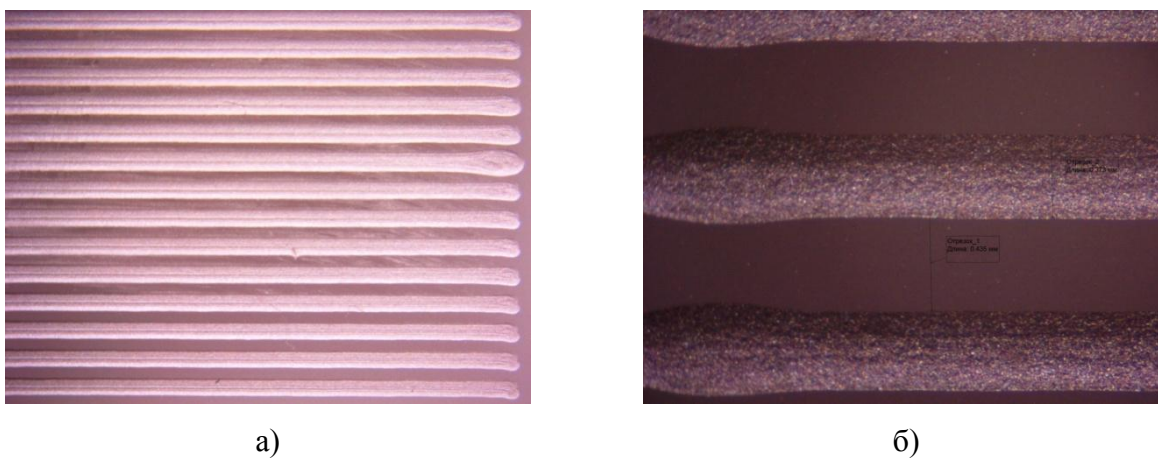
Первичный подогрев обеспечивает подготовку материала для нанесения на подложку, которая в свою очередь размещается на термостоле.

Рисунок топологии печатных проводников формируется при помощи программы. На рисунке 1.74 показано рабочее место оператора-проектировщика, выставляющего начальные и конечные точки для микрополосковой линии.



Рисунок 1.74 – Формирование топологии

Были получены микрополосковые линии, фотографии которых показаны на рисунке 1.75. Получена ширина топологического элемента и зазор между ними 150 мкм. В настоящее время ведется проектирование и изготовление функциональных устройств СВЧ.



а) общий вид; б) при увеличении.

Рисунок 1.75– Напечатанные микрополосковые линии

### 1.2.2 Кластер FDM, SLA и композитной 3D печати (общее описание)

В рамках работ по оснащению ЦКП «Импульс» по договору 2020.321809 от 20.03.2020 г. на поставку технологического оборудования был приобретён кластер 3D-печати, в состав которого вошли три вида 3D-принтеров, обеспечивающих следующие технологические возможности:

- а) печать достаточно крупных изделий любой формы и сложности, с многочисленными мельчайшими деталями из фотополимера;
- б) печать из высокопрочных композитных материалов по прочности схожих с авиационным алюминием;
- в) крупноформатная печать конструктивными пластиками.

Было выбрано следующее оборудование кластера:

- 1) Стереолитографический 3D-принтер в количестве 1 шт., который представляется собой крупноформатный стереолитографический 3D-принтер FormLabs Form 3L;
- 2) 3D-принтер для композитной печати в количестве 1 шт. – Anisoprint Composer A4;
- 3) 3D-принтер в количестве 1 шт. – крупноформатный FDM 3D-принтер Picaso Designer XL.

### 1.2.2.1 Стереолитографический 3D-принтер

Лазерный 3D-принтер Form 3L компании Formlabs является третьим поколением стереолитографических принтеров данной компании. Фрагмент подготовки к запуску изображен на рисунке 1.72.

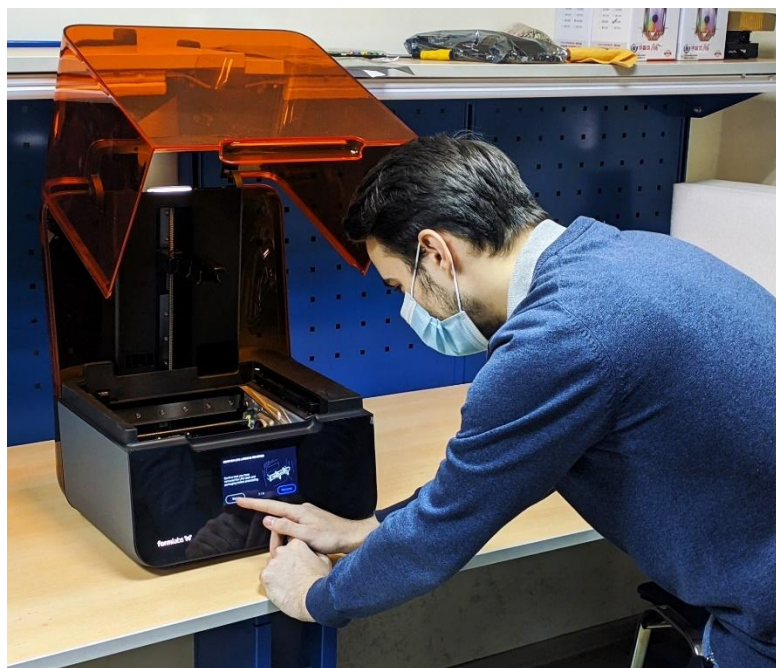


Рисунок 1.72 – Внешний вид 3D-принтера Formlabs Form 3L

Основные преимущества:

1) Технология Low Force Stereolithography (LFS) позволяет обеспечить высокое качество печати и уменьшить сложность процесса. С ее помощью можно воссоздавать достаточно крупные изделия любой формы и сложности, с многочисленными мельчайшими деталями. Это достигается за счет уменьшения размеров и веса поддержек и значительной оптимизации оптической системы;

2) Прицельная точность и повторяемость. Их обеспечивает система обработки света LPU (оптический источник) с линзами и зеркалами. Лазерный луч проходит через специальный фильтр, обеспечивающий чистоту его пятна. Перпендикулярность луча плоскости сборки гарантирует параболическое зеркало. Четкому управлению способствует высокочастотный гальванометр;

3) Непрерывность печати. Процесс печати поддерживается и контролируется автоматически, что не требует постоянного контроля со стороны оператора. Многочисленные датчики обеспечивают процесс и своевременно известят о появлении сбоев. Оптические датчики производят калибровку по замкнутому циклу, с автоматическим поддержанием масштаба и мощности. Они способны обнаружить попадание пыли.

4) Более 20 встроенных датчиков позволяют контролировать правильность установки платформы, выявлять наличие пыли и активировать систему фильтрации, контролировать температуру в камере, автоматически замерять уровень фотополимера, своевременно включать лопатки для перемешивания материала.

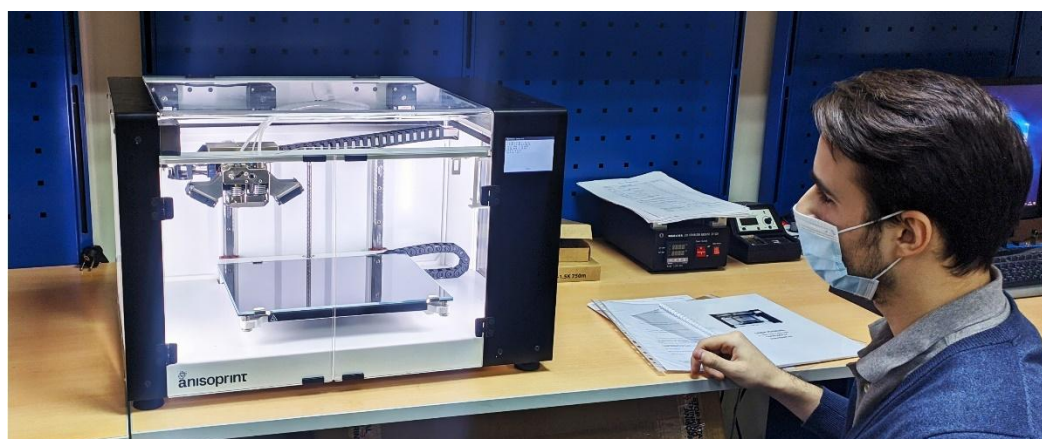
Основные технические характеристики сведены в таблице 1.27.

Таблица 1.27 – Параметры 3D-принтера Form 3L

Характеристика	Значение
Форматы файлов	STL;OBJ
Размеры, мм	775x520x735
Масса, кг	48
Диаметр пятна лазера, мкм	85
Лазер, мВт	2×250
Длина волны лазера, нм	405
Материал	Фотополимер
Рабочая камера	335x200x300 мм
Технология печати	Low Force Stereolithography (LFS)
Толщина слоя от, мкм	25
Дисплей	Сенсорный 5,5" 1280 × 720
Интерфейсы	Wi-Fi;Ethernet; USB 2.0

#### 1.2.2.2 3D-принтер для композитной печати с компьютерной системой проектирования и управления

Отличительной особенностью данного 3D-принтера является печать из высокопрочных композитных материалов. С его помощью возможно построить модели с армирующими волокнами, которые по прочности будут схожи с авиационным алюминием. В печати используется типовая технология FDM, что значительно экономнее установок SLS. Внешний вид 3D-принтера при подготовке к запуску изображен на рисунке 1.73.



а) экструдер (печатающая головка); б) 3D-принтер.

Рисунок 1.73 – Внешний вид 3D-принтера Anisoprint Composer A4

Нужно отметить, что в данном принтере используется двухэкструдерная печатающая головка, в которой первое сопло работает с типовыми пластиками (PLA, ABS, нейлон, PETG и др.), второе армирует пластик непрерывным углеродным волокном. Волокно содержит множество углеродных нитей, скрепленных между специальным полимером.

Основные технические характеристики сведены в таблице 1.28.

Таблица 1.28 – Параметры 3D-принтера Anisoprint Composer A4

Характеристика	Значение
Размеры, мм	600x400x375
Масса, кг	25
Материал	PETG, Carbon Fiber, PLA, ABS, Нейлон и др.
Подогреваемая платформа	стекло с подогревом
Рабочая камера, мм	297x210x147
Температура печатного стола	60–120 °C
Температура экструдера	270 °C
Технология печати	FDM, CFC
Толщина слоя	от 60 мкм
Диаметр нити	1,75
Интерфейсы	SD, USB
Количество печатающих головок	2

### 1.2.2.3 Крупноформатный FDM 3D-принтер Picaso Designer XL

Picaso Designer XL – российский 3D-принтер. Это первый крупноформатный FDM-принтер от PICASO 3D, который работает с конструктивными пластиками. Внешний вид в режиме эксплуатации изображен на рисунке 1.74.

Это устройство обеспечивает точную печать благодаря новому подходу к разработке экструдера. Толщина слоя может составлять 10 микрон – это один из лучших показателей среди других производителей подобного оборудования. Главное нововведение производителей – расширение рабочей камеры до 360 × 360 × 610 мм. Минимальная толщина слоя составляет 10 микрон. Это приблизительно в 10 раз тоньше человеческого волоса. Точная механика и аппаратная платформа XL позволяет создавать модели, требующие прорисовки всех тонкостей.



Рисунок 1.74 – Внешний вид 3D-принтера Picaso Designer XL  
в процессе печати в ЦКП «Импульс»

Основные технические характеристики сведены в таблице 1.29.

Таблица 1.29 – Параметры 3D-принтера Picaso Designer XL

Характеристика	Значение
Размеры, мм	645 × 565 × 985
Масса, кг	75
Количество сопел	1
Максимальная температура платформы для печати	150°C
Максимальная температура экструдера	410 °C
Направляющие	XY Рельсовые, сталь Z Цилиндрические, сталь
Рабочая камера, мм	360 × 360 × 610 мм
Технология печати	Fused Filament Fabrication [FFF]
Скорость	до 100 см <sup>3</sup> /ч
Диаметр нити, мм	1,75±0,1
Диаметр сопла, мм	0,5 / (0,2–0,8)
Минимальная толщина изготавливаемого слоя, мкм	10



### 1.2.3 Установка плазмохимического осаждения диэлектриков в плазме индуктивного и емкостного разрядов и система подачи и утилизации газов установок плазмохимического травления и осаждения

*Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Установка плазмохимического осаждения диэлектриков STE ICP 200D предназначена для осаждения диэлектриков  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$ ,  $\alpha\text{-Si}$  в плазме индуцированного разряда на полупроводниковые и органические подложки. Входит в технологическую линейку изготовления МИС СВЧ.

В таблице 1.30 представлены основные характеристики установки.

Таблица 1.30 – Характеристики установки STE ICP 200E

Наименование параметра	Значение
Остаточное давление в камере-реакторе, не более, Па	$6 \times 10^{-4}$
Скорость откачки химически-стойкого турбомолекулярного насоса по $\text{N}_2$ , л/с	1200
Максимальный диаметр полупроводниковых пластин, мм	200
Количество одновременно обрабатываемых пластин:	
диаметром 2''	7
диаметром 3''	4
диаметром 100 мм	1
диаметром 150 мм	1
диаметром 200 мм	1
Терморегулирование температуры электрода в диапазоне, °С	от -30 до 80
Количество источников плазмы, шт.	2

Продолжение Таблицы 1.30

Нагрев пластин во время процесса, °С, не менее	400
Неравномерность осаждения по диаметру 100 мм пластины, не более, %	$\pm 1$
Мощность ВЧ, подводимого к источнику индуктивно связанной плазмы (ICP), Вт	10÷1200
Частота ВЧ сигнала генератора источника ICP, МГц	13,56
Количество газовых линий с контроллером потока газов, шт.	6

Основной функцией установки плазмохимического осаждения диэлектриков STE ICP 200D является формирование тонких диэлектрических слоев  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$ ,  $\alpha\text{-Si}$  для создания пассивирующих защитных слоев между технологическими операциями, создания диэлектрика при формировании планарных конденсаторов СВЧ МИС.

Для проведения процесса осаждения диэлектрика полупроводниковая пластина помещается в шлюз (рисунок 1.75), после чего загружается непосредственно в рабочую камеру в область химически активной плазмы, располагаясь на специальном подложкодержателе.



Рисунок 1.75 – Фотография загрузочного шлюза STE ICP 200D

При зажигании емкостного разряда, происходит разложение газовой смеси на электроны, ионы и активные радикалы. Радикалы и ионы, поступая на поверхность подложки, вступают в поверхностную реакцию с образованием аморфного или поликристаллического слоя требуемого материала. Свойства и состав получаемого слоя контролируются составом газовой смеси, температурой подложки и условиями ионной бомбардировки. Для контроля механической напряженности пленки  $\text{Si}_x\text{N}_y$  применяется режим смешанного возбуждения разряда током высокой (13,56 МГц) и средней частоты (50–460 кГц).

На установке плазмохимического осаждения диэлектриков STE ICP 200D были отработаны процессы осаждения диэлектрических слоев  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$  на полупроводниковые пластины GaAs, GaN, InP, Si.

#### **1.2.4 Контрольно-измерительная аппаратура СВЧ**

Развитие отечественного контрольно-измерительного оборудования СВЧ диапазона в последние годы успешно идет в АО «НПФ «Микран», ООО "ПЛАНАР" и ООО "НПК ТА-ИР". Тесное сотрудничество с АО «НПФ «Микран» при выполнении ряда проектов позволило достигнуть договоренности о подготовке проектов 2021–2024 годов, один из которых направлен на разработку нелинейного рефлектометра. Тема этого проекта: «Развитие методов рефлектометрии в пространстве нелинейных параметров пассивных и активных систем и создание опытных отечественных нелинейных рефлектометров для решения задач исследования материалов, элементов и систем в области экспериментальной физики, радиофизики и 5G-6G телекоммуникаций. В качестве первого этапа начинаемого проекта решено состав оборудования ЦКП «Импульс» пополнить востребованной новой разработкой – векторным

анализатором цепей P4226/1, который оснащен опциями ПО для анализа импульсных и динамических характеристик.

Прибор поставлен по договору № ЕИ-80/531/20 от 22.07.2020. Поступил в конце октября 2020 г.

#### *Назначение, выполняемые функции в ЦКП*

Фото векторного анализатора P4226 с комплектом калибровочных аксессуаров показано на рисунке 1.76. Прибор имеет двойное назначение. Первое – использование при выполнении заказных исследований, второе – освоение сотрудниками ЦКП технологии разработки новых программных опций для увеличения функциональных возможностей.



Рисунок 1.76 – Векторный анализатор цепей P4226 с комплектом калибровки

#### *Характеристики оборудования*

Основные метрологические и технические характеристики приведены в таблице 1.31. Эти параметры содержатся в руководстве по эксплуатации, выпущенном АО «НПФ «Микран», они приводятся в данном подразделе для удобства пользователей при разработке программ и методик, в которых используется векторный анализатор и требуется указать допуски на измеряемые параметры.

Таблица 1.31 – Метрологические и технические характеристики P4226

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот, МГц	от 10 до 26500
Полосы пропускания фильтров ПЧ	от 10 Гц до 100 кГц
Дискретность установки частоты выходного сигнала	1 Гц

Продолжение Таблицы 1.31

Пределы допускаемой относительной погрешности установки частоты при работе от внутреннего опорного генератора в течение одного года	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
<p>Диапазон установки уровня выходной мощности, дБм</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- без опции «ДМА»:</li> <li>- в диапазоне частот до 500 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 500 МГц до 13,25 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 13,25 ГГц до 26,5 ГГц</li> <li>- с опцией «ДМА»</li> </ul>	<p>от минус 20 до +10</p> <p>от минус 20 до +10</p> <p>от минус 25 до +10</p> <p>от минус 50 до +10</p>
Дискретность установки мощности выходного сигнала, дБ	0,01
<p>Пределы допускаемой относительной погрешности установки уровня выходной мощности, дБ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- без опции «ДМА»:</li> <li>- с опцией «ДМА»:</li> </ul>	<p><math>\pm 1,0</math></p> <p><math>\pm 1,5</math></p>
Диапазон измерения входной мощности, дБм	от уровня собственных шумов до +10
Пределы абсолютной погрешности измерения уровня входной мощности, дБ:	$\pm 1$
Диапазон ослаблений аттенюаторов приемника сигнала для измерителей с опцией «ДМА», дБ	от 0 до 70 с шагом 10 дБ
<p>Уровень собственного шума приемников в диапазоне частот, дБм/Гц, не более:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в диапазоне частот до 200 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 200 МГц до 500 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 500 МГц до 1 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 1 ГГц до 13,25 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 13,25 ГГц до 26,5 ГГц</li> </ul>	<p>минус 90</p> <p>минус 120</p> <p>минус 125</p> <p>минус 130</p> <p>минус 135</p>
<p>Динамический диапазон при полосе фильтра ПЧ 10 Гц, дБ, не менее</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в диапазоне частот до 200 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 200 МГц до 500 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 500 МГц до 1 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 1 ГГц до 13,25 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 13,25 ГГц до 26,5 ГГц</li> </ul>	<p>90</p> <p>120</p> <p>125</p> <p>130</p> <p>135</p>
Диапазон измерений модуля коэффициента отражения	от 0 до 1
<p>Диапазон измерения модуля коэффициента передачи, дБ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в диапазоне частот до 200 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 200 МГц до 500 МГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 500 МГц до 1 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 1 ГГц до 13,25 ГГц</li> <li>- в диапазоне частот свыше 13,25 ГГц до 26,5 ГГц</li> </ul>	<p>от минус 80 до +80</p> <p>от минус 110 до +90</p> <p>от минус 115 до +90</p> <p>от минус 120 до +90</p> <p>от минус 125 до +90</p>

Продолжение таблицы 1.31

<p>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений модуля коэффициента отражения четырехполюсников <math>\Delta S_{11}</math> (<math>\Delta S_{22}</math>)<sup>2</sup>):</p> <p>- с коаксиальным набором мер: <math>\pm (0,011+0,006 S_{11} +0,014 S_{11} ^2+0,014 S_{21}  S_{12} )</math></p> <p>- с электронным калибратором: <math>\pm (0,012+0,011 S_{11} +0,032 S_{11} ^2+0,018 S_{21}  S_{12} )</math></p>	
<p>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы коэффициента отражения двухполюсников, градус</p>	<p><math>\pm(180/\pi)</math> <math>\arcsin(\Delta S_{11}^{\text{II}}/ S_{11} )</math></p>
<p>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы коэффициента отражения четырехполюсников, град</p>	<p><math>\pm(180/\pi) \arcsin(\Delta S_{11}/ S_{11} )</math></p>
<p>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений модуля коэффициента передачи <math>\Delta S_{21}</math> (<math>\Delta S_{12}</math>), дБ:</p> <p>- с коаксиальным набором мер: <math>\pm 20\lg(1-(0,02+0,014 S_{11} +0,014 S_{22} +(5/2)^N \cdot 10^{-6} \cdot  S_{21} ^{-1}))</math></p> <p>- с электронным калибратором: <math>\pm 20 \cdot \lg(1-(0,025+0,032 \cdot  S_{11} +0,018 \cdot  S_{22} +(5/2)^N \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot  S_{21} ^{-1}))</math></p>	
<p>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы коэффициента передачи, градус:</p>	<p><math>\pm (180/\pi) \cdot \arcsin(1-10^{\Delta S_{21}/20})</math></p>
<p>Параметры измерительных портов нескорректированные:</p>	
<p>Модуль коэффициента отражения в режиме источника сигнала, дБ, не более:</p> <p>в диапазоне частот от 100 МГц до 3000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 3000 МГц до 12000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 12000 МГц до 21000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 21000 МГц до 26500 МГц</p>	<p>минус 16 дБ</p> <p>минус 14 дБ</p> <p>минус 12 дБ</p> <p>минус 10 дБ</p>
<p>Модуль коэффициента отражения в режиме приемника сигнала в диапазоне частот, дБ, не более:</p> <p>- в диапазоне частот от 100 МГц до 3000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 3000 МГц до 12000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 12000 МГц до 21000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 21000 МГц до 26500 МГц</p>	<p>минус 13</p> <p>минус 12</p> <p>минус 10</p> <p>минус 9</p>
<p>Направленность, дБ, не более:</p> <p>- в диапазоне частот от 100 МГц до 3000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 3000 МГц до 12000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 12000 МГц до 21000 МГц</p> <p>- в диапазоне частот свыше 21000 МГц до 26500 МГц</p>	<p>минус 18 дБ</p> <p>минус 20 дБ</p> <p>минус 20 дБ</p> <p>минус 20 дБ</p>

## *Применение*

На рисунке 1.77 показано проведение обучающего семинара по современным методам измерения с применением векторных анализаторов цепей и, в частности, типа P4226.



Рисунок 1.77 – Проведение обучающего семинара сотрудниками АО «НПФ «Микран» совместно с ЦКП «Импульс» в онлайн и офф-лайн режимах

На приборе в течение короткого времени, с сентября по ноябрь 2020 г., были проведены исследования частотных характеристик по теме «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент» (внутренний потребитель НИИ СЭС) и др.

Практика показала, что измерения на таких сложных приборах, требуют обстоятельной предварительной подготовки, как минимум 72 часа. Поэтому в качестве руководства по освоению методик измерений на приборах производства АО «НПФ «Микран» к.т.н. Ульяновым В.Н. был подготовлен цикл лабораторных работ (ПРИЛОЖЕНИЕ Г Лабораторные работы по современным технологиям и системам автоматизированного измерения на СВЧ). Их применение в ЦКП показало, что для освоения всего материала по измерениям на современных векторных анализаторах требует предварительной подготовки в объеме семестра для магистрантов и аспирантов, а для инженеров и научных сотрудников дополнительная подготовка в зависимости от ранее полученных компетенций в области радиотехники. Обнажи-

лась и другая проблема и потребность – проведения поисковых и прикладных исследований по совершенствованию автоматизации измерений и упрощению интерфейсов, в настоящее время достаточно сложных для восприятия. В связи с развитием цифровых методов при формировании и обработке сигналов актуализируется задача объединения в одном приборе измерений при воздействии импульсных и непрерывных сигналов. В настоящее время приходится при проведении исследований прибегать к использованию разных стендов. Приведем такой пример, связанный с использованием векторного анализатора цепей P4-4226 и стенда для проведения импульсных измерений.

Исследовалась антенная система с поляризационным разделением сигналов. Разработан волноводный поляризационный ортоплексер диапазона 7.1 - 8.4 ГГц для облучателя зеркальных антенн линейной поляризации с коаксиально-волноводными входами [72]. Внешний вид ортоплексера и облучателя, а также их размещение в безэховой камере показаны на рисунке 1.78. Измерения частотных характеристик проводились векторным анализатором цепей.

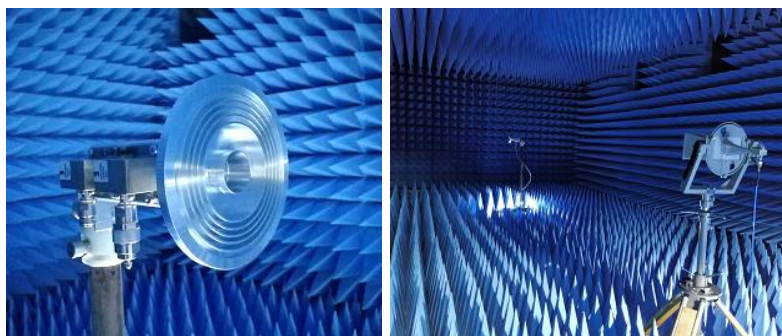


Рисунок 1.78 – Внешний вид измеряемого ортоплексера и облучателя (слева) и их размещение с облучающим рупором в безэховой камере (справа)

Антенная система, содержащая облучатель и ортоплексер, измерялась в режиме приёма гармонических колебаний в дальней зоне на расстоянии 4 м (рисунок 1.78, справа). В качестве передающей антенны выступил пирамидальный рупор линейной поляризации Пб 40/3. Импульсные характеристики исследовались на установке, показанной на рисунке 1.79.

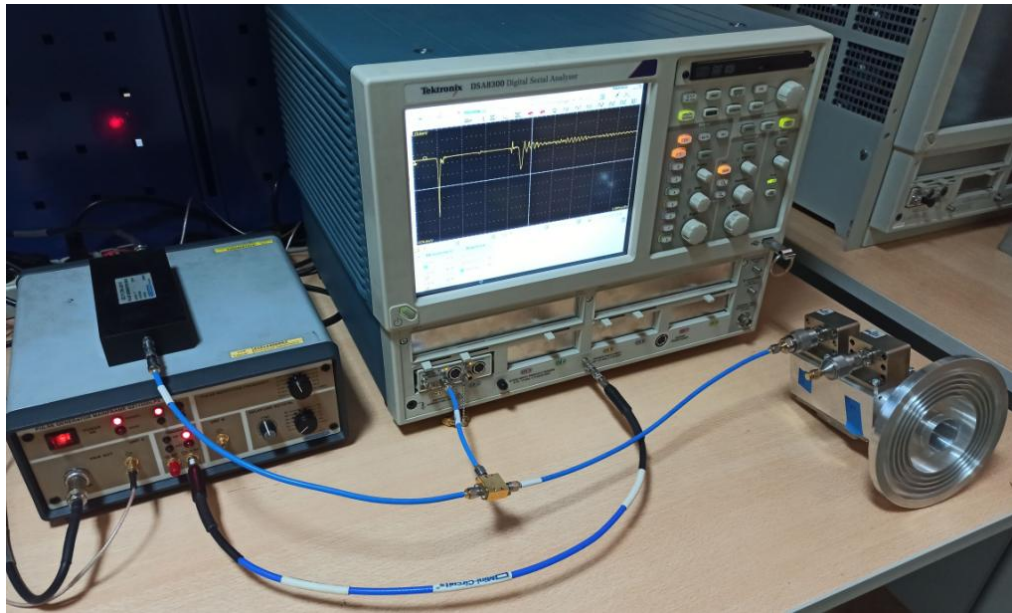


Рисунок 1.79 – Установка для измерения импульсных характеристик ортоплексера и облучателя

На рисунке 1.80 показаны экспериментальные частотные зависимости возвратных потерь  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ортоплексера, нагруженного на облучатель, при подаче гармонических колебаний на первый и второй коаксиальный вход/выход в сравнении с соответствующими расчетными зависимостями.

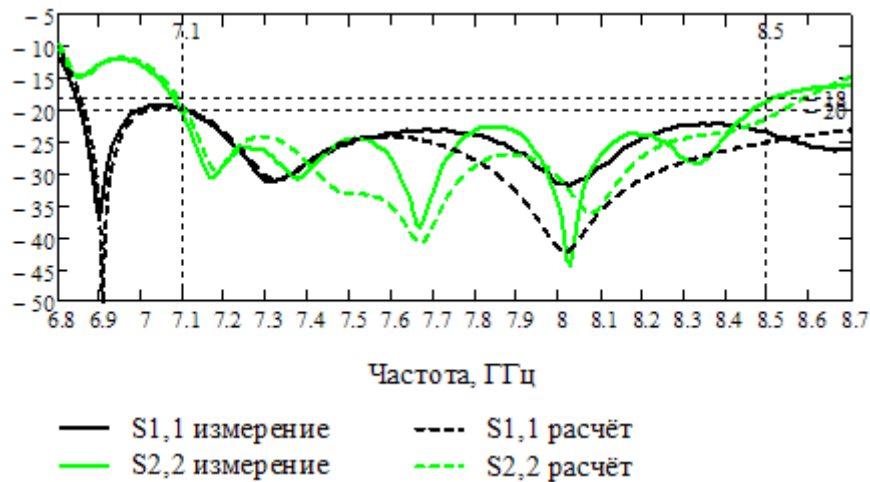


Рисунок 1.80 – Частотная зависимость возвратных потерь

Измерена также кросс-поляризационная развязка в пространстве (XPD) при изменении поляризации излученного сигнала на фиксированных частотах для срезов диаграмм направленности в Е и Н-плоскостях.

Результаты измерения импульсных характеристик показаны на рисунке 1.81. На нем наряду с тестирующим импульсом изброжена рефлектограмма первого входа ортоплексера, нагруженного на облучатель. На рисунке 1.82 показаны возвратные потери  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ , рассчитанные из полученных рефлектограмм.



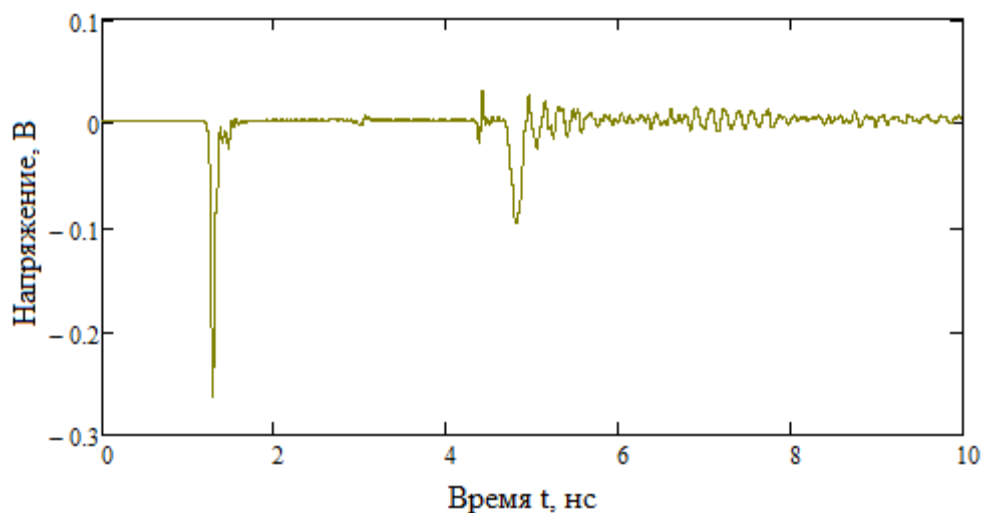


Рисунок 1.81 – Рефлектограмма воздействующего и отраженного сигнала от входа номер 1 ортоплексера

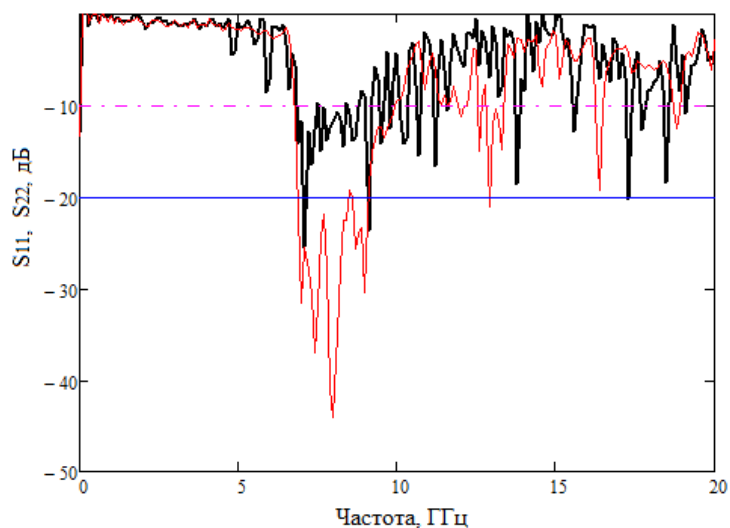


Рисунок 1.82 – Возвратные потери, полученные при импульсном воздействии

Сделаны выводы: полученные расчетным и экспериментальным путем частотные зависимости возвратных потерь, развязки XPD позволяют корректно измерять параметры обратного рассеяния. По мнению авторов, перспективно также применять импульсный режим измерения, т.к. в этом случае можно отказаться от использования безэховой камеры [73].

### Выводы по разделу 1

В ноябре 2020 г. были закончены поставки оборудования по проекту. Сведения об общих затратах на приобретение оборудования в 2019–2020 годах и их структуре приведены в таблице 1.32.

Таблица 1.32 – Затраты на оборудование ЦКП «Импульс»

Год	Сумма затрат на оборудование, тыс. руб.	Доля затрат по годам и в целом, %
2019	89367,541	89,36
2020	48017,773	80,03
Всего	137385,314	84,69

Таким образом, выполнены требования п.2.1 ТЗ «Дооснащение ЦКП «Импульс» современным дорогостоящим научным и метрологическим оборудованием (стоимостью свыше 1 млн. рублей), в том числе комплектующими, необходимыми для сборки и (или) изготовления такого оборудования, в объеме не менее 80 % стоимости проекта в соответствии с поставленными целями для повышения качества проводимых работ и организации новых услуг по поддержке реализации приоритетов научно-технологического развития, обеспечен доступ к оборудованию ЦКП для выполнения научных и научно-технических проектов по заявкам третьих лиц».

## **2. Разработка и освоение новых методик исследований и/или измерений, в том числе с применением УНУ**

В отчетный период при выполнении исследований и разработок было уделено внимание методикам проведения испытаний интегральных микросхем на макетах отладочных плат и методикам измерения относительной диэлектрической проницаемости диэлектриков. Этому способствовало приобретение нового оборудования для измерений на СВЧ в 2019 и 2010 годах.

В процессе работ по измерениям была предпринята ревизия концепция использования оборудования ЦКП. Необходимость этого возникла исходя из следующих факторов:

1) Возрастает диапазон разницы в ценах зарубежного и отечественного оборудования при сравнимых или даже одинаковых функциональных возможностях. Пример – цены на векторные анализаторы цепей Keysight и АО «НПФ «Микран».

2) Расширение функциональных характеристик измерительных приборов путем разработки дополнительного программного обеспечения (опций) влечет за собой увеличение их цены, но при этом коды программ остаются закрытыми, как и возможность использования собственных программ для обработки исходной получаемой информации для расчета дополнительно измеряемых параметров устройств.

3) По названным выше причинам потребители зарубежных приборов вольно или невольно тормозят развитие отечественных приборов.

4) Представляется целесообразным использование приборов известных зарубежных производителей с параметрами выше достигнутых в РФ в качестве оборудования метрологического назначения. В то же время отечественное измерительное оборудование, аналогичное по базовым параметрам зарубежным образцам, должно занять нишу производственного, научного и учебного назначения.

5) Активнее работать с отечественными производителями СВЧ измерительного оборудования по генерации новых потребностей в разработке опций для освоенных приборов, например, измерение параметров материалов, сосредоточенных элементов, нелинейных искажений и т.д.

Сотрудники ЦКП «Импульс» в 2020 г. совместно с ведущими специалистами АО «НПФ «Микран» провели совместную работу по подготовке новых проектов в области импульсных измерений, а также семинар по автоматизации измерений на СВЧ. Контакты сотрудников университета и научно-производственной компании положительно сказались не только в выработке перспектив развития, но и в решении насущных текущих потребностей создания методик исследований и измерений.

## 2.1 Методика зондовых измерений СВЧ интегральных микросхем

Зондовые измерения представляют наиболее сложный вид определения параметров интегральных микросхем, т.к. объект исследований, кристалл микросхемы, имеет маленькие размеры, а элементы топологии еще меньше. В ЦКП «Импульс» были отработаны многие вопросы зондовых измерений на основе зондовой станции и специальных зондов, позволяющих осуществлять согласованное включение в СВЧ цепь (это зонды типа копланарной полосковой линии), а также подачу питания на активные элементы (игольчатые зонды).

Методика была разработана при выполнении НИР и вошла в состав отчетной документации под названием «Зондовые измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1». Полное описание методики приведено в ПРИЛОЖЕНИИ Б. Методика. Зондовые измерения СВЧ интегральной микросхемы ИС1».

Средства измерений, используемые для измерений – оборудование ЦКП «Импульс» (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Перечень основного оборудования для зондовых измерений

№ п/п	Наименование	Тип и нормативные документы	Назначение	Измеряемые характеристики	Метрологические и технические характеристики
1	Трёхканальный источник питания с возможностью измерения тока и напряжения	Keysight E36313A	Установка рабочего режима по напряжению	Измерение потребляемого тока и напряжение питания	Погрешность установки по напряжению не более 5 мВ, по току не более 5 мА. Погрешность измерения не более 0,1%
2	Векторный анализатор цепей с набором калибровочных мер	R&S ZVA40	Измерение параметров рассеяния	Измерение модуля и фазы параметров рассеяния	Диапазон частот: 10 МГц – 40 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не более 0,2 дБ; по фазе: не более 2°
3	Векторный анализатор цепей	Keysight PNA-X N5247B	Измерение параметров рассеяния	Измерение модуля и фазы параметров рассеяния	Диапазон частот: 10 МГц – 67 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не более 0,1 дБ; по фазе: не более 2°

Оборудование монтируется в стойках, примыкающих к зондовой станции (рисунок 2.1).

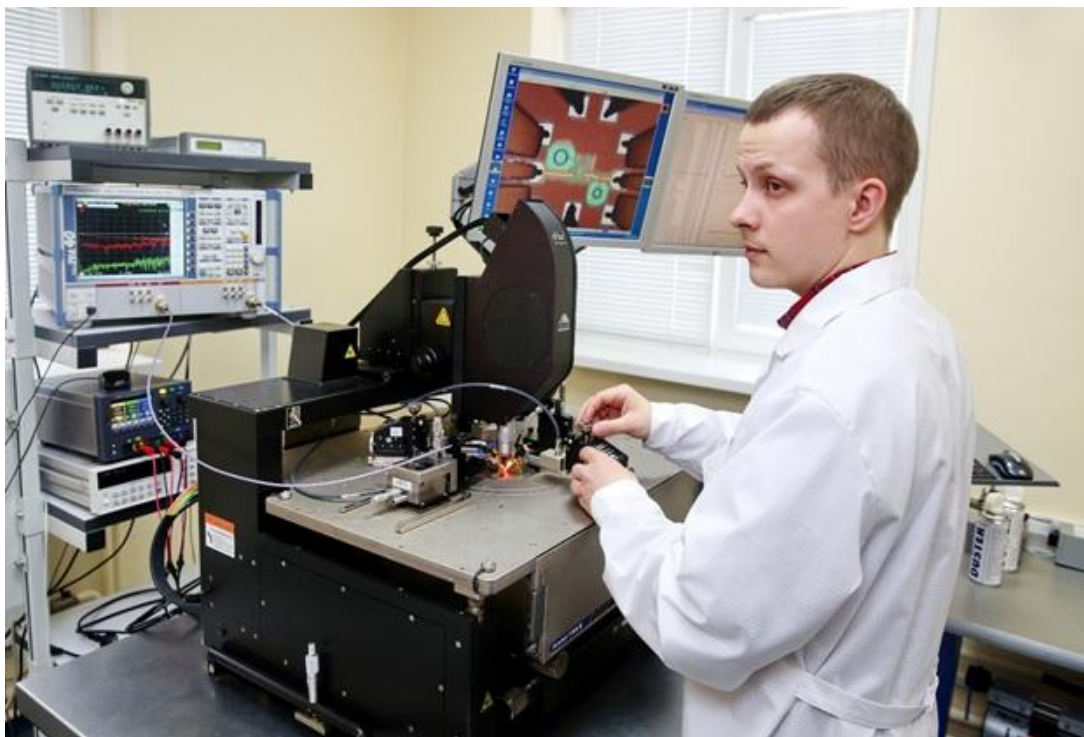


Рисунок 2.1 – Измерение параметров монолитной интегральной схемы на зондовой станции в ЦКП «Импульс»

Измерение параметров рассеяния интегральных схем выполняется прямым методом при использовании автоматического векторного анализатора цепей, откалиброванного в соответствии с типовой методикой LRRM в плоскостях подключения СВЧ-зондов контактного устройства к ОИ.

Измерение параметров рассеяния ИС в различных режимах осуществляется при помощи измерительных установок, структурные схемы которых представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

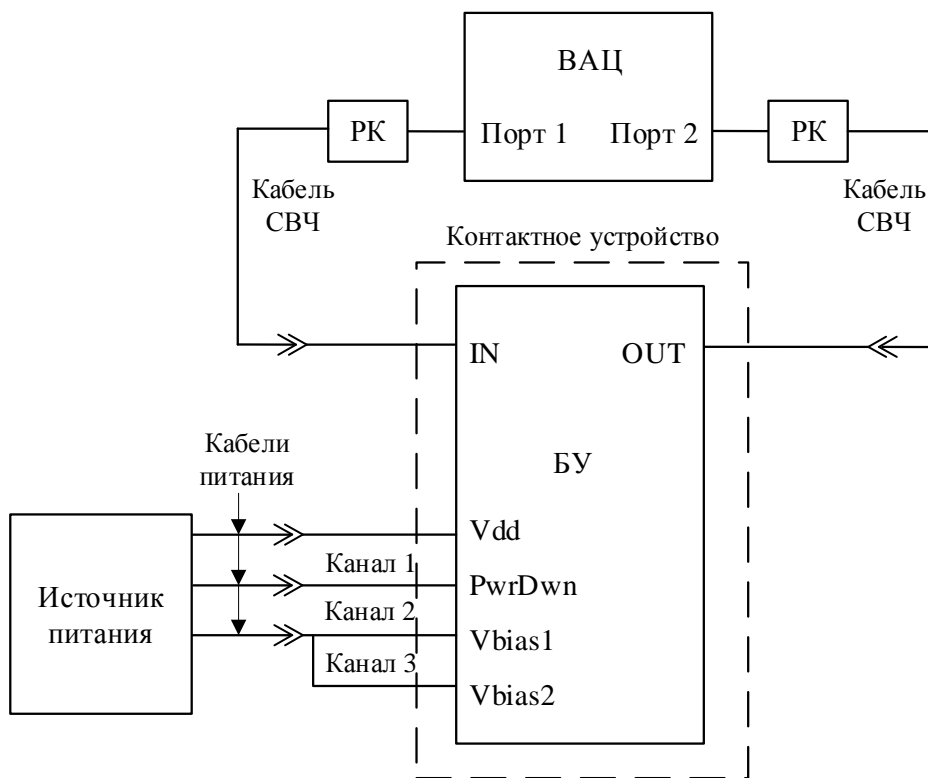


Рисунок 2.2 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния буферного усилителя



Рисунок 2.3 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния цифрового аттенюатора

Методика зондовых измерений ИС отработана для единичных изделий в виде кристаллов или на пластине.

## 2.2 Методика проведения испытаний интегральных микросхем на отладочных платах

Данная методика была разработана при выполнении НИР и вошла в состав отчетной документации под названием «Методика проведения испытаний интегральных микросхем ИС1 и ИС2 на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2». Полное описание методики приведено в ПРИЛОЖЕНИИ В. Методика проведения испытаний интегральных микросхем ИС1 и ИС2 на макетах отладочных плат МОП ИС1 и МОП ИС2.

Реализация испытаний осуществляется с применением оборудования ЦКП «Импульс» (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Материально-техническое обеспечение измерений

№ п/п	Наименование	Тип и нормативные документы	Назначение	Измеряемые характеристики	Метрологические и технические характеристики
1	Двухканальный источник питания с возможностью изменения тока и напряжения	Agilent E3646A S/N MY40013280	Установка рабочего режима по напряжению		Погрешность установки по напряжению не более 10 мВ, по току не более 1 мА. Погрешность измерения не более 1%
2	Векторный анализатор цепей с опцией скалярного измерения коэффициента преобразования смесителя	R&S ZVA40	Измерение параметров рассеяния, измерение параметров смесителя	Измерение модуля и фазы параметров рассеяния, измерение коэффициента преобразования	Диапазон частот: 10 МГц – 40 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не более 0,1 дБ; по фазе: не более 2°
3	Векторный анализатор цепей с опцией скалярного измерения коэффициента преобразования смесителя	Keysight PNA-X N5247B	Измерение коэффициента шума	Измерение модуля и фазы параметров рассеяния, измерение коэффициента преобразования	Диапазон частот: 10 МГц – 67 ГГц; Погрешность измерения по модулю: не более 0,1 дБ; по фазе: не более 2°
4	Генератор сигналов	R&S SMB 100A	Формирование СВЧ сигнала	–	100 кГц – 20 ГГц
5	Векторный анализатор цепей	Agilent E5071C	Формирование СВЧ сигнала	–	100 кГц – 20 ГГц

Схемно-аппаратная реализация методики включает 10 схем измерений, включающих векторный анализатор цепей и другие структурные единицы. Применение совокупности

схем – вынужденная мера, обеспечивающая единичное или мелкосерийное производство микросхем. При крупносерийном производстве необходима автоматизация. Разработанная методика по существу позволяет подготовить технические требования на автоматизированный стенд.

Схема измерительной установки представлена на рисунке 2.4, используемая при измерении параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по входу цифрового аттенюатора (ЦАТТ) и драйвера ЦАТТ интегральной микросхемы ИС1.

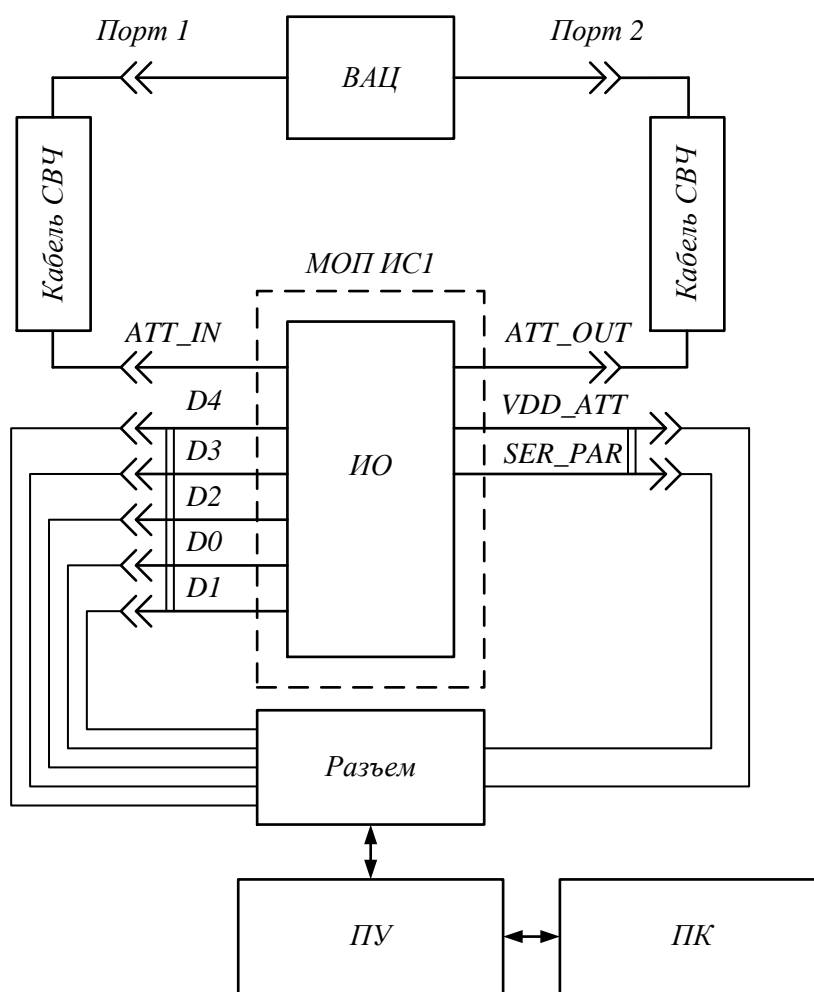


Рисунок 2.4 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по входу ЦАТТ и драйвера ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рисунке 2.5 представлена схема измерительной установки, используемая при измерении точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ.



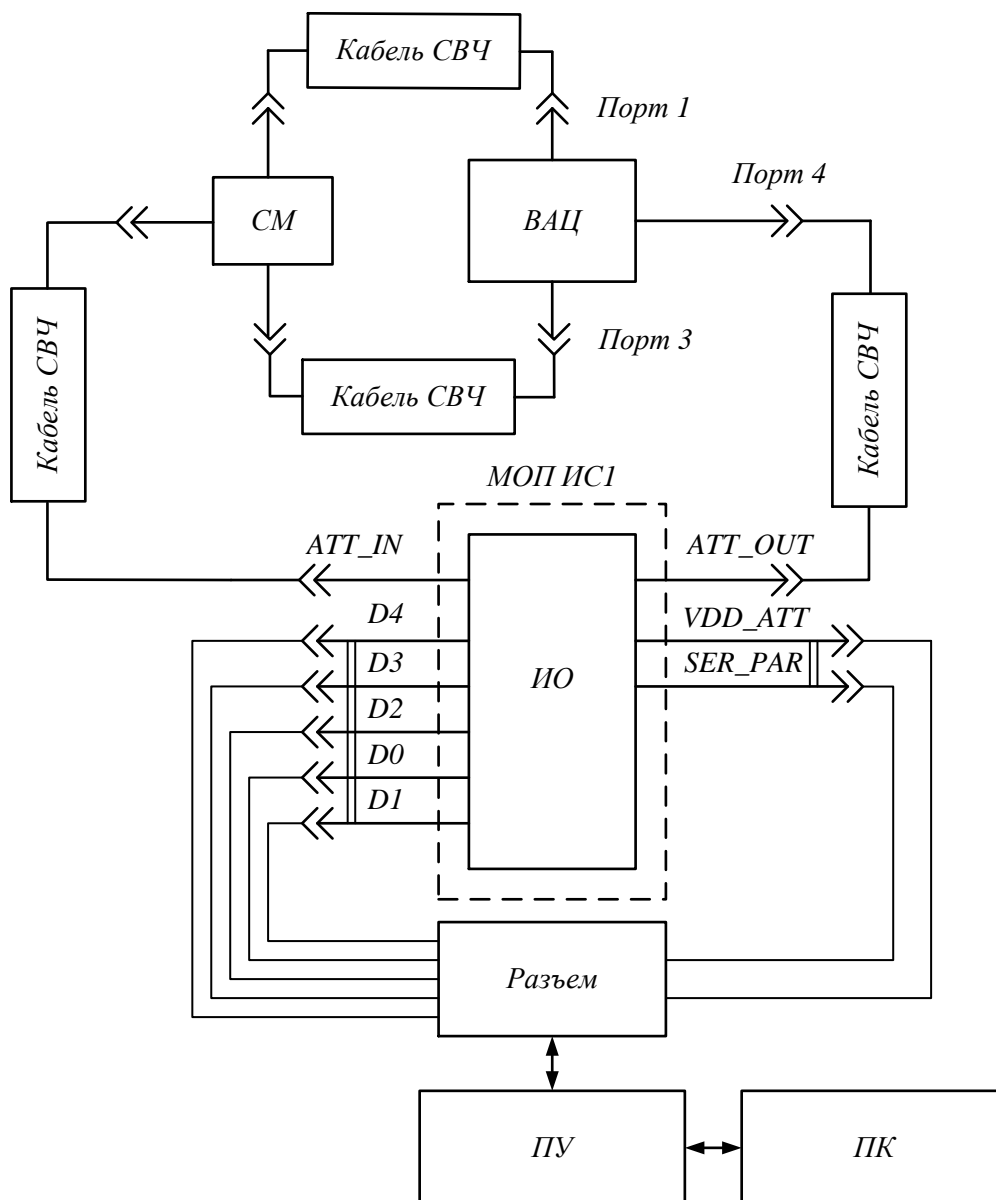


Рисунок 2.5 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу ЦАТТ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рисунке 2.6 представлена схема измерительной установки для проведения измерений параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу буферного усилителя (БУ) СВЧ интегральной микросхемы.

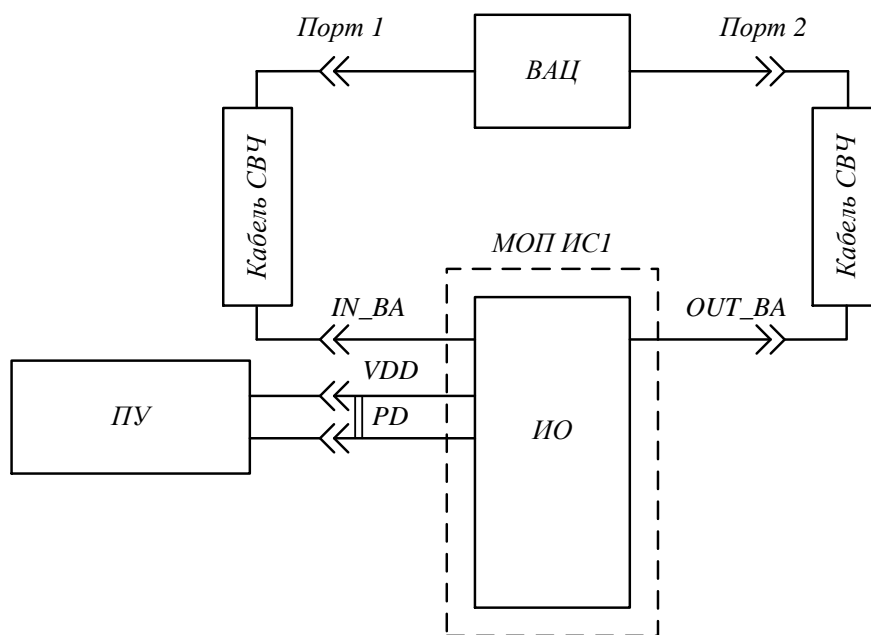


Рисунок 2.6 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рисунке 2.7 представлена схема измерительной установки для проведения измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ

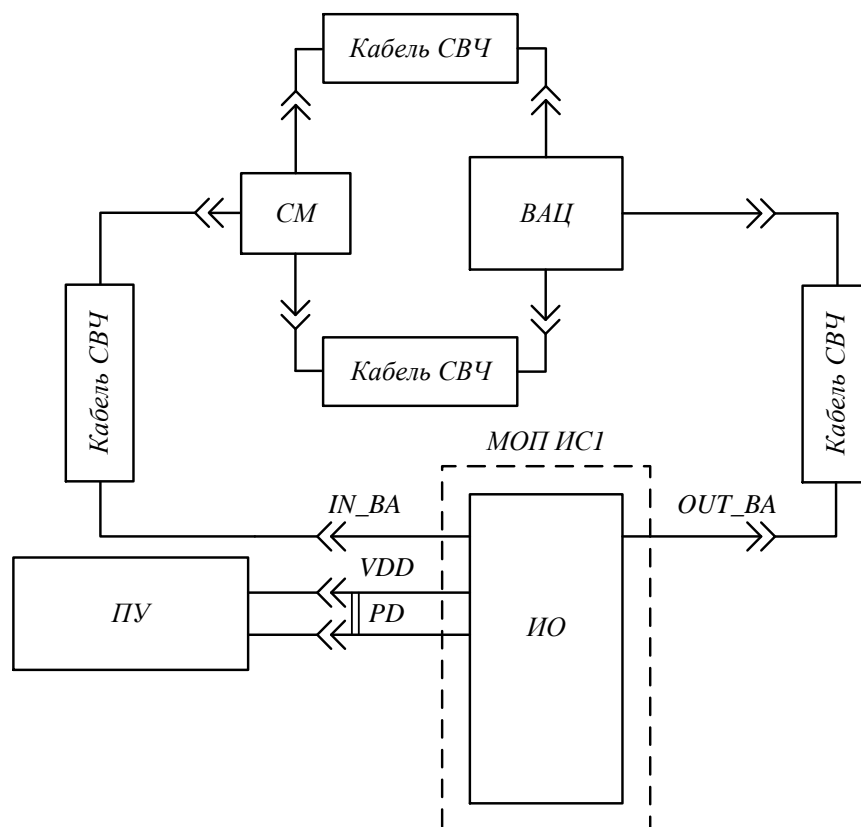


Рисунок 2.7 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рисунке 2.8 представлена схема измерительной установки для проведения измерения коэффициента шума БУ.

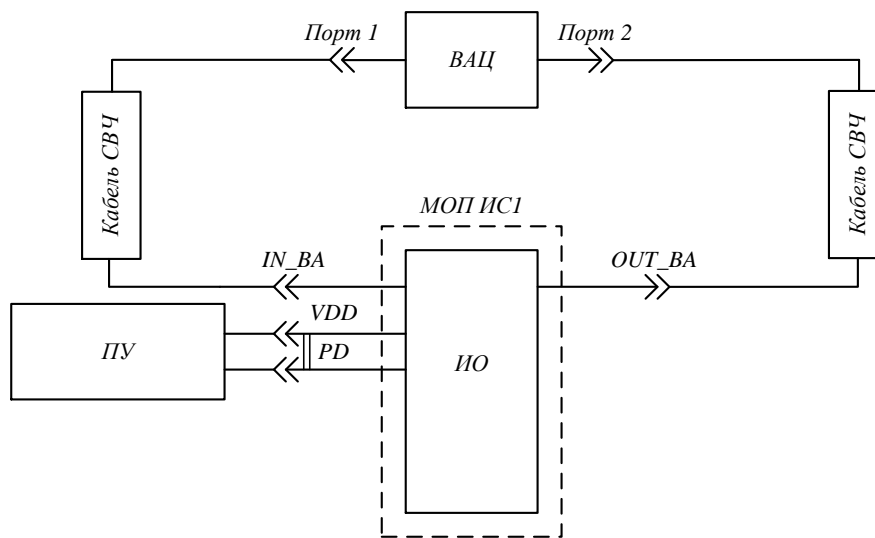


Рисунок 2.8 – Схема измерительной установки для измерения коэффициента шума БУ СВЧ интегральной микросхемы ИС1

На рисунке 2.9 представлена схема измерительной установки, используемой при измерении коэффициента преобразования смесителя в зависимости от частоты сигналов ВЧ и ПЧ; коэффициента преобразования смесителя в диапазоне рабочих частот, в зависимости от мощности сигнала гетеродина. Данная схема используется также для измерения точки 1 дБ компрессии по входу СМ.

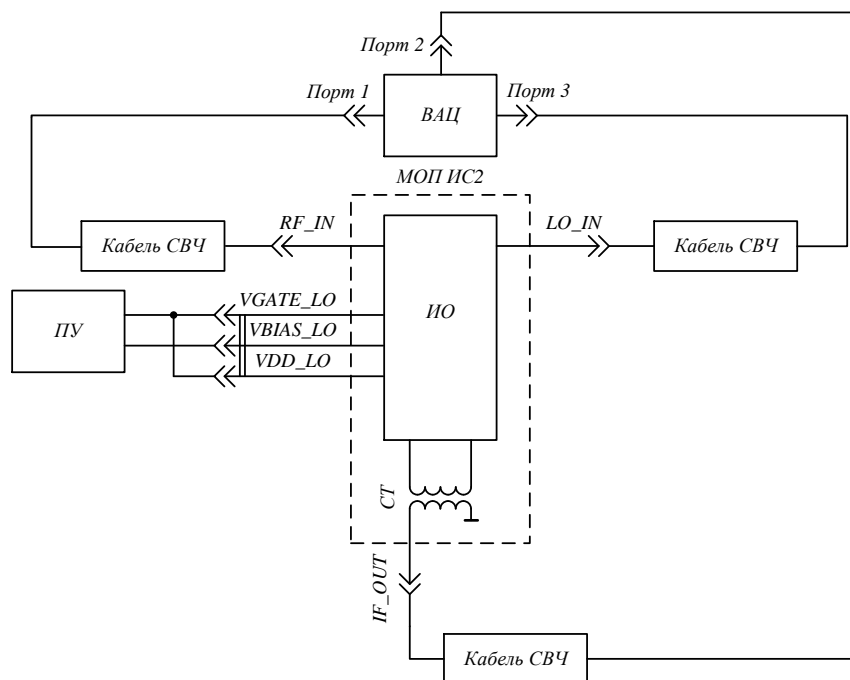


Рисунок 2.9 – Схема измерительной установки для измерения коэффициента преобразования СМ при различных зависимостях входных параметров сигнала ВЧ и ПЧ СВЧ и для измерения точки 1 дБ компрессии по входу СМ интегральной микросхемы ИС2

На рисунке 2.10 представлена схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ.

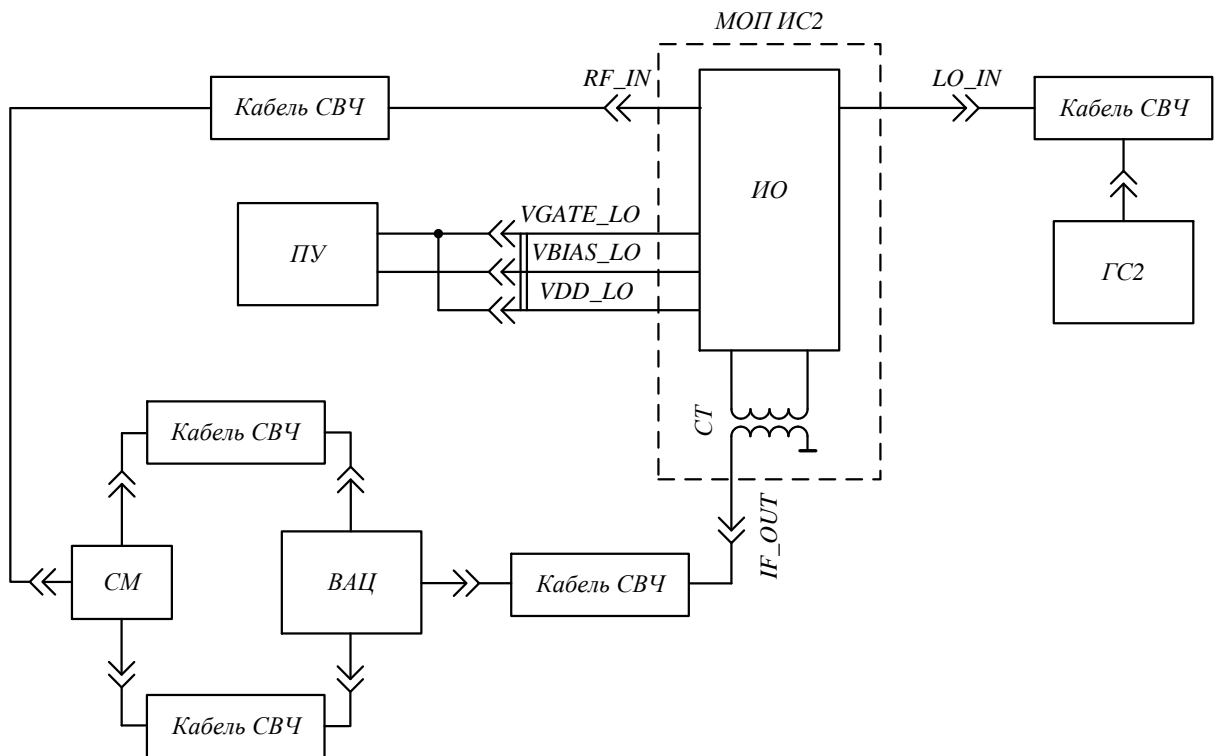


Рисунок 2.10 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу СМ СВЧ интегральной микросхемы ИС2

На рис. 2.11 представлена схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 и УПЧ2.

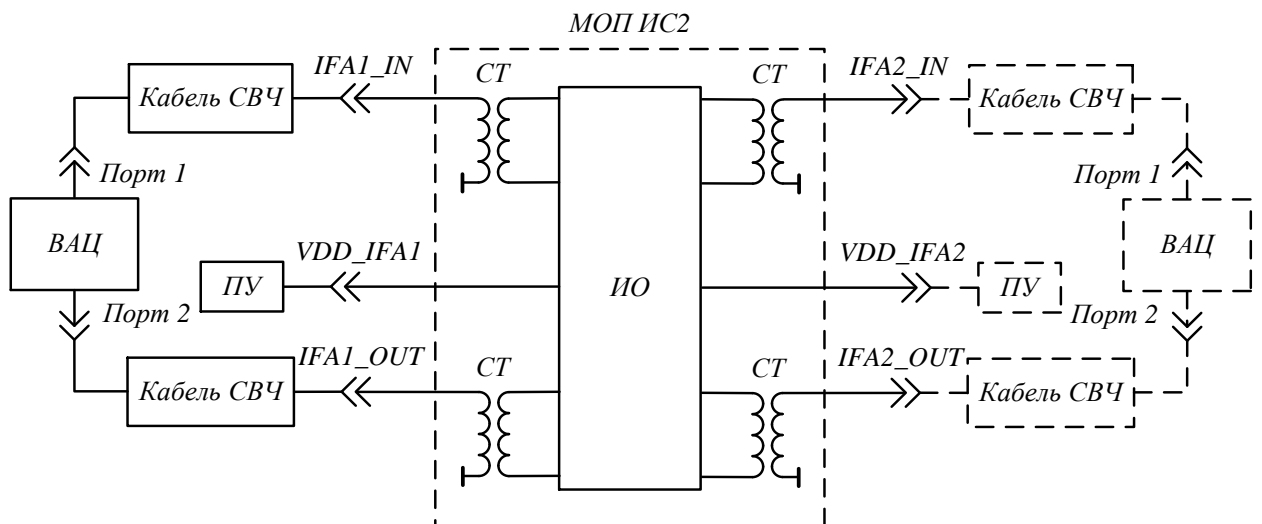


Рисунок 2.11 – Схема измерительной установки для измерения параметров рассеяния и точки 1 дБ компрессии по выходу УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 (схема для измерения указанных параметров УПЧ2 показана штриховой линией)

На рисунке 2.12 представлена схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2.

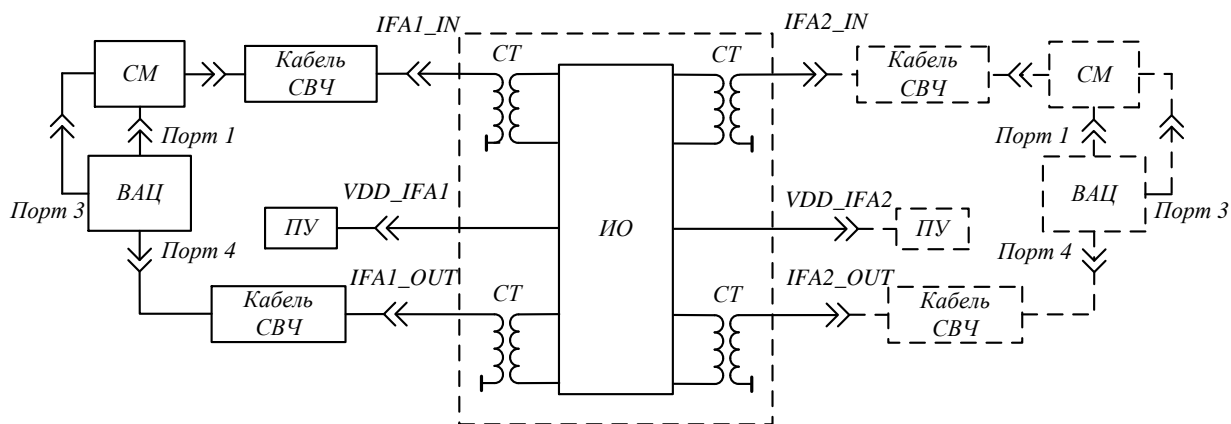


Рисунок 2.12 – Схема измерительной установки для измерения точки интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 (схема для измерения указанных параметров УПЧ2 показана штриховой линией)

На рисунке 2.13 представлена схема измерительной установки для измерения коэффициента шума УПЧ1 и УПЧ2.

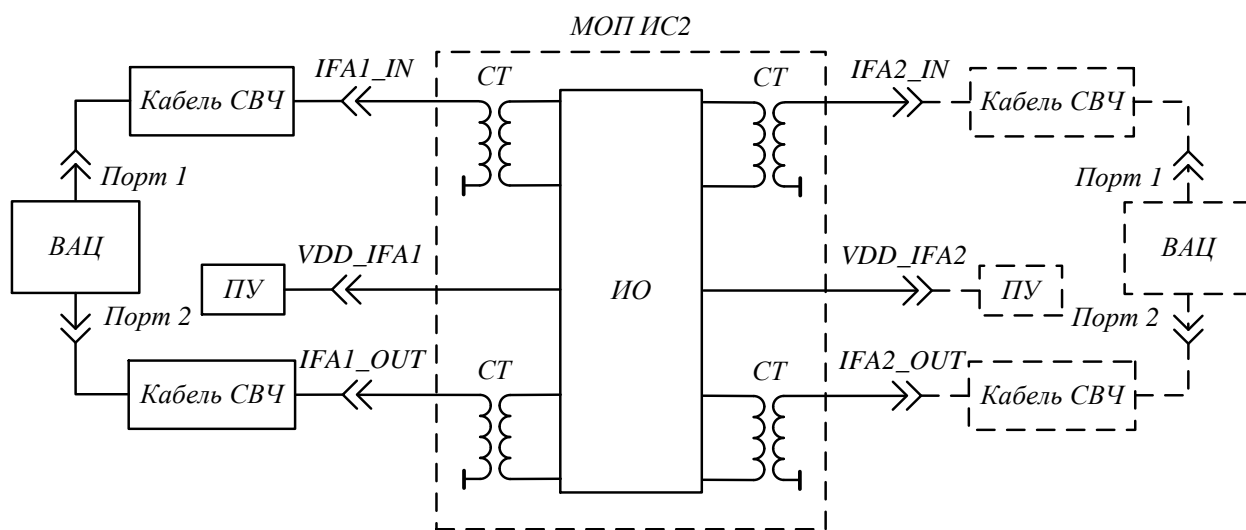


Рисунок 2.13 – Схема измерительной установки для измерения коэффициента шума УПЧ1 и УПЧ2 СВЧ интегральной микросхемы ИС2 (схема для измерения указанных параметров УПЧ2 показана штриховой линией)

### 2.3 Разработка методики измерения относительной диэлектрической проницаемости материалов подложек в широкой полосе частот

При производстве фольгированных материалов, диэлектрических подложек возникает потребность в определении относительной диэлектрической проницаемости материалов  $\epsilon_r$  в

широком частотном диапазоне. В работе [16] в аналитической форме представлены формулы определения  $\varepsilon_2$  подложки, помещенной над копланарной полосковой линией (рисунок 2.14). Задача решается расчетно-экспериментальным методом. Отрезок копланарной полосковой линии рассматривается как распределенный сенсор, поэтому весьма важно определить погонные параметры копланарной линии в зависимости от относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2$ .

Разработка данной методики является целью проекта, подготовленного и направленного в РНФ. В настоящее время идет разработка опытного образца модуля на основе копланарной линии для установки измеряемой платы. Представленное далее описание уже используется в лаборатории печатной технологии при выполнении лабораторных исследований.

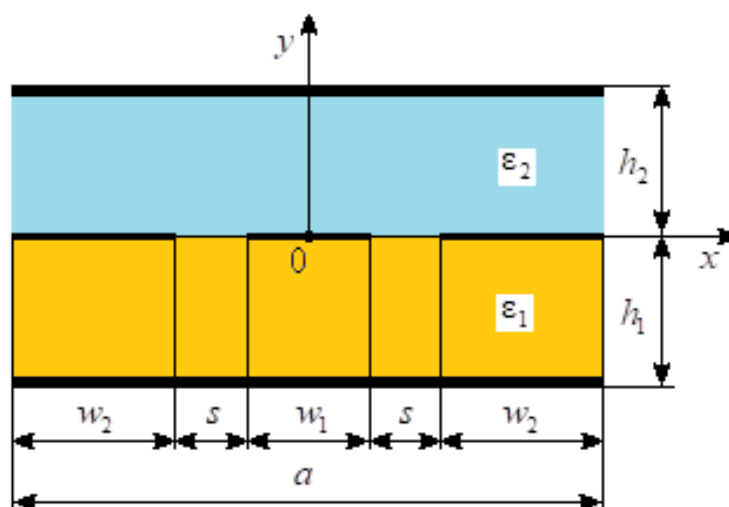


Рисунок 2.14 – Конструкция копланарной полосковой линии с двумя экранирующими плоскостями

Был проведен обзор публикаций по анализу копланарных полосковых линий. Начало исследованию копланарных полосковых линий (КПЛ) было положено в ряде работ [17-21] конца 60-х и в 70-е годы прошлого века. Интерес к этим линиям передачи связан с удобством их применения в невзаимных магнитных и других устройствах. В течение 1969-1975 годов были проведены анализ основных характеристик в квази-Т приближении и с учетом распространения волн высших типов. Расширение типов устройств на основе КПЛ и развитие вопросов их проектирования актуально и в настоящее время [22-31].

В работе [22] рассмотрены копланарные полосковые линии с одной экранирующей плоскостью. Рассмотрена зависимость характеристического импеданса от расстояния между боковыми экранами при разной высоте расположения токонесущего проводника над или под плоскостью заземлённых боковых полосок.

Использование метода конформных отображений позволило получить аналитические и численные выражения для расчета первичных параметров в квази-Т-приближении различных полосовых структур [23 -25].

В [26] был предложен метод парциальных емкостей для расчета размеров копланарных волноводов различного типа с учетом анизотропии материала. В этой статье рассматривается зависимость коэффициентов распространения в КПЛ от размеров проводника и свойств материала. В [27] была проанализирована копланарная полосовая линия, содержащая два проводника. Аналитические замкнутые выражения были получены для определения ее основных параметров.

Авторы работы [28] провели анализ КПЛ в экране с проводниками конечной толщины с использованием метода квазистатического спектрального анализа (SDA). С использованием SDA [29] была проанализирована КПЛ в экране с проводниками конечной толщины. В [29] был представлен полноволновый анализ КПЛ, основанный на преобразовании Фурье и точном учете граничных условий. К сожалению, данные, полезные для проектирования устройств на основе КПЛ, выходят за рамки исследования, представленного в [29].

Другие авторы [30] рассчитали характеристическое сопротивление и потери в асимметричных копланарных и эллиптических копланарных линиях, разновидностях КПЛ. Копланарная линия, расположенная на многослойных диэлектрических подложках, была исследована в [31] на основе метода конформных отображений. Применение полученных результатов было продемонстрировано для расчета времени задержки в КПЛ, была измерена фазовая скорость в линии передачи на подложке  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

На основании проведенного обзора был сделан вывод о том, что для решения поставленной задачи наиболее подходят метод конформных отображений и метод сеток. В работе [16] проведен анализ копланарной полосковой линии между плоскими экранами (КПЛЭ) методом конформных отображений и численным методом сеток. Была поставлена цель изучить зависимость параметров таких линий от изменений диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2$  в верхнем диэлектрическом слое (рисунок 2.14) и найти возможность определения неизвестной  $\epsilon_2$  из измеренных коэффициентов матрицы рассеяния.

Примененная копланарная линия состоит из токонесущей полоски шириной  $w_1$ , расположенной на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  и толщиной  $h_1$ ; на этой же подложке нанесены боковые планарные экраны шириной  $w_2$ , отделённые от токонесущей полоски зазором  $s$ . Токонесущая полоска и боковые экраны находятся между экранирующими плоскостями, которые имеют конечный размер  $a$  по оси  $x$ .

Наличие боковых экранов позволяет достичь слабой связанности электрических полей в нижней и верхней части структуры с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  соответственно. Для качественной оценки изменения электрического поля при изменении  $\epsilon_2$  решалось уравнение Лапласа методом сеток [16]. Были взяты следующие диэлектрические проницаемости слоев и размеры полосок:  $\epsilon_1 = 9,8$ ,  $\epsilon_2 = 1$  или  $\epsilon_2 = 10$ ;  $a = 20$  мм;  $h_1 = 1$  мм;  $h_2 = 3$  мм;  $w_1 = 0,5$  мм;  $s = 1$  мм. Количество узлов вдоль осей  $x$  и  $y$  составляло 120 и 40 соответственно. На рис. 2.15 показан результат решения уравнения Лапласа в виде эквипотенциальных линий, они показаны синим цветом для  $\epsilon_2 = 1$  и красным для  $\epsilon_2 = 10$ .

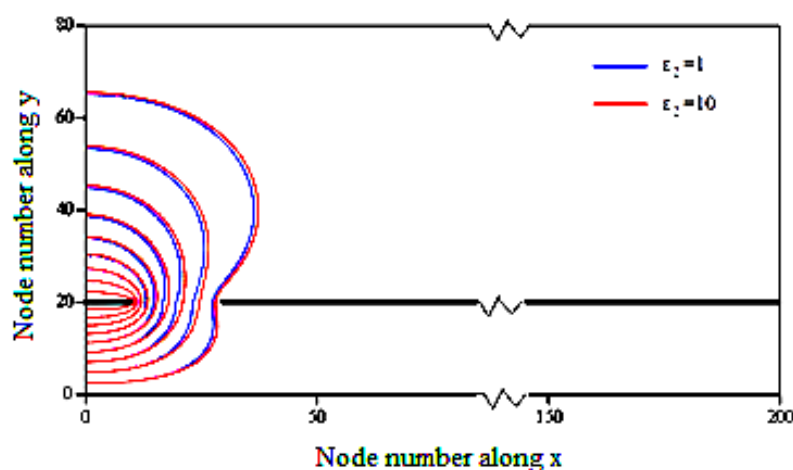


Рисунок 2.15 – Эквипотенциальные линии в поперечном сечении КПЛЭ (показана половина структуры). Синие линии ( — ) и красные линии ( — ) были получены при значениях  $\epsilon_1 = 9,8$  и  $\epsilon_2 = 1$  и  $\epsilon_1 = 9,8$  и  $\epsilon_2 = 10$  соответственно

Из рисунка 2.15 видно, что наибольшее изменение потенциалов наблюдается в зазоре. Для потенциала 1 В на токонесущей полосе максимальное отклонение в одном из узлов сетки, лежащих в плоскости поверхности раздела диэлектрика, составляло 0,045 В при десятикратном изменении диэлектрической проницаемости верхнего слоя. Это можно рассматривать как довольно небольшое значение, предполагая, что изменение диэлектрической проницаемости верхнего слоя не вызовет каких-либо существенных изменений в структуре электрического поля в нижнем слое из-за влияния боковых плоских экранов и экранирования заземляющими плоскостями.

Теперь рассмотрим модель полосковой структуры, построенную методом конформных отображений. Представим копланарную линию в виде полубесконечной полосы в силу симметрии структуры и, соответственно, электрического поля относительно оси  $Oy$  (рисунок 2.16). Полуполоса на плоскости  $z = x + iy$  представляет нижнюю или верхнюю часть структуры с толщиной диэлектрического слоя  $h$ . Полуполоса отображается на полуплоскость  $\xi$  с помощью функции (2.1) [33]



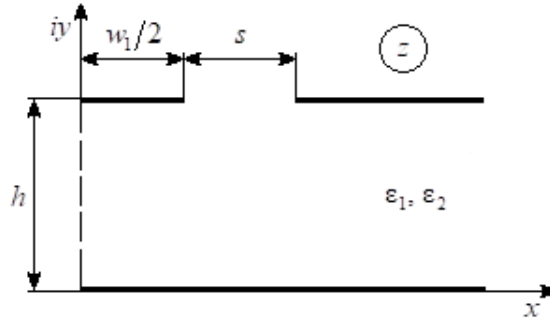


Рисунок 2.16 – Копланарная линия в виде полу бесконечной полосы

$$\xi(z) = \text{ch}(\pi z/h), \quad (2.1)$$

где  $h = h_1$  для нижнего слоя диэлектрика с  $\epsilon_1$ , и  $h = h_2$  для верхнего слоя диэлектрика с  $\epsilon_2$ .

Отображение  $\xi(z)$  переводит полуполосу с электродами КПЛЭ с нижним или верхним экраном в копланарную линию с планарными экранами, но несимметричную относительно точки  $\xi(z) = 0$ . Применяя преобразование симметризации [34, 35], мы получаем отображение планарных конденсаторов на плоскость идеальных конденсаторов, емкости которых равны парциальным емкостям токонесущей полосы на нижнюю плоскость и нижнюю часть боковых экранов:

$$C_1 = \frac{2\epsilon_0 \cdot \epsilon_1}{\pi} \cdot \text{arcch} \left[ \frac{K_1' \cdot \text{ch}(g_1) + K_1'' \cdot \text{ch}(d_1)}{\text{ch}(a_1) \cdot (K_1'' - K_1')} \right], \quad (2.2),$$

$$C_2 = \frac{2\epsilon_0 \cdot \epsilon_2}{\pi} \cdot \text{arcch} \left[ \frac{K_2' \cdot \text{ch}(g_2) + K_2'' \cdot \text{ch}(d_2)}{\text{ch}(a_2) \cdot (K_2'' - K_2')} \right], \quad (2.3)$$

где коэффициенты в (2.2) и (2.3) находятся из следующих выражений:

$$K_{1,2}' = \sqrt{\text{ch}^2(a_{1,2}) - \text{ch}^2(d_{1,2})}, \quad (2.4)$$

$$K_{1,2}'' = \sqrt{\text{ch}^2(a_{1,2}) - \text{ch}^2(g_{1,2})}, \quad (2.5)$$

$$a_{1,2} = \frac{\pi \cdot (w_1 + w_2 + 2s)}{2h_{1,2}}, \quad d_{1,2} = \frac{\pi \cdot (w_2 + 2s)}{2h_{1,2}}, \quad (2.6)$$

$$g_{1,2} = \frac{\pi \cdot w_2}{2h_{1,2}}. \quad (2.7)$$

Погонная емкость токонесущей полоски находится как сумма парциальных емкостей:

$$C_0 = C_1 + C_2. \quad (2.8)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость КПЛЭ определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_1 + C_2}{C_1/\varepsilon_1 + C_2/\varepsilon_2}. \quad (2.9)$$

Характеристическое сопротивление находится из известного выражения:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}{c \cdot C_0}. \quad (2.10)$$

Погонная индуктивность находится из (2.11) ( $c$  - скорость света):

$$L_0 = \frac{1}{c} \cdot \left( \frac{C1}{\varepsilon_1} + \frac{C2}{\varepsilon_2} \right)^{-1}. \quad (2.11)$$

Используя выражения (2.2) — (2.13) и программу для численного решения уравнения Лапласа, были рассчитаны зависимости характеристического импеданса  $Z_0$  от отношения  $w_1/h_1$  при фиксированных значениях  $w_2 = 8$  мм,  $h_2 = 3$  мм,  $s = 1$  мм,  $\varepsilon_1 = 9,8$ ,  $\varepsilon_2 = 1,0$ . Зависимость  $Z_0(w_1/h_1)$  показана на рисунке 2.17. Сравнение результатов, полученных двумя методами, показывает хорошее согласие. Это позволяет подтвердить более ранний вывод, основанный на сравнении электрических полей (рисунок 2.14), утверждавшее о слабой связи поля нижней и верхней частей исследуемой полосковой структуры.

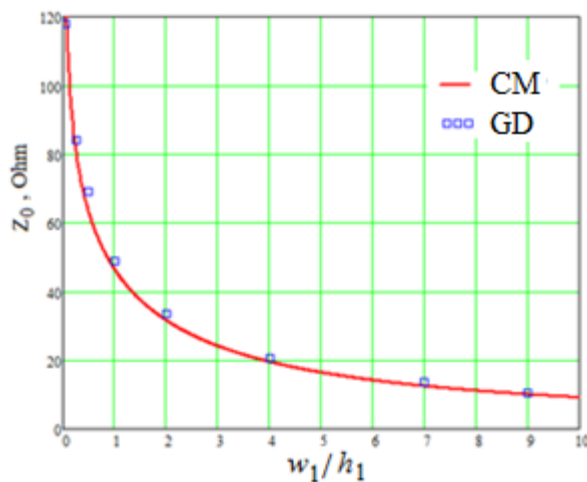


Рисунок 2.17 – Зависимость волнового сопротивления от  $w_1/h_1$

Приближение исходя из слабой связи полей нижней и верхней частей КПЛЭ дает наиболее простой способ определения относительной диэлектрической проницаемости диэлектриков, размещенных между токонесущей полосой и верхней экранирующей плоскостью. Рассчитана зависимость эффективной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{eff}$  от  $\varepsilon_2$  копланарной линии со следующими параметрами:  $w_1 = 1$  мм;  $w_2 = 8$  мм;  $h_1 = 1$  мм;  $h_2 = 3$  мм;  $s = 1$  мм;  $a = 23$  мм;  $\varepsilon_1 = 9,8$ . Результаты расчетов приведены на рисунке 2.18.

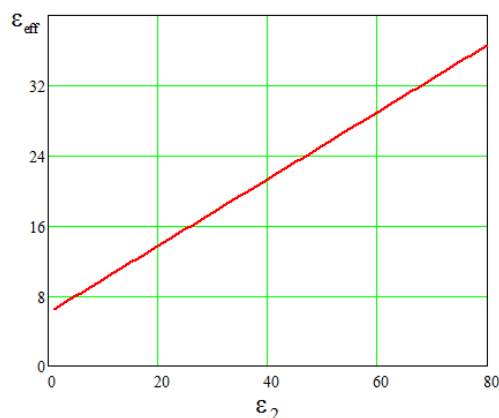


Рисунок 2.18 – График зависимости  $\varepsilon_{eff}$  от диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2$  верхнего слоя

Теперь рассмотрим использование отрезка КПЛЭ для определения относительной диэлектрической проницаемости образца в виде подложки, образующей верхний диэлектрический слой (рисунок 2.14). Методика измерения состоит в сравнении параметров КПЛЭ с известными геометрическими размерами и известными диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и копланарной полосковой линии, в которой верхний диэлектрический слой заменяется образцом с неизвестной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$ . Для этого определим значение эффективной диэлектрической проницаемости при  $\varepsilon_2 = 1$  и расстоянии от токонесущей полосы до верхней плоскости  $h_2$  по формуле:

$$\varepsilon_{ef0} = \frac{C_3 + C_4}{\frac{C_3}{\varepsilon_1} + C_4}, \quad (2.12)$$

где  $C_3$ ,  $C_4$  – частичные емкости КПЛЭ, определяемые по формулам (2.2), (2.3).

Воспользуемся хорошо известным соотношением между фазовой задержкой и эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{ef0}$ :

$$\varphi_0 = 1,2 \cdot f_0 \cdot l \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef0}}, \quad (2.13)$$

где  $f_0$  – частота в ГГц;  $l$  – длина отрезка КПЛЭ. Расчетная фазовая задержка составила  $\varphi_0 = 365,7$  град при  $f_0 = 2$  ГГц и  $l = 0,06$  м.

Когда используется образец с неизвестной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$  в качестве верхнего диэлектрического слоя такой же толщины, эффективная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{ef1}$  определяется по формуле (2.14):

$$\varepsilon_{ef1} = \frac{C_3 + C_4 \cdot \varepsilon_2}{\frac{C_3}{\varepsilon_1} + C_4}. \quad (2.14)$$

Поскольку  $\varepsilon_2$  не известна, для составления уравнения для ее нахождения вносимый фазовый сдвиг в КПЛЭ с введенной подложкой определяется экспериментально как аргумент коэффициента  $S_{21}$  матрицы рассеяния. В приводимом примере фазовая задержка  $\varphi_1 = \arg(S_{21}^1)$  составила  $\varphi_1 = 449,9$  градусов. Увеличив  $\varepsilon_2$  от 1 до неизвестного значения, мы получили приращение задержки фазы  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$ .

Воспользуемся соотношением между фазовой задержкой  $\varphi_1$  и эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{ef1}$  (2.15)

$$\varphi_1 = 1,2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef1}} \cdot l. \quad (2.15)$$

Из формул (2.13), (2.14), (2.15) приходим к формуле (2.16) для определения эффективной диэлектрической проницаемости КПЛЭ со вставкой из материала с  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_{ef1} := (\Delta\varphi)^2 \cdot D^{-2} + 2 \cdot \Delta\varphi \cdot D^{-1} \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef0}} + \varepsilon_{ef0}, \quad (2.16)$$

где  $D = 1,2 \cdot f_0 \cdot l$ .

Выражение (2.16) с учетом формулы (2.14), в которой  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_{ef1}$  связаны явно, позволило определить относительную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_2$  (2.17):

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{C_4} \cdot (C_3 \cdot \varepsilon_{ef1} / \varepsilon_1 + C_4 \cdot \varepsilon_{ef1} - C_3). \quad (2.17)$$

*Пример экспериментального определения  $\varepsilon_2$ .* Полосковая структура представляет собой КПЛЭ на подложке из материала RO4303C толщиной 0,6 мм с  $\varepsilon_1 = 3,38$ . Размеры полосковой структуры:  $w_1 = 2,2$  мм;  $w_2 = 8$  мм;  $h_1 = h_2 = 1,5$  мм;  $s = 1$  мм;  $a = 30$  мм; длина токонесущей полосы составляет 83 мм. Значения рассчитанных емкостей:  $C_3 = C_3 = 72,24$  пФ. Частотная зависимость вносимого фазового сдвига измерялась экспериментально  $\varphi_0 = \arg(S_{21}^0) = 221,14$  град. Затем верхняя подложка с известной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2 = 3,38$  была заменена на подложку из материала той же толщины с неизвестным значением  $\varepsilon_2$ . После этого была измерена фазовая задержка  $\varphi_1 = \arg(S_{21}^1) = 227,03$  град. Расчет с использованием полученных выражений дал  $\varepsilon_2 = 4,35$ , как и ожидалось.

## 2.4 Методика измерения вязкости растворов (чернил)

Параметры и характеристики функциональных узлов печатной электроники в значительной степени определяются вязкостью растворов материалов (чернил), используемых при выполнении технологических операций нанесения материалов печатными методами. Поэтому

для определения вязкости растворов проведена закупка прибора  $\mu$ VISC из собственных средств ТУСУРа.

Методика была составлена в связи с поступлением в состав УНУ прибора  $\mu$ VISC – портативного миниатюрного вискозиметра, внешний вид которого представлен на рисунке 2.19. Полный текст методики измерения вязкости приведен в ПРИЛОЖЕНИИ С Методика измерения вязкости растворов (чернил).



Рисунок 2.19 – Внешний вид измерителя вязкости  $\mu$ VISC

Измерение динамической вязкости при прохождении потока вещества через трубку было впервые проведено в 1838 году Ж.Л.М. Пуазейлем. В ходе данных экспериментов была показана необходимость приложения давления, чтобы преодолеть напряжение сдвига, вызванное стенками цилиндрической трубки. По результатам экспериментов было выведено уравнение потока Хагена-Пуазейля.

Компания Rheosense разработала микрощелевой MEMS чип VROC, в котором измерение динамической вязкости проводится по данным измерения давления жидкости в щелевом канале с помощью массива микродатчиков давления. Очевидным преимуществом щелевой конструкции канала является полное исключение влияния входного и выходного падения давления.

Преимуществами способов измерения с помощью микроэлектромеханического микрофлюидного чипа VROC, компании Rheosense являются:

- Измерение истинной (абсолютной) динамической вязкости для ньютоновских и неньютоновских жидкостей.
- Закрытое исполнение системы измерения позволяет избежать эффектов, связанных с испарением жидкости и поверхностью контакта жидкости с воздухом.
- Измерение на ультрамалых объемах жидкости по сравнению с любыми другими вискозиметрами.

- Обеспечение ламинарного потока даже при очень высоких скоростях сдвига из-за значительного уменьшения числа Рейнольдса.
- Близкие к реальным условия потока, например, для введения инфузионных растворов или выхода чернил.
- Точность превышает 1% от полной шкалы и 2% от показания.
- Воспроизводимость лежит в пределах 1%.
- Жидкость во время эксперимента герметизирована, что предотвращает ее испарение и блокирует основную причину возникновения неточностей.

При проведении измерения для сходных образцов не нужно проводить очистку чипа. Предыдущий образец просто вымывается новым, что не влияет на качество измерения.

Отбор и ввод образца очень прост. Для большинства образцов результаты появляются на экране менее чем через одну минуту. Несколько режимов работы позволяют проводить как базовые измерения, например, при контроле качества или измерения вязкости, как необходимого параметра, так и более сложные - для изучения зависимости вязкости от скорости сдвига или температуры.

Весь прибор вместе с аккумулятором весит около 700 грамм, что дает возможность его непосредственного переноса к месту измерения и использования в полевых условиях или в условиях мобильных лабораторий контроля качества.

Области применения:

- Технологии электроники.
- Биохимия и белки.
- Фармацевтика.
- Нефтехимия и полимеры.
- Масла и смазки.
- Чернила и краски.
- Покрытия и лаки.
- ПАВ и моющие средства.
- Пищевые продукты.
- Шампуни и косметика.

#### **Основные технические характеристики прибора**

- *Точность*: 1% от шкалы или 2% от значения.
- *Воспроизводимость*: 1%.
- *Скорость потока*: от 0,5 до 450 мкл/мин.
- *Диапазон температур*: 18-40°C (другие температуры по запросу).
- *Точность температуры*: 0,15°C.

- *Работа от аккумуляторов:* мин. 100 измерений.
- *Электропитание:* +8 В.
- *Объем пипетки:* 400 мкл.
- *Варианты чипов:* HA01-01, HA02-01, HC02-01 (*другие чипы по запросу*).

### **Процесс измерения**

1. Отбор образца в одноразовую пипетку.
2. Измерение вязкости образца в автоматическом или ручном режиме.
3. Получение результата и чистка чипа после измерения в режиме очистки.

### **Варианты чипов для вискозиметра $\mu$ VISC™**

#### **HA01-01**

- Глубина канала: 50 мкм
- Диапазон скоростей сдвига: 6,5-5800  $\text{c}^{-1}$
- Диапазон вязкости: 0,2-100 мПа·с

#### **HA02-01**

- Глубина канала: 100 мкм
- Диапазон скоростей сдвига: 1,7-1453  $\text{c}^{-1}$
- Диапазон вязкости: 60-5000 мПа·с

#### **HC02-01**

- Глубина канала: 100 мкм
- Диапазон скоростей сдвига: 1,7-1453  $\text{c}^{-1}$
- Диапазон вязкости: 400-20000 мПа·с

Техника измерений согласно ПРИЛОЖЕНИЮ С Методика измерения вязкости.

### **Выводы по разделу 2**

Представленные методики и информация о разработках в этом направлении не исчерпывают потребностей ЦКП, которые возникают в процессе обеспечения работ по конкретным темам. Важно, что в процессе проведения исследований и измерений сотрудники могут не только следовать разработанной методике, но и подготовить и опробовать методику сами. Эта услуга, исходя из опыта работы, стала востребованной, т.к. часто заказчик не в полной мере владеет возможностями аппаратного обеспечения измерений или изготовления объекта договоренностей. Здесь важно следующее – рост компетенций сотрудников, отвечающих за определенные виды измерений и работу технологического оборудования. В работе ЦКП «Импульс» появился новый акцент на создание новых опций измерений к существующим приборам отечественного производства, основная работа по которым состоит из разработки метода или методики, лежащей в основе разработки программного обеспечения и реализации изме-

рений. При этом важным периодом внедрения новых опций является прямое взаимодействие с разработчиками приборов предприятия-изготовителя.

Итак, в данном разделе описаны разработанные и освоенные новые методики измерений и исследования, а также сформулирована концепция развития работ по созданию новых опций измерений, в том числе на вновь закупленном оборудовании.



### 3. Доработка сайта ЦКП

Доработка сайта проводилась в связи с дооснащением оборудованием и разработкой новых методик и в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 18 июля 2016 г. № 871. При этом также учтены наработки конца 2019 и периода 2020 года.

В связи с пополнением оборудования и доработкой части документации внесены следующие изменения на сайте ЦКП «Импульс».

1. Обновлен полный перечень оборудования ЦКП «Импульс» в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень оборудования ЦКП «Импульс» (2020 год)

1	Аппаратно-программный комплекс для проведения микроволнового анализа на базе зондовой станции Cascade M150 Марка: Cascade M150 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2012 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 3545500 МОЛ Бова А.Г. Инв. №41012400006 НИИ МЭС (СБИ) Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к. 314
2	Векторный анализатор цепей N9952A Марка: N9952A Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2017 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4647976 МОЛ Дорошенко М.Н. Инв. 410124000003 СКБ «Смена» Г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 104
3	Векторный анализатор электрических цепей до 40 ГГц Марка: ZVA40 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2017 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 7410000 МОЛ Бова А.Г. Инв.№410124000009 НИИ МЭС Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314
4	Генератор СВЧ сигналов Rohde&Schwarz Марка: Rohde&Schwarz Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2017 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 2700000 МОЛ Бова А.Г. НИИ МЭС Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314

Продолжение Таблицы 3.1

5	<p>Испытательная климатическая камера (тепло-холод)                  Марка: ESPEC SU-262                  Количество единиц: 1 Год выпуска: 2017                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1033000                  МОЛ Бова А.Г.                  нв.№41012400012                  НИИ МЭС                  Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314</p>
6	<p>Микроскоп INM 100 UV                  Марка: INM100UV                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 5310000                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв.№ 11010402453                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/1</p>
7	<p>Нелинейный рефлектометр                  Марка: P4-И-02 Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2012                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 3700000                  МОЛ Бомбизов А.А.                  Инв.№ 41012400003                  СКБ «СМЕНА»                  Г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 104</p>
8	<p>Полуавтоматическая установка ультразвуковой микросварки ТРТ                  Марка: ТРТ НВ-05                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2015                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4750000                  МОЛ Бова А.Г.                  Инв.№41012400038                  НИИМЭС                  Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314</p>
9	<p>Стенд измерения векторных характеристик цепей в импульсном режиме на базе                  Обзор 103, Caban 140, S5048, P4-И-01                  Марка: Caban 140, S5048, P4-И-01                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2015                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1186403,79                  МОЛ Бомбизов А.А.                  P4-И-01 Инв.№21010404131 -47681,04                  Caban №410134002375 453350                  S5048 №410134002376 498100                  Обзор 103 №21010403448 -187272,75                  СКБ «СМЕНА»                  Г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 104</p>

Продолжение Таблицы 3.1

10	<p>Стенд измерения мощностных характеристик на базе зондовой станции Cascade Microtech Summit 11K и СВЧ тюнеров                  Марка: Summit 11K                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 9529387,00                  МОЛ Бова А.Г.                  Инв.11010402449                  МЭС                  Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314</p>
11	<p>Технологическая линия фотолитографии                  Марка: Адсорбционная азотная установка АдА-0,010), станция деионизованной воды, станция оборотной воды                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4224290                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. №11010402437                  Инв.№ 11010402438                  Инв.№11010402434                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/1</p>
12	<p>Установка допроявления фоторезиста YES-G500                  Марка: YES-G500                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4366000                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. №11010402454                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/81</p>
13	<p>Установка нанесения фоторезистов                  Марка: OPTispin SB20                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1970600                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. №11010402457                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/1</p>
14	<p>Установка отмывки пластин                  Марка: OPTwet SB30                  Количество единиц: 1                  Год выпуска: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 6136000                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. №11010402452                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/81</p>

Продолжение Таблицы 3.1

15	<p>Установка электронно-лучевого и ВЧ магнетронного напыления                  Марка: Orion-B                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2009                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 10620000                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. №11010402451                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/81</p>
16	<p>Планетарная шаровая мельница                  Марка: Pulverisette 7 Premium Line                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1919355                  МОЛ Бомбизов А.А.                  Инв. 210124000038                  СКБ «Смена»                  Г. Томск, пр. Ленина 40, к.104</p>
17	<p>Установка быстрого термического отжига                  Марка: STE RTA150, SemiTEq                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 9000000                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. 210124000041                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/81</p>
18	<p>Лазерный анализатор размера частиц                  Марка: Analysette 22 Nano Tec                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 5140677                  МОЛ Бомбизов А.А.                  Инв. 210124000039                  СКБ «Смена»                  Г. Томск, пр. Ленина 40, к.104</p>
19	<p>Профилометр оптический 3D                  Марка: Profilm 3D                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 4000000                  МОЛ Солдаткин В.И.                  Инв. 210124000034                  ЛХиТОМ                  Г. Томск, пр. Ленина 40</p>
20	<p>Анализатор цепей с комплектом аксессуаров                  Марка: Keysight Technologies N5247B                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 37304843                  МОЛ Бова А.Г.                  Инв. 210124000035                  МЭС                  Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314</p>

Продолжение Таблицы 3.1

21	<p>Установка плазмохимического травления                  Марка: STE ICP200E6 SemiTEq                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 19000000                  МОЛ Дорошенко М.Н.                  Инв. 210124000040                  НОЦ                  Г. Томск, ул. Вершинина, 76/81</p>
22	<p>Электромагнитный вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO                  Марка: ANALYSETTE 3 PRO                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 1004493                  МОЛ Бомбизов А.А.                  Инв.210124000037                  СКБ «Смена»                  Г. Томск, пр. Ленина 40, к.104</p>
23	<p>Осциллограф                  Марка: Keysight Technologies UXR0134A                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2019                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 11998173                  МОЛ Бова А.Г.                  Инв. 210124000036                  МЭС                  Г. Томск, ул. Красноармейская, 147, к.314</p>
24	<p>Система прецизионного шнекового дозирования с набором аксессуаров                  Марка: Catalina                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2020                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 12435164                  МОЛ Бомбизов А.А.                  Инв.210124000050                  СКБ «Смена»                  Г. Томск, пр. Ленина 40, к.104</p>
25	<p>Кластер FDM, SLA и композитной 3D печати с набором расходных материалов в составе: стереолитографический 3D-принтер; 3D-принтер для композитной печати; 3D-принтер; компьютерная система проектирования и управления 3D печатью.                  Марка: FDM                  Количество единиц: 1                  Дата ввода в эксплуатацию: 2020                  Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 2764555                  МОЛ Бомбизов А.А.                  Инв.210124000051                  СКБ «Смена»                  Г. Томск, пр. Ленина 40, к.104</p>

Продолжение Таблицы 3.1

26	Установка плазмохимического осаждения диэлектриков в плазме индуктивного и емкостного разрядов и система подачи и утилизации газов установок плазмохимического травления и осаждения Марка: STE ICP 200D Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2020 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 30000000 МОЛ Дорошенко М.Н. Инв. 210124000053 НОЦ Г. Томск, ул. Вершинина, 76/81
27	Контрольно-измерительная аппаратура СВЧ в составе: векторный анализатор цепей P4226/1; кабель СВЧ фазостабильный, соед. тип NMD 3,5 мм (розетка), NMD 3,5 (вилка), 700 мм; набор калибровочных мер с соединителями типа IX var.3. Марка: P4226/1 Количество единиц: 1 Дата ввода в эксплуатацию: 2020 Балансовая (восстановительная) стоимость единицы (руб.): 2818944 МОЛ Бомбизов А.А. Инв.210124000052 СКБ «Смена» Г. Томск, пр. Ленина 40, к.104

2. Помещен план работы ЦКП «Импульс» на 2020 год, утвержденный проректором по НР и инновациям (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – План работы ЦКП «Импульс» и УНУ на 2020 г.

№ п/п	Планируемые работы	Период выполнения	Требуемое оборудование
1.	Обеспечение работ Научно-исследовательская лаборатории "Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости" (НИЛ "ФИЭМС") кафедры ТУ, проект «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости»	01.03.2020-31.12.2020	Сектор измерений СВЧ и импульсных, 4 ед.
2.	Обеспечение работ Лаборатории интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) кафедры ФЭ по теме «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки»	01.03.2020-31.12.2020	Сектор измерений СВЧ и импульсных, 4 ед.
3.	Обеспечение работ Центр НТИ «Технологии беспроводной связи и Интернета вещей» по тематике Центра	01.01.2020 - 30.12.2020	Сектор измерений СВЧ, 2 ед.
4.	Обеспечение работ лаборатории печатных технологий каф. КУДР «Исследование нелинейных свойств тонкопленочных проводников, изготовленных методом струйной печати с применением нанодисперсных электропроводящих чернил. Углеродные устройства СВЧ»	01.01.2020 - 30.12.2020	Комплекс обеспечения аддитивных технологий, 6 ед.

Продолжение Таблицы 3.2

5.	Лаборатория интеллектуальных компьютерных систем, проект РНФ «Исследования и разработка цифрового дизайн-центра по проектированию микроэлектронных устройств для беспроводных систем связи».	0.1.01.2020 - 30.12.2020	Сектор измерений СВЧ, 2 ед.
6.	НИИ Систем электрической связи, х/д 46/19, проект «Прикладные исследования и разработка прототипа твердотельного радиолокационного сенсора для цифровых интеллектуальных систем безопасности, систем управления движением судов, охраны береговой линии, шельфа и границ, обладающего пониженной радиолокационной»	0.1.01.2020 - 30.08.2020	Оборудование технологического сектора и сектора измерений СВЧ, 12 ед.
7.	Обеспечение работ по исследованию вариантов построения и моделирование интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрактов Ку-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN (х/д 44/19, АО "Концерн ВКО" Алмаз-Антей").	01.12.2019- 30.06.2020	Измерения на вновь поступившем PNA-X и осциллографе, на зондовой станции, 6 ед.
8.	Выполнение работ по договорам внешних пользователей, всего 30 договоров	0.1.01.2020 - 30.12.2020	Оборудование технологического сектора и сектора измерений СВЧ, 18 ед.
9.	Обеспечение работ по теме «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных», г/з 4/20	01.03.2020- 31.12.2020	Оборудование технологического сектора и сектора измерений СВЧ, 8 ед.
10.	Подготовка предложений ЦКП по участию в проектах по 218 постановлению правительства РФ, проектов РНФ, РФФИ	0.1.01.2020 - 30.12.2020	Аналитическая работа, предложения по видам работ

Загрузка текущая 71%, планируемая до 80%.

3. Приведены сведения о выполненных работах в 2020 году (таблицы 3.3, 3.4).

Таблица 3.3 – Внутренние пользователи услуг ЦКП «Импульс»

№ п/п	Лаборатория (подразделение)	Темы работ, часть которых выполнялась на оборудовании ЦКП или с участием его сотрудников	Работы, выполнявшиеся в ЦКП
1	Научно-исследовательская лаборатория "Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости" (НИЛ "ФИЭМС") кафедры ТУ	Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости	TDR измерениям в нанопикосекундном диапазоне и исследование частотных характеристик в широком диапазоне частот прототипа устройств для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса.
2	Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) кафедры ФЭ	Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки	Измерение параметров элементов радиофотоники на СВЧ. Технологические работы по исследованию плазмоустойчивости диэлектрических и металлических пленок и разработке процесса плазмохимического травления InP/InGaAsP гетероструктур.
3	Центр НТИ «Технологии беспроводной связи и Интернета вещей» (со Сколковским институтом науки и технологий)	Разработка отладочных плат для передачи сверхузкополосных сигналов двоичной фазовой манипуляции малой мощности.	Измерение параметров устройств в импульсном режиме.
4	Лаборатория печатных технологий каф. КУДР	Исследование нелинейных свойств тонкопленочных проводников, изготовленных методом струйной печати с применением нанодисперсных электропроводящих чернил. Углеродные устройства СВЧ.	3D печать токопроводящих проводников, измерение параметров чернил и устройств
5	Лаборатория интеллектуальных компьютерных систем	Исследования и разработка цифрового дизайн-центра по проектированию микроэлектронных устройств для беспроводных систем связи.	Измерение параметров на СВЧ с применением зондовой станции, векторных анализаторов цепей.
6	НИИ Систем электрической связи	Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент	Аналитический обзор, измерение параметров на СВЧ и в импульсном режиме, изготовление макетов. Подготовка проектов.



Таблица 3.4 – Работы, выполнявшиеся по заказам внешних пользователей услугами ЦКП «Импульс»

№ п/п	Характер услуг, выполнявшихся в ЦКП по договорам
1.	Изготовление коронок по представленным моделям заказчика на 3D принтере.
2.	Изготовление макета взрывозащищенного кожуха на 3D принтере.
3.	Печать заглушек кабель-канала по представленной модели заказчика.
4.	Печать секций для хранения пластиковых карт по представленным моделям заказчика.
5.	Печать изделий по представленным моделям заказчика.
6.	Измельчение материалов заказчика до получения порошка с размером частиц не более 100 мкм, просеивание порошка для отделения фракций размером не более 50 мкм, 10 мкм, 5 мкм, измерение размеров частиц порошка, перемешивание и гомогенизация пасты с использованием связующего компонента на основе терпиниола. Минимальный объем пасты по окончанию работы – 120 мл. Изготовление пасты по нормативу.
7.	Проведение измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полупроводникового материала на частотах 1.1 ГГц и 2.5 ГГц
8.	Проведение измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для листовых СВЧ ламинатов на частотах 2.5 ГГц и 5.1 ГГц
9.	Прорисовка масок на фотошаблонных заготовках ПМС-ФП 102x102x2,4 (маскирующий слой из хрома) с минимальным размером элементов топологии 1 мкм
10.	Услуга по контролю резьбовых соединений манометров с помощью оптического микроскопа.
11.	Работы по контролю среза тонкопленочных покрытий с помощью оптического и электронного микроскопа.
12.	Работы по визуальному контролю дефектности тонкопленочных магнетронных покрытий с помощью оптического и электронного микроскопа.
13.	Работы по контролю вольфрамовых катодов для электронной пушки с помощью оптического и электронного микроскопа.
14.	Работы по контролю дефектности поверхности зеркал для лидаров с помощью оптического, электронного микроскопа и профилометра.
15.	Измерение АЧХ коэффициента отражения антенных устройств в диапазоне частот до 67 ГГц, расчет КСВ.
16.	Проведение измерений коэффициента отражения приемника по выходу в коаксиальном тракте в диапазоне до 40 ГГц. Измерение спектра и мощности СВЧ сигнала на коаксиальном выходе приемника при поданном оптическом сигнале при частоте модулирующего сигнала до 20 ГГц. Косвенный расчет и моделирование коэффициента оптического преобразования в указанном диапазоне СВЧ сигнала.
17.	Измерение комплексных коэффициентов передачи и отражения элементов калибровочных и верификационных элементов на подложках с использованием зондовой установки в диапазоне частот до 40 ГГц; Измерение комплексных коэффициентов передачи и отражения пассивных и активных СВЧ устройств на базе широкополосного векторного анализа цепей

Продолжение Таблицы 3.4

18.	Работа по осаждению металлических покрытий Ti, Ta, W, Mo на алмаз из недргоценных металлов с отжигом контактного слоя, Осаждение однослойных металлических покрытий на алмаз из недргоценных металлов Al, Ti, W, Mo; Термическая обработка (отжиг) алмазных образцов на установке быстрого термического отжига Raith 150 Two
19.	Оценка профиля образцов заказчика: определяется зависимость высоты профиля от координаты и пространственная визуализация профиля на пяти участках одного образца заказчика.
20.	Работы по химической обработке деталей
21.	Изготовление масок из фотошаблонных заготовок ПМС-ФП 102x102x2,4 (маскирующий слой из окиси железа) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм
22.	Измерение параметров устройств в СВЧ диапазоне, TDR измерения при воздействии пикосекундных импульсов.
23.	Разработка и создание информационно-измерительной и управляющей системы для технологических процессов современного производства на примере типа «городской водоканал – автоматизация контроля состояния водозаборных скважин и технологического оборудования, бассейнов воды, технических бассейнов систем канализации и очистных сооружений с использованием беспроводных принципов передачи информации»
24.	Исследование вариантов построения и моделирование интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрактов Ku-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN

4. Отработана процедура заключения типового договора на оказание услуги ЦКП внешним заказчиком, которая не противоречит принятым нормативным документами в РФ и принимается бухгалтериями исполнителя и заказчика:

- 1) Договор на оказание услуги;
- 2) Техническое описание услуги;
- 3) Акт сдачи-приёмки выполненных услуг по договору.

Договор составляется сотрудником ЦКП, согласовывается с заказывающим юридическим лицом (заказчиком услуг) и подлежит учету в соответствии с регламентами документооборота организаций. Основание являются заявка на проведение научных исследований и оказание услуг, устная договоренность.

Пример текстов договора и приложений приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Д Типовой договор на оказание услуги ЦКП «Импульс».

5. Уточнена форма заявки на проведение научных исследований и оказание услуг (ПРИЛОЖЕНИЕ Е Заявка на проведение научных исследований и оказание услуг). В их число включены работы и услуги, перечисленные в таблице 3.6.

6. Составлен уточненный Перечень выполняемых типовых работ центра

коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ и СВЧ устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс»), приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Ж Перечень выполняемых типовых услуг центра коллективного пользования.

Таблица 3.5 – Перечень выполняемых типовых работ и (или) оказываемых услуг

№ п/п	Наименование типовой работы и оказываемых услуг
1.	Измерение вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик устройств полупроводниковой электроники, как органической, так и твердотельной.
2.	Измерение векторных параметров ВЧ и СВЧ устройств при импульсном воздействии при длительности импульсов от 17 нс до 35 пс.
3.	Измерение частотной зависимости векторных параметров в диапазоне до 67 ГГц (полный набор коэффициентов матрицы рассеяния), включая измерения на пластине.
4.	Измерение нелинейных и шумовых характеристик СВЧ-устройств, в том числе монолитных интегральных схем.
5.	Проведение СВЧ «load pull» измерений мощности и коэффициента шума на подложке в импульсном режиме.
6.	Изготовление элементов твердотельной электроники и радиофотоники.
7.	Проектирование и изготовление элементов электроники, конструктивных деталей методами аддитивных технологий.
8.	Прототипирование микросхем СВЧ – разработка схем, топологии, расчет параметров, измерение изготовленных макетов и образцов.
9.	Проведение аналитических исследований в области нано-микроэлектроники СВЧ, аддитивных технологий.
10.	Подготовка проектов по направлениям нано-микроэлектроники СВЧ, аддитивных технологий.

7. Утверждено обновленное Положение о ЦКП «Импульс» (ПРИЛОЖЕНИЕ И Положение о ЦКП Импульс).

Сайт ЦКП «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ- и СВЧ-устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс»)

<https://tusur.ru/ru/o-tusure/struktura-i-organy-upravleniya/departament-nauki-i-innovatsiy/nauchnoe-upravlenie/tsentry-kollektivnogo-polzovaniya/tsentr-kollektivnogo-polzovaniya-impuls>

### **Выводы по разделу 3**

Проведенная работа по доработке сайта позволила систематизировать и упростить работу с потребителями услуг. Однако преодолеть изрядную долю бюрократии не представилось возможным, т.к. деятельность бюджетной организации, являющейся базовой для ЦКП, регламентируется системой бухгалтерского учета. Тем не менее, взяв оформление необходимых документов в обслуживание сотрудника ЦКП, издержки оформительского плана удалось минимизировать и выполнить план исследований и оказания услуг в полном объеме.

#### **4. Проведение работ по реализации стратегии развития ЦКП по развитию технологий и методов измерений**

В плане работ по реализации стратегии развития ЦКП было выполнено несколько значимых мероприятий, как в направлении оказания услуг по НИР фундаментального характера, так и при выполнении прикладных работ. Такому сочетанию исследований способствовала сформировавшаяся структура ЦКП, составленная из секторов измерений, нацеленных на экспериментальные исследования, и сектора технологического по направлению наномикроэлектроники СВЧ, в котором можно изготавливать изделия или осуществлять часть операций при изготовлении элементов и узлов.

В 2020 г. при определяющей поддержке Министерства науки и высшего образования был проведен большой объем аналитической и проектной работы. Далее приведены основные результаты этих усилий, направленных на реализацию стратегии развития ЦКП на ближайшие годы.

##### **4.1 Формирование проектов РНФ «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня»**

Были сформированы и согласованы руководствами договаривающихся организаций (ЦКП «Импульс» ТУСУРа и названными далее учреждениями и организациями) следующие проекты с краткой их характеристикой.

###### **4.1.1 Квантовый и баллистический электронный транспорт в полупроводниковых наноструктурах с усиленным электрон-электронным взаимодействием**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), г. Новосибирск.

Руководитель проекта Погосов Артур Григорьевич, гл.н.с.,

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс» – изготовление полупроводниковых наноструктур.

Характер работы – фундаментальное исследование.

Направление из Стратегии НТР РФ– Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация научных статей.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

Предполагаемая продолжительность работ на оборудовании: 1000 часов/год.

###### **4.1.2 Статические и динамические наноструктуры в кристаллическом углероде для приложений электроники и фотоники**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Федеральное

государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Руководитель проекта Липатов Евгений Игоревич.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»:

1. Осаждение одно- и многослойных металлических покрытий на кристаллических углерод из драгоценных и недрагоценных металлов (Au, Pt, Al, Ti, Ta, W, Mo).
2. Термическая обработка (отжиг) образцов.
3. Услуги фотолитографии.
4. Ультразвуковая микросварка

Характер работы – фундаментальное исследование.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация научных статей.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

Предполагаемая продолжительность работ на оборудовании: 1000 часов/год.

#### **4.1.3 Разработка технологий модифицирования поверхности полимерных пьезоэлектрических материалов методом осаждения ультратонких покрытий для приложений реконструктивно-восстановительной хирургии**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Руководитель проекта Твердохлебов С. И.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»:

1. Масштабирование технологий формирования ультратонких функциональных покрытий на поверхности полимерных пьезоэлектрических материалов, в том числе 3D структур с открытой взаимосвязанной пористостью.
2. Разработка технологии управления кристаллической структурой полимерных пьезоэлектрических материалов методом термоциклирования.
3. Изучение структуры и свойств ультратонких покрытий сформированных на поверхности полимерных пьезоэлектрических материалов, в том числе 3D структур с открытой взаимосвязанной пористостью.

Направление из Стратегии НТР РФ– Задача 29 (п. 32 пп. "а") Формирование сети центров экспериментального производства, инжиниринга, прототипирования, опытного и мелкосерийного производства, испытательных центров и центров сертификации с учетом приоритетов научно-технологического развития.

Характер работы – фундаментальное исследование.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация научных статей, выпустить опытные образцы индивидуальных имплантируемых медицинских изделий пригодных для проведения предклинических и ограниченных клинических испытаний.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

#### **4.1.4 Разработка научных основ создания субмикро-г нанооптоэлектро-механического акселерометра**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Руководитель проекта Нестеренко Тамара Георгиевна, к.т.н., доцент Отделения электронной инженерии (ОЭИ).

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»:

1. Напыление диэлектрических слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$ , металлических материалов Cu, Ti, Al и др.;
2. Травление металлических и диэлектрических слоев;
3. Изготовление фотошаблонов;
4. Фотолитографические операции для создания топологии оптоэлектромеханического акселерометра;
5. Оптическая инспекция топологических слоев;
6. Контроль параметров оптоэлектромеханического акселерометра.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н6.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация статей, образцы акселерометров.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

#### **4.1.5 Влияние субструктуры на термоэлектрические свойства нанокристаллических композиционных материалов на основе халькогенидов металлов**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг ФГБОУ ВО "ВГТУ", ВГТУ.

Руководитель проекта Макагонов В. А.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»: изготовление образцов для проведения экспериментальных исследований.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация статей, изготовление образцов для проведения экспериментальных исследований.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

Предполагаемая продолжительность работ на оборудовании: до 1000 часов/год.

#### **4.1.6 Моделирование и исследование интегрального радиодифракционного когерентного приемника и его элементов на основе полупроводниковых технологий кремний-на-изоляторе, кремний-германий и фосфид индия для высокоскоростных систем передачи данных до 400 Гб/с**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

Руководитель проекта Бабак Л.И.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»: Измерение параметров на СВЧ и в импульсном режиме. Изготовление комплекта фотошаблонов.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация статей, макеты устройств.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

#### **4.1.7 Оптические приемопередатчики на основе фотонно-электронных интегральных схем на платформе InP для перспективных систем связи 5G/6G и радиодифракционной оптики**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Сколковский институт науки и технологий.

Руководитель проекта Кюпперс Ф.

Характер работы фундаментальное исследование.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»: изготовление макетов, измерение параметров на СВЧ и в импульсном режиме.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация результатов в рамках научных статей в соответствии с условиями конкурса.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг..

#### **4.1.8 Разработка технологии изготовления многослойных печатных плат на алюминиевых основаниях для устройств электронной техники, получаемых посредством 3D печати с применением создаваемых высокотеплопроводящих диэлектрических слоев из низкотемпературной керамики с токопроводящими топологиями**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

Руководитель проекта Иванов А.А., к.т.н.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»: подготовка паст для печати, печать диэлектриков и металлических проводников, исследование на адгезию и частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация статей, опытные образцы плат с высокой теплопроводимостью.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

Предполагаемая продолжительность работ на оборудовании: до 1000 часов/год.

#### **4.1.9 Решение задач температурной стабилизации объектов в замкнутом объеме инертного газа с применением аддитивных технологий**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

Руководитель проекта Туев В.И., д.т.н.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»: нанесение материалов на сложные поверхности с помощью принтеров, измерение параметров электромагнитных излучений в широком диапазоне частот.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация статей, изобретения, макеты светоизлучающих устройств.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

Предполагаемая продолжительность работ на оборудовании: 1000 часов/год.

#### **4.1.10 Разработка физико-химических основ создания многофункциональных оптоэлектронных устройств на основе пленок ниобата лития**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг ФГБОУ ВО "ВГТУ", ВГТУ.

Руководитель проекта Сумец М. П.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»:

1. Проектирование топологии;
2. Изготовление комплекта фотошаблонов;
3. Обработка подложек и формирование многослойных тонкопленочных покрытий.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов – публикация статей, макеты оптоэлектронных устройств.

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.



#### **4.1.11 Физико-технологические основы создания модуляторов лазерного излучения по схеме Маха-Цендера на базе эпитаксиальных АЗВ5-гетероструктур**

Заявитель проведения научных исследований и оказание услуг Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

Руководитель проекта Байдусь Н. В.

Работы, выполняемые ЦКП «Импульс»: изготовление комплекта фотошаблонов, измерение СВЧ параметров.

Направление из Стратегии НТР РФ – Н1.

Предполагаемое использование научных результатов

Планируемые сроки выполнения работ: 2021 – 2024 гг.

Предполагаемая продолжительность работ на оборудовании: 1000 часов/год.

#### **4.2 Расширение круга пользователей услугами «ЦКП «Импульс»**

В 2020 году расширение круга организаций-пользователей научным оборудованием ЦКП проходило в достаточно некомфортных условиях по причине пандемии. Однако наработки предшествующих лет и текущая работа в 2020 году позволили привлечь в качестве внешних пользователей услуг ЦКП «Импульс» 29 организаций (таблица 4.1). Этому предшествовала работа по изучению спроса, проведение рекламных мероприятий через сайт ТУСУ-Ра с использованием рассылок, большого числа личных встреч с посещениями предприятий и на территории ЦКП «Импульс». Последнее оказалось наиболее эффективным. Выполнение услуг ЦКП имело большое значение для формирования проектов по 218 постановлению правительства с индустриальными партнерами АО «НПФ «Микран», АО ИСС им. М.Ф. Решетнева. Так в основу проекта с АО «НПФ «Микран» взяты научно-исследовательские результаты по разработке и проектированию комплекта микросхем СВЧ, представленные в отчете по этапу 1 настоящего проекта. Развитие исследований ЦКП по направлению «Нелинейная рефлектометрия» стало основой проекта «Развитие методов рефлектометрии в пространстве нелинейных параметров пассивных и активных систем и создание опытных отечественных нелинейных рефлектометров для решения задач исследования материалов, элементов и систем в области экспериментальной физики, радиофизики и 5G-6G», направленного в РНФ (руководитель Малютин Н.Д.).

Таблица 4.1 – Перечень организаций – внешних пользователей услугами ЦКП «Импульс»

№ п/п	№ договора	Заказчик	Период выполнения работ	Характер услуг, выполнявшихся в ЦКП (ТЗ)	Результат выполнения услуги	Используемое оборудование ЦКП	Ответственный исполнитель от ЦКП	Контактное лицо заказчика
1	14/20	Общество с ограниченной ответственностью "НПЦ "Комплексные инженерные решения"	09.06.2020-10.08.2020	Изготовление коронок по представленным моделям заказчика: расчетная масса изделия 800 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм пластика.	Коронки по представленным моделям заказчика	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer XL	Бомбизов Александр Александрович, Караульных Сергей Павлович	Бузина Наталья Владимировна
2	15/20	Общество с ограниченной ответственностью "Системы. Технологии. Коммуникации"	10.06.2020-26.08.2020	Изготовление макета взрывозащищенного кожуха, количество изделий 1 шт., расчетная масса изделий 1250 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм пластика.	Макет взрывозащищенного кожуха	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer XL	Бомбизов Александр Александрович, Караульных Сергей Павлович	Савин Андрей Дмитриевич
3	16/20	Общество с ограниченной ответственностью "БТЕ-СФО"	09.07.2020-17.08.2020	Печать заглушек кабель-канала по представленной модели заказчика, количество изделий 50 штук, расчетная масса изделий 825 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм	Заглушки кабель-канала по представленной модели заказчика	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer XL	Бомбизов Александр Александрович, Салиев Солижон	Строганова Ксения Петровна

Продолжение Таблицы 4.1

4	17/20	Общество с ограниченной ответственностью "Картомат-технологии"	15.06.2020-14.08.2020	Изготовление секций для хранения пластиковых карт по представленным моделям заказчика, расчетная масса изделий 1200 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм	Секции для хранения пластиковых карт по представленным моделям заказчика	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer XL	Бомбизов Александр Александрович, Салиев Солижон	Александров Иван
5	18/20	Общество с ограниченной ответственностью "ПНК "Биосенсорика"	26.06.2020-24.08.2020	Печать корпусов по представленной модели заказчика, количество изделий 20 штук, расчетная масса изделий 850 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм	Напечатанные корпуса по представленной модели заказчика	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer X	Бомбизов Александр Александрович, Салиев Солижон	Кобзев Вячеслав Михайлович
6	19/20	Общество с ограниченной ответственностью "Прототип"	23.06.2020-19.08.2020	Печать изделий по представленным макетам заказчика, расчетная масса изделий 800 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм	Напечатанные изделия по представленным моделям заказчика	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer X	Бомбизов Александр Александрович, Салиев Солижон	Хаматнуров Дмитрий Борисович

Продолжение Таблицы 4.1

7	20/20	Индивидуальный предприниматель Джумабеков Эркин Куванычбекович	10.07.2020-26.08.2020	Печать изделий по представленным моделям заказчика, расчетная масса изделий 700 грамм, печать 3D-изделий по нормативу 10 рублей без учета НДС за грамм	Напечатанные изделия по представленным моделям заказчика	3D-принтер Picaso Designer X-Pro, 3D-принтер Picaso Designer X	Бомбизов Александр Александрович, Салиев Солижон	Джумабеков Эркин Куванычбекович
8	21/20	Общество с ограниченной ответственностью НПК "Аддитив"	17.07.2020-19.08.2020	Измельчение материалов заказчика до получения порошка с размером частиц не более 100 мкм., просеивание порошка для отделения фракций размером не более 50 мкм., 10 мкм., 5 мкм., измерение размеров частиц порошка, перемешивание и гомогенизация пасты с использованием связующего компонента на основе терпиниола. Минимальный объем пасты по окончании работы – 120 мл. Изготовление пасты по нормативу 2400 рублей без учета НДС за 30 грамм пластика.	Изготовлены функциональные порошки и пасты, использую материалы заказчика	Планетарная шаровая мельница "Pulverisette 7" Premiom Line; Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec; Вибрационный грохот ANALYSETTE 3 PRO	Бомбизов Александр Александрович	Артищев Сергей Александрович

Продолжение Таблицы 4.1

9	22/20	Общество с ограниченной ответственностью "Полупроводниковые материалы"	15.07.2020-31.08.2020	Проведение измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полупроводникового материала на частотах 1.1 ГГц и 2.5 ГГц	Услуги по измерению относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полупроводникового материала на частотах 1.1 ГГц и 2.5 ГГц	Резонаторы диэлектрические центральной частоты 1.1 ГГц и 2,5 ГГц; Векторный анализатор цепей PNA-X N5247 A	Коколов Андрей Александрович Помазанов Алексей Владимирович	Хохлов Денис Олегович
10	23/20	Общество с ограниченной ответственностью "Научные приборы и системы"	15.07.2020-31.08.2020	Проведение измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для листовых СВЧ ламинатов на частотах 2.5 ГГц и 5.1 ГГц	Услуги по измерению относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для листовых СВЧ ламинатов на частотах 2.5 ГГц и 5.1 ГГц	Резонаторы диэлектрические центральной частоты 2,5 ГГц и 2,5 ГГц; Векторный анализатор цепей PNA-X N5247 A	Шеерман Федор Иванович Шутов Евгений Александрович	Федоров Павел Леонидович

Продолжение Таблицы 4.1

11	24/20	Общество с ограниченной ответственностью "СПИНОР"	09.06.2020-15.09.2020	Прорисовка 3-х масок на фотошаблонных заготовках ПМС-ФП 102x102x2,4 (маскирующий слой из хрома) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм	Работы по прорисовке масок для контактной фотолитографии с использованием материалов заказчика	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа, 4 позиции оборудования; установка отмывки пластин OPTwet SB30; Установка нанесения фоторезистов OPTIspin SB20; Установка допроявления фоторезиста YES-G500; Технологическая линия фотолитографии; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Ника Дарья Александровна
12	25/20	Индивидуальный предприниматель Обмачевский Александр Викторович	09.06.2020-15.09.2020	Услуга по контролю резьбовых соединений манометров с помощью оптического микроскопа	Услуга по контролю резьбовых соединений манометров с помощью оптического микроскопа	Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Обмачевский Александр Викторович
13	26/20	Общество с ограниченной ответственностью» Лаборатория 23»	09.06.2020-15.09.2020	Работы по контролю среза тонкопленочных покрытий с помощью оптического и электронного микроскопа	Работы по контролю среза тонкопленочных покрытий с помощью оптического и электронного микроскопа	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Юрьев Юрий Николаевич

Продолжение Таблицы 4.1

14	27/20	Общество с ограниченной ответственностью «Плазменные технологии»	09.06.2020-15.09.2020	Работы по визуальному контролю дефектности тонкопленочных магнетронных покрытий с помощью оптического и электронного микроскопа	Результаты по визуальному контролю дефектности тонкопленочных магнетронных покрытий с помощью оптического и электронного микроскопа	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Юрьев Юрий Николаевич
15	28/20	Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственная компания «ЛучЭнергоПром»	10.06.2020-15.09.2020	Работы по контролю вольфрамовых катодов для электронной пушки с помощью оптического и электронного микроскопа	Работы по контролю вольфрамовых катодов для электронной пушки с помощью оптического и электронного микроскопа	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Миков Алексей Викторович
16	29/20	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)	12.06.2020 - 15.09.2020	Работы по контролю дефектности поверхности зеркал для лидаров с помощью оптического, электронного микроскопа и профилометра	Результаты контроля дефектности поверхности зеркал для лидаров с помощью оптического, электронного микроскопа и профилометра	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; Микроскоп INM 100UV, Оптический профилометр Profilm3D.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Разенков Игорь Александрович

Продолжение Таблицы 4.1

17	30/20	Акционерное общество "Научно-внедренческое предприятие "Топаз"	15.06.2020-15.09.2020	Работа по прорисовке маски на фотошаблонных заготовках (материал Заказчика) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм	Маски на фотошаблонных заготовках (материал Заказчика) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа, 4 позиции оборудования; установка отмытки пластин OPTwet SB30; Установка нанесения фоторезистов OPTIspin SB20; Установка допроявления фоторезиста YES-G500; Технологическая линия фотолитографии; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Левицкий Михаил Ефимович
18	31/20	Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственная компания "ТЕ-САРТ"	10.07.2020-31.08.2020	Измерение АЧХ коэффициента отражения антенных устройств в диапазоне частот до 67 ГГц, расчет КСВ.	Результаты по измерению параметров антенных устройств	Векторный анализатор цепей PNA-X N5247 A	Шеерман Федор Иванович Шутов Евгений Александрович	Сёмкин Артем Олегович



Продолжение Таблицы 4.1

19	32/20	Общество с ограниченной ответственностью "ТУСУР-электроника"	15.07.2020-31.08.2020	Проведение измерений коэффициента отражения приемника по выходу в коаксиальном тракте в диапазоне до 40 ГГц. Измерение спектра и мощности СВЧ сигнала на коаксиальном выходе приемника при поданном оптическом сигнале при частоте модулирующего сигнала до 20 ГГц. Косвенный расчет и моделирование коэффициента оптического преобразования в указанном диапазоне СВЧ сигнала.	Результаты измерения параметров радиофотонного интегрального приемника в коаксиальном тракте, включая согласование по выходу, коэффициент оптического преобразования	Векторный анализатор цепей PNA-X N5247 A; Анализатор спектра N9030A Agilent Technologies	Коколов Андрей Александрович Помазанов Алексей Владимирович	Бабак Леонид Игоревич
----	-------	--	-----------------------	---	--	--	--	-----------------------

Продолжение Таблицы 4.1

20	33/20	Общество с ограниченной ответственностью "НПК ТА-ИР"	11.06.2020-29.12.2020	Измерение комплексных коэффициентов передачи и отражения элементов калибровочных и верификационных элементов на подложках с использованием зондовой установки в диапазоне частот до 40 ГГц; Измерение комплексных коэффициентов передачи и отражения пассивных и активных СВЧ устройств на базе широкополосного векторного анализа цепей.	Результаты измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения элементов калибровочных и верификационных элементов на подложках с использованием зондовой установки в диапазоне частот до 40 ГГц. Результаты измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения пассивных и активных СВЧ устройств на базе широкополосного векторного анализа цепей.	Стенд измерения мощностных характеристик на базе зондовой станции Cascade Microtech Summit 11K и СВЧ тюнеров; Векторный анализатор цепей ZVA40; Генератор СВЧ сигналов Rohde&Schwarz; Анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров.	Шеерман Федор Иванович. Коколов Андрей Александрович	Попкович Анатолий Антонович
----	-------	--	-----------------------	---	---	---	--	-----------------------------

Продолжение Таблицы 4.1

21	34/20	Общество с ограниченной ответственностью "Инвестиционная строительная компания" ООО "ИСК"	10.06.2020-15.09.2020	Работа по прорисовке маски на фотошаблонных заготовках (материал Заказчика) с минимальным размером элементов топологии 1 мкм	Маски на фотошаблонных заготовках (материал Заказчика) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; установка отмывки пластин OPTwet SB30; Установка нанесения фоторезистов OPTIspin SB20; Установка допроявления фоторезиста YES-G500; Технологическая линия фотолитографии; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Дробышев Сергей Васильевич
22	35/20	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет"	1 этап: 14.09.2020 – 15.09.2020 2 этап: 14.09.2020 – 10.10.2020 3 этап: 14.09.2020 – 20.12.2020	Работа по осаждению металлических покрытий Ti, Ta, W, Mo на алмаз из недорогих металлов с отжигом контактного слоя, Осаждение однослойных металлических покрытий на алмаз из недорогих металлов Al, Ti, W, Mo; Термическая обработка (отжиг) алмазных образцов на установке быстрого термического отжига Raith 150 Two	Работа по осаждению металлических покрытий Ti, Ta, W, Mo на алмаз из недорогих металлов с отжигом контактного слоя, Осаждение однослойных металлических покрытий на алмаз из недорогих металлов Al, Ti, W, Mo; Термическая обработка (отжиг) алмазных образцов на установке быстрого термического отжига Raith 150 Two	Полуавтоматическая установка ультразвуковой микросварки ТРТ НВ-05; Установка быстрого термического отжига STE RTA150, Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа Марка: Raith 150 Two	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович	Ивонин И.В.

Продолжение Таблицы 4.1

23	36/20	Общество с ограниченной ответственностью "Электронные источники"	09.06.2020-15.09.2020	Оценка профиля образцов заказчика: определяется зависимость высоты профиля от координаты и пространственная визуализация профиля на пяти участках одного образца заказчика.	Результаты оценки профиля образцов заказчика	УНУ "Установка плоттерной печати чернилами с широким диапазоном вязкости (2D-плоттер); Оптический профилометр Profilm3D	Шкарупо Анастасия Петровна.	Бурдовицин Виктор Алексеевич
24	37/20	Общество с ограниченной ответственностью "Икстроник"	09.06.2020-15.09.2020	Оценка профиля образцов заказчика: определяется зависимость высоты профиля от координаты и пространственная визуализация профиля на пяти участках трех образцов заказчика.	Результаты оценки профиля образцов заказчика	Платформа УНУ, в которой реализуется ультразвуковое дозирование чернил при печати на подложку, включая профилометр Profilm3D	Иванов Андрей Николаевич	Шкарупо Семен Петрович
25	38/20	Индивидуальный предприниматель Цырретаров Ринчин Баирович	16.06.2020-25.09.2020	Работы по химической обработке деталей	Химическая обработка деталей	Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Цырретаров Ринчин Баирович

Продолжение Таблицы 4.1

26	39/20	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет"	08.09.2020-21.09.2020	Требуется изготовить 12 масок из фотошаблонных заготовок ПМС-ФП 102x102x2,4 (маскирующий слой из окиси железа) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм	Маски из фотошаблонных заготовок ПМС-ФП 102x102A	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; установка отмывки пластин OPTwet SB30; Установка нанесения фоторезистов OPTIspin SB20; Установка допроявления фоторезиста YES-G500; Технологическая линия фотолитографии; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович	Толбанов О.П.
27	41/19	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет"	18.12.2019-12.03.2020	Требуется изготовить 12 масок из фотошаблонных заготовок ПМС-ФП 102x102x2,4 (маскирующий слой из окиси железа) с минимальным размером элементов топологии: 1 мкм	Маски из фотошаблонных заготовок ПМС-ФП 102x102x2.4	Электронный микроскоп Zeiss Supra 55 с функцией электронного литографа; установка отмывки пластин OPTwet SB30; Установка нанесения фоторезистов OPTIspin SB20; Установка допроявления фоторезиста YES-G500; Технологическая линия фотолитографии; Микроскоп INM 100UV.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович	Зарубин А.Н.

Продолжение Таблицы 4.1

28	46/19	Акционерное общество «Научно-производственная фирма "Микран"»	30.12.2019-31.08.2020	Изготовление макетов микросхем СВЧ: переключателей, удвоителей частоты, смесителей. Изготовление сверхширокополосных делителей до 67 ГГц. Измерение частотных зависимостей параметров СВЧ, импульсные измерения.	Макеты микросхем СВЧ: переключателей, удвоителей частоты, смесителей. Интегральные сверхширокополосные делители до 67 ГГц. Результаты измерения частотных зависимостей параметров СВЧ, импульсные измерения.	Стенд измерения мощностных характеристик на базе зондовой станции Cascade Microtech Summit 11K и СВЧ тюнеров; Технологическая линия фотолитографии; Установка допроявления фоторезиста YES-G500; Установка нанесения фоторезистов OPTispin SB20; Установка отмывки пластин OPTwet SB30; Векторный анализатор цепей N9952A; Микроскоп INM 100 UV; Полуавтоматическая установка ультразвуковой микросварки TPT HB-05; Установка быстрого термического отжига STE RTA150, SemiTEq; Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 Nano Tec FRITSCH); Анализатор цепей Keysight Technologies №5247B с комплектом аксессуаров.	Шестериков Евгений Викторович, Кулинич Иван Владимирович, Казимиров Артем Игоревич	Дроботун Н.Б.
----	-------	---	-----------------------	--	--	---	--	---------------

Продолжение Таблицы 4.1

29	7/20	ОАО «Манотомь»	20.03.2020 – 31.08.2020	Информационно-измерительная и управляющая система для технологических процессов современного производства на примере типа «городской водоканал – автоматизация контроля состояния водозаборных скважин и технологического оборудования, бассейнов воды, технических бассейнов систем канализации и очистных сооружений с использованием беспроводных принципов передачи информации»	Информационно-измерительная и управляющая система для технологических процессов современного производства на примере типа «городской водоканал – автоматизация контроля состояния водозаборных скважин и технологического оборудования, бассейнов воды, технических бассейнов систем канализации и очистных сооружений с использованием беспроводных принципов передачи информации»	Кластер FDM, SLA и композитной 3D печати с набором расходных материалов. Стенд измерения векторных характеристик цепей в импульсном режиме на базе Обзор 103, Caban 140, S5048, P4-I-01. Марка: Caban 140, S5048, P4-I-01	Бомбизов Александр Александрович, Караульных Сергей Павлович	Веснер Сергей Михайлович
----	------	----------------	-------------------------	---	---	---	--	--------------------------

Продолжение Таблицы 4.1

30	44/20	АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»	18.12.2019-29.06.2020	Исследование вариантов построения и моделирование интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрактов Ку-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN	Проведено исследование вариантов построения интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрактов Ку-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN	Анализатор цепей с комплектом аксессуаров Марка: Keysight Technologies N5247B	Бабак Леонид Иванович	Шеерман Федор Иванович
31	45/20	Общество с ограниченной ответственностью "Компьютерный центр "Башня"	01.09.2020-09.10.2020	Измерение параметров серверных сетевых плат: джиттер и коэффициент ошибок BER, пропускная способность в максимальных режимах.	Услуги по измерению параметров серверных сетевых плат	Осциллограф Keysight Technologies UXR0134A	Шеерман Федор Иванович, Шутов Евгений Александрович	Сидоренко Александр Александрович



### 4.3 Разработка специализированного программного обеспечения

Развитие СВЧ микроэлектроники, наиболее важного для ЦКП «Импульс» направления исследований и практических работ, это достаточно динамичный процесс с ответвлением тематик исследований по мере накопления знаний и выполнения успешных проектов. Один из таких проектов, ключевые публикации по которым состоялись в 2015-2017 годах – автоматизация проектирования монолитных интегральных схем и их элементов [74-76]. К 2018 году были под руководством д.т.н. Бабака Л.И. было разработано программное обеспечение и защищены кандидатские диссертации по следующим темам:

Автоматизация измерений, построение моделей и библиотек элементов СВЧ монолитных интегральных схем на базе отечественных GaAs и GaN технологий [74];

Автоматизированный структурно-параметрический синтез малошумящих СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма [75];

Автоматизированное построение моделей пассивных компонентов и их применение при структурно-параметрическом синтезе малошумящих СВЧ транзисторных усилителей [76].

В основе указанных работ лежат экспериментальные результаты, полученные на оборудовании ЦКП «Импульс». Востребованность ПО и перспектива разработки САПР привели к выделению из состава лаборатории интеллектуальных компьютерных систем группы программистов и разработчиков, объединившихся в ООО «50 Ом Технолоджи». Группа разрабатывает программные малосигнальные модели транзисторов для применения в процессе проектирования МИС и устройств СВЧ. Малосигнальные модели транзисторов позволяют сравнить возможности разных производителей, являются этапом построения большесигнальных и шумовых моделей. Построение моделей «вручную» может стать трудоемким процессом, поскольку имеются множество подходов и тонкостей экстракции параметров. Даже если удалось построить требуемую модель, задача экстракции параметров для большого числа транзисторов и дальнейшего импорта их в САПР может занять значительное время. Поэтому «50 Ом Технолоджи» разрабатывает плагин Smart HEMT Modeling для решения этой проблемы. ПО одновременно строит модели рHEMT транзисторов в разных рабочих точках по измеренным S-параметрам, экспортирует построенные модели в виде схемы и набора выражений в AWR Design Environment и автоматически создаёт графики и наборы целевых функций внутри САПР для визуальной оценки точности модели и возможной оптимизации средствами AWR Design Environment. В настоящее время сотрудничество ЦКП с ООО «50 Ом Технолоджи» по договоренности между руководителем ЦКП и ведущими сотрудниками компании налажено по обмену информацией и представлению необходимого времени для измерений на СВЧ. Сотрудники компании, ранее работавшие в секторе измерений на СВЧ,

обладают необходимыми компетенциями. Являясь одновременно преподавателями ТУСУР, они для ЦКП на начальной стадии становления бизнеса являются внутренними потребителями с ограниченным временем измерений в соответствии с ТЗ на проект РФФ.

#### **4.4 Разработка средств измерений по направлению «Нелинейная рефлектометрия»**

Следует отметить еще одно ветвление в направлении исследований ЦКП «Импульс» – развитие нелинейной рефлектометрии. Это направление было основано д.т.н. Семеновым Э.В., поддержано в ЦКП на раннем этапе его становления и продолжает развиваться в тесном взаимодействии с АО НИИ Полупроводниковых приборов (НИИПП) усилиями небольшого совместного коллектива. Подготовлен проект развития приборного оснащения, востребованного в АО НИИПП. По результатам реализации проекта планируется разработать новые измерительные приборы, которые позволят адекватно измерять характеристики нелинейных цепей в режиме видеоимпульсного воздействия. Кроме того, в качестве коммерциализуемого продукта могут быть предложены новые нелинейно-инерционные модели приборов, оформленные в виде библиотечных элементов для систем автоматизированного проектирования.

Для разработки поведенческих моделей видеоимпульсных цепей потребуется адекватно измеренное семейство переходных характеристик таких цепей. Имеется значительный опыт измерения переходных и вольт - амперных характеристик цепей с использованием импульсов наносекундной и пикосекундной длительности [76 -83]. В последнее время такие измерения проводились в интересах АО «НИИПП». Разработан метод совместного измерения вольт - амперных и вольт - фарадных характеристик посредством единственного видеоимпульса. В рамках этого метода разработаны соответствующие измерительные установки и программное обеспечение для них. Данный метод и средства измерения опробованы на примере коррекции характеристик биполярных транзисторов, для измерения прямой ветви вольт-фарадных характеристик варикапов, характеризации конденсаторов в импульсном режиме.

Первые слайды презентации пленарного доклада Семенова Э.В. приведены на рисунке 4.1.

Проведенные исследования легли в основу проекта по теме «Развитие методов рефлектометрии в пространстве нелинейных параметров пассивных и активных систем и создание серийных отечественных нелинейных рефлектометров для решения задач исследования материалов, элементов и систем в области экспериментальной физики, радиофизики и 5G-6G телекоммуникаций».

# Видеоимпульсные нелинейные измерения и моделирование: возможности и приложения

Пленарный доклад на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2019)

Семенов Эдуард Валерьевич  
д.т.н., проф. каф. РСС ТУСУР  
ст.н.с. лаб. 42 АО «НИИПП»  
edwardsemyonov@narod.ru

Измерения выполнены на оборудовании  
ЦКП "Импульс" ТУСУР

## Введение

- Наибольшие сложности (но и возможности) возникают при измерении, анализе и моделировании нелинейно-инерционных объектов при видеоимпульсном воздействии.
- В настоящем докладе рассматривается
  - Эффективное для синтеза нелинейных моделей определение нелинейно-инерционной системы.
  - Нелинейно-инерционные модели типа «черный ящик» для видеоимпульсных воздействий.
  - Неквазистатические модели объектов (учитывающие внутреннюю инерционность их емкостей).
  - Методы селекции нелинейных искажений сигналов со сплошным спектром.
  - Экспериментальные результаты в области нелинейной видеоимпульсной локации.
  - Экспериментальные результаты по термонелинейной видеоимпульсной рефлектометрии электрических контактов.
  - Нелинейная характеристика диэлектриков при видеоимпульсном воздействии.
  - Импульсные измерения характеристик полупроводниковых приборов с учетом термодинамических процессов.

## Определение нелинейной системы при наличии инерции

- Для непрерывных сигналов: несоответствие принципу суперпозиции. Критерий косвенный и не функционален при синтезе моделей.

$$F[x_1(t) + x_2(t)] = F[x_1(t)] + F[x_2(t)]$$

линейная система

$$u(t) = h(t) * x(t)$$

нелинейная система

?

- Для дискретных финитных сигналов: несоответствие матричному уравнению:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x},$$

- в котором вектора  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{x}$  понимаются не как многомерные объекты, а как совокупность отсчетов входного  $\mathbf{x}$  и выходного  $\mathbf{u}$  сигналов во времени.
- В радиотехнике под матрицей  $\mathbf{A}$  обычно понимают циркулянтную матрицу (каждая следующая строка представляет собой сдвиг предыдущей).

3

Рисунок 4.1 – Презентация пленарного доклада Семенова Э.В.

Проведена полезная работа по вовлечению в орбиту интереса взаимодействия исполнителей проектов Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, количество которых составляет несколько десятков. Однако это оказалось возможным только для тех, кто уже организовал малые предприятия, т.к. другие начинающие инноваторы не имели статус юридического лица. Сохраняется перспектива перехода исполнителей начальных проектов в следующую их стадию развития, поэтому обращение к возможностям ЦКП со стороны участников этого движения произойдет по мере «взросления».

Рассматривался еще один резерв повышения эффективности использования оборудования, связанный с выполнением проектов РФФИ и РФФИ. Исполнители действующих проектов имеют небольшие объемы финансирования в основном в виде фонда оплаты труда. Как оказалось, в процессе изучения запросов исполнителей проектов РФФИ и РФФИ, экспериментальные исследования и технологические работы востребованы, но по причине недостатка средств они не закладываются в планы работ. В этом отношении работа по формированию проектов учеными университетов и РАН с участием объекта инфраструктуры при финансировании РФФИ – дальновидное действие, которое принесет оживление в экспериментальную физику, радиофизику и другие направления.

Весьма эффективным средством пропаганды услуг явились ссылки на применение оборудования ЦКП «Импульс» в докладах на конференциях, статьях, открытых лекциях и семинарах. Информация об этих мероприятиях приводится в настоящем отчете в разделах 1-10.

#### **Выводы к разделу 4**

Несмотря на трудности 2020 года, связанные с разрывами в экспериментальных исследованиях, измерениях, сотрудники ЦКП и коллеги многих других подразделений и разных организаций использовали возможности ЦКП «Импульс» для решения не только текущих задач, но и для формирования будущих проектов. Такой переход к аналитической работе оказался очень интересным с точки зрения анализа перспектив научного поиска с опорой на имеющиеся технологические и аппаратные возможности существующей инфраструктуры.

## **5. Проведение исследований по заказам внутренних и внешних пользователей услугами ЦКП**

В связи с возникшими ограничениями на присутствие сотрудников в лабораториях и других подразделениях ТУСУР, включая ЦКП, проведение экспериментальных исследований проводилось в начале 2020 г. и с начала сентября 2020 г. (по приказу ректора исключены месяцы с мая по август 2020 г.). В сложившейся ситуации руководителем ЦКП «Импульс» совместно с администрацией университета и рядом сотрудников был скорректирован план работ с марта 2020 г. Было решено исходя из графиков выполнения внутренних работ подразделений и возможностей привлечения внешних заказчиков переместить акценты деятельности ЦКП на проведение аналитических исследований и проектные работы, а также активизировать подготовку публикаций по тематике исследований ЦКП и заявок на РИД с использованием ранее полученных экспериментальных данных и, по возможности, дополнительно проведенных. При этом не были остановлены мероприятия по освоению нового оборудования, для чего активно использовались ресурсы ИТ инфраструктуры ТУСУРа, которая была фактически обновлена в 2017-2019 годах за счет внебюджетных средств, поступивших по договорам с индустриальным партнером АО «НПФ «Микран». Объем вложений в обновление серверного, коммутационного оборудования, ресурсов накопителей информации и рабочих мест составил более 30 млн. руб. В 2020 г. ТУСУР из внебюджетных средств закупил программное обеспечение для поддержки научных исследований и организации всех форм дистантной работы и обучения.

Коррекция плана коснулась работ Получателя субсидии за счет средств гранта и работ, выполненных за счет собственных средств из внебюджетных источников (договоров). В настоящем разделе в таблице 5.1 приведен перечень внутренних пользователей ЦКП, темы их работ, заказчики. Работы в интересах внешних пользователей из внебюджетных источников (см. таблицу 4.2) описаны в разделе 10.

### **5.1 Внутренние пользователи**

Обеспечение работ внутренних пользователей осуществлялось сотрудниками ЦКП «Импульс» из средств гранта. Сотрудникам лабораторий предоставлялся доступ к оборудованию ЦКП на условиях внутренних договоренностей. Такой порядок взаимодействия достаточно эффективен с точки зрения экономии времени и оформления отношений, поскольку сотрудники из одного университета. Заказчиками работ являются Минобрнауки РФ, Российский научный фонд (РНФ), Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), Сколковский институт науки и технологий. Источники финансирования – бюджет. Как правило, работа на измерительном оборудовании ЦКП велась совместно, а на технологическом

оборудовании только сотрудниками ЦКП. Это связано со сложностью технологического оснащения и необходимостью аттестации сотрудников. Список основных работ, проводимых в интересах внутренних пользователей, дан в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Внутренние пользователи услуг ЦКП «Импульс»

№ п/п	Лаборатория (подразделение)	Темы работ, часть которых выполнялась на оборудовании ЦКП или с участием его сотрудников	Работы, выполнявшиеся в ЦКП	Руководитель	Заказчик
1	Научно-исследовательская лаборатория "Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости" (НИЛ "ФИ-ЭМС") кафедры ТУ	Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости	Измерение параметров при импульсном воздействии	Д.т.н. Заболоцкий А.М.	Минобрнауки РФ
2	Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) кафедры ФЭ	Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки	Измерение параметров элементов радиофотоники на СВЧ	К.т.н. Ерофеев Е.В.	Минобрнауки РФ
3	Центр НТИ «Технологии беспроводной связи и Интернета вещей» (со Сколковским институтом науки и технологий)	1. Моделирование функциональности uRLLC сетей 5G на основе сетевого симулятора ns-3. 2. Разработка отладочных плат для передачи сверхузкополосных сигналов двоичной фазовой манипуляции малой мощности. 3. Имитационная модель передающего тракта базовой станции 5G. 4. Разработка программ дополнительного профессионального образования по направлению "Технологии беспроводной связи и интернета вещей".	Измерение параметров устройств в импульсном режиме.	К.т.н. Рогожников	АНООВО "Сколковский институт науки и технологий"
4	Лаборатория печатных технологий (ЛПТ) каф. КУДР	Исследование нелинейных свойств тонкопленочных проводников, изготовленных методом струйной печати с применением нанодисперсных электропроводящих чернил. Углеродные устройства СВЧ.	3D печать токопроводящих проводников, измерение параметров чернил и устройств	К.т.н. Бомбизов А.А.	РФФИ

Продолжение Таблицы 5.1

5	Лаборатория интеллектуальных компьютерных систем	Исследования и разработка цифрового дизайн-центра по проектированию микроэлектронных устройств для беспроводных систем связи.	Аналитический обзор, измерение параметров на СВЧ	К.т.н. Сальников А.С.	РНФ
6	НИИ Систем электрической связи	Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент	Аналитический обзор, измерение параметров на СВЧ и импульсном режиме, изготовление макетов	Д.т.н. Малютин Н.Д.	Минобрнауки РФ

### 5.1.1 Лаборатория Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости

Новая научно-исследовательская лаборатория, направленная на проведение комплекса фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС), образованная в 2020 году. Руководителем лаборатории назначен профессор кафедры телевидения и управления (ТУ) Александр Заболоцкий. Исследовательская программа согласована с Российской академией наук.

В программе работы лаборатории утверждены пять направлений.

1. Направление «Компоненты». Исследуются закономерности и механизмы электромагнитных и климатических взаимовлияний в электронных компонентах.
2. Направление «Биомедицина». Изучается совместное влияние нано - и пикосекундных электромагнитных импульсов на биологические объекты.
3. Решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Развитие новых численных алгоритмов решения СЛАУ с уменьшенными числительными затратами на многовариантный анализ и оптимизацию параметров радиоэлектронных средств.
4. Направление «Модели». Новые математические модели для анализа отклика радиоэлектронных средств на широкий ряд воздействий.
5. Направление «Помехозащита». Совершенствование обеспечения высокого качества электроэнергии с помощью исследования закономерностей влияния параметров на характеристики структур.

ЦКП «Импульс» представил услуги лаборатории ФИЭМС по TDR измерениям в нано-пикосекундном диапазоне и исследованию частотных характеристик в широком диапазоне частот.

Проведены исследования при следующих типах измерений:

– прототипов устройств для защиты силовой шины электропитания от сверхкороткого импульса;

– прототипов устройств для измерения элементов и узлов оптимальной сети высоковольтного электропитания при совместных климатических и электромагнитных воздействиях;

– прототипов устройств для измерения уровня излучаемой помехоэмиссии и уровня восприимчивости элементов и узлов оптимальной сети высоковольтного электропитания к излучаемому и кондуктивному воздействию.

Взаимодействие лаборатории ФИЭМС с ЦКП «Импульс» оформлено соглашением между руководителями, по результатам проведения исследований оформляются протоколами.

Использовалось оборудование ЦКП «Импульс»:

Цифровой стробоскопический осциллограф DSA830, полоса пропускания 70 ГГц, частота дискретизации;

Цифровой стробоскопический модуль 80E04, 50 Ом, полоса пропускания 20 ГГц;

Обостритель GZ1117DN-35/IV, 50 Ом,  $U > 25$ , длительность импульса  $< 37$  пс;

Генератор импульсов GZ1105DLP2, 50 Ом, время нарастания фронта не более 1 нс, частота повторения 10 кГц;

Аксессуары – аттенюатор 20 дБ, ответвитель, нагрузка 50 Ом.

Публикация – статья 2020 года:

Chernikova E.B. Evaluating the influence of the magnetic permeability of the microstrip modal filter substrate on its frequency characteristics / E.B. Chernikova, A.A. Kvasnikov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // Journal of physics: conference series [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1611/1/012032]. – 2020. – Vol. 1611(2020). – P. 1–4. DOI:10.1088/1742-6596/1611/1/012032. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85090797725&origin=resultslist>.

Выступления на конференциях:

1. Жечев Е.С. Experimental study of the buried vias effect on reflection symmetric modal filter performance. 21st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM, June 29 – July 3, 2020, Erlagol, Altai.

2. Хажибеков Р.Р. A device for an ultrashort pulse attenuation in common and differential modes in the high voltage power supply circuits of the spacecraft. 21st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM, June 29 – July 3, 2020, Erlagol, Altai.

Результаты интеллектуальной деятельности:



Патент РФ на изобретение. Заявка № 2020126543. Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах. Дата регистрации 10.08.2020.

### **5.1.2 Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники кафедры Физическая Электроника**

В 2020 году в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники на базе кафедры Физической электроники была создана специализированная молодежная лаборатория интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040).

Целью созданной молодежной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники являются теоретические и экспериментальные исследования новых схемотехнических, конструктивных и технологических решений, направленных на создание отечественных сверхширокополосных оптоэлектронных устройств на основе фотонных интегральных схем собственной разработки для перспективных волоконно-оптических систем передачи информации и систем радиофотоники.

Задачами функционирования лаборатории ЛИОР являются:

- проведение научно-исследовательских и экспериментальных работ по профилю лаборатории;
- оснащение технологическим, испытательным и контрольно-измерительным оборудованием;
- вовлечение в научно-исследовательскую деятельность сотрудников, аспирантов и студентов университета;
- подготовка научных публикаций и разработки технической документации.

На данный момент на базе лаборатории ЛИОР осуществляются следующие операции:

- монтаж кристаллов фотонных интегральных схем в корпуса;
- электрическое соединение выводов кристалла и корпуса интегральной схемы;
- проведение оптических и электрических измерений параметров фотонных интегральных схем в бескорпусном исполнении и в виде радиофотонных модулей.

Комплекс оборудования лаборатории ЛИОР, приобретенного в конце 2019 - начале 2020 года для выполнения перечисленных выше работ включает: станцию для работы с оптоволокном и изготовления сферических линз представлено на рисунках, стол для проведения оптических измерений, установку монтажа кристаллов НВ75, установку микросварки НВ16.

Выполнение измерений СВЧ-параметров элементов радиофотоники выполнялось на оборудовании ЦКП «Импульс» на двух уникальных платформах:

– векторный анализатор цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров. Измерение параметров СВЧ компонент, узлов в четырехпортовом режиме в диапазоне до 67 ГГц;

– осциллограф Keysight Technologies UXR0134A. Ранее недоступные измерения однократных быстрых процессов, в том числе для измерения амплитудных и фазовых шумов в диапазоне до 13 ГГц.

Решение задач ЛИОР по измерению параметров оптических трактов и устройств осуществляется на базе N5247B и UXR0134A применением электрооптических преобразователей и приемников в составе указанных приборов. Это позволяет существенно расширить возможности ЦКП «Импульс» при измерении устройств радиофотоники и сетей на основе оптоволоконной оптики. С целью подготовки кадрового состава по измерениям в области радиофотоники 12 ноября 2020 г. был проведен обучающий семинар «Перспективные измерительные платформы в области микроэлектроники, радиофотоники и систем телекоммуникации» фирмой Keysight Technologies.

Были выполнены технологические работы по исследованию плазмостойкости диэлектрических и металлических пленок и разработке процесса плазмохимического травления InP/InGaAsP гетероструктур.

#### **5.1.2.1 Исследование плазмостойкости диэлектрических и металлических пленок**

Проведение операций плазмохимического травления гетероструктур GaAs, GaN, InP на установке плазмохимического травления STE ICP200E SemiTEq потребовало провести исследование плазмостойкости диэлектрических и металлических пленок. Известно, что более высокой термостойкостью обладают диэлектрические и металлические маски. В качестве диэлектрической маски была выбрана пленка нитрида кремния, в качестве металлической – многослойная пленка Ti/Pt/Au с толщинами 50/25/400 нм, соответственно. Использование Ti/Pt/Au в качестве маски при плазмохимическом травлении было выбрано исходя из того, что данная металлизация образует омический контакт к высоколегированным полупроводниковым АЗВ5 группы слоям р-типа проводимости, и может позволить использовать техники самосовмещения при формировании интегральных волноводных *p-i-n*- диодов.

В экспериментах были использованы полуизолирующие подложки GaAs. Подложка с диэлектрической маской подготавливалась следующим образом. На поверхность подложки осаждалась пленка нитрида кремния толщиной 400 нм. Осаждение пленки нитрида кремния проводилось методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Формирование элементов топологии в диэлектрике выполнялось методом плазмохимического травления в ин-

дуктивно-связанной плазме по однослойной маске фоторезиста в SF6 плазме. Экспонирование пленки фоторезиста проводилось методом контактной литографии.

Формирование металлической маски на другой подложке выполнялось с использованием метода обратной литографии по двухслойной фоторезистивной маске. Экспонирование фоторезистов проводилось методом контактной литографии. Напыление металлизации Ti/Pt/Au (50/25/400 нм) выполнялось методом электронно-лучевого напыления.

После удаления фоторезистивных масок проводилось разделение пластин на образцы. Далее на образцах выполнялась операция плазмохимического травления в хлорсодержащей плазме в разных режимах. Травление выполнялось в газовой смеси Cl<sub>2</sub>/Ar с соотношением потоков 20/80 см<sup>3</sup>/мин. В режимах травления менялись величины мощностей индуктивного разряда ICP в диапазоне 500 – 1000 Вт и емкостной мощности RF в диапазоне 25 – 200 Вт, а также давление процесса p в диапазоне 5 – 15 мТорр. Время травления для всех образцов составляло 1 мин. После травления выполнялись оценка внешнего вида и измерение остаточной толщины масок.

Из полученных результатов видно, что с ростом ICP мощности скорость травления как металлической, так и диэлектрической масок замедлялась, что приводило к росту селективности процесса. При этом использование металлической маски обеспечивало более высокую селективность процесса.

На рисунках 1.5 и 1.6 показаны микроскопические изображения поперечного сечения образцов с металлической и диэлектрической масками, соответственно, после плазмохимического травления при разных значениях мощности индуктивного разряда. Обе маски после травления имеют ровные края, кроме того, диэлектрическая маска демонстрирует отсутствие видимого рельефа.

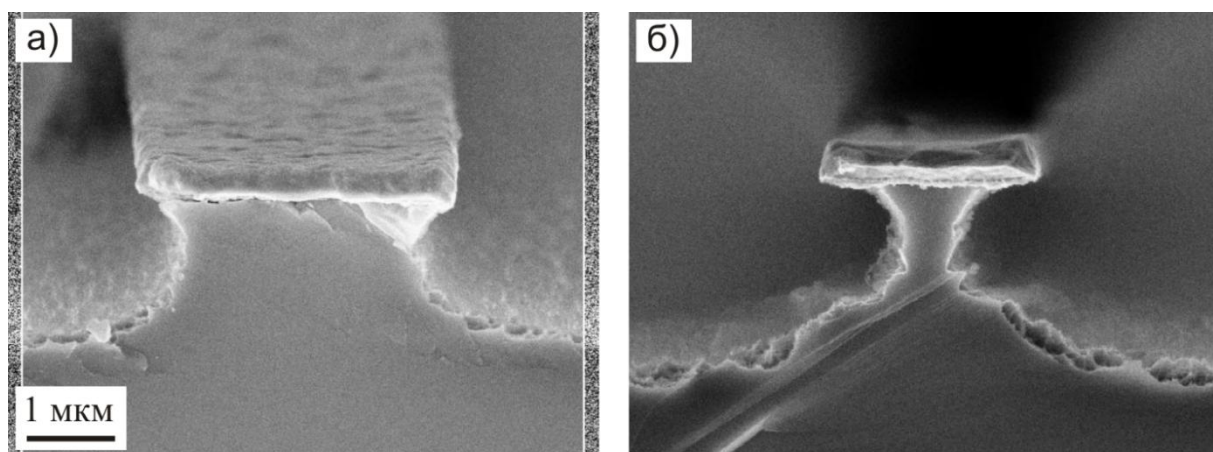


Рисунок 1.5 – Микроскопические изображения поперечного сечения образцов с металлической маской Ti/Pt/Au после плазмохимического травления в течение 1 мин при двух значениях мощности индуктивного разряда (а) 500 и (б) 1000 Вт

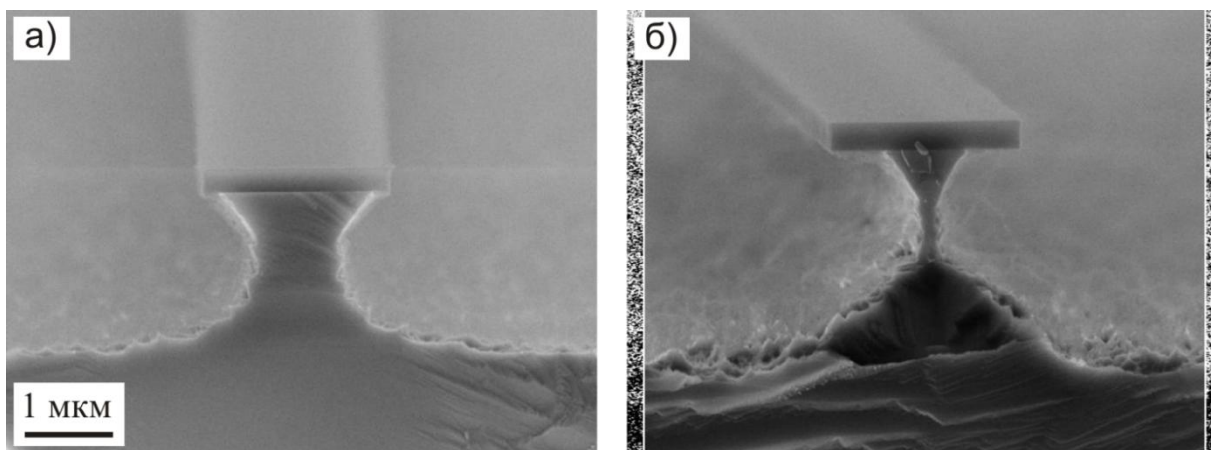


Рисунок 1.6 – Микроскопические изображения поперечного сечения образцов с диэлектрической маской  $\text{Si}_x\text{N}_y$  после плазмохимического травления в течение 1 мин при двух значениях мощности индуктивного разряда (а) 500 и (б) 1000 Вт

Из полученных результатов видно, что с ростом RF мощности скорость травления как металлической, так и диэлектрической масок монотонно увеличивалась. При этом селективность травления масок относительно GaAs снижалась, приходя к насыщению при RF мощностях 150 – 200 Вт. В этом случае металлическая маска также обеспечивала более высокую селективность процесса травления.

На рисунках 1.7 и 1.8 показаны микроскопические изображения поперечного сечения образцов с металлической и диэлектрической масками соответственно, после плазмохимического травления при разных значениях емкостной мощности разряда. Обе маски обеспечивают ровную границу травления.

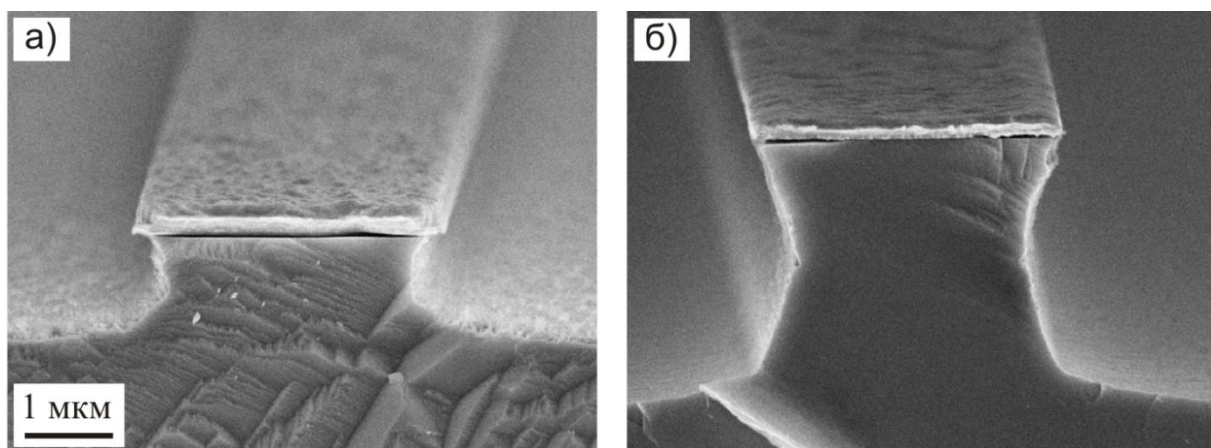


Рисунок 1.7 – Микроскопические изображения поперечного сечения образцов с металлической маской Ti/Pt/Au после плазмохимического травления в течение 1 мин при двух значениях емкостной мощности разряда (а) 25 и (б) 150 Вт

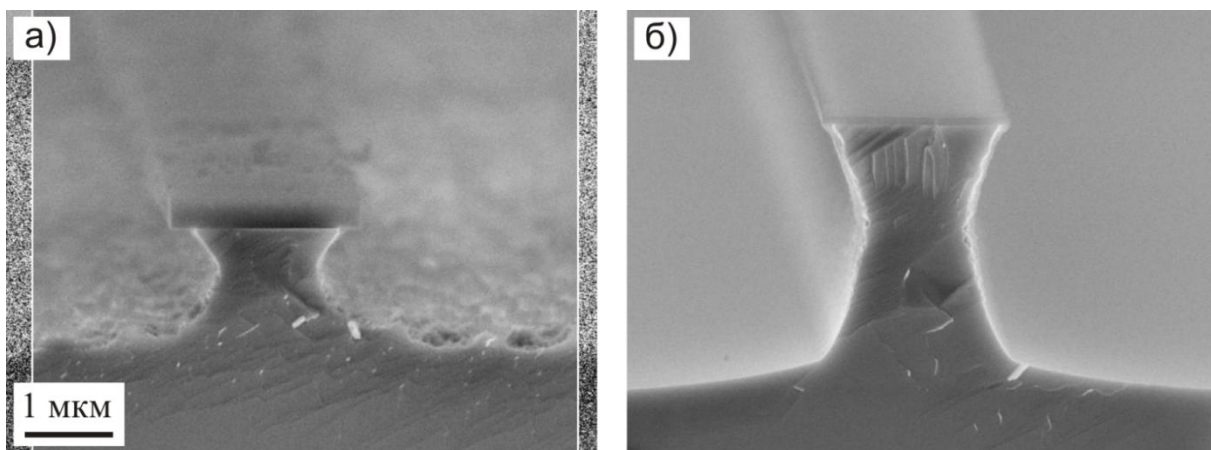


Рисунок 1.8 – Микроскопические изображения поперечного сечения образцов с диэлектрической маской  $\text{Si}_x\text{N}_y$  после плазмохимического травления в течение 1 мин при двух значениях емкостной мощности разряда (а) 25 и (б) 150 Вт

Из полученных результатов видно, что трехкратное увеличение давления процесса приводит к слабому росту скоростей травления как металлической, так и диэлектрической масок. При этом селективность процессов травления практически не меняется.

На рисунке 1.9 показаны микроскопические изображения поперечного сечения образцов с металлической маской, после плазмохимического травления при разных значениях давления в процессе травления.

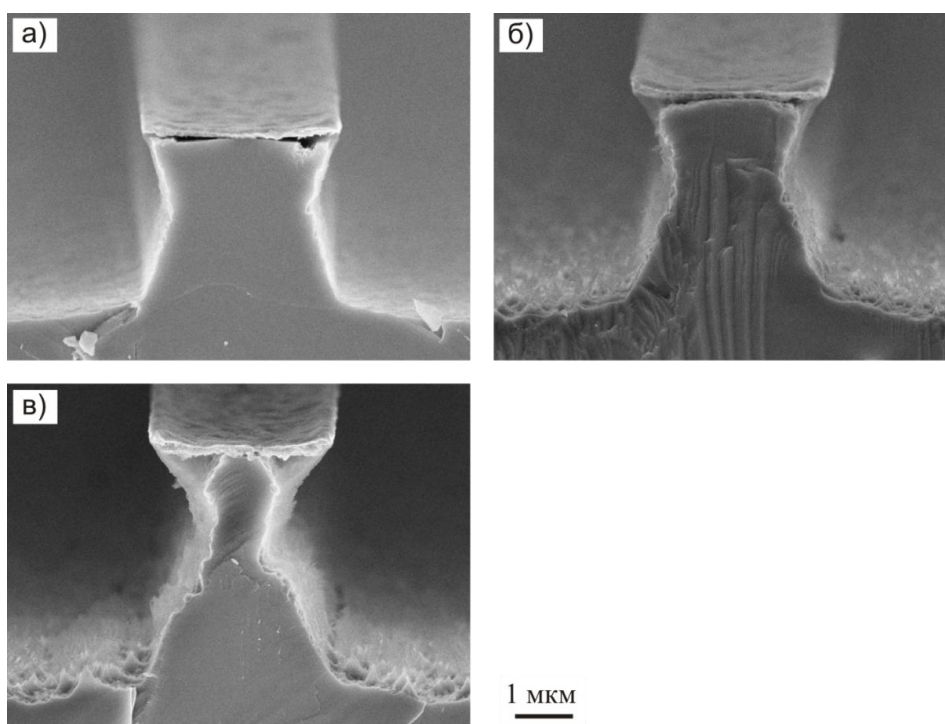


Рисунок 1.9 – Микроскопические изображения поперечного сечения образцов с металлической маской Ti/Pt/Au после плазмохимического травления в течение 1 мин при разных величинах давления в процессе плазмохимического травления (а) 5, (б) 10 и (в) 15 мТорр

Вид металлической маски не меняется от давления в процессе травления. В то же время изменяется характер травления GaAs подложки, увеличивается боковой подтрав и шероховатость поверхности GaAs. Внешний вид диэлектрической маски также не зависел от давления в процессе плазмохимического травления.

В результате проведения эксперимента было выявлено, что и металлическая Ti/Pt/Au и диэлектрическая  $\text{Si}_x\text{N}_y$  маски обладают высокой плазмостойкостью и могут быть использованы в качестве масок для плазмохимического травления InP.

### **5.1.2.2 Разработка процесса плазмохимического травления InP/InGaAsP гетероструктур**

В экспериментах были использованы полуизолирующие подложки InP на поверхности, которых была сформирована InP/InGaAsP *p-i-n* гетероструктура.

Для разработки процессов травления на установке ПХТ STE ICP200E по маске нитрида кремния на поверхности подложки формировалась маска нитрида кремния толщиной 300 нм. Осаждение пленки нитрида кремния проводилось методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Формирование элементов топологии в диэлектрике выполнялось методом плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме по однослойной маске фоторезиста. Экспонирование пленки фоторезиста проводилось методом контактной литографии.

После снятия фоторезиста пластины делились на образцы с площадью около 1 см<sup>2</sup>. Далее проводилось плазмохимическое травление образцов в индуктивно-связанной плазме с использованием газовой смеси Cl<sub>2</sub>/Ar/N<sub>2</sub> в различных режимах. В режимах травления менялись: состав газовой смеси, величина емкостной мощности (RF), давление процесса. Величина индуктивной мощности разряда (ICP) во всех режимах была зафиксирована на уровне 700 Вт. Поток Ar составлял 20 см<sup>3</sup>/мин.

После травления образцы раскалывались поперек сформированных элементов рельефа. Контроль образцов проводился с использованием метода сканирующей электронной микроскопии на установке Raith 150 Two. На образцах контролировались: профиль, глубина травления и толщина нарушенного слоя.

На рисунке 1.10 представлены микроскопические изображения профиля протравленных структур и зависимость скорости травления InP в плазме Cl<sub>2</sub>/Ar/N<sub>2</sub> от соотношения потоков азота и хлора, при фиксированных значениях емкостной мощности разряда 100 Вт и давлении процесса 5 мТорр.

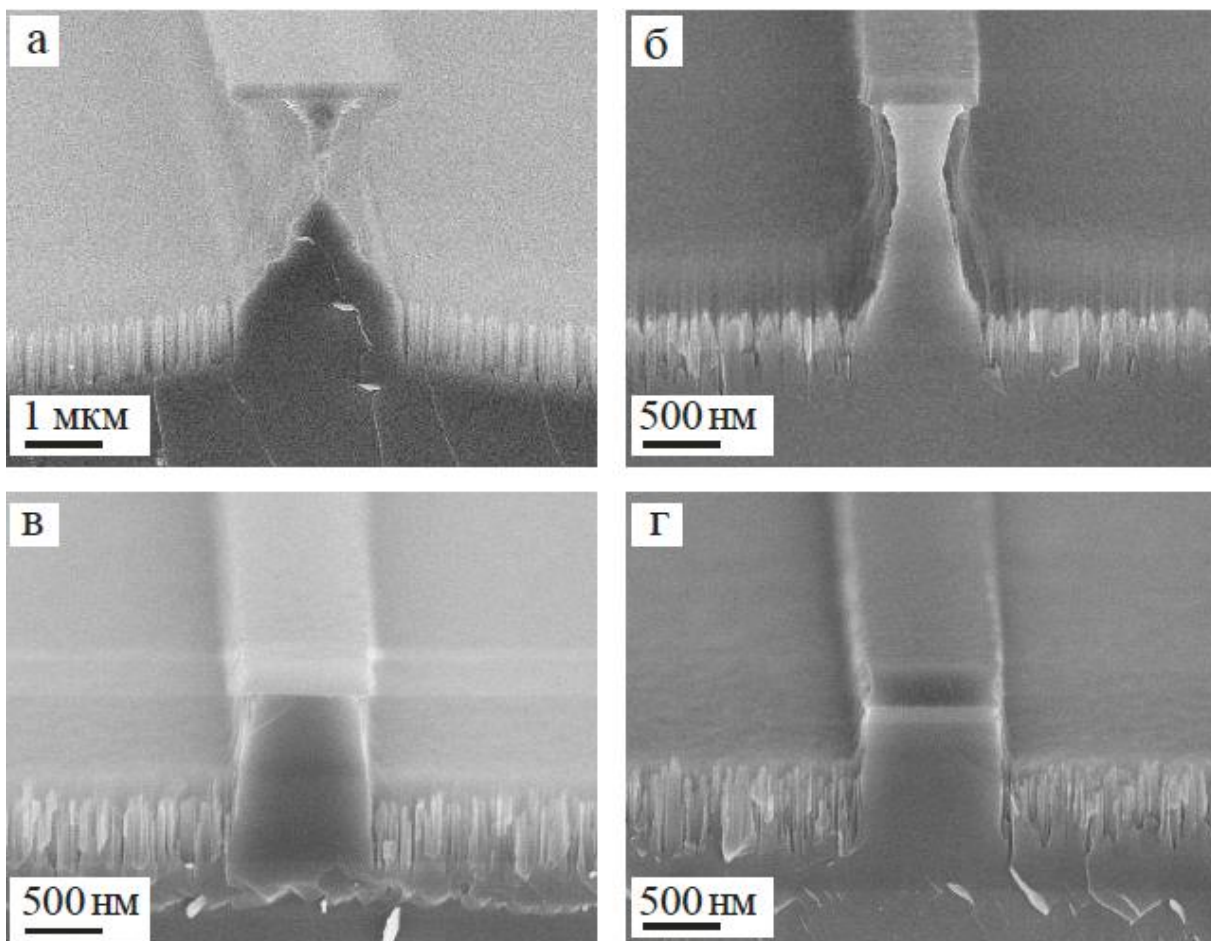


Рисунок 1.10 – Микроскопические изображения поперечного сечения травленых структур после травления в плазме  $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$  с разным соотношением потоков  $\text{N}_2/\text{Cl}_2$ : (а) 0/30, (б) 10/20, (в) 15/15 и (г) 20/10  $\text{cm}^3/\text{min}$ . При емкостной мощности разряда 100 Вт и давлении процесса 5 мТорр

Как видно из рисунка 1.10 а при травлении в плазме  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  наблюдается значительный боковой подтрав  $\text{InP}$ . Увеличение доли азота в составе газовой смеси приводило к монотонному уменьшению величины бокового подтрав и при равных потоках азота и хлора (рисунок 1.10, в) боковой подтрав практически отсутствовал.

Полученные результаты позволили провести оптимизацию режима травления. На рисунке 1.11 показано микроскопическое изображение поперечного сечения потравленной структуры после травления в плазме  $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$  с использованием оптимизированного режима.

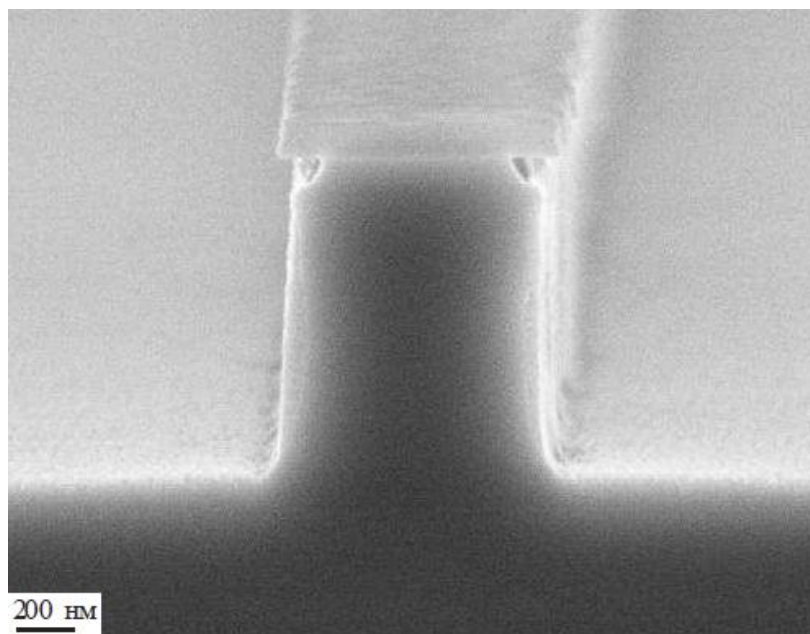


Рисунок 1.11 – Микроскопическое изображение поперечного сечения травленной структуры, при соотношении потоков  $N_2/Cl_2$  равном  $20/10 \text{ см}^3/\text{мин}$ , емкостной мощности разряда 100 Вт и давлении процесса 30 мТорр

Как видно из рисунка 1.11 разработанный процесс характеризуется высокой анизотропностью и гладкой морфологией поверхности InP после травления. Скорость травления InP составила 0,55 – 0,6 мкм/мин. При травлении InP/InGaAsP гетероструктур было обнаружено, что разработанный процесс является не селективным. Это позволяет выполнять в одном цикле травление как InP так и InGaAsP слоев гетероструктуры.

Таким образом, разработанный процесс может быть использован для формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением в оптических приборах на InP.

Сотрудники ЛИОР в 2020 г. опубликовали со ссылкой на использование оборудования ЦКП «Импульс» статьи (см. ПРИЛОЖЕНИЕ К Копии публикаций сотрудников лабораторий молодых ученых со ссылками на ЦКП «Импульс»):

1. Erofeev E., Arykov V., Stepanenko M., Kogai A., Kurikalov V. 28 GHz single-chip transmit RF front-end MMIC for multichannel 5G wireless communications // Symmetry. 2020. Vol. 12(7). P. 1167. [DOI 10.3390/sym12071167, <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088573570&origin=resultslist>] (см. ПРИЛОЖЕНИЕ П).

2. Sakharov Yu.V. Structure and properties of nanoporous oxide dielectrics modified by carbon // Materials Physics and Mechanics. 2020. Vol. 44. (1). P. 110-115 [DOI 10.18720/MPM.4412020\_13, <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85084261734&origin=resultslist>].

3. Жидик Ю.С., Троян П.Е., Козик В.В., Козюхин С.А., Заболотская А.В., Кузнецова С.А. Исследование электрофизических свойств пленок ИТО // Известия высших учебных за-



ведений. Физика. 2020. Т. 63. № 7 (751). С. 31-35. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43864603>).

Выступления на конференциях:

1. XXV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», 25 - 27 мая 2020 г., г. Томск, Исследование температурной стабильности барьерных контактов к арсениду галлия, очный доклад, Шалев А.Н., Минин О.Н., Жидик Ю.С. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43995134>)

2. Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем (МЭС)», 05 - 08 Октября 2020 г., г. Зеленоград, Структура и электрофизические свойства пористых диэлектриков, модифицированных углеродом, заочный доклад, Сахаров Ю.В. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44088980>).

### **5.1.3 Центр НТИ «Технологии беспроводной связи и Интернета вещей» (со Сколковским институтом науки и технологий)**

Руководитель Центра НТИ к.т.н. Рогожников Е.В. Сотрудничество с данным структурным подразделением было в рамках выполнения проектов «Имитационная модель передающего тракта базовой станции 5G», «Моделирование функциональности URLLC сетей 5G на основе сетевого симулятора NS-3», «Разработка программ дополнительного профессионального образования» по направлению "Технологии беспроводной связи и интернета вещей".

Направление работ Центра НТИ, соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»), направлению Н1 «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» и направлению Н6 «Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики».

Взаимодействие Центра НТИ и ЦКП «Импульс» осуществлялось при проведении аналитических исследований, измерений и при разработке образовательной программы.

Виды измерений, производимые по проекту «Разработка отладочных плат для передачи сверхузкополосных сигналов двоичной фазовой манипуляции малой мощности» (Проект

1) приведены в таблице 5.2, по проекту «Имитационная модель передающего тракта базовой станции 5G» (Проект 2) в таблице 5.3.

Таблица 5.2 – Виды измерений по Проекту 1

№	Тип используемого прибора	Виды измерений
1.	Анализатор сигналов	Измерение полосы передаваемого сигнала в диапазоне 100 Гц – 100 кГц. Измерение мощности передаваемого сигнала в диапазоне -20dBm – 0dBm Определение частоты несущей в диапазоне 864 МГц – 870 МГц
2.	Цифровой осциллограф	Определение формы сигнала во временной области. Определение амплитуды передаваемого сигнала в диапазоне 0.1 – 1 В. Считывание сигнала для дальнейшей обработки на ПК со скоростью от 5 GSa/s.

Таблица 5.3 – Виды измерений по Проекту 2

№	Тип используемого прибора	Виды измерений
1.	Векторный генератор сигналов	Формирование широкополосных тестовых сигналов с полосой 100 МГц и несущей частотой (3 - 5) ГГц.
2.	Анализатор спектра	Запись и измерение параметров широкополосного сигнала, прошедшего радиотракт.
3.	Векторный анализатор цепей	Измерение коэффициента передачи по мощности аналоговых устройств радиотракта в полосе 100 МГц
4.	Векторный анализатор цепей	Измерения S и X параметров цепей радиотракта в полосе 100 МГц.

Суть проведенных работ изложена в пп. 5.1.3.1–5.1.3.3.

#### 5.1.3.1 Имитационная модель передающего тракта базовой станции 5G

Выполнено моделирование аналогового радиотракта базовой станции сотовой связи пятого поколения в программной среде NI AWR Design Environment. Проведена валидация модели усилителя мощности в программной среде AWR на основе сравнения результатов измерений нелинейных параметров амплитудной характеристики СВЧ усилителя, полученных на макете усилителя с результатами полученных в ходе симуляции нелинейной модели усилителя. Представлены результаты измерения относительного вектора ошибки между входным и выходным сигналами в модели радиотракта.

Задача аналогового радиотракта обеспечить требуемый уровень мощности сигнала на передающей антенне. При этом искажения передаваемого сигнала и внеполосные излучения не должны превышать уровень допустимых значений, указанных в спецификации на базовую станцию.

Так согласно спецификации, выходная мощность передатчика базовой станции не должна превышать 24 дБм (0,25 Вт) для станции малого радиуса покрытия и 38 дБм (6,3 Вт) для станции среднего радиуса покрытия. Для станции большого радиуса покрытия ограничений на выходную мощность передатчика нет.

Уровень допустимых искажений передаваемого сигнала ограничен относительной величиной вектора ошибки EVM для всех используемых в системе модуляций.

Схема передатчика показана на рисунке 5.1.

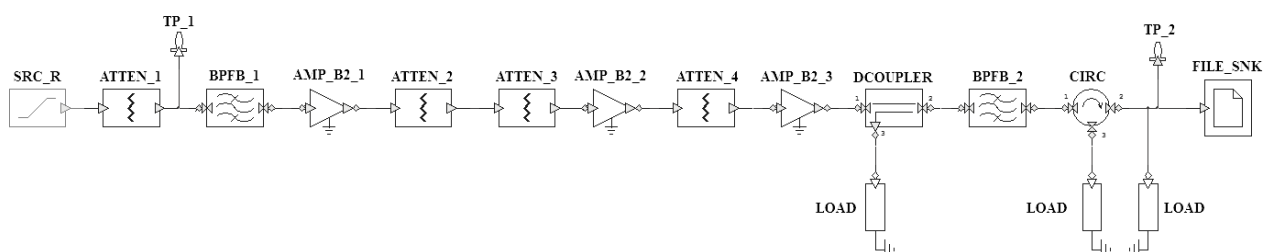


Рисунок 5.1 – Схема программной модели передающего тракта в среде AWR

Схема содержит:

источник тестового сигнала SRC\_R в виде текстового файла содержащего отсчеты сигнала во временной области, который содержит отсчеты сформированного в MATLAB широкополосного сигнала (полоса 100 МГц, несущая 3,55 ГГц) с OFDM модуляцией;

аттенюатор ATTEN\_1 для удобства регулировки выходного уровня источника сигнала; полосовой фильтр BPFB\_1 с полосой пропускания от 3,3 ГГц до 3,8 ГГц по уровню  $-3$  дБ, для подавления внеполосных продуктов преобразования цифроаналогового преобразователя;

каскады усиления мощности AMP\_B2\_1, AMP\_B2\_2 и AMP\_B2\_3; аттенюатор ATTEN\_2, для коррекции уровня мощности после первого каскада усиления;

аттенюаторы ATTEN\_3 и ATTEN\_4, имитируют потери мощности в межкаскадной связи;

направленный ответвитель DCOUPLER, для отвода части мощности выходного сигнала передатчика на фильтр предискажений DPD (Digital Pre-Distortion);

полосовой фильтр BPFB\_2, для подавления внеполосного излучения передатчика;

циркулятор CIRC для развязки приемной и передающей части, работающих на одну антенну; резистивные согласованные нагрузки LOAD, подключённые к выходам циркулятора, имитирующие сопротивление антенны и входных цепей приемника;

ПО FILE\_SNK, для записи отсчетов сигнала, прошедшего радиотракт и последующей обработки.

Параметры нелинейности передаточной характеристики моделей каскадов усиления выбраны в соответствии с параметрами существующей компонентной базы. Таким образом,

модель первого каскада усилителя мощности AMP\_B2\_1 по параметрам соответствует микросхеме усилителя мощности MNA-7A+. Модель второго каскада усилителя мощности соответствует микросхеме HMC409LP. Модель третьего каскада усилителя мощности соответствует микросхеме HMC1114PM5E. Параметры каждого блока устанавливаются в его меню свойств, при этом каждый параметр возможно изменять в процессе моделирования схемы, наблюдая в этот момент обновление результатов измерений.

### **Валидация модели усилителя мощности**

Перед моделированием сложных устройств необходимо убедиться, что среда моделирования адекватно воспроизводит процессы, протекающие в реальных устройствах. Для этого необходимо произвести валидацию некоторой простой модели реального устройства, основные параметры которого известны и получены при измерении реальными измерительными приборами.

В случае соответствия результатов моделирования с результатами измерений на реальном устройстве, можно сделать вывод о том, что данную программную среду можно использовать при моделировании сложных устройств и систем.

В рамках данной работы проведено моделирование аналогового радиотракта базовой станции системы сотовой связи пятого поколения.

Согласно технической спецификации на базовую станцию пятого поколения основным требованием к передающему тракту является величина вектора ошибки (EVM, error vector magnitude) выходного сигнала передатчика на его антенном гнезде.

Основной вклад в величину EVM на выходе радиотракта вносит нелинейность амплитудной характеристики его активных элементов и первую очередь усилителей мощности. Поэтому основой для валидации модели радиотракта следует считать в первую очередь валидацию модели нелинейного усилительного устройства.

Нелинейность амплитудной характеристики реального усилительного устройства в основном определяется такими параметрами как, точка однодецибельной компрессии по выходу (OP1dB), точка пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу (OIP3). Данные параметры определяют, уровень четных и нечетных гармоник в выходном сигнале, а также уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка (IM3) на выходе усилителя, что в свою очередь будет определять величину EVM на выходе всего тракта.

Валидация модели нелинейного усилителя производилась с использованием проведенных измерений интермодуляционных искажений усилителя HMC453ST89.

На рисунке 5.2 представлена схема измерения интермодуляционных искажений модели усилителя мощности в среде AWR.

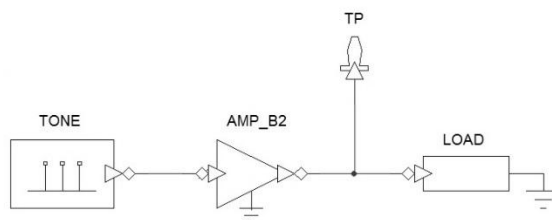


Рисунок 5.2 – Схема программной модели усилителя мощности для измерения интермодуляционных искажений

Схема измерения на рисунке 5.2 содержит: генератор двухтонового сигнала TONE с частотой тонов равных соответственно 1,840 ГГц и 1,845 ГГц, и мощностью каждого тона равной -5 дБм, усилитель мощности AMP\_B2 с коэффициентом усиления по мощности равным 9,45 дБ и точкой пересечения интермодуляций 3-го порядка по выходу равной 39,75 дБм, активную нагрузку LOAD согласованную с выходным сопротивлением усилителя мощности. Для вывода данных со схемы используется контрольная точка TP (Test point).

На рисунке 5.3 приведен график спектра сигнала на выходе усилителя мощности

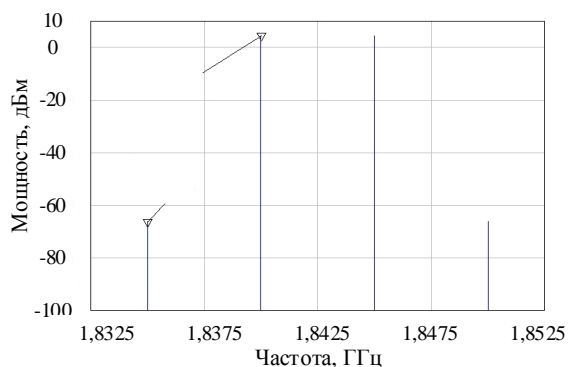


Рисунок 5.3 – Спектр сигнала на выходе усилителя мощности

Из графика на рисунке 5.3 видно, что спектр двухтонового сигнала обогащен продуктами интермодуляционных искажений третьего порядка с частотами 1,835 ГГц и 1,850 ГГц.

### 5.1.3.2 Моделирование функциональности URLLC сетей 5G на основе сетевого симулятора NS-3

В настоящее время все больший интерес уделяется сотовым сетям пятого поколения (5G). Одной из основных особенностей является предоставление услуг по обеспечению сверхнадежной передачи данных с низкой задержкой (URLLC). Основными требованиями для данного типа трафика являются: время доставки пакета не более 1 мс и надежность передачи не меньше 99,999%.

Целью данной работы являлось создание модели передачи трафика URLLC в сетях 5G. Для выполнения поставленной задачи было решено использовать симулятор дискретных событий NS-3 по следующим критериям:

1. Данный симулятор разработан на языке программирования C++ с поддержкой высокоуровневого программирования на Python, что обеспечивает хорошую производительность и низкий порог вхождения;
2. NS-3 является программным обеспечением с открытым исходным кодом и имеет свободно распространяемую лицензию;
3. Система является кроссплатформенной; 4. Система имеет модульное строение, что позволяет легко добавлять новые элементы;
5. Симулятор имеет встроенную поддержку беспроводных стандартов;
6. Основной акцент в системе сделан на широкую масштабируемость сети;
7. Имеется встроенная поддержка распределенных вычислений.

Для достижения поставленной цели были решены такие задачи как: формирование канала физического уровня, формирование сигнала физического уровня, формирование пакетов данных URLLC, обработка канала в приемнике, оценка параметров канала, таких как емкость, надежность, задержка, и получение трейсов для формирования зависимостей для вероятности потери пакета.

За основу была взята модель 5G NR, разработанная отделом мобильных сетей в центре технологий телекоммуникаций Каталонии (CTTC). Проект 5G NR является развитием проекта LENA, симулятора сетей LTE/EPC, в основе которого лежит модуль «mmWave», разработанный Нью-Йоркским университетом беспроводных сетей и университетом Падуи.

В соответствии с техническим заданием модель 5G NR была модифицирована, а именно: добавлены новые модули, внесены изменения в реализации имеющихся классов.

Из данной работы был сделан вывод о необходимости дооснащения ЦКП «Импульс» специализированными программными продуктами и измерительными средствами для работы по 5G, т.к. при проведении описанной работы пришлось заимствовать и то, и другое в других подразделениях. Перспектива востребованности работ по 5G растет.

Дальнейшее сотрудничество Центра НТИ и ЦКП «Импульс» планируется по измерениям параметров прецизионного формирователя коротких импульсов. Требуется произвести измерения с использованием широкополосного осциллографа с частотой дискретизации не менее 10 ГГц для измерения точности формирования коротких импульсов с длительностью от 5 нс до 200 нс (измерение точности установки длительности импульса и точности установки задержки выходного импульса относительно синхроимпульса). Приобретенный в 2019 г. широкополосный осциллограф Keysight Technologies UXR0134A удовлетворяет требо-

ваниям для измерения временной нестабильности параметров формируемых импульсов (джиттер) в диапазоне (10 – 100) пс.

### **5.1.3.3 Разработка программ дополнительного профессионального образования**

Одной из отличительных особенностей новой цифровой экономики и информационного общества является появление и развитие технологий беспроводной связи и Интернета вещей (БСИВ). Как следствие актуальной проблемой становится подготовка высококвалифицированных кадров, способных применять на практике, разрабатывать и внедрять данные технологии. Центр компетенций Национальной технологической инициативы «Технологии беспроводной связи и “Интернета вещей”» (ЦК НТИ БСИВ) ориентирован на решение этой задачи с помощью включенных в его состав академических площадок, которые обладают уникальными образовательными компетенциями в области БСИВ.

ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) – ведущий вуз в области электронно-вычислительной техники, новых средств связи и радиоэлектроники – входит в число академических членов ЦК НТИ БСИВ. ТУСУРом разработаны образовательные программы повышения квалификации: «Разработка интеллектуальных встраиваемых систем», «Технологии физического уровня стандарта 5G NR», «Технологии промышленного Интернета вещей».

Программа повышения квалификации: «Технологии промышленного Интернета вещей» формирует компетенции в области управления техническими системами с использованием датчиков и «умных» сенсоров, микроконтроллеров и исполнительных устройств, туманных и облачных вычислений. Рассматриваются практические кейсы с применением промышленных образцов одноплатных компьютеров Intec Milestone-C100 (российский одноплатный компьютер на базе отечественного процессора компании Миландр).

Программа повышения квалификации: «Разработка интеллектуальных встраиваемых систем» посвящена современным принципам и технологиям, применяемым при разработке встраиваемых систем. Слушатели будут изучать устройство микроконтроллеров, основы языка C, протоколы управления и передачи данных и др. Получат практический опыт работы с протоколами SPI, I2C, UART, аналоговыми и цифровыми датчиками. Кроме этого, в программе немалое внимание уделено системам «Интернета вещей», машинному обучению и компьютерному зрению. Слушатели познакомятся с тем, как устроена нейросеть и какое оборудование может быть использовано для запуска и работы нейросетей для встраиваемых систем. Программа будет полезна для разработчиков устройств «Интернета вещей». Практическая часть программы построена на базе отладочного набора STMicroelectronics B-L475E-IOT01A2, предназначенного для разработки приложений и устройств сферы «Интернета вещей», также будет использовано оборудование Movidius и Raspberry Pi.

В программе повышения квалификации: «Технологии физического уровня стандарта 5G NR» рассматриваются современные принципы и технологии, применяемые в сетях передачи данных 5-го поколения. В частности, речь пойдет о физическом уровне стандарта 3GPP TS 38.201 Release 15. В водной части программы слушатели познакомятся с принципами формирования кадров, сигналами и каналами физического уровня, и их назначением. Слушатели познакомятся с тем, как производится обработка и формирование сигналов для восходящего и нисходящего каналов, изучат принципы работы LDPC кодирования. В программе разобраны алгоритмы временной и частотной синхронизации и то, как формируются опорные сигналы. Также не останутся без внимания вопросы мультиплексирования каналов и множественного доступа в сетях 5G.

Данная программа полезна для разработчиков систем передачи данных. Практическая часть программы реализуется с использованием среды Matlab.

В целом, в подготовленных программах рассматриваются тематики, релевантные области БСИВ и, таким образом, деятельности ЦК НТИ БСИВ:

Стандарты и модели применения промышленного «Интернета вещей»;

Проводные интерфейсы и протоколы промышленного «Интернета вещей»;

Технологии, которые применены в стандарте 5NR, структура кадра, модуляции, физические каналы и их назначение;

LDPC кодирование в соответствии с стандартом 5G NR;

Машинное обучение: Введение в машинное обучение. Перцептрон. Архитектура нейросети. Сверточные нейросети.

Наряду с этим, повышение квалификации специалистов решает задачи освоения предметной области БСИВ на уровне разработчика систем связи, а также систем «Интернета вещей», пользователя и проектировщика технологий, планирования управления изменениями в проектах малого и среднего уровня сложности в области БСИВ, а также развитию «мягких» навыков для эффективной командной работы, в том числе на уровне топ-менеджмента в технологической компании или на производстве, по разработке и реализации планов информатизации предприятий и их подразделений на основе Web- и CALS-технологий.

Реализация программ повышения квалификации показала заинтересованность среди сотрудников ряда предприятий, специализирующихся на разработке систем связи, а также систем «Интернета вещей».

Подготовленные по указанным программам специалисты удовлетворяют потребность в кадрах для рынков НТИ, в частности, при реализации проектов для Автонет, Аэронет, Технет.



#### **5.1.4 Лаборатория печатных технологий кафедры Конструирование узлов и деталей радиоаппаратуры**

Лаборатория имеет статус научно-учебного подразделения, оснащенного современным оборудованием для подготовки нанопорошков, измерения параметров нано- микро частиц, их сортировки, подготовки наночернил для печати проводников и диэлектриков, и их печати с помощью принтеров (3D печать).

Услуги для лаборатории оказывались в рамках прикладных НИР по тематикам «Исследование нелинейных свойств тонкопленочных проводников, изготовленных методом струйной печати с применением нанодисперсных электропроводящих чернил», «Разработка, исследование и испытание бортовой аппаратуры РЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли L- и X- диапазонов» и др. Основной вид услуг – измерение параметров макетов в импульсном режиме и на СВЧ, а также изготовление заготовок плат на керамических и органических подложках для печати СВЧ элементов и устройств.

Материалы исследований, полученные в лаборатории с применением оборудования ЦКП «Импульс» докладывались на конгрессе 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020), организаторы Институт сильноточной электроники СО РАН (Institute of High Current Electronics SB RAS), Томский исследовательский центр СО РАН (Tomsk Scientific Center SB RAS), Национальный исследовательский политехнический университет (National Research Tomsk Polytechnic University), Chongqing University of Arts and Sciences. Были представлены доклады Федоров В.Н., Малютин Н.Д. (V.N. Fedorov, N.D. Malyutin) “Pulse and frequency characteristics of microwave antenna based on carbon fibers” – устный доклад, Иванчикова Е.А. и др. (E.A. Ivanchikova, I.A. Ekimova, V.N. Fedorov, A.G. Loschilov, N.S. Trufanova, A.S. Trufanova) “Carbon microwave elements” – постерный доклад. Доклады представлялись на секции «Углеродные материалы в электронике и фотонике» (4th NMHT: Carbon materials in electronics and photonics). Оба доклада опубликованы в тезисах и подготовлены для печати в журнале по итогам проведения конгресса.

The screenshot shows a webinar page with the following details:

- EFRE 2020 ONLINE** logo in the top left.
- Language: **РУС** (Russian) in the top right.
- Social media icons for Facebook and VK in the top right.
- Frequency: **Каждую неделю, По будням 13:00** with a calendar icon and **Добавить в календарь** button.
- Hosts: **Ведущие** EFRE 2020.
- Вебинар начнётся через 20 минут** (Webinar starts in 20 minutes).
- Start time: **Начало: 25 сен. 2020**.
- Duration: **Длительность: 2 часа**.
- Interactive options: **Задать вопрос ведущему** (Ask a question to the speaker) and **Пройти тест системы** (Take system test).
- 4th NMHT: N4 - Carbon materials in electronics and photonics** as the main title.
- Chairman: **Dr. Evgeny Lipatov**; Administrator: **Dmitry Genin**.
- Topic: **N4-O-041302 Invited HIGH-TEMPERATURE ELECTRON-HOLE LIQUID IN DIAMOND FILMS** by **Alexander Vasilchenko, Kuban State University, Krasnodar, Russia**.
- Reference ID: **N4-O-014301**.

В ПРИЛОЖЕНИИ Л1 Материалы конгресса 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020) приведены копии выходных данных сборника тезисов конгресса, тезисов докладов и их презентаций, которые были опубликованы в открытом доступе на сайте конгресса.

Ресурсы ЦКП «Импульс» лабораторией печатных технологий использовались при выполнении проектов «Разработка взрывозащищенного кожуха для ретранслятора УКВ радиосвязи», «Разработка модуля прецизионного дозирования материалов. Изготовление и испытание модуля прецизионного дозирования материалов», г/б 4/20/1 «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных» и др.

В лаборатории печатных технологий проведен цикл работ по совершенствованию технологий, изучению свойств наносимых пленок. В плане работ для внутренних потребителей проведена разработка макетной платы для выполнения зондовых измерений характеристик СВЧ-элементов, изготовленных методом принтерной печати. К макетной плате предъявляются следующие требования:

- материал подложки – ВК-96;
- размеры подложки – 60×48×0,5 мм;
- макет должен содержать калибровочные меры (холостой ход, короткое замыкание, линия передачи) в компланарном исполнении, совместимые с зондами Cascade Microtech APC40-A H924V;
- макет должен содержать тестовые двухполюсники, выполненные в виде планарных конденсаторов различной емкости;

– контактные площадки для измерения четырехполюсников и многополюсников в микрополосковом исполнении;

– обеспечить режим проведения измерений в диапазоне частот до 10 ГГц.

При выполнении печати выдержаны следующие параметры контактных площадок для зондовых измерений: ширина сигнального проводника 100 мкм, ширина заземленного проводника 400 мкм, зазор между проводниками 50 мкм.

Выполнены бакалаврские работы по тематике «Адгезионная прочность, плоттерная печать, макет установки, экспериментальные исследования». Изготовлены макеты, на которых тестировалась толщина пленок с помощью профилометра. Была поставлена цель получить пленки с толщиной до 100 мкм. При однократном проходе дозатора толщина пленки не превышала 10 мкм. На рисунке 5.4 показана типичная профилограмма пленок с толщиной 30 мкм при двухкратном проходе дозатора. Увеличение проходов печати приводило к растеканию чернил. В настоящее время ведутся работы по увеличению вязкости чернил, что позволит увеличить толщину наносимых пленок.

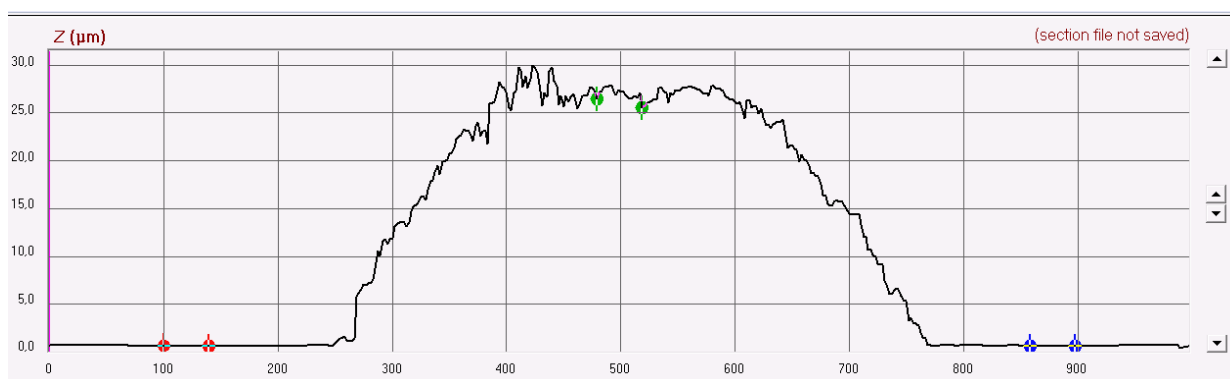


Рисунок 5.4 – Профилограмма пленки при двухкратном проходе и ширине проводника 500 мкм

Проводились исследования температурного воздействия на систему «пленка-подложка». В частности, были рассмотрены режимы спекания пленок, так как от температурного режима зависят как проводящие свойства материалов, так и адгезионная прочность. Теоретические исследования показали неоднозначность влияния температуры на силы молекулярного взаимодействия. Прямым и наиболее точным способом оценки адгезионной прочности является метод отрыва пленки при котором проводится измерение приложенной силы или совершенной работы, необходимой для нарушения адгезионного взаимодействия между пленкой и подложкой.

По результатам измерений было получено 90 значений (для каждого режима отжига пленок 30 значений) и рассчитано среднее значение силы отрыва и разрушающего напряжения для каждого из режимов спекания соответственно: а)  $F_1 = 17,78 \text{ Н}$ ,  $\sigma_{\text{отр}1} = 0,71 \text{ МПа}$ ; б)

$F_2 = 28,69 \text{ Н}$ ,  $\sigma_{отр2} = 1,15 \text{ МПа}$  в)  $F_2 = 46,29 \text{ Н}$ ,  $\sigma_{отр3} = 1,85 \text{ МПа}$ . Погрешность результатов измерения не превысила  $0,27 \text{ кПа}$ .

### **5.1.5 Лаборатория интеллектуальных компьютерных систем**

Направление работ лаборатория интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) тесно связаны тематикой ЦКП «Импульс» по проектированию и исследованию монолитных интегральных схем СВЧ. Приобретенный опыт позволил сотрудникам ЛИКС сформировать научный проект РНФ «Исследования и разработка цифрового дизайн-центра по проектированию микроэлектронных устройств для беспроводных систем связи», в котором создается программная платформа на основе моделей и программных модулей, уже опробованных и вновь разрабатываемых. Верификация моделей осуществляется на оборудовании ЦКП. Группа разработчиков цифрового дизайн-центра обособилась и основала ООО «50ом технолоджи».

Результаты работ ЛИКС 2020 г. с участием ЦКП «Импульс» представлены в разделе 10 настоящего отчета, а также в ряде публикаций (ПРИЛОЖЕНИЕ П – Копии публикаций сотрудников со ссылкой на ЦКП «Импульс»).

### **5.1.6 НИИ Систем электрической связи**

Основным направлением НИР 2020 года НИИ Систем электрической связи (НИИ СЭС) явился проект базовой части финансирования фундаментальных исследований по теме «Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент». Названный проект выполняется тремя небольшими коллективами (от 3 до 5 сотрудников каждый), объединенными с целью повышения эффективности исследований, в том числе, с использованием ресурсов ЦКП «Импульс».

Значительное внимание в 2020 году было уделено аналитическим исследованиям с целью поиска актуальных задач, решение которых имеет признаки фундаментальных проблем. Был подготовлен обзор публикаций по теме «Современные устройства, антенны и отражатели с невзаимными свойствами». Его краткая аннотация:

«В обзоре рассматриваются СВЧ антенны, устройства (включая отражатели), материалы и среды с невзаимными свойствами, которые из-за их уникальности и перспективности применения стали темой большого количества научных исследований и публикаций. Отмечается, что амплитудная невзаимность может быть реализована не только с помощью подмагниченных ферритов и полупроводниковых усилителей, но и на основе параметрических и нелинейных структур с использованием пространственно-временной модуляции. Делается вывод о том, что поляризационная невзаимность также может быть достигнута и на

безмагнитных компонентах, включая варикапы, другие параметрические элементы. При анализе взаимных отражателей, выполненных как на «тонких» поверхностных структурах, так и на объемных волноводах, рассматриваются взаимные кросс-полярирующие (деполярирующие) отражатели - «невидимки», преобразующие исходную поляризацию падающей волны в ортогональную поляризацию отраженной, которые могут быть построены с использованием лишь взаимных пассивных компонентов без применения невзаимных (ферритовых циркуляторов, гираторов и т.п.). Совмещение поляризационных и невзаимных свойств в радарных отражателях, RFID-метках и т.п., является дополнительной степенью свободы при проектировании радиоэлектронных систем нового поколения.

Ключевые слова: невзаимное отражение, поляризационная невзаимность, пространственно-временная модуляция, кросс-полярирующие отражатели, RFID-метки».

При выполнении исследований коллективы столкнулись с недостаточностью имевшегося оборудования, поэтому планы оснащения ЦКП новым оборудованием обсуждались совместно с тем, чтобы выполнить следующие запланированные работы:

1) Усовершенствовать TDR-метод для проведения измерений отраженных волн в волноведущих структурах, включая системы с пространственно-временной модуляцией, а также в открытом пространстве в ближней и дальней зонах при импульсном воздействии и с применением наиболее совершенных измерительных платформ мировых производителей;

2) Разработать и исследовать устройства, обеспечивающие экспериментальные измерения и являющиеся объектами исследований: поляризационный разделитель; нетрадиционные направленные ответвители на связанных структурах с существенно разными фазовыми скоростями нормальных волн; модальные фильтры, расщепляющие импульсные сигналы на гребенку импульсов с временами задержки нормальных волн; частотно-селективные устройства для фильтрации (разделения) входных сверхкоротких импульсов по трем портам; устройства управления поляризацией излучаемых (передаваемых) волн с минимальными потерями.

3) Разработать программное обеспечение для экспресс-обработки получаемых экспериментальных данных.

В ПРИЛОЖЕНИИ М Копия статьи «Особенности интерференции синфазных и противофазных волн» приведен пример одной из подготовленных публикаций по теме, в которой приведены результаты исследований, основанные на экспериментально-расчетном методе с применением оборудования ЦКП «Импульс»: А.Н. Сычев, Н.Д. Малютин, Е.И. Тренкаль, Г.А. Малютин «Особенности интерференции синфазных и противофазных волн с неравными фазовыми скоростями в связанных линиях при импульсном воздействии». В этой статье решена задача определения амплитуд синфазных и противофазных составляющих

волн с сильно отличающимися фазовыми скоростями в зависимости от частоты, что стало возможным в результате применения усовершенствованного TDR-метода. Прямое измерение амплитуд и фаз четырех составляющих волн, возбуждаемых при импульсном воздействии, осуществить невозможно, т.к. пока не разработано высокочувствительных зондов падающих и отраженных волн с разделением их по типам взаимодействия – синфазного и противофазного. Поэтому применена методика расчета амплитуд волн в основе которой лежит экспериментальное определение отклика отрезка связанных линий на импульсное воздействие, затем выполняется построение математической модели анализа волнового процесса при использовании экспериментально определенных граничных условий, и в заключение делается сравнение теоретических результатов при расчете отклика на импульсное воздействие с экспериментальными данными. Эта методика может быть охарактеризована как экспериментально-расчетная.

Аннотация статьи «Особенности интерференции синфазных и противофазных волн с неравными фазовыми скоростями в связанных линиях при импульсном воздействии»:

«Рассмотрено распространение короткого импульса пикосекундного диапазона в связанных линиях с отношением фазовых скоростей противофазных и синфазных волн 3:1. Экспериментально показана особенность интерференции синфазных и противофазных волн в таких структурах, приводящая к разделению входного импульса между тремя портами без существенной потери энергии на отражение от входа. Установлено, что интерференция волн приводит к изменению направленных свойств рассматриваемых структур и разделению спектральных составляющих импульса между портами».

Материалы исследований и возможности ЦКП «Импульс» при измерениях были продемонстрированы на Международном симпозиуме по фундаментальным исследованиям электрических систем (International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering), Румыния, Бухарест, Политехнический университет, 2020, 5-7 ноября (см. программу симпозиума ниже).



**ISFEE 2020**  
<http://isfee.elth.pub.ro>



DEPARTAMENTUL  
**ELTH**  
ELECTROTEHNICA

# **International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering**

**University POLITEHNICA of Bucharest, Romania, November 5–7, 2020**

*Dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of our Faculty of Electrical Engineering in  
the University Politehnica of Bucharest and to the 115<sup>th</sup> years of our  
Department of Electrical Engineering founded by Professor Nicolae  
Vasilescu-Karpen*



## **BRIEF PROGRAMME**

### **Thursday, November 5, 2020**

- 10<sup>00</sup> – 11<sup>00</sup> **Opening Session**
- 11<sup>00</sup> – 12<sup>00</sup> **ASTR + IEEE CAS/CS Chapter Round Table**
- 12<sup>00</sup> – 13<sup>00</sup> **Oral Sessions: Bioengineering & Sensors and transducers / Materials  
in Electrical Engineering**
- 13<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup> **Break**
- 14<sup>00</sup> - 16<sup>00</sup> **Oral Sessions: Circuits / Electromagnetic Field**

### **Friday, November 6, 2020**

- 10<sup>00</sup> – 12<sup>00</sup> **Oral Sessions: Electrical Machines & Drives / Data processing**
- 12<sup>00</sup> – 13<sup>00</sup> **Oral Sessions: Education & Management / Informatics & Applied  
Mathematics**
- 13<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup> **Break**
- 14<sup>00</sup> - 16<sup>00</sup> **Oral Sessions: Power Engineering / Renewable Energy**
- 16<sup>00</sup> - 17<sup>00</sup> **Closing Session and Concluding Remarks**



International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering 2020  
University POLITEHNICA of Bucharest, Romania  
November 5–7, 2020



### Electromagnetic Field

Chairs: Ioan F. Hantila, Iosif V. Nemoianu

ID	Schedule	Author(s)	Paper Title
591	14 <sup>00</sup> - 14 <sup>15</sup>	Ahmet Aydođan, Serkan Sađlam, Funda Akleman	Dielectric measurement via partially filled and short-circuited circular waveguides
592	14 <sup>15</sup> - 14 <sup>30</sup>	Mihai E. Marin, Veronica Manescu (Paltanea), Gheorghe Paltanea, Paul C. Andrei, Catalin Grumeza, Ioan F. Hantila	Hysteresis cycle measurements using an innovative laboratory equipment
593	14 <sup>30</sup> - 14 <sup>45</sup>	Veronica Manescu (Paltanea), Gheorghe Paltanea, Bogdan Varaticeanu, Paul Minciunescu, Mihai Maricaru, Lucian Demeter, Maricica Pesteri, Horia Gavriila, Iosif V. Nemoianu	Numerical analysis of a brushless servomotor with soft magnetic composite stator core
643	14 <sup>45</sup> - 15 <sup>00</sup>	M.D. Călin, E. Helerea	Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips
650	15 <sup>00</sup> - 15 <sup>15</sup>	V. Solcanu, M. Găiceanu, M. Constantinescu, A. Bordianu, Ghe. Samoilescu, A. Sotir	Global modeling of the leakage magnetic field in a volume of interest on a military ship (ship compartment)
659	15 <sup>15</sup> - 15 <sup>30</sup>	V. Solcanu, M. Gaiceanu, M. Constantinescu, A. Bordianu, Ghe. Samoilescu, A. Sotir	Basic electromagnetic compatibility equation for radio communication systems on board military ships
667	15 <sup>30</sup> - 15 <sup>45</sup>	Evgeniy I. Trenkal, Nickolay D. Malyutin, Vladislav S. Pozdnyakov	Experimental research of space-time modulation in transmission lines with controlled nonlinear elements

Доклад сделан в устной форме с представлением рукописи: Evgeniy I. Trenkal, Nickolay D. Malyutin, Member, IEEE, Vladislav S. Pozdnyakov. Experimental research of space-time modulation in transmission lines with controlled nonlinear elements – Евгений Тренкаль, Николай Малютин, Владислав Поздняков. Экспериментальное исследование пространственно-временной модуляции в передающей линии, содержащей управляемые нелинейные элементы. Текст доклада приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Н.

Аннотация статьи:

Представлены результаты экспериментального исследования структуры в виде копланарной линии передачи, содержащей регулируемые нелинейные элементы, при импульсном воздействии. Проведен анализ временных и частотных характеристик. Введено определение коэффициента отражения  $S_{11}$  как отношение амплитуд спектральных составляющих отклика в присутствии нелинейных элементов к амплитудам спектральных составляющих в отсутст-



вие нелинейных элементов. Показано, что вследствие нелинейных искажений отклика структуры на импульсное воздействие в узких полосах частот  $|S_{11}|$  больше единицы. Сделан вывод о частичной невзаимности структуры по причине появления нелинейных искажений в отраженном сигнале.

Ключевые слова — невзаимность, нелинейные элементы, импульс, рефлектометрия, спектр, пространственно-временная модуляция.

## **5.2 Расширение перечня и комплексности оказываемых услуг, а также круга пользователей для обеспечения максимальной загрузки оборудования ЦКП и обеспечения эффективного участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации**

Решение задачи расширения перечня и комплексности оказываемых услуг в круге внутренних пользователей проводилось путем обсуждения с руководителями подразделений проблем, возникающих в их работе. Кроме представленных в предыдущем подразделе материалов о проведении работ в интересах НИЛ «ФИЭМС», ЛИОР, Центр НТИ, ЛПТ, ЛИКС, НИИ СЭС была проведена разработка проектов еще с несколькими внутренними потенциальными пользователями. Приведем пример одного из проектов, генерация которого от НИИ Светодиодных технологий, директор д.т.н. Туев В.И.

*Название проекта* – Решение задач температурной стабилизации объектов в замкнутом объеме инертного газа с применением аддитивных технологий.

*Направление из Стратегии НТР РФ* – Н2 Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии.

Обоснование соответствия тематики проекта направлению из Стратегии НТР РФ.

Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике в области освещения основан на использовании кластеров твердотельных источников света на основе светоизлучающих GaN\InGaN полупроводниковых структур. Преобразование электрической энергии в видимое излучение осуществляется на основе электролюминесценции и позволяет достичь рекордных показателей по световой отдаче в 170-180 лм/Вт, что превышает значение этого параметра как для ламп накаливания (14-18 лм/Вт), так и люминесцентных источников света (40-80 лм/Вт). Таким образом, светодиодные источники света в настоящее время являются наиболее энергоэффективными потребителями электроэнергии. Твердотельные источники света на основе светоизлучающих GaN\InGaN полупроводниковых структур не содержат опасных и вредных веществ, что позволяет отнести их к экологически чистой продукции, не требующей специальных мер по утилизации.

### *Аннотация проекта*

В процессе анализа тепловых параметров единичного светоизлучающего диода, имеющего площадь GaN/InGaN полупроводниковой структуры один квадратный миллиметр и рассеивающего тепловую мощность 500 мВт, выяснилось, что для обеспечения удовлетворительного температурного режима необходимо отводить тепловую энергию, плотность потока которой более чем на порядок превышает ее значение для лампы накаливания 40 Вт, имеющей площадь колбы ориентировочно 100 квадратных сантиметров. Особенность полупроводниковых приборов и, в том числе GaN/InGaN полупроводниковых структур, такова, что с ростом температуры стремительно возрастает скорость деградиционных процессов и уменьшается надежность, сокращается срок службы прибора. Таким образом, значимость решения задач моделирования, анализа и разработки новых технических решений обеспечения теплового режима светодиодных структур чрезвычайно велика.

Световой поток, генерируемый единичными светодиодами, недостаточен для создания световых приборов для целей освещения, поэтому на практике используются кластеры из нескольких излучателей, световые потоки которых пространственно суммируются, обеспечивая требуемое значение этого параметра для светового прибора. Задача теплового управления в кластерах GaN/InGaN полупроводниковых структур существенно более серьезная, чем в кластерах светоизлучающих диодов, поскольку структуры расположены существенно ближе друг к другу. Такая конструкция реализована в светодиодных излучающих элементах (СИЭ) нитевидных (филаментных) светодиодных ламп. СИЭ представляет собой кластер GaN/InGaN полупроводниковых структур общим количеством до 50 штук, линейно расположенных на удлиненной подложке. Специфика использования СИЭ в составе нитевидных ламп имеет две существенных особенности.

Первая особенность связана с наличием люминофорной композиции, ввиду невысокого значения теплопроводности компаунда одеялом покрывающей СИЭ со стороны полупроводниковых структур. Это обстоятельство усложняет конвективный теплообмен с окружающей средой.

Вторая особенность связана с расположением СИЭ, которых может быть несколько в зависимости от мощности лампы, внутри стеклянной колбы. При этом источники тепла – СИЭ оказываются в замкнутом объеме заполняющего колбу газа.

В связи с этим должна быть разработана многоуровневая тепловая модель объектов в замкнутом объеме, позволяющая проводить исследование тепловых полей как в структуре СИЭ, так и в структуре замкнутого объема заполняющего колбу газа.

Теплоперенос внутри колбы осуществляется конвекцией заполняющего колбу лампы газа. Увеличить коэффициент конвекции можно добавлением к молекулярному электронного

газа. Требуется экспериментальное подтверждение проведенного ранее расчетного эксперимента, для этого требуется использование оборудования принтерной печати центра коллективного пользования.

Принтерные технологии относятся к группе технологий, называемых печатными, а их применение в электронике обозначают термином «печатная электроника» (printed electronics, printable electronics). Развитие принтерной технологии позволит: существенно сократить время создания элементов и устройств электроники; перейти от субтрактивных методов получения компонент, к которым относится самый распространенный метод фотолитографии, к аддитивным методам изготовления элементов практически без потерь исходных материалов на формирование топологии. Выделяют несколько преимуществ печатной электроники:

- Возможность уменьшить массу элементов благодаря применению оснований, легче, чем все известные основания печатных плат (керамика, металл, стеклотекстолит, пластмасса).
- Гибкость. Возможность создания изделий любой формы, пригодных к многократным изгибам и различным видам деформации.
- Универсальность. Возможность использования в качестве основания широкий спектр материалов, в том числе простых и дешевых, таких как бумага, текстиль, PET, PEN и т.п.
- Технологичность. Возможность производства конечных изделий в одном технологическом цикле методами близкими к традиционной полиграфии.
- Дешевизна. Низкая стоимость изделий массового производства.
- Доступность. Относительно невысокая стоимость производственного оборудования, простота освоения, отсутствие жестких требований к классу чистоты производственных помещений.

Вместе с тем, требуется разработка раствора материала для создания слоя с низкой температурой выхода электронов.

Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Математическая модель распределения температуры в структуре кристалл - подложка СИЭ - колба светодиодной лампы, позволяющая учесть особенности размещения кристаллов на подложке.
2. Установлено, что введение источника свободных электронов, температурно сопряженного со светодиодными нитями с кластерами GaN/InGaN наноструктур, позволяет уменьшить температуру структур в светодиодной лампе.
3. Рецепт раствора материала для создания слоя с низкой температурой выхода электронов печатными методами реализуется на *оборудовании центра коллективного пользования*.

## **Выводы по разделу 5**

В результате выполнения мероприятий по расширению числа пользователей услугами ЦКП в проведении исследований с использованием оборудования центра налажены деловые отношения с шестью лабораториями ТУСУРа. Охваченный круг внутренних пользователей в 2019-2020 годах выполнял исследования и разработки, в рамках которых проводились измерения в СВЧ диапазонах, при импульсном воздействии, а также использовались аддитивные технологии для изготовления макетов. Расширение перечня и комплексности оказываемых услуг, а также круга пользователей для обеспечения максимальной загрузки оборудования ЦКП и обеспечения эффективного участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, показанное в данном разделе, отражено также в разделе 10 на примерах работ для внешних пользователей.

## 6. Реализация мероприятий по подготовке кадров и развитию компетенций

Подготовка кадров и развитие компетенции сотрудников ЦКП «Импульс» осуществлялась в 2020 г. без отрыва от основной деятельности на семинарах, в процессе подготовки докладов на конференциях и участие в них с устными сообщениями. Наиболее эффективным, конечно, является выполнение исследований на оборудовании ЦКП и в процессе работы над диссертациями.

### 6.1 Семинар АО «НПФ «Микран» по автоматизации измерения векторных параметров

Семинар проводился сотрудниками АО «НПФ «Микран» и ЦКП «Импульс» Основной докладчик – к.т.н. Ульянов В.Н. На рисунке 6.1 показаны очные участники семинара, сотрудники ЦКП и магистранты второго года обучения. В процессе работы семинара был открыт доступ для зарегистрированных участников (всего 24 человека). Семинар проходил в специализированной аудитории 143 главного корпуса ТУСУР, оснащенной средствами коммуникации и прямой демонстрации проведения экспериментальных исследований.

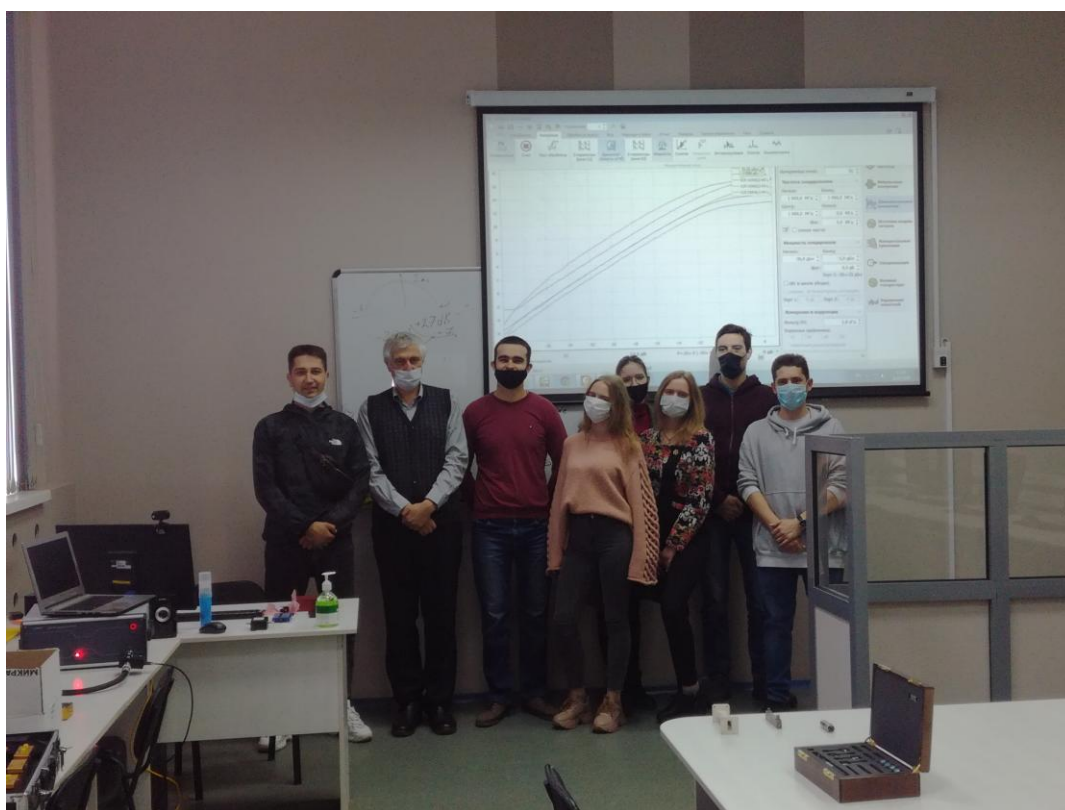


Рисунок 6.1 – Очные участники семинара АО «НПФ «Микран» и ЦКП «Импульс»  
На семинаре рассматривались вопросы теории и принципа работы векторных анализаторов цепей с демонстрацией работы на приборе P4426/1 производства Микрана. После семинара всем участникам предоставлена возможность работы на векторном анализаторе цепей по учебным материалам в виде описания лабораторных работ (ПРИЛОЖЕНИЕ Г Ла-

бораторные работы по современным технологиям и системам автоматизированного измерения на СВЧ).

Программа семинара включала:

- 1) Знакомство с принципом работы векторных анализаторов цепей (см. файл «Презентация семинара Микран ЦКП.pdf» в составе ОД).
- 2) Руководство работы на векторном анализаторе: основные возможности, «ручная» и электронная калибровка приборов, измерение частотных характеристик.
- 3) Иные возможности: измерение динамических характеристик, импульсные характеристики.
- 4) Возможности развития программного обеспечения.

## **6.2 Семинар Keysight Technologies**

По согласованию с представителем компании Keysight Technologies в ноябре 2020 г. состоялся второй семинар на тему «Перспективные измерительные платформы в области микроэлектроники, радиофотоники и систем телекоммуникации (ПРИЛОЖЕНИЕ О Перспективные измерительные платформы в области микроэлектроники, радиофотоники и систем телекоммуникации). Это было обусловлено приобретением и введением в состав оборудования ЦКП «Импульс» двух универсальных платформ: анализатора цепей Keysight Technologies N5247B с комплектом аксессуаров и осциллографа Keysight Technologies UXR0134A. На семинаре в дистанционном режиме присутствовало более 30 сотрудников.

Представленная в ПРИЛОЖЕНИИ О презентация ориентирует слушателей на максимально возможное расширение функций названных приборов за счет их агрегатирования в схемы измерения СВЧ и оптических параметров передающих и приемных трактов. Учитывая, что N5247B и UXR0134A имеются в ЦКП, данное направление расширения функций представляется эффективным решением для роста квалификации сотрудников и расширения круга потребителей услуг в быстро развивающемся направлении радиофотоники.

## **6.3 Подготовка диссертаций и выполнение исследований**

В работе ЦКП имеет большое значение сотрудничество с сотрудниками, выполняющими диссертационные исследования. В 2019 году защитили кандидатские диссертации Кулинич И.В. (научн. рук. Троян П.Е.) – тема диссертации «Микроэлектромеханический переключатель для сверхвысокочастотных широкополосных интегральных схем», Тренкаль Е.И. (научн. рук. Лошилов А.Г.) – тема диссертации «Способ и устройства определения структуры и параметров многослойных сред на основе модифицированного TDR-метода» и Коноваленко М.О. (научн. рук. Буянов Ю.И.) – тема диссертации «Гибридная система питания антенных решёток для малогабаритных радиолокационных станций». Их исследования проводились с применением оборудования ЦКП


«Импульс». В 2020 г. работы над диссертациями продолжали Христенко А.В. по теме «Обнаружение малоразмерных БПЛА методом фоновой радиолокации» и Светличный Ю.А., тема диссертации «Реализация цифровых методов в многопозиционных станциях с фазированными антенными решетками и совмещенными каналами радиолокации и связи», научный руководитель д.т.н. Малютин Н.Д. [36-39]. Диссертация представлена на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», защита немечена на 23 декабря 2020 г. В диссертации Светличного Ю.А. описано применение микросхем СВЧ и устройств радиофотоники, разрабатывавшихся по хоздоговорам 13/19, 22/18, 6/18, 29/17 с проведением экспериментальных исследований микроэлектронной и радиофотонной ЭКБ высокой степени интеграции и компонентов радиотехнических систем с АФАР на оборудовании ЦКП.



Магистерская диссертация Шарабудинова Р.М. (руководитель Малютин Н.Д.) на тему «СВЧ корректор ГВЗ на связанных полосковых линиях» была отмечена заняла второе место в конкурсе лучших работ магистрантов в 2020 г.

В исследованиях с последующей публикацией материалов принимали активное участие сотрудники, исполнители работ по проекту и сотрудничающие с ЦКП доктора и кандидаты наук Малютин Н.Д., Ерофеев Е.В., Бабак Л.И., Шестериков Е.В., Трекналь Е.И., Шеерман Ф.И., Кулинич И.В., Перин А.С., Коноваленко М.О., Ишуткин С.В., Бомбизов А.А. Активно участвуют студенты и магистранты Иванчикова Е., Малютин Г., Поздняков В., Труфанова Н., Труфанова А. и др.

Анализ влияния работ, связанных с использованием возможностей ЦКП, проделан по нескольким авторам. На рисунке 6.2 показан профиль Малютина Н.Д. по сведениям Scopus.

# Malyutin, Nickolay

 Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

 <https://orcid.org/0000-0003-0317-9096>  [Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

## Документ и тенденции цитирования

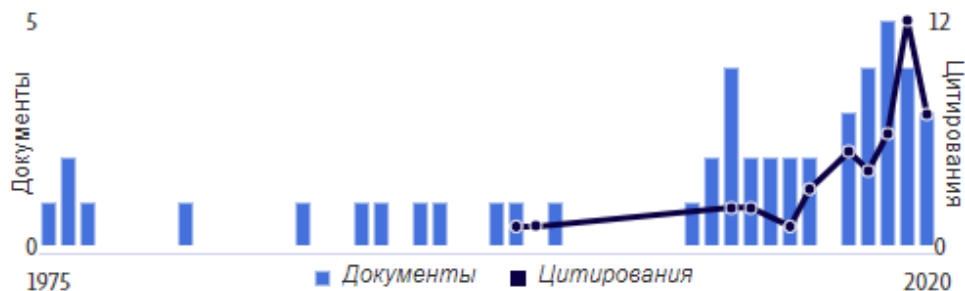


Рисунок 6.2 – Число публикаций и цитирований Малютина Н.Д. в наукометрической системе Scopus


Анализ графиков рисунка 6.2 показывает следующее. Период модернизации и развития ЦКП, с 2011 г. по 2015 г. характеризуется публикацией в среднем 2-х работ, индексированных в Scopus. В 2015 г. усилия автора были направлены на выпуск первой в России монографии по развитию аддитивных методов в органической электронике (РИНЦ: Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / Малютин Н.Д., Туев В.И., Лошилов А.Г., Артищев С.А., Здрок А.Е., Аллануров А.М., Бомбизов А.А., Лазько М.А., Караульных С.П., Макаров И.М., Убайчин А.В., Дегтяренко К.М., Гадиров Р.М., Тельминов Е.Н., Солодова Т.А., Никонов С.Ю., Никонова Е.Н., Копылова Т.Н., Якиманский А.В. / Под. ред. проф. Малютин Н.Д. Томск: Изд-во ТУСУР, 2015), 3-х монографий, в которых обобщены результаты исследований по новым работам 2012-2014 гг. в области органической электроники, микроэлектроники СВЧ. Рост публикаций отмечается с 2016 г., что связано с развитием аддитивных технологий и регулярными исследованиями по связанным полосковым структурам в СВЧ диапазоне и при импульсном воздействии сверхкоротких импульсов с применением оборудования ЦКП. Приводимый пример, конечно, не идеален в статистическом смысле, но он объективно отражает картину влияния суммарных факторов, связанных с работой ЦКП. Наиболее значительный их них – рост числа ссылок на публикации, вышедших на английском языке в изданиях из списка Scopus и Web of Science.



Аналогичные выводы можно сделать из анализа профиля д.т.н. Газизова Т.Р., тематика исследований которого связана с разработкой модальных фильтров, позволяющих защи-



щать аппаратуру от сверхкоротких импульсов нано-пикосекундного диапазона длительностей. Эта тематика была включена в направления, поддерживаемые в ЦКП с 2011 года.

## Gazizov, Talgat R.

 Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian

 [Связать с ORCID](#)  [Просмотреть профиль Mendeley](#)

 [Редактировать профиль](#)  [Настроить оповещение](#)  [Потенциальн](#)

 [Экспортировать в SciVal](#)

### Документ и тенденции цитирования

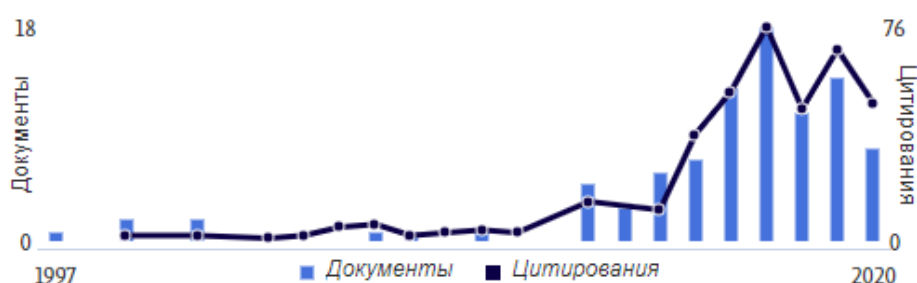



Рисунок 6.3 – Число публикаций и цитирований Газизова Т.Р. в наукометрической системе Scopus


Срез публикаций д.т.н. Бабака Л.И. в области разработки и исследования интегральных схем СВЧ, создания библиотек моделей компонент ИС в диапазоне до 67 ГГц показан на рисунке 6.4. Значительные колебания количества публикаций по годам при общей тенденции их роста обусловлены продвижением по частотам от L - X диапазонов в область миллиметровых волн, а затем переходом к работам по радиофотонике. При этом, естественно, наступает временное уменьшение количества публикаций и коррелированных с этим цитирований.


# Babak, Leonid I.

 [Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

 7004736629 

 [Связать с ORCID](#)

 [Просмотреть профиль Mendeley](#)

## Документ и тенденции цитирования

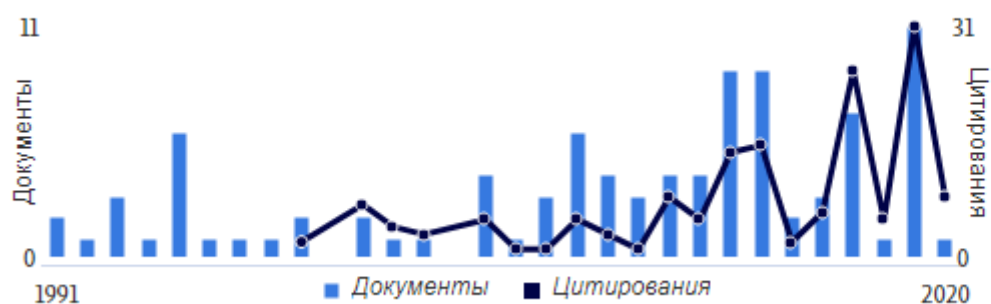


Рисунок 6.4 – Число публикаций и цитирований Бабака Л.И. в наукометрической системе Scopus

### Выводы к разделу 6

1. Совокупность мероприятий по повышению уровня компетенций в виде семинаров, выполнения лабораторных работ по материалам производителей аппаратуры, российских и зарубежных, проведение исследований и подготовка публикации статей, монографий, докладов обеспечивают необходимый рост уровня квалификации сотрудников, функционирующих на базе ЦКП. Положительным индексом состояния этого направления работ является выполнение работ внутренних и внешних пользователей, а также подготовка проектов РНФ с потенциальными потребителями услуг.

2. Приведенные данные публикаций и цитирования ведущих специалистов ТУСУРа в направлениях деятельности, совпадающих с направлениями ЦКП «Импульс», позволяют сделать выводы о значительном влиянии состояния инфраструктуры исследований на известность российских ученых и инженеров в мировом пространстве. Развитие ЦКП, и, безусловно, научно-техническая политика Министерства науки и высшего образования в значительной степени влияют на выбор актуальной тематики и рост количества и качества публикаций в зарубежных и отечественных научно-технических журналах, трудах конференций, монографиях. Это показывают объективные данные анализа публикационной активности авторов по сведениям, взятым из Scopus, WoS, РИНЦ.



## 7. Подготовка публикаций по тематике исследований ЦКП и заявок на РИД

### 7.1 Публикации

Непосредственная подготовка публикаций (п. 2.7 ПГ) проводилось из внебюджетных средств по хозяйственным договорам выполнения НИР. Расходы на сами исследования проводились из разных источников в зависимости от типа НИР – фундаментальная или прикладная.

Был проведен мониторинг публикационной активности авторов по наукометрическим базам Scopus и РИНЦ, находящихся на должностях исследователей, которые работают в ЦКП и сотрудничают с ним при выполнении своих работ. В список авторов были включены сотрудники, являющиеся авторами отчетов по первому и второму этапам по проекту поддержки ЦКП. Профили публикаций 17 исследователей по данным Scopus приведены далее. Разумеется, что все они отличаются, но наблюдается общая тенденция у большинства: увеличение количества публикаций после 2010-2011 годов. Следует также отметить важнейший показатель значимости исследований – индекс цитирования. Наибольшие индексы цитирования в один из годов: **76 цитирований** работ д.т.н. Газизова Т.Р., являющегося научным руководителем лаборатории молодых ученых, **индекс 60** отмечается публикаций к.т.н. Шестерикова Е.В., **31 цитирование** получили работы д.т.н. Бабака Л.И.

При анализе развития исследований уместно обратиться к истории развития направлений работы ЦКП. Краткие сведения таковы: начиная с 2006 г. в ТУСУР выполнялся проект инновационного развития образования. Реализация проекта на тему группового проектного обучения позволила почти полностью переоснастить или создать новые учебные и научные лаборатории. Именно в этот период ТУСУР осуществил кардинальное преобразование научной инфраструктуры. В 2010 г. ТУСУР продолжил работу по оснащению лабораторий, выполняя сразу три проекта по 218 постановлению правительства, и в это же время был основан ЦКП «Импульс». Перечисленные события привели к росту возможностей разработчиков в разных направлениях, развиваемых традиционно в ТУСУР, но наибольшая динамика была в становлении на новой основе микроэлектроники СВЧ с решительным продвижением в область наноэлектроники СВЧ. Как показали время и практика, тематика работ и оснащение ЦКП «Импульс» сформировались адекватно запросам страны и предназначению вуза, основанного в 1962 году на заре микроэлектроники.

Цитирование: 2018 – 5, 2019 – 31, 2020 - 8

Документы: 2018 – 1, 2019 – 11, 2020 - 1

## Babak, Leonid I.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[7004736629](#) [Связать с ORCID](#) [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

106

Документы автора

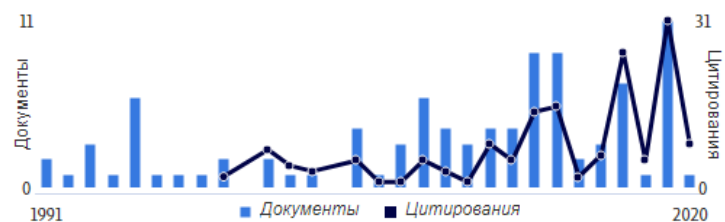
152

Цитирования по 97 докум.

7

[h-индекс: Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Silicon Photonics; Light Modulators; Optical Interconnects

[3 документа](#)

Phase Shifters; Phased Arrays; Variable Gain Amplifiers

[3 документа](#)

Bandpass Filters; Mixers; Monolithic Microwave Integrated Circuits

[3 документа](#)

Цитирование: 2018 – 1, 2019 – 1, 2020 - 1

Документы: 2018 – 1, 2019 – 0, 2020 - 0

# Bombizov, Aleksandr A.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[sc](#) 35298372500 [iD](#)

[Связать с ORCID](#)

[Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[✎ Редактировать профиль](#)

[🔔 Настроить оповещение](#)

[👤 Потенциальные соответствия авторов](#)

[📄 Экспортировать в SciVal](#)

## Обзор показателей

6

Документы автора

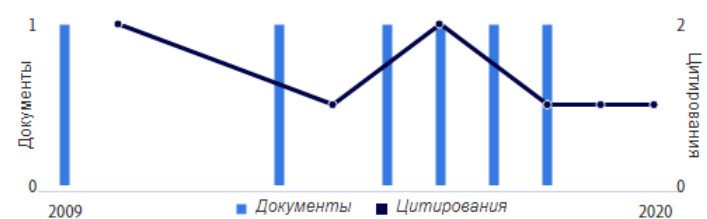
8

Цитирования по 8 докум.

2

[h-индекс: Просмотреть h-график](#)

## Документ и тенденции цитирования



## Темы с наибольшим вкладом 2015–2019 [🔗](#)

**Inverse Synthetic Aperture Radar; Doppler Radar; Signal Jamming**

[1 документ](#)

**Acoustic Emissions; Reinforced Concrete; Earthquake Precursor**

[1 документ](#)

**Ohmic Contacts; Gallium Arsenides; Inp**

[1 документ](#)

Цитирование: 2018 – 47, 2019 – 68, 2020 - 49  
Документы: 2018 – 11, 2019 – 14, 2020 - 8

## Gazizov, Talgat R.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[SC 15064111300](#) [ID](#) [Связать с ORCID](#) [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

93

Документы автора

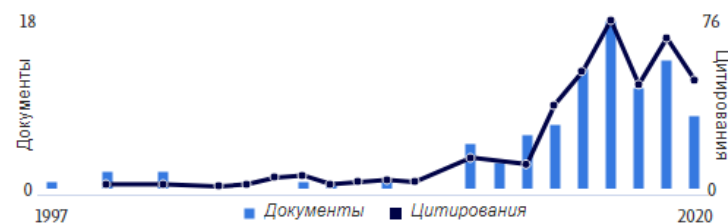
386

Цитирования по 191 докум.

9

[h-индекс: Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Ultrashort Pulses; Meanders; Microstrip Lines

[52 документа](#)

Electromagnetic Pulses; Low Noise Amplifiers; High Electron Mobility Transistors

[4 документа](#)

Macromodeling; Passivity; Power Lines

[2 документа](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 3, 2019 – 5, 2020 - 8

Документы: 2018 – 1, 2019 – 0, 2020 - 0

## Ekimova, I. A.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[24331311000](#) <https://orcid.org/0000-0002-4988-3612> [Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

6

Документы автора

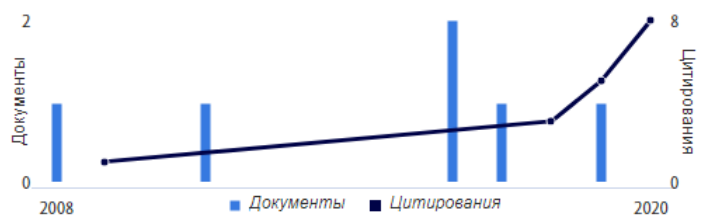
17

Цитирования по 17 докум.

1

[h-индекс: Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Phosphors; Vanadates; Luminescence

[1 ДОКУМЕНТ](#)

Partial Discharges; Insulation; Square Waves

[1 ДОКУМЕНТ](#)

Mordenite; Nuclear Fuel Reprocessing; Iodine

[1 ДОКУМЕНТ](#)



Цитирование: 2018 – 8, 2019 – 14, 2020 - 6

Документы: 2018 –4, 2019 – 3, 2020 - 1

## Erofeev, Evgenii V.

[Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

25929097700 [Связать с ORCID](#) [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[✎ Редактировать профиль](#) [🔔 Настроить оповещение](#) [🔍 Потенциальные соответствия авторов](#)

[📄 Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

42

Документы автора

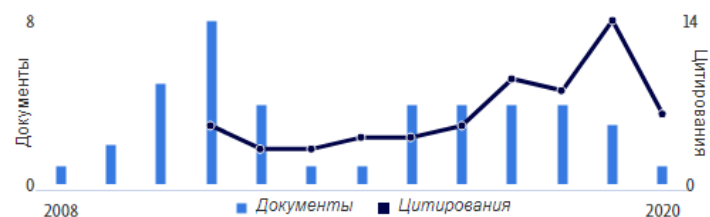
61

Цитирования по 56 докум.

4

*h*-индекс: [Просмотреть \*h\*-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Ohmic Contacts; Gallium Arsenides; Inp

[5 ДОКУМЕНТЫ](#)

Aluminum Gallium Nitride; High Electron Mobility Transistors; MIS (Semiconductor)

[4 ДОКУМЕНТЫ](#)

Magnetron Sputtering; Impulses; Deposition Rates

[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

[Просмотреть все темы](#)

[42 документов](#)

[Цитирования в 56 документах](#)

[0 Препринты](#)

New

[Соавторов: 45](#)

[Темы](#)

Цитирование: 2018 – 9, 2019 – 6, 2020 - 4  
Документы: 2018 – 1, 2019 – 2, 2020 - 0

## Ishutkin, Sergey V.

[Research and Production Company, Tomsk, Russian Federation](#) [Показать всю информацию об авторе](#)

[36677567800](#) [Связать с ORCID](#) [Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)  
[Экспортировать в SciVal](#)

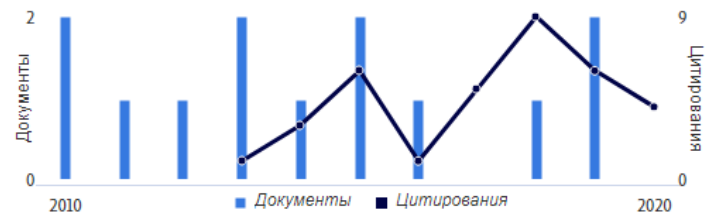
### Обзор показателей

13  
Документы автора

35  
Цитирования по 25 докум.

4  
h-индекс: [Посмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Quantum Well Infrared Photodetectors; Electrochemical Etching; Gallium Nitrides  
[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

Ohmic Contacts; Gallium Arsenides; Inp  
[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

Optomechanics; Mechanical Oscillators; Resonators  
[1 ДОКУМЕНТ](#)

Цитирование: 2018 – 9, 2019 – 6, 2020 - 4  
Документы: 2018 – 1, 2019 – 2, 2020 - 0

## Karaban, V. M.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[24605285200](#) <https://orcid.org/0000-0002-1769-3531> [Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

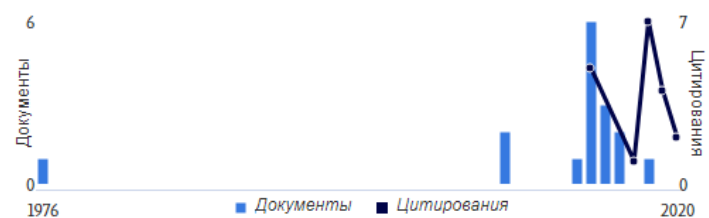
### Обзор показателей

16  
Документы автора

19  
Цитирования по 12 докум.

3  
h-индекс: [Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Spacecraft Charging; Solar Arrays; Electrostatic Discharge

[3 ДОКУМЕНТЫ](#)

Monolithic Integrated Circuits; Low Noise Amplifiers; Spacecraft Orbits

[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

Doherty Amplifiers; Peak-To-Average Power Ratio (PAPR); Monolithic Microwave Integrated Circuits

[1 ДОКУМЕНТ](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 4, 2019 – 9, 2020 - 19  
Документы: 2018 – 1, 2019 – 2, 2020 - 1

## Kuksenko, S. P.

[Toms State University of Control Systems and Radioelectronics](#), Tomsk, Russian Federation

[Показать всю информацию об авторе](#)

[55651039800](#) <https://orcid.org/0000-0001-9713-458X> [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)  
[Экспортировать в SciVal](#)

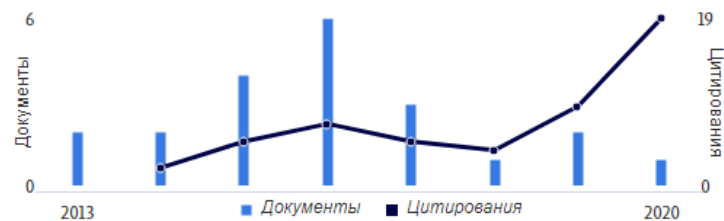
### Обзор показателей

21  
Документы автора

51  
Цитирования по 34 докум.

4  
h-индекс: [Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Ultrashort Pulses; Meanders; Microstrip Lines

[14 документа](#)

Eddy Current Problem; Edge Elements; Generalized Schur Cor

[1 документ](#)

Power Lines; Finite-Difference Time-Domain (FDTD); Matrix I

[1 документ](#)

[Просмотреть все темы](#)

[21 документов](#)

[Цитирования в 34 документах](#)

[0 Препринты](#)

New

[Соавторов: 14](#)

[Темы](#)

Цитирование: 2018 – 0, 2019 – 2, 2020 - 5

Документы: 2018 – 0, 2019 – 2, 2020 - 0

## Kulinich, Ivan

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[57205437118](#) [Связать с ORCID](#) [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

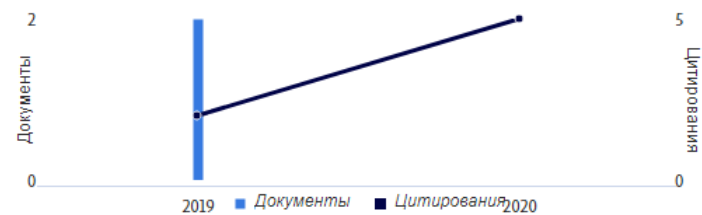
### Обзор показателей

2  
Документы автора

7  
Цитирования по 7 докум.

1  
h-индекс: [Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Gyroscopes; Micro-Electrical-Mechanical Systems; Scale Factor

[1 документ](#)

DFB Laser; Electroabsorption Modulators; Distributed Feedback Lasers

[1 документ](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 6, 2019 – 12, 2020 - 7  
Документы: 2018 – 5, 2019 – 4, 2020 - 3

## Malyutin, Nickolay

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

6603235190 [📄](#)

<https://orcid.org/0000-0003-0317-9096>

[Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#)

[Настроить оповещение](#)

[Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

47

Документы автора

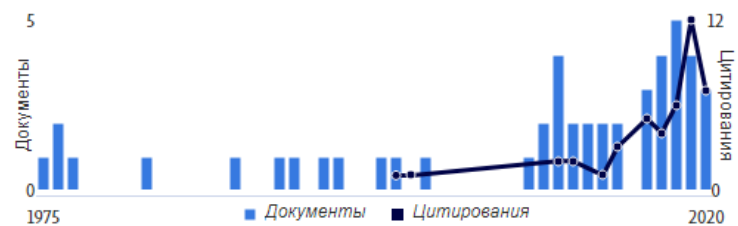
44

Цитирования по 33 докум.

4

*h*-индекс: [Просмотреть \*h\*-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#)

[Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019 [📄](#)

Directional Couplers; Phase Shifters; Insertion Losses

[4 ДОКУМЕНТЫ](#)

Inverse Synthetic Aperture Radar; Doppler Radar; Signal Jamming

[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

Dividers; Dual-Band; Ultrapower

[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 4, 2019 – 5, 2020 - 0

Документы: 2018 –3, 2019 – 2, 2020 - 0

## Perin, A. S.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[7004748272](#) <https://orcid.org/0000-0002-9597-3088> [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

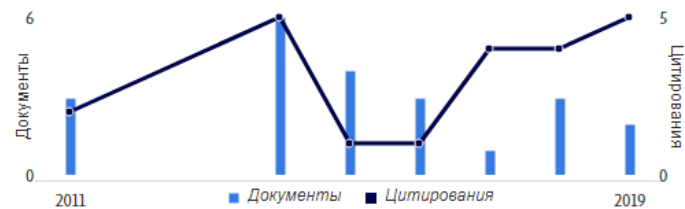
### Обзор показателей

22  
Документы автора

22  
Цитирования по 21 докум.

3  
h-индекс: [Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Photorefractive Crystals; Solitons; Lithium Niobates  
[10 ДОКУМЕНТЫ](#)

Lithium Niobates; Photorefractive; Czochralski Method  
[1 ДОКУМЕНТ](#)

Bessel Beam; Friedrich Wilhelm Bessel; Micromanipulation  
[1 ДОКУМЕНТ](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 0, 2019 – 0, 2020 - 0

Документы: 2018 – 0, 2019 – 1, 2020 - 2

## Trenkal, Evgeniy I.

[Toms State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

57194547603 [Связать с ORCID](#) [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

5

Документы автора

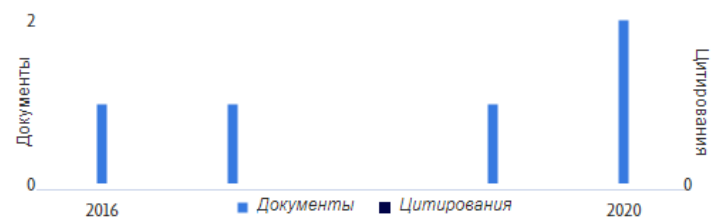
0

Цитирования по 0 докум.

0

*h*-индекс: [Просмотреть \*h\*-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Time Domain Reflectometry; Cables; Electric Fault Location

[2 документа](#)

Power Amplifiers; High Electron Mobility Transistors; Cree

[1 документ](#)



Цитирование: 2018 – 11, 2019 – 6, 2020 - 2

Документы: 2018 – 2, 2019 – 1, 2020 - 1

## Sychev, Aleksandr N.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[36683297000](#) <https://orcid.org/0000-0002-4079-4605> [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

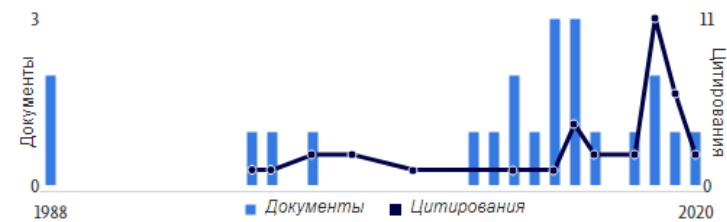
### Обзор показателей

22  
Документы автора

36  
Цитирования по 21 докум.

4  
h-индекс: [Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

**Butler Matrix; Couplers; Dual-Band**

[3 документа](#)

**Directional Couplers; Phase Shifters; Insertion Losses**

[2 документа](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 2, 2019 – 7, 2020 - 0

Документы: 2018 – 3, 2019 – 3, 2020 - 1

## Tuev, Vasilii I.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

56964253700 [ID](#)

[Связать с ORCID](#)

[Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#)

[Настроить оповещение](#)

[Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

21

Документы автора

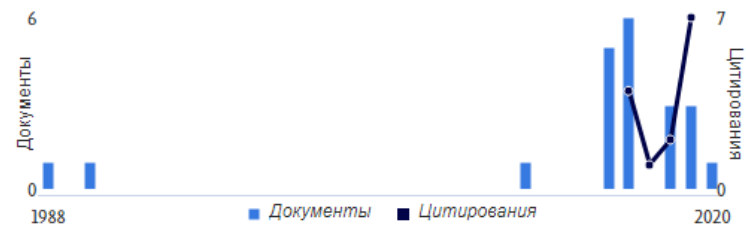
14

Цитирования по 11 докум.

3

*h*-индекс: [Просмотреть \*h\*-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019 [ID](#)

Power Semiconductor Diodes; Heat Sinks; Light Emitting Diodes

[8 документов](#)

Spacecraft Control; Zirconium Oxide; Coprecipitation

[5 документов](#)

Ingan; Aluminum Gallium Nitride; Semiconductor Quantum Wells

[1 документ](#)

Цитирование: 2018 – 0, 2019 – 12, 2020 - 2  
Документы: 2018 – 2, 2019 – 8, 2020 - 0

## Sheyerman, F. I.

[Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[35300990400](#) [Связать с ORCID](#) [Это вы? Ссылка на профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)  
[Экспортировать в SciVal](#)

### Обзор показателей

31

Документы автора

31

Цитирования по 24 докум.

3

[h-индекс: Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



[Анализировать результаты по автору](#) [Обзор цитирования](#)

### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Silicon Photonics; Light Modulators; Optical Interconnects

[4 документа](#)

Phase Shifters; Phased Arrays; Variable Gain Amplifiers

[3 документа](#)

Bandpass Filters; Mixers; Monolithic Microwave Integrated Circuits

[3 документа](#)

[Просмотреть все темы](#)

Цитирование: 2018 – 15, 2019 – 60, 2020 - 60  
Документы: 2018 – 3, 2019 – 2, 2020 - 5

## Shesterikov, Evgeniy Viktorovich

[Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation](#)

[Показать всю информацию об авторе](#)

[sc](#) 23995925500 [id](#) <https://orcid.org/0000-0003-4844-8376> [Просмотреть профиль Mendeley](#)

[Редактировать профиль](#) [Настроить оповещение](#) [Потенциальные соответствия авторов](#)

[Экспортировать в SciVal](#)

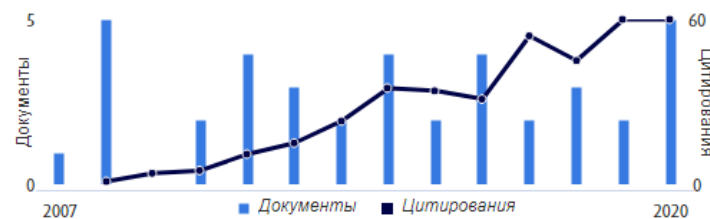
### Обзор показателей

40  
Документы автора

378  
Цитирования по 307 докум.

10  
h-индекс: [Просмотреть h-график](#)

### Документ и тенденции цитирования



### Темы с наибольшим вкладом 2015–2019

Hydroxyapatites; Sprayed Coatings; Plasma Spray

[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

Fretting; Connectors; Contact Resistance

[2 ДОКУМЕНТЫ](#)

Optomechanics; Mechanical Oscillators; Resonators

[1 ДОКУМЕНТ](#)

Приведенные выше сведения о публикациях были дополнены из наукометрической системы РИНЦ. В руководстве ЦКП считают, что публикация в отечественных журналах остается важной составляющей в развитии радиоэлектроники и всех других отраслей науки и экономики. Развитие РИНЦ фактически превратило эту систему в электронную библиотеку с огромным и очень необходимым фондом хранения и поиска.

В таблице 7.1 приведено количество публикаций сотрудников ТУСУРа, пользовавшихся услугами ЦКП, индексирование в Scopus и РИНЦ. Из таблицы видно, что в 2019 г. наблюдается рост публикаций, индексированных в Scopus и уменьшение числа публикаций в отечественных журналах и трудах конференций. При этом общее число индексированных работ растет.

Таблица 7.1 – Количество публикаций сотрудников ТУСУРа, пользовавшихся услугами ЦКП, индексированных в Scopus и РИНЦ

№	Ф.И.О	2018 год		2019 год	
		Scopus	РИНЦ	Scopus	РИНЦ
1	Артищев Сергей Александрович	0	6	0	0
2	Бабак Леонид Иванович	1	12	11	12
3	Бомбизов Александр Александрович	1	3	0	7
4	Газизов Тальгат Рашитович	11	32	14	27
5	Екимова Ирина Анатольевна	1	2	0	6
6	Ерофеев Евгений Викторович	4	11	3	3
7	Ишуткин Сергей Владимирович	1	3	2	4
8	Карабан Вадим Михайлович	1	6	2	0
9	Куксенко Сергей Павлович	1	7	2	8
10	Кулинич Иван Владимирович	0	0	2	6
11	Малютин Николай Дмитриевич	5	12	4	10
12	Перин Антон Сергеевич	3	14	2	16
13	Сычев Александр Николаевич	2	5	1	5
14	Тренкаль Евгений Игоревич	0	4	1	4
15	Туев Василий Иванович	3	20	3	15
16	Шеерман Федор Иванович	2	12	8	15
17	Шестериков Евгений Викторович	3	4	2	3
Всего		39	153	57	141
Итого по годам		192		198	

Данные за последние 2 года не дают возможности оценить динамику публикаций, но с учетом выше приведенных сведений об индексировании в Scopus в течение всего периода активной работы исследователей становится очевидным следующее:

1) Результаты исследований публикуются и представляются в мировом информационном пространстве, что свидетельствует о достаточно высоком уровне выполняемых работ. Средний показатель роста публикаций и цитирований на интервале 2011-2019 годов не менее 2 по индексам Scopus.

2) Публикационная активность в интервале 2016-2019 годов имеет положительную динамику и при проведении разумной научно-технической политики, наиболее вероятно, сохранится в последующие годы. Этому способствует проведенная модернизация ЦКП, вовлечение в процесс подготовки новых проектов от организаций РАН, университетов, предприятий (их уже в 2020 г. более 40).

## **7.2 Результаты интеллектуальной деятельности**

По тематике направлений ЦКП в 2019-2020 годах велась работа в двух направлениях:

- работа по обеспечению измерений и макетирования объектов изобретений, полезных моделей, топологий интегральных схем и программами для ЭВМ, оформление заявок на все виды РИД;
- продажа прав на использование перечисленных видов РИД.

ЦКП «Импульс» не имеет права подавать заявки на регистрацию РИД с указанием на обладание прав, но авторы создаваемых объектов интеллектуальной деятельности могут беспрепятственно при выполнении своих должностных обязанностей или на правах внешнего пользователя пользоваться услугами центра. Наличие экспериментальных исследований макетов, способов, интегральных микросхем или тестирования программ для ЭВМ ускоряет процедуру экспертизы и повышает вероятность востребованности РИД со стороны потенциальных покупателей лицензий на использование новых решений.

В таблице 7.2 приведены сведения о поданных заявках на изобретения/полезные модели авторами, взаимодействовавшими в той или иной форме с ЦКП «Импульс» в 2020 г. В таблице 7.3 показаны сведения о защите интегральных схем и программ для ЭВМ в 2019-2020 г. В этой таблице показаны заявки на топологии интегральных схем в 2019 г. и отсутствуют пока сведения о ТИМС в 2020 г. Это вызвано тем, что в текущем году сотрудники дизайн-центра разрабатывали по заказам предприятий схемы, топологии комплектов МИС СВЧ (см., например, раздел 10 настоящего отчета), запуск которых на изготовление и оформление заявок на выдачу свидетельств запланирован на начало 2021 г. ввиду чрезвычайно большого объема работ и одновременно проводившейся модернизации ЦКП.

В 2020 году были заключен договор об уступке прав на РИД:

Договор № 3/20 от 31 октября 2020 г. Передача исключительных прав ТУСУР в АО «НПФ «Микран» на полезную модель «Стенд для измерения импульсных и частотных характеристик сверхширокополосных объектов», дата государственной регистрации прав 26.12.2019 г. и на изобретение «Управляемый полосковый трансформатор импедансов» патент №2721482 дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений 19.05.2020 г. Стоимость договора 110 тыс. руб. Акт передачи будет оформлен после получения изменения патентообладателя из Роспатента.

Таблица 7.2 – Сведения о поданных заявках и патентах на изобретения/полезные модели авторами, взаимодействующими в той или иной форме с ЦКП «Импульс»

Авторы	Патентообладатель	Объект: изобретение (И), полезная модель (ПМ), программа для ЭВМ (ЭВМ), топология интегральной микросхемы (ТИМС)	Тип документа: Патент (П), свидетельство (С)	№ заявки	№ патента	Дата публикации	Название	Приоритет
Карабан В.М.	ТУСУР	ПМ	П	2020115627	Патент пока не получен	пока нет	Четырёхканальная управляющая система	12.05.2020
Медведев А.В., Хасан А.А., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020122269	Патент пока не получен	пока нет	Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием на противоположных сторонах печатной платы	06.07.2020
Медведев А.В., Хасан А.А., Кузнецова-Таджибаева О.М., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020122274	Патент пока не получен	пока нет	Способ трассировки печатных проводников на двух сигнальных слоях печатной платы для цепей с резервированием	06.07.2020

Продолжение Таблицы 7.2

Медведев А.В., Кузнецова- Таджибаева О.М., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020122293	Патент пока не получен	пока нет	Способ компоновки мно- гослойных печатных плат для цепей с резервирова- нием	06.07.2020
Жечев Е.С., Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Чернико- ва Е.Б.	ТУСУР	И	П	2020126549	Патент пока не получен	пока нет	Способ компоновки печ- атных проводников для цепей с модальным ре- зервированием	10.08.2020
Костелецкий В.П., Заболоц- кий А.М.	ТУСУР	И	П	2020126543	Патент пока не получен	пока нет	Полосковая структура, защищающая от сверхко- ротких импульсов в диф- ференциальном и син- фазном режимах	10.08.2020
Белоусов А.О., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020130052	Патент пока не получен	пока нет	Способ трассировки про- водников модального фильтра на основе плос- кого кабеля	14.09.2020
Белоусов А.О., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020130252	Патент пока не получен	пока нет	Способ трассировки про- водников модального фильтра с круговым сече- нием	15.09.2020
Белоусов А.О., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020130253	Патент пока не получен	пока нет	Способ трассировки про- водников модального фильтра	15.09.2020



Продолжение Таблицы 7.2

Суровцев Р.С., Носов А.В., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020130254	Патент пока не получен	пока нет	Меандровая линия за- держки в воздухе, рас- кладывающая сверхко- роткий импульс на после- довательность импульсов равной амплитуды	15.09.2020
Суровцев Р.С., Носов А.В., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020130255	Патент пока не получен	пока нет	Меандровая микрополос- ковая линия задержки, раскладывающая сверх- короткий импульс на по- следовательность им- пульсов равной амплиту- ды	15.09.2020
Рогожников Е.В., Дмитриев Э., Мовчан А., Дуплищева Н.В., Покаме- стов Д.А.	ТУСУР	ПМ	П	2020132918	Патент пока не получен	пока нет	Устройство передачи ин- формации по цепям пита- ния	07.10.2020
Сагиева И., Га- зизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020130784	Патент пока не получен	пока нет	Микрополосковая линия с двумя симметричными проводниками сверху, защищающая от сверхко- ротких импульсов	18.09.2020
Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Николаев И.И., Демаков А.В., Дроздова А.А	ТУСУР	И	П	2020131977	Патент пока не получен	пока нет	Способ изготовления ли- нии электропередачи со спиральным поперечным сечением и устройство на его основе	29.09.2020

Продолжение Таблицы 7.2

Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Иванов А.А., Николаев И.И., Газизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020131978	Патент пока не получен	пока нет	Коаксиальная камера для измерения эффективно- сти электромагнитного экранирования радиопо- глощающих материалов	29.09.2020
Жидик Ю.С., Ишуткин С.В., Троян П.Е.	ТУСУР	ПМ	П	2020131796	Патент пока не получен	пока нет	Адаптер полупроводни- ковой пластины	28.09.2020
Солдаткин В.С., Михаль- ченко Т.С., Шардина А.О., Юлдашова Л.Ш.	ТУСУР	ПМ	П	2020135049	Патент пока не получен	пока нет	Устройство для обезза- раживания воды и пище- вых жидкостей ультра- фиолетовым излучением	27.10.2020
Сагиева И., Га- зизов Т.Р.	ТУСУР	И	П	2020138861	Патент пока не получен	пока нет	Микрополосковая линия с заземленным проводни- ком сверху, защищающая от сверхкоротких им- пульсов	27.11.2020

Таблица 7.3 – Сведения о защите интегральных схем и программ для ЭВМ

Авторы	Патентообладатель	Объект: изобретение программа для ЭВМ (ЭВМ), топология интегральной микросхемы (ТИМС)	Тип документа: свидетельство (С)	№ заявки	№ патента	Дата публикации	Название	Приоритет
Жидик Ю.С., Ющенко А.Ю., Троян П.Е.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630213	2019630224	20 ноября 2019	Монолитная интегральная схема коммутируемой линии задержки Ка-диапазона	31 октября 2019
Жидик Ю.С., Ющенко А.Ю., Троян П.Е.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630214	2019630223	20 ноября 2019	Монолитная интегральная схема аттенюатора Ка-диапазона	31 октября 2019
Жидик Ю.С., Ющенко А.Ю., Троян П.Е.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630212	2019630225	20 ноября 2019	Сложнофункциональная монолитная интегральная схема Ка-диапазона	31 октября 2019
Помазанов А.В., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630189	2019630213	12 ноября 2019	Монолитная интегральная схема SiGe BiCMOS векторного фазовращателя X-диапазона с интегрированными корректирующими ЦАП	04 октября 2019
Коколов А.А., Помазанов А.В., Досанов А.М., Бабак Л.И.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630187	2019630214	12 ноября 2019	Монолитная интегральная схема SiGe BiCMOS двойного балансного субгармонического смесителя К-диапазона со встроенным усилителем гетеродина и полифазным фильтром	04 октября 2019

Продолжение Таблицы 7.3

Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., Шутов Е.А.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630188	2019630216	12 ноября 2019	Монолитная интегральная схема SiGe BiCMOS двухкаскадного малошумящего усилителя диапазона 18-25 ГГц	04 октября 2019
Коряковцев А.С., Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Конкин Д.А., Бабак Л.И.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630190	2019630215	12 ноября 2019	Монолитная интегральная схема SiGe BiCMOS оптоэлектронного приемника диапазона DC-20 ГГц со встроенным трансимпедансным усилителем с дифференциальным выходом и компенсацией постоянной составляющей	04 октября 2019
Конкин Д.А., Коколов А.А., Шеерман Ф.И.	ТУСУР	ТИМС	С	2019630191	2019630212	12 ноября 2019	Монолитная интегральная схема 4-канального DWDM демультиплексора	04 октября 2019
Квасников А.А., Иванов А.А., Куксенко С.П., Комнатов М.Е.	ТУСУР	ЭВМ	С	2020614561	2020615414	22.05.2020	3D SE BOX 2020	21.05.2020
Степаненко М.В., Юнусов И.В., Арыков В.С., Троян П.Е., Жидик Ю.С.	ТУСУР	ЭВМ	С	пока нет	Свидетельство пока не получен	пока нет	InGaAsP/InP MOW EOM Optimazer	Степаненко М.В., Юнусов И.В., Арыков В.С., Троян П.Е., Жидик Ю.С.

Продолжение Таблицы 7.3

Гуляева А.А., Таловская А.А., Кулинич И.В.	ТУСУР	ЭВМ	С	пока нет	Свидетельство пока не полу- чено	пока нет	Расчет профиля показате- ля преломления при тер- мической диффузии в ниобате лития	Гуляева А.А., Та- ловская А.А., Ку- линич И.В.
Белоусов А.О., Газизов Т.Т.	ТУСУР	ЭВМ	С	пока нет	Свидетельство пока не полу- чено	пока нет	Многокритериальная оп- тимизация трехпроводно- го микрополоскового мо- дального фильтра с уче- том массогабаритного критерия	Белоусов А.О., Гази- зов Т.Т.
Ким Г.Ю., Ма- лыгин К.П., Носов А.В., Суровцев Р.С., Газизов Т.Т.	ТУСУР	ЭВМ	С	пока нет	Свидетельство пока не полу- чено	пока нет	Оптимизация генетиче- ским алгоритмом меанд- ровой микрополосковой линии из двух витков, соединенных каскадно	Ким Г.Ю., Малыгин К.П., Но- сов А.В., Суровцев Р.С., Гази- зов Т.Т.
Костелецкий В.П., Заблоц- кий А.М.	ТУСУР	ЭВМ	С	пока нет	Свидетельство пока не полу- чено	пока нет	Анализ полосковой структуры, защищающей от сверхкоротких им- пульсов в дифференци- альном и синфазном ре- жимах	Костелец- кий В.П., Заблоц- кий А.М.
Чепко Т.А., Малютин Г.А.	ТУСУР	ЭВМ	С	пока нет	Свидетельство пока не полу- чено	пока нет	Программа расчета вол- новых характеристик ге- терогенных в продольном сечении копланарных по- лосковых линий на осно- ве решения конечно- разностных телеграфных уравнений	пока нет

### **Выводы по разделу 7**

1) Приведенные данные публикаций авторов, взаимодействующих в той или иной форме с ЦКП «Импульс» и аффилированных с ТУСУР, показывает, что результаты исследований публикуются и представляются в мировом информационном пространстве. Это свидетельствует о достаточно высоком уровне выполняемых работ. Средний показатель роста публикаций и цитирований на интервале 2011-2019 годов не менее 2 по индексам Scopus.

2) Публикационная активность в интервале 2016-2019 годов имеет положительную динамику. Этому способствует проведенная модернизация ЦКП в более раннее время. Вовлечение в процесс подготовки новых проектов от организаций РАН, университетов, предприятий (их уже в 2020 г. более 40) будет определять востребованности услуг центра в последующие годы.

3) При создании РИД наблюдается цикличность в защите топологий интегральных схем, поэтому необходима корректировка планов работы ЦКП в этом направлении.

## 8. Участие в мероприятиях по рекламе деятельности ЦКП и УНУ

### 8.1 Интернет

В таблице 8.1 приведена информация о ссылках на источники информации в сети, в которых указывается об использовании оборудования ЦКП «Импульс», его возможностях и полученных результатах.

Таблица 8.1 – Ссылки на источники в сети, содержащие информацию о ЦКП «Импульс»

№	Адрес	Тема публикации
1.	<a href="https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093119829&amp;origin=resultslist">https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093119829&amp;origin=resultslist</a>	An experimental research of the ultra-wideband pulse propagation in a transdirectional coupler based on coupled striplines
2.	<a href="https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093110660&amp;origin=resultslist">https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093110660&amp;origin=resultslist</a>	The antenna system with signal polarization separation
3.	<a href="https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093120861&amp;origin=resultslist">https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85093120861&amp;origin=resultslist</a>	High-resolution lightweight dual-frequency aircraft synthesized aperture radar for remote-sensing of the Earth: Implementation experience and development prospects
4.	<a href="https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088571119&amp;origin=resultslist">https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088571119&amp;origin=resultslist</a>	From symmetry to asymmetry: The use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration
5.	<a href="https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85094888957&amp;origin=resultslist">https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85094888957&amp;origin=resultslist</a>	Influence of the Surface Morphology of the Microwave Microstrip Line on Its Transmission Performance
6.	<a href="https://tusun.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tskp-impuls-gotov-vypolnyat-zakazy-na-novom-oborudovanii">https://tusun.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tskp-impuls-gotov-vypolnyat-zakazy-na-novom-oborudovanii</a>	ЦКП «Импульс» готов выполнять заказы на новом оборудовании
7.	<a href="https://ckp-rf.ru/ckp/200568/">https://ckp-rf.ru/ckp/200568/</a>	НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки
8.	<a href="http://www.sib-science.info/ru/heis/printer-dlya-3d-pechati-integralnykh-skhem-sozdadut-02072020">http://www.sib-science.info/ru/heis/printer-dlya-3d-pechati-integralnykh-skhem-sozdadut-02072020</a>	Принтер для 3D-печати интегральных схем создадут в Томске

Продолжение Таблицы 8.1

9.	<a href="https://gt-tomsk.ru/news/centr-kollektivnogo-polzovaniya-tusura-pristupaet-k-vypolneniyu-zakazov-na-obnovlennom-oborudovanii/">https://gt-tomsk.ru/news/centr-kollektivnogo-polzovaniya-tusura-pristupaet-k-vypolneniyu-zakazov-na-obnovlennom-oborudovanii/</a>	ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ТУСУРА ПРИСТУПАЕТ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАКАЗОВ НА ОБНОВЛЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ
10.	<a href="https://gt-tomsk.ru/news/centr-kollektivnogo-polzovaniya-tusura-pristupaet-k-vypolneniyu-zakazov-na-obnovlennom-oborudovanii/">https://gt-tomsk.ru/news/centr-kollektivnogo-polzovaniya-tusura-pristupaet-k-vypolneniyu-zakazov-na-obnovlennom-oborudovanii/</a>	ТУСУР получил новое оборудование для развития аддитивных технологий и электроники
11.	<a href="http://fasie.ru/press/fund/printer-dlya-3d-pechati-integralnykh-skhem-sozdadut-v-tomske/">http://fasie.ru/press/fund/printer-dlya-3d-pechati-integralnykh-skhem-sozdadut-v-tomske/</a>	ПРИНТЕР ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СОЗДАДУТ В ТОМСКЕ

В ПРИЛОЖЕНИИ Р приведены копии интернет-сообщений о работе ЦКП «Импульс».

На сайте ТУСУР публиковалась информации о деятельности ЦКП «Импульс» (<https://tusur.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tskp-impuls-gotov-vypolnyat-zakazy-na-novom-oborudovanii>).



## ЦКП «Импульс» готов выполнять заказы на новом оборудовании

23 октября 2020



Рабочее место с прибором N5247B

В рамках обновления приборной базы, которое прошло в ТУСУРЕ, [ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ «ИМПУЛЬС»](#) пополнился новым оборудованием, которое открывает новые возможности для реализации проектов.

В 2020 году в рамках проекта «Поддержка и развитие центра коллективного пользования "Импульс"» прошло значительное [обновление приборной базы](#). Проведена закупка и освоение нового технологического и измерительного оборудования, позволяющего ЦКП выполнять исследования и измерения на мировом уровне.

В этом году приборная база центра коллективного пользования пополнилась комплексом оборудования для сектора развития аддитивных технологий. Он позволяет выполнять технологические операции получения нанопорошков, их сортировки и измерения размеров частиц для приготовления «чернил» и добавки в состав композитов, а затем осуществлять изготовление по технологии 3D-конструктивных элементов любой сложности.

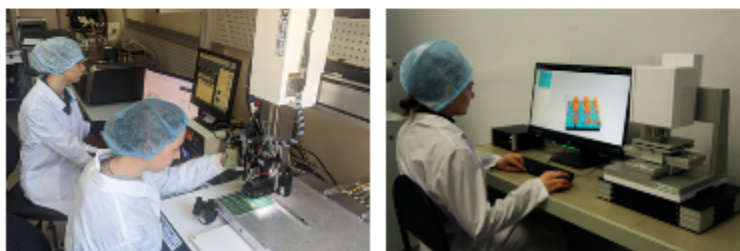
«Организация работ по развитию аддитивных технологий – это не просто покупка нового оборудования. Этому предшествовал анализ состояния данного направления в мировой науке и практике, проведение исследований на имевшейся технологической и приборной базе и выполнение ряда НИР», – комментирует руководитель ЦКП «Импульс» Николай Малютин.

Такой подход к подбору оборудования делает ЦКП ТУСУРа уникальным подразделением, в котором разработчики и исследователи могут реализовать свои проекты. Например, при изготовлении плёнок металлов и диэлектриков в процессе производства электронных компонентов требуется контроль их толщины. Для решения этой задачи ЦКП дооснащён современным оптическим профилометром модели Profilm3D. Он позволяет определять толщину плёнок и состояние их поверхности с высокой точностью и тем самым повысить достоверность исследований.

Значительно усилен сектор СВЧ-измерений. В ЦКП поставлены векторный анализатор цепей N5247B и осциллограф серии UXR. Кроме того, на базе ЦКП «Импульс» разработаны новые методики измерений параметров материалов, необходимые при проектировании и производстве монолитных интегральных схем и других изделий.

Развитие исследований в ЦКП «Импульс» поддерживается выполнением проектов в рамках заказов предприятий и организаций. Только за прошлый год выполнены работы по 17 договорам с внешними пользователями, а также по трём проектам по соглашениям с Министерством науки и высшего образования РФ. На повышение квалификации сотрудников в части эффективности использования оборудования направлены семинары с участием ведущих специалистов АО «НПФ «Микран», фирмы Keysight Technologies. В этих мероприятиях принимают участие как маститые разработчики, так и магистранты, осваивающие премудрости СВЧ-измерений.

«Несмотря на пандемию, в этом году сотрудники ЦКП «Импульс» и подразделений, которые с нами тесно взаимодействуют, выполнили большой объём аналитической работы по направлениям развития технологий и измерений с применением нового приборного и технологического оборудования. Подготовлены проекты НИР для участия в конкурсах РНФ и Минобрнауки РФ, цель которых – получение новых научно-технических результатов совместно с промышленными партнёрами», – отметил Николай Малютин.



Источник: пресс-служба ТУСУРа

<https://tusun.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tskp-impuls-gotov-vypolnyat-zakazy-na-novom-oborudovanii>

## 8.2. Баннер ЦКП «Импульс» на сайте ТУСУР

Адрес размещения информации о ЦКП «Импульс»

<https://tusur.ru/ru/o-tusure/struktura-i-organy-upravleniya/departament-nauki-i-innovatsiy/nauchnoe-upravlenie/tsentry-kollektivnogo-polzovaniya/tsentr-kollektivnogo-polzovaniya-impuls>

Ниже показана копия первой страницы информации о ЦКП «Импульс».

[Главная](#) / [О ТУСУРе](#) / [Структура и органы управления](#) / [Департамент науки и инноваций](#) / [Научное управление](#) / [Центры коллективного пользования](#) / [Центр коллективного пользования «Импульс»](#)

### Центр коллективного пользования «Импульс»

Центр коллективного пользования «Аппаратно-программные средства измерений и контроля параметров сверхширокополосных ВЧ- и СВЧ-устройств импульсными методами» (ЦКП «Импульс»)

#### Цели и задачи центра коллективного пользования

Целями и задачами ЦКП «Импульс» являются:

- 1 обеспечение на современном уровне проведения исследований, а также оказание услуг (измерений, исследований и испытаний) на имеющемся научном оборудовании в форме коллективного пользования заинтересованным пользователям;
- 2 повышение уровня загрузки научного оборудования в ЦКП «Импульс»;
- 3 обеспечение единства и достоверности измерений при проведении научных исследований на оборудовании ЦКП «Импульс»;
- 4 участие в подготовке специалистов и кадров высшей квалификации (студентов, аспирантов, докторантов) на базе современного научного оборудования ЦКП «Импульс»;
- 5 реализация мероприятий программы развития ЦКП «Импульс».

#### Основные направления исследований, проводимых в центре и (или) с использованием уникальной установки

Основными направлением деятельности ЦКП «Импульс» является обеспечение на имеющемся оборудовании проведения исследований, оказание услуг исследователям и научным коллективам как Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, так и иным заинтересованным пользователям в следующих областях:

- 1 исследование новых источников света на основе полупроводниковых диодов с целью развития направления энергосбережения;
- 2 разработка методов и аппаратно-программных средств измерения параметров элементов и устройств СВЧ и радиофотоники;
- 3 разработка методов и аппаратно-программных средств измерения векторных параметров устройств ВЧ- и СВЧ-диапазонов при импульсном воздействии;
- 4 развитие нового направления – нелинейной импульсной рефлектометрии;
- 5 измерение параметров элементов, устройств ВЧ и СВЧ и радиофотоники ВЧ- и СВЧ-классическими методами с переходом к реализации TDR-процедур;
- 6 разработка, изготовление и исследование монолитных интегральных схем (МИС) на GaAs, GaN, разработка МИС на основе SiGe.



Коллектив сектора СВЧ МИС, ЦКП «Импульс» (2012 г.)

Центр коллективного пользования «Импульс»

- Заявка на проведение работ в ЦКП
- Статус заявки в ЦКП

Уникальная научная установка «Установка плоттерной печати чернилами с широким диапазоном вязкости» (2D-плоттер)

Руководитель



**Малютин Николай Дмитриевич**

Доктор технических наук, профессор

Тел.: (3822) 52-79-42

E-mail: ndm@main.tusur.ru

Фактический адрес центра: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

## 8.3 Участие в симпозиумах и конференциях с докладами, включающими ссылки на использование оборудования ЦКП «Импульс»

Реклама возможностей ЦКП «Импульс» звучала в устных докладах на мероприятиях и в опубликованных материалах конференций:

1. На международном симпозиуме по фундаментальным исследованиям электрических систем (International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering), Румыния, Бухарест, Политехнический университет, 2020, 5-7 ноября (ПРИЛОЖЕНИЕ Н).

2. На конгрессе 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020), организаторы Институт сильноточной электроники СО РАН (Institute of High Current Electronics SB RAS), Томский исследовательский центр СО РАН (Tomsk Scientific Center SB RAS), Национальный исследовательский политехнический университет (National Research Tomsk Polytechnic University), Chongqing University of Arts and Sciences (ПРИЛОЖЕНИЕ Л).

3. Международной конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР, ноябрь 2020 г.

4. Rovkin M.E., Samuleev M.S., Malyutin N.D., Ermakov R.V., Djakov I.V., Dostovalov M.Yu. High-resolution lightweight dual-frequency aircraft synthesized aperture radar for remote-sensing of the earth: implementation experience and development prospects. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 22057.

5. Malyutin N.D., Trenkal E.I., Sychev A.N An experimental research of the ultra-wideband pulse propagation in a transdirectional coupler based on coupled striplines. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 52017.

6. Konovalenko M.O., Sokolov V.V., Trenkal E.I., Malyutin N.D. The antenna system with signal polarization separation. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 52018.

### **Выводы к разделу 8**

Сотрудники ТУСУР обеспечили участие в мероприятиях по рекламе деятельности ЦКП и УНУ с демонстрацией основных направлений работ, что способствовало предоставлению современного оборудования, технологического, методического, метрологического обеспечения для отечественных организаций, а также имеющих в г. Томске дизайн-центров по разработке изделий СВЧ микроэлектроники, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, включая Дизайн-центр "Микроэлектронные системы" НИИ микроэлектронных систем ТУСУР, АО "НПФ Микран", ООО "50ом Технолоджи", ООО "ЛЭМЗ-Т". Подготовлены условия для создания в соответствии с проектом Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. (Стратегия-2030) в Сибирском регионе (возможно, в г. Томске и в том числе на базе ТУСУР) центра технологических компетенций, регионального дизайн-центра и проектных команд, системы подготовки кадров технологов и проектировщиков в области СВЧ микроэлектроники.

## 9. Составление перечня и закупка вспомогательного оборудования и ПО

ЦКП «Импульс» в силу специфики его деятельности, ориентированной на обеспечение выполнения исследований, связан с 7 НИИ, лабораториями, кафедрами и другими подразделениями ТУСУРа (см. таблицу 9.1 – Сведения об основных структурных подразделениях ТУСУР (из отчета о научной деятельности за 2019 г.)).

Таблица 9.1 – Сведения об основных структурных подразделениях ТУСУР

**Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
"Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"**

**Сведения об основных структурных подразделениях\***

Показатель	Код строки	Количество
Филиал	1	0
Институт	2	2
Факультет	3	13
Кафедра	4	38
Отдел докторантуры (аспирантуры)	5	1
Учебно-научные подразделения, всего, из них:	6	66
учебно-научная (научно-учебная) лаборатория	7	49
научно-образовательный центр	8	11
базовая кафедра вуза в научной организации	9	6
Базовая (проблемная, отраслевая) лаборатория в вузе	10	5
Научно-исследовательский институт	11	7
Научный центр	12	1
Научно-методический центр	13	1
Конструкторское, проектно-конструкторское, технологическое подразделение	14	5
Подразделение научно-технической информации	15	1
Опытная база (опытно-экспериментальное производство)	16	2
Патентно-лицензионное подразделение	17	1
Бизнес-инкубатор	18	1
Технопарк	19	2
Инновационно-технологический центр	20	1
Инжиниринговый центр	21	1
Центр сертификации	22	1
Центр трансфера технологий	23	0
Центр коллективного пользования научным оборудованием и экспериментальными установками	24	1
Центр инновационного консалтинга	25	0
Другие научно-исследовательские подразделения (центры, отделы, лаборатории, секторы)	26	0

\* Включаются сведения с учетом подразделений в филиалах и институтах.

Проректор по научной работе и инновациям  (подпись) Лоцилов Антон Геннадьевич

Каждое рабочее место сотрудника в ЦКП и в других подразделениях ТУСУР, выполняющих исследования и измерения на оборудовании центра, оснащены одним или несколькими ПЭВМ разного класса, связанных в единую IT-сеть университета. В число пользователей сети входят 385 исследователей и инженеров, 439 профессоров и преподавателей, аспиранты и магистранты и др. (таблица 9.2 – Кадровый состав ТУСУР (по отчету о научной деятельности за 2019 г.)).

Таблица 9.2 – Кадровый состав ТУСУР (по отчету о научной деятельности за 2019 г.)

## 2.2 КАДРОВЫЙ СОСТАВ

Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"

Таблица 13

### ЧИСЛЕННОСТЬ РАБОТНИКОВ ВУЗА В 2019 ГОДУ

Профессиональные квалификационные группы должностей	Код строки	Работники по основной должности		Внутренние совместители		Внешние совместители		Работники, с которыми заключен эффективный контракт, чел.
		численность работников, чел.	сумма занятых ставок, долей ставок	численность работников, чел.	сумма занятых ставок, долей ставок	численность работников, чел.	сумма занятых ставок, долей ставок	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Всего (сумма строк 2, 3, 7, 13), в том числе:	1	1654	1122,60	356	93,25	489	122,30	
руководители вуза	2	7	7,00	0	0,00	0	0,00	7
работники подразделений вуза, реализующих функции высшего и дополнительного профессионального образования, всего (сумма строк 4-6), в том числе:	3	1156	782,35	195	62,75	283	64,40	
руководители структурных подразделений	4	105	97,60	13	5,20	5	1,25	123
профессорско-преподавательский состав	5	439	261,85	90	23,80	179	40,35	708
административно-хозяйственный, учебно-вспомогательный и прочий обслуживающий персонал	6	612	422,90	92	33,75	99	22,80	
работники сферы научных исследований и разработок, всего (сумма строк 8-12), в том числе:	7	385	243,25	118	25,50	197	54,90	239
руководители научных подразделений	8	23	21,25	6	1,70	2	1,00	31

В начале 2020 г. в связи с подключением ЦКП к выполнению аналитических исследований и резким увеличением объема проектных работ, обновление программного обеспечения стало актуальной задачей по следующим ее составляющим:

- обеспечение безопасности путем антивирусной защиты;
- поиск заимствований, как обязательное условие ВАК РФ, редакций журналов и изданий, программных комитетов конференций, диссертационных советов и научного управления ТУСУР, государственных аттестаций аспирантов, магистрантов;
- обеспечение видеоконференцсвязи для проведения мероприятий онлайн: семинаров, конференций, совещаний, демонстрации работы приборов в процессе повышения квалификации и лекций, практик, лабораторных работ и т.п.;
- обновление пакета офисных приложений;
- получение права на использование серверной операционной системы;
- получение права на использование базового программного обеспечения;
- получение права на пользование операционной системой существующих рабочих станций.

Эти задачи сформулированы специалистами IT-сектора при консультациях с руководителями направлений ЦКП: Шестериковым Е.В (технологическое); Бабаком Л.И. (измерения на СВЧ); Бомбизовым А.А. (аддитивные технологии); Малютиным Н.Д. (нелинейная рефлектометрия).

В 2017-2019 годах из внебюджетных средств по двум проектам ФЦП было закуплено серверное и коммутационное оборудование для общей сети ТУСУРа и оснащено более 100 рабочих мест рабочими станциями в подразделениях, связанных с ЦКП. В конце 2019 г. закончились или заканчивались лицензии на программное обеспечение по многим позициям и назревали проблемы в связи с этим в оснащении ПО рабочих мест для сотрудников и работающих магистрантов и аспирантов. Поэтому при составлении перечня вспомогательного оборудования и программного обеспечения в начале 2020 г. был проведен опрос пользователей услугами ЦКП, прежде всего, восьми директоров НИИ, директора НОЦ, заведующих научными и учебно-научными лабораториями, заведующих кафедрами. В результате, при непосредственном участии ректора В.М. Рулевского, проректора по НР и инновациям Лощилова А.Г., проректора по УР Сенченко П.В. было принято решение отдать предпочтение в 2020 году обновлению IT - инфраструктуры ТУСУРа в части программного обеспечения для всего сектора научных исследований, в том числе ЦКП «Импульс». Такое решение оказалось дальновидным, т.к. в 2020 году состоялся переход на дистанционные методы работы в НИИ, научных лабораториях и проведения учебных занятий всего университета. Был сформирован список приобретаемого ПО, представленный в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Перечень ПО обновления IT – инфраструктуры

№	Товары (работы, услуги)	Кол-во	Ед.	Цена	Сумма
1	Право на использование пакета офисных приложений Microsoft OfficeStd 2019 RUS для работы в существующей операционной системе <b>ООО «МАКССОФТ-24»</b>	108	шт.	2 582,16	278 873,28
2	Право на использование серверной операционной системы Microsoft WinSvrSTDCore 2019 <b>ООО «МАКССОФТ-24»</b>	1	шт.	10 198,88	10 198,88
3	Право на использование пакета базового программного обеспечения Microsoft Windows Pro 10 RUS для лицензирования существующих рабочих станций <b>ООО «МАКССОФТ-24»</b>	42	шт.	3 167,67	133 042,14
4	Право на использование операционной системы обеспечения Microsoft Windows Pro 10 RUS существующих рабочих станций <b>ООО «МАКССОФТ-24»</b>	42	шт.	7 642,08	320 967,36
5	Право на использование Kaspersky Endpoint Security для бизнеса – Расширенный Russian Edition 500-999 Node 1 year Educational Renewal License <b>ООО «Софттекс»</b>	600	шт.	454,00	272 400, 00
6	Право использования Kaspersky Security для почтовых серверов Russian Edition 1000-1499 MailAddress 1 year Educational Renewal License <b>ООО «Софттекс»</b>	11 500	шт.	145,95	167 842,50
7	Академическая лицензия на ПО Система видеоконференцсвязи TrueConf Server на 12 онлайн пользователей в составе: Поддержка LDAP, Active Directory и UDP Multicast Технологическая поддержка на 1 год для 12 онлайн пользователей. Публичные веб-конференции на 45 гостей, трансляция видеоконференцсвязи TrueConf Terminal Pro на 1 соединение <b>ООО «Софттекс»</b>	1	шт.	420 000,00	420 000,00



Продолжение Таблицы 9.3

8	Право на использование программного обеспечения TrueConf Server на 50 онлайн пользователей. Бессрочная академическая лицензия <b>ООО «Интаит-Сибирь»</b>	1	шт.	1 103 030,00	1 103 030,00
9	Право использования результата интеллектуальной деятельности: Программная система для обнаружения текстовых заимствований в учебных и научных работах «Антиплагиат.ВУЗ» версии 3.3» на основании лицензионного договора №2184 от «05» марта 2020 г. <b>АО «Антиплагиат»</b>	1	усл. ед.	64 800,00	64 800,00
10	Право использования результата интеллектуальной деятельности: Программное обеспечение «Модуль поиска текстовых заимствований Объединенная коллекция» на основании лицензионного договора №2184 от «05» марта 2020 г. <b>АО «Антиплагиат»</b>	1	усл. ед.	424 372,41	424 372,41

Для обеспечения резервного питания закуплен источник питания GPR-730H10D, 0-300 V-1A, 2Xled в количестве 1 шт. стоимостью 63,5 тыс. руб.

**Выводы по разделу 9**

Принятое решение об обновлении ПО ИТ инфраструктуры ЦКП «Импульс» и ТУ-СУРа обеспечило бесперебойную и достаточно эффективную работу сотрудников ЦКП «Импульс» и связанных с ними подразделений университета и внешних пользователей. Поставки лицензированного ПО позволили также поддержать процесса обучения магистрантов и аспирантов, что оказалось крайне необходимо при внедрении дистантных способов обучения.

## **10. Разработка технических требований на характеристики вновь осваиваемой технологии изготовления и прототипирования СВЧ ИС**

Работы по данному разделу выполнялись из внебюджетных источников – хозяйственных договоров по заказам ООО "ЛЭМЗ-Т", АО НИИПП, АО "НПФ Микран", АО "Концерн ВКО" Алмаз-Антей" договоров по оказанию услуг (таблица Таблица 4.1 – Перечень организаций – внешних пользователей услугами ЦКП «Импульс»). Как уже отмечалось, на характер этой части деятельности ЦКП существенно повлияли ограничения в продолжительности и непрерывности экспериментальных исследований. В соответствии со стратегией развития ЦКП и согласно Техническому заданию на проект в плане работ были аналитические исследования, разработка технических требований на характеристики вновь осваиваемой технологии изготовления и прототипирования СВЧ ИС. Поэтому сотрудники, взаимодействующие с ЦКП «Импульс», на значительную часть времени 2020 г. были переключены на проведение обзорных работ, аналитических исследований по заключенным контрактам и договорам, а также на подготовку проектов. В настоящем подразделе приведены некоторые сведения о выполненных работах, которые входили в план развития ЦКП на 2020 г. и последующие годы по направлениям НТР РФ Н1, Н2, Н6.

### **10.1. Исследование вариантов построения и моделирование интегральных блоков перспективных СВЧ передающих, приемных и приемо-передающих радиотрактов Ku-диапазона длин волн, выполненных по полупроводниковым технологиям Si/SiGe/GaAs/GaN**

Настоящий обзор и аналитические исследования выполнены под руководством д.т.н. Бабака Л.И. и группами сотрудников дизайн-центра "Микроэлектронные системы" НИИ микроэлектронных систем ТУСУР, сектора СВЧ измерений ЦКП. Исследования нацелены на реализацию выбираемых вариантов схемных и технологических решений с максимально возможным применением ресурсов ЦКП «Импульс». В работе приняли активное участие сотрудники лаборатории интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа (ЛИКС). Далее приведены материалы, отражающие анализ тенденций в направлениях, совпадающих с направлениями деятельности ЦКП «Импульс» и представляющих перспективу его занятости в проектировании, исследовании и изготовлении электронной компонентной базы СВЧ и модулей на их основе.

#### **10.1.1 Состояние СВЧ электронной компонентной базы и полупроводниковых технологий изготовления приемопередающих модулей в России и за рубежом**

В настоящее время наблюдается бурный рост в области создания и применения радиоэлектронных и телекоммуникационных систем для различных сфер промышленности,

транспорта, общественного потребления, вооружений и др. Современными тенденциями в развитии радиоэлектронных систем (РЭС) гражданского и военного назначения являются освоение все более высокочастотных (ВЧ) диапазонов, в том числе сверхвысокочастотных и крайне высокочастотных (СВЧ и КВЧ), с целями увеличения скорости и объема передачи данных, а также разрешающей и пропускной способности, повышение функциональности, срока службы, надежности и помехоустойчивости, снижение энергопотребления, массогабаритных характеристик и стоимости, повышение технологичности при производстве и др.

К традиционным областям применения СВЧ радиоэлектронных систем относятся связь, радиовещание, телевидение, радиолокация, навигация, радиоастрономия, телеметрия, телеуправление, телекоммуникации, гигабитовые системы передачи данных, измерительная техника и др. Среди современных СВЧ радиоэлектронных и телекоммуникационных средств большое место занимают системы на базе использования ППМ и АФАР (например, для наземных и бортовых радиолокационных станций, спутниковых систем связи и др.

Реализация указанных выше тенденций обеспечивается несколькими путями, к которым относятся, в частности, использование новых принципов построения радиотехнических систем и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС), применение современной малогабаритной СВЧ полупроводниковой электронной компонентной базы (ЭКБ), разработка новых технологий производства СВЧ радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на основе высокоинтегрированной компоновки элементов и узлов [36-39].

В частности, современным направлением в создании РЭА различного назначения, включая РЛС с АФАР, является использование многофункциональных СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), ИС высокой степени интеграции и, особенно, систем на кристалле (СнК, *англ.* System-on-Chip – SoC). Их применение обеспечивает целый ряд преимуществ – значительное снижение массы, габаритов и потребляемой мощности радиоэлектронных узлов, повышение надежности, срока службы, технологичности и др.

Для достижения наибольшей плотности в сочетании с высокими тактико-техническими характеристиками (ТТХ) изготавливаемых изделий в течение последних лет за рубежом также исследуются и внедряются технологии плотной и объемной упаковки в корпус большого числа компонентов (часть из них могут представлять СнК) – System-in-Package (SiP, Система в корпусе, СвК), System-on-Package (SoP), Module-on-Package (MoP) и другие их разновидности. В частности, развитие получают технологии трехмерной (3D) интеграции СВЧ компонентов.

Указанные технологии являются весьма перспективными и позволяют удовлетворить растущие требования к функциональным, массогабаритным и энергетическим харак-

теристикам СВЧ РЭА. Кроме того, их следствием является появление новых прогрессивных концепций построения радиотехнических систем, в том числе АФАР для РЛС. Например, одна из перспективных технологий изготовления АФАР, исследуемых в зарубежных странах, предполагает, что полотно антенной решетки состоит из плоских панелей (подрешеток), которые собраны на основе большого количества СВЧ ППМ типа СнК (рисунок 10.1).

На рисунке 10.2 представлены структурные схемы и фотографии МИС четырех- и восьмиканальных ППМ типа СнК, разработанных для зарубежных РЛС с АФАР. Здесь в состав ИС СнК, помимо аналоговой СВЧ части, входят цифровые блоки управления ППМ и часть блоков ЦОС.

В современных условиях определяющей составляющей создания и производства упомянутой выше высокотехнологичной продукции является уровень технологий производства ЭКБ, отдельных компонентов, а также радиотехнических систем в целом.

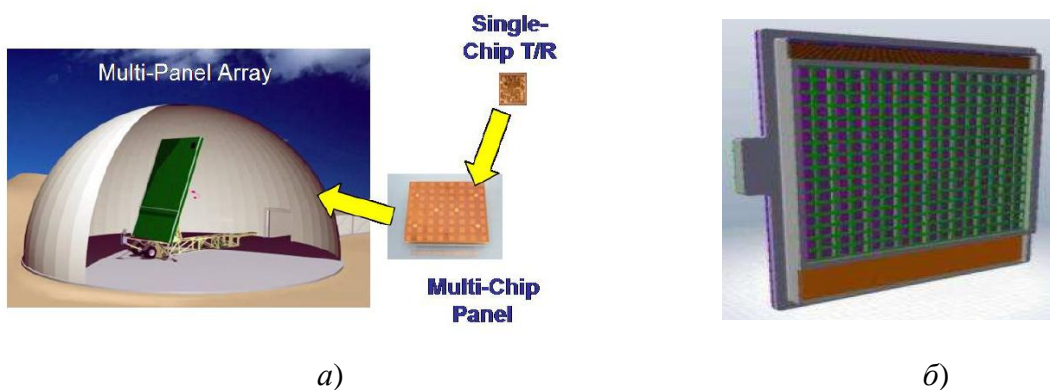


Рисунок 10.1 – Перспективная технология производства АФАР: а) проект АФАР из плоских антенных подрешеток; б) внешний вид антенной подрешетки

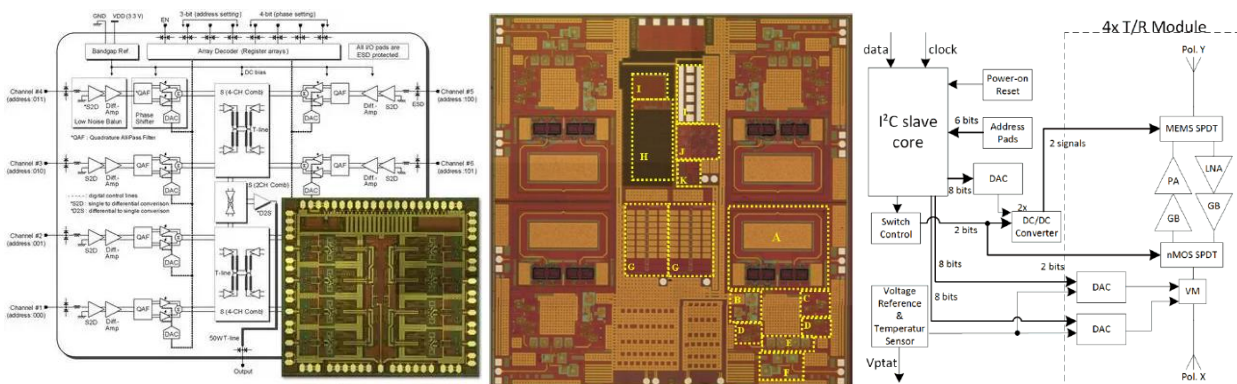


Рисунок 10.2 – Структурные схемы и фотографии МИС четырех- и восьмиканальных ППМ типа СнК, разработанных для зарубежных РЛС с АФАР

Следует отметить, что в отечественной радиотехнической отрасли системный уровень изделий в основном соответствует мировым показателям, а отдельные образцы превосходят импортные аналоги [40]. Однако, к сожалению, российские предприятия сильно отстают от лидеров мирового рынка ЭКБ (США, Франция, Германия, Япония, Тайвань, Китай) по уровню технологий разработки и изготовления СВЧ МИС и СнК, а также применению их в радиотехнических системах. Исследования в области создания отечественных высокоинтегрированных технологий плотной и объемной компоновки компонентов для производства СВЧ РЭА также проводятся в совершенно недостаточном объеме. На российских предприятиях такие технологии используются пока редко и сильно отстают от мирового уровня.

Настоящий обзор направлен на исследование указанных проблем при создании высокоинтегрированных ППМ типа СнК для АФАР, используемых в РЛС. Предполагается, что результаты проекта будут востребованы в ближайшее время при создании перспективных образцов как ППМ с АФАР и в широком спектре других радиотехнических изделий и систем, выпускаемых многими предприятиями.

### 10.1.2 ЭКБ и технологии изготовления СВЧ приемопередающих модулей

Как было отмечено, отечественная промышленность по уровню технологий производства современной СВЧ ЭКБ (МИС и СнК), ППМ и радиотехнических систем сильно отстает от развитых стран. В связи с этим СВЧ тракты ППМ в России зачастую создаются по устаревшим технологиям, не позволяющим получать приемлемые ТТХ изделий на мировом уровне. Состояние развития технологий СВЧ ЭКБ в России и сравнение с зарубежным уровнем приведено на рисунке 10.3.

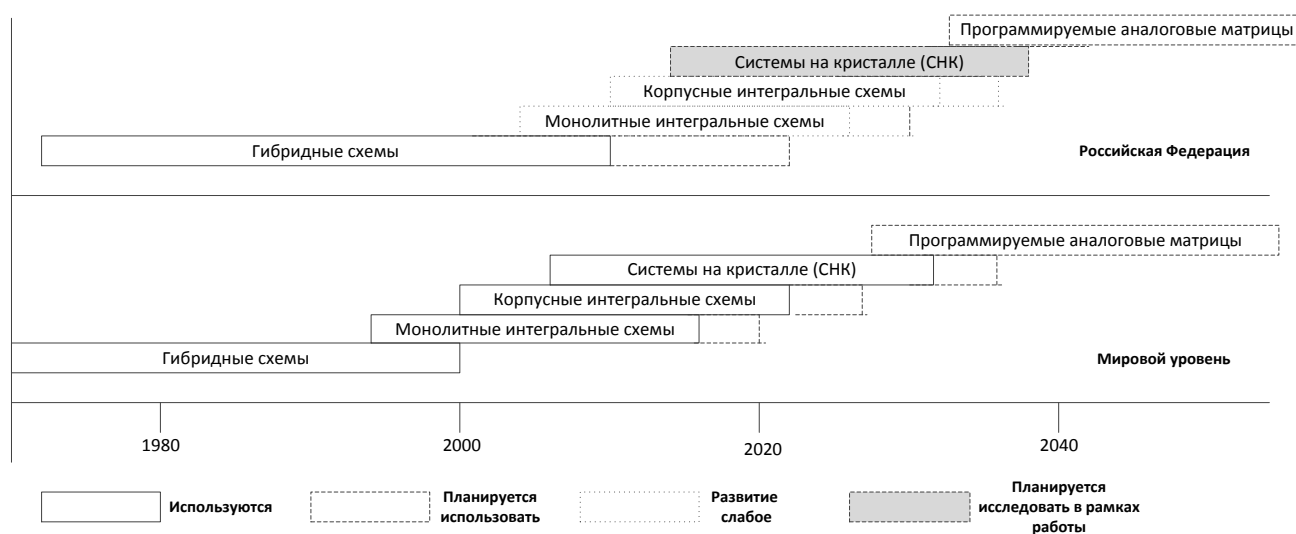


Рисунок 10.3 – Состояние развития технологий СВЧ ЭКБ в России и за рубежом

Приведем сравнительный обзор технологических вариантов реализации СВЧ РЭА и, в частности, СВЧ ППМ.

### **Технологии СВЧ ГИС**

В России для производства СВЧ блоков используются преимущественно технологии ГИС. В этом случае микросхемы, пассивные и активные дискретные элементы размещаются на печатных платах (ПП) или подложках и соединяются с помощью отдельных проводников, проводников на ПП, микрополосковых перемычек либо полосково-коаксиальных переходов. Подобные блоки имеют низкие ТТХ, неприемлемо большие габариты, низкую технологичность и надежность. Пример СВЧ блока четырехканального ППМ, выполненного по гибридной интегральной технологии, приведен на рисунке 10.4.

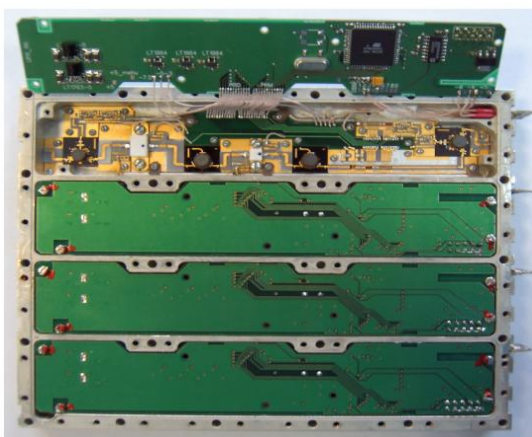


Рисунок 10.4 – Четырехканальный СВЧ ППМ, изготовленный по технологии ГИС (габаритные размеры – десятки сантиметров)

### **Технологии СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС**

В связи с недостатками технологии СВЧ ГИС в России и за рубежом переходят на более совершенные технологии. В частности, используется технология производства СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС. Микросхемы представляют собой законченные функциональные узлы, упакованные в корпус (рисунок 10.5). Такие ИС содержат один или несколько полупроводниковых кристаллов монокристаллических интегральных схем (МИС), размещенных на подложках и соединенных между собой и с выводами микросхемы аналогичными предыдущему примеру способами. Преимущество в сравнении с гибридными технологиями – большая степень интеграции за счет объединения в ИС одного или нескольких законченных функциональных блоков.

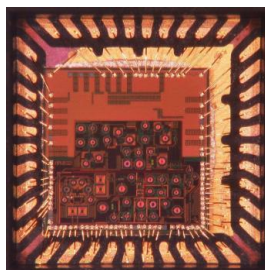


Рисунок 10.5 – Выполненная по SiGe технологии диаграммообразующая ИС  
в корпусе для ППМ АФАР X-диапазона

К сожалению, в Российской Федерации разработка и производство корпусированных СВЧ ИС развиты слабо по причине узкой номенклатуры, низких ТТХ, отсутствия многофункциональных компонентов. Создание перспективных СВЧ ППМ на основе корпусированных ИС представляется проблематичным по нескольким причинам: затруднительно достижение высоких ТТХ и высокой плотности монтажа СВЧ узлов; рынок отечественных корпусированных ИС не развит и, скорее всего, быстро развиваться не будет вследствие наличия более перспективных технологий; зарубежные образцы не поставляются по причине ограничения экспорта.

### Технологии СВЧ МИС и многокристалльных модулей

Более перспективной элементной базой являются бескорпусные МИС СВЧ диапазона. За рубежом СВЧ МИС начали использоваться в радиоаппаратуре, начиная с 1990-х годов, и в настоящее время являются самым распространенным типом СВЧ ЭКБ. Блок СВЧ ППМ на основе МИС может быть построен по технологии многокристалльных модулей, когда несколько функционально различных бескорпусных МИС размещаются на одной подложке (например, полупроводниковой или из низкотемпературной керамики) и объединяются между собой. Такая технология значительно улучшает ТТХ изделий, заметно снижает габариты СВЧ узлов (до единиц миллиметров). Примеры GaAs МИС малошумящего усилителя (МШУ) диапазона 3-20 ГГц [40] и ППМ X-диапазона, выполненного в виде многокристалльного модуля на основе GaAs МИС, приведены на рисунке 10.6.

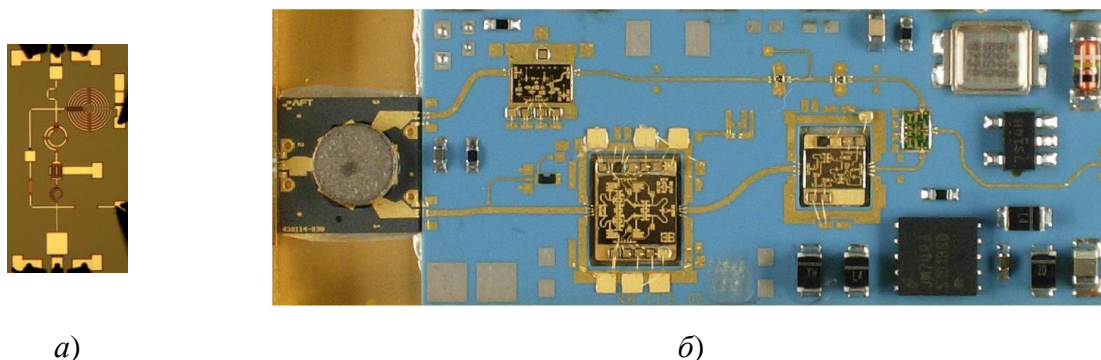


Рисунок 10.6 – GaAs МИС малошумящего усилителя диапазона 3-20 ГГц (а);  
ППМ X-диапазона в виде многокристалльного модуля на основе GaAs МИС (б)

Нужно отметить, что разработка и производство корпусированных и бескорпусных СВЧ ИС является самым дорогостоящим технологическим процессом в производстве ППМ.

Рядом предприятий в области производства радиотехнических систем и компонентов для них (ФГУП НПП «Исток», г. Фрязино [10, 11], АО «НИИПП» г. Томск, ЗАО НПФ

«Микран», г. Томск, АО «ОКБ Планета», г. Великий Новгород, РНИИРС, г. Ростов-на-Дону, АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург и др.) освоены технологии производства СВЧ МИС на основе материала GaAs. Эти технологии обеспечивают рабочие частоты изделий до 12-15 ГГц (для переключательных схем - до 20 ГГц и выше), но имеют низкую степень интеграции. На ПАО «Микрон» (г. Зеленоград) на основе 90 нм и 180 нм КМОП технологий запущено производство цифровых ИС. На базе 90 нм РЧ КМОП технологии выпущены первые экспериментальные образцы СВЧ МИС для ППМ X-диапазона. К достоинствам последней технологии относятся гораздо более высокая степень интеграции СВЧ ИС, а также возможность реализации смешанных цифровых и аналоговых схем на одном кристалле.

Тем не менее, в России серийное производство СВЧ МИС с частотами выше X-диапазона не развито, существующая номенклатура СВЧ МИС слишком узка. Предприятиями-производителями СВЧ электроники мелкосерийно выпускаются отдельные типы МИС в некоторых поддиапазонах частот, главным образом, для собственных нужд.

Кроме того, технологии многокристальных модулей с использованием МИС отдельных СВЧ устройств (функциональных элементов – усилителей, смесителей, коммутирующих и управляющих устройств и т.д.) не обеспечивают наибольшей степени интеграции СВЧ ППМ и, как следствие, наименьших габаритов, высокой надежности и др.

### **Технология «Система на кристалле»**

Достижение наилучших показателей СВЧ узлов и получение возможности создания многофункциональных СВЧ ППМ действительно высокой степени интеграции представляется возможным путем ориентации на современные мировые технологии, к которым относится, в частности, технология СнК. Эта технология начала использоваться за рубежом примерно с 2005 года, первоначально в цифровой технике. СнК – это ИС (чаще всего кремниевая), интегрирующая на одном кристалле несколько различных функциональных блоков, которые образуют законченное изделие для автономного применения в электронной аппаратуре. При разработке СнК используются так называемые виртуальные электронные компоненты, представляющие собой топологию и (или) программный код функционально-законченных блоков и узлов СнК. Для обозначения этих компонентов в англоязычной литературе используются термины «IP-блоки» или «IP-ядра». В русскоязычной литературе устоялся термин «сложно-функциональный блок» (СФБ). СВЧ узел при этом выполняется по технологии планарного многокристального модуля на единой подложке (например, из поликора), где размещаются один или несколько кристаллов СнК и небольшое количество необходимых дискретных компонентов (например, фильтры, цепи развязки), могут использоваться и кристаллы МИС. В многокристальном модуле возможны варианты



гетерогенной (разнородной) интеграции [41], т.е. интеграции нескольких СнК и МИС, выполненных по различным технологиям, что позволяет обеспечить достижение наилучших ТТХ за счет использования лучших показателей отдельных технологий (Si, SiGe, GaAs, GaN и др.).

По технологии СнК за рубежом миллионными партиями изготавливаются не только бытовые устройства связи, телекоммуникаций и др., но и высоконадежные космические и военные системы [42].

Таким образом, представляется возможным создание по технологии СнК высокоинтегрированных СВЧ ППМ различных частотных диапазонов с высокими ТТХ, низким энергопотреблением, технологичных и недорогих в производстве и эксплуатации, стойких к внешним воздействующим факторам. Пример кремниевой ИС 32-канального СВЧ приемопередатчика типа СнК приведен на рисунке 10.7а. На рисунке 10.7б изображен СВЧ ППМ с цифровой обработкой сигнала (ЦОС) для перспективных радиотехнических систем, он использует кристалл СнК.

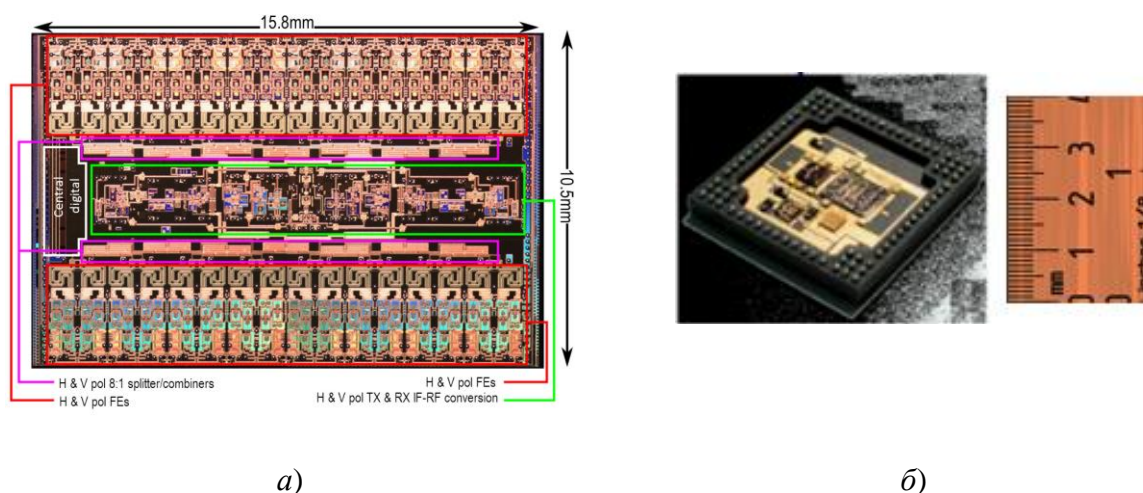


Рисунок 10.7 – Примеры СнК: а) кремниевая ИС 32-канального СВЧ приемопередатчика; б) СВЧ ППМ с ЦОС, использующий СнК

Освоение технологии СнК предполагает теоретические и экспериментальные исследования в части разработки методов проектирования, моделирования и испытаний этих компонентов, путей создания отдельных видов ЭКБ тракта СВЧ, способов построения СВЧ ППМ на базе СнК.

### 10.1.3 Технологии высокоинтегрированной сборки и компоновки СВЧ приемопередающих модулей

Для достижения высокой степени интеграции компонентов радиотехнических систем в течение последних лет за рубежом исследуется и внедряется технология плотной и

объемной упаковки в корпус большого числа компонентов [43-47]: System-in-Package (SiP), System-on-Package (SoP), Module-on-Package (MoP) и др.

Этапы развития зарубежных технологий приведены на рисунке 10.8. Начиная с середины 2000-х годов, разработано значительное количество вариантов интеграции с применением различных технологий для объемного межсоединения компонентов. Эти технологии были применены вначале для создания плотно упакованных цифровых модулей памяти, процессоров и других кремниевых ИС в изделиях компьютерной техники, однако затем часть из них стала применяться при разработках РЧ и СВЧ модулей.

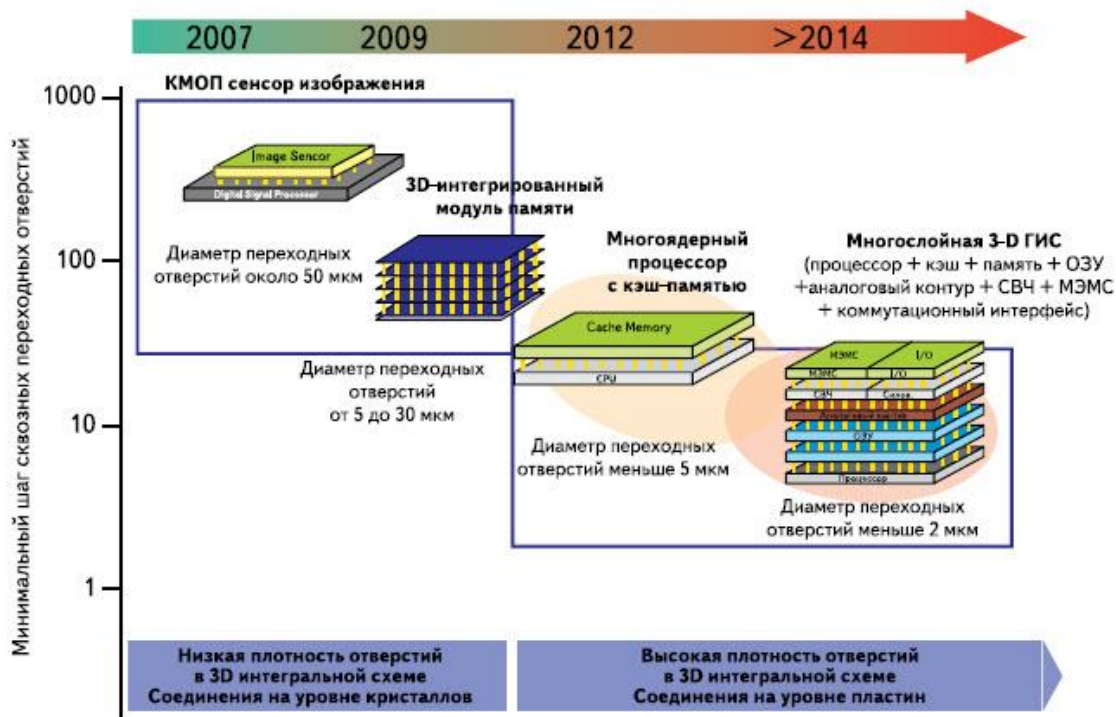


Рисунок 10.8 – Развитие технологий 3D-интеграции компонентов

Один из вариантов 3D-интеграции в одной конструкции оптоэлектронных и РЧ аналоговых компонентов, а также цифровых компонентов для ЦОС, предложенный в подразделении «The Georgia Tech 3D Systems Packaging Research Center» Технологического университета Джорджии (США), представлен на рисунке 10.9.

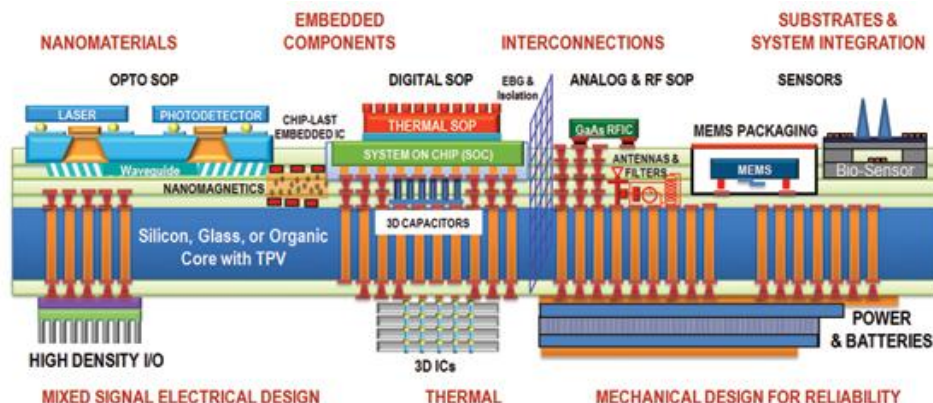


Рисунок 10.9 – Технология 3D-интеграции компонентов

На рисунке 10.10 показана компоновка перспективного СВЧ приемопередающего модуля с ЦОС, в один корпус с которым интегрируется планарный антенный излучатель. На основе таких модулей собираются многоканальные цифровые антенные решетки (ЦАР) и цифровые АФАР (ЦАФАР), которые могут располагаться на плоской или произвольной поверхности.

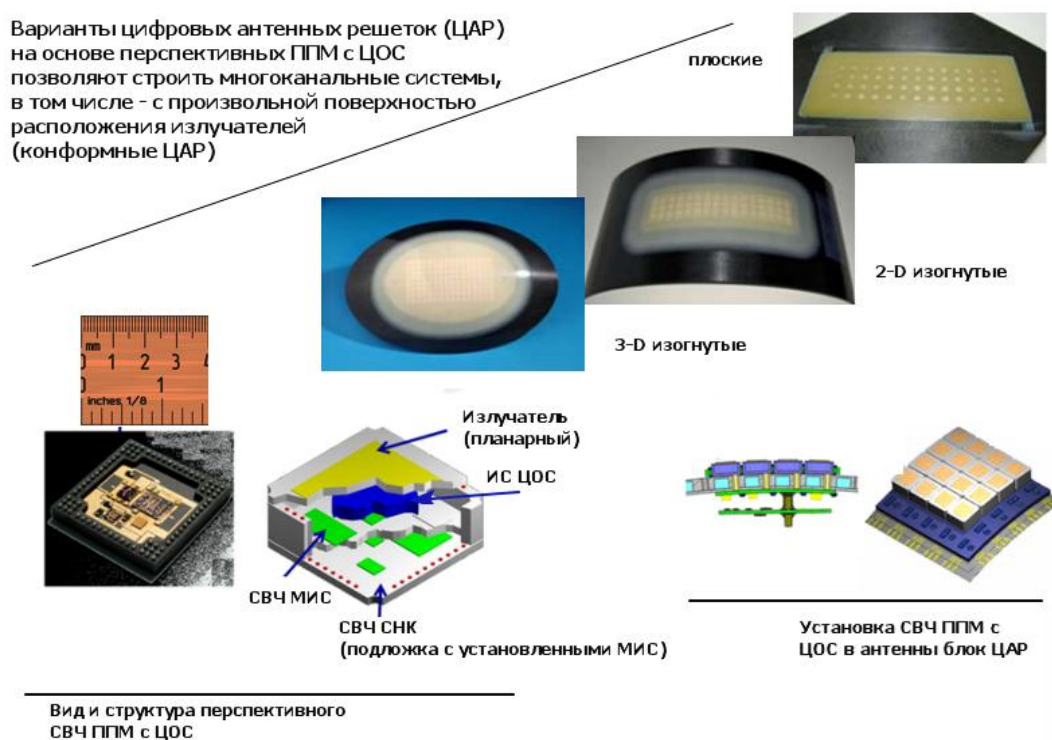


Рисунок 10.10 – Компоновка перспективного СВЧ ППМ с ЦОС и излучателем, цифровые антенные решетки на основе таких модулей

Около восьми лет назад появилась новая технология интеграции – встраиваемые компоненты внутри ПП или полупроводниковых подложек. Формируется печатный узел со сложной 3D структурой, в которой как дискретные, так и пленочные компоненты расположены внутри самих ПП (либо подложек). В качестве дискретных компонентов используются, в частности, полупроводниковые ИС, которые могут представлять собой либо отдельные радиоэлектронные устройства, либо целые узлы или модули (например, РЧ ППМ). Помимо уменьшения размеров элементов, существенные преимущества достигаются за счет гетерогенной интеграции. Это позволяет совместить в одном корпусе элементы, изготовленные с применением различных технологических маршрутов и, соответственно, оптимизированные по разным характеристикам. Помимо значительного упрощения технологии сборки, увеличивается функционал изделий, уменьшаются их габариты и повышается надежность.

За рубежом исследования в указанных направлениях ведутся главным образом в США и Германии, например, такими ведущими компаниями, как Qualcomm, Nec Electronics

и др. Разработки относятся к высокотехнологичным областям промышленности, подпадают под ограничение экспорта технологий, подробности в открытой литературе не раскрываются.

#### **10.1.4 Основные особенности технологических процессов Si/SiGe/GaAs/GaN**

В настоящее время в промышленном производстве СВЧ МИС используются следующие основные полупроводниковые технологии:

1) Технология полевых транзисторов CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) на основе кремния Si; технология BiCMOS на основе соединения кремний-германий SiGe, объединяющая технологию гетеробиполярных транзисторов и CMOS-технологию; технология "кремний-на-изоляторе" КНИ (SOI –Silicon On Insulator) с высокоомными кремниевыми подложками, на базе которых могут быть реализованы CMOS (а в последнее время - и BiCMOS) технологические процессы.

2) Технологии на основе полупроводниковых соединений III-V. К ним относятся, в частности, технологии полевых гетероструктурных транзисторов HEMT (High Electron Mobility Transistor), pHEMT (псевдоморфные) и mHEMT (метаморфные) технологии на подложках GaAs, HEMT-технологии на подложках InP; технологии биполярных гетероструктурных транзисторов HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) на подложках GaAs и InP.

3) Технологии полевых гетероструктурных транзисторов на основе III-нитридов. Наиболее распространенными из этой группы являются технологии на основе нитрида галлия GaN на подложках из сапфира Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, карбида кремния SiC и кремния Si (111).

Следует отметить, что большинство указанных технологий относятся к нанотехнологиям высокого уровня сложности, так как полупроводниковые гетероструктуры являются неоднородными (слоистыми) и могут включать большое число (до 20 и более) полупроводниковых слоев с различными свойствами, толщина которых может быть менее 2-4 нм.

В настоящее время освоено промышленное производство СВЧ МИС на основе HEMT- и HBT-технологий с топологической нормой (длиной затвора для полевых транзисторов) 50-70 нм, также находятся на стадии исследования и освоения технологии с топологической нормой до 30 нм. Кроме того, освоены промышленные кремниевые CMOS-технологии изготовления ИС для вычислительной техники с топологической нормой до 5-7 нм, BiCMOS-технологии для аналоговых и аналого-цифровых ИС с топологической нормой до 28-32 нм.

Параметры СВЧ МИС во многом определяются свойствами материалов, на базе которых они производятся. В связи с этим в таблице 10.1 представлены основные характеристики полупроводниковых материалов для изготовления СВЧ МИС. Такие характеристики материала, как подвижность и скорость электронов, определяют максимальную рабочую частоту СВЧ МИС. Напряженность пробоя определяет максимально допустимые напряжения и, в конечном счете, максимальную мощность полупроводниковых приборов.

Таблица 10.1 – Характеристики полупроводниковых материалов

Полупроводниковый материал	Si	GaN	GaAs	InGaAs	InAs	InSb
Подвижность электронов $\times 10^3$ ( $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ )	0,6	1,6	4,5	8	16	30
Скорость электронов ( $10^7$ см/с)	1,0 (в насыщении)	2,5 (в насыщении)	2 (в насыщении)	2,7 (пиковая)	4 (пиковая)	5 (пиковая)
Ширина зоны (эВ)	1,2	3,4	1,43	0,72	0,36	0,18
Напряженность пробоя (МВ/см)	0,6	3,5	0,6	0,4	0,1	0,01

Сравнительные характеристики существующих в настоящее время основных технологий изготовления СВЧ МИС приведены в таблице 10.2.

Таблица 10.2 – Характеристики основных технологий изготовления СВЧ МИС

Технология	GaAs MESFET	GaAs pHEMT	GaAs mHEMT	InP HEMT	InP HBT	GaN HEMT	Si CMOS	SiGe BiCMOS
$f_t$ , ГГц	90 (150 нм)	150 (50 нм) 100 (150 нм)	450 (50 нм) 120 (150 нм)	560 (30 нм) 160 (150 нм)	600	150 (60 нм)	170 (45 нм)	300 (200 нм) 200 (100 нм)
$NF_{\min}$ , дБ	0,7 (10 ГГц) 3,3 (40 ГГц)	0,4 (10 ГГц) 1,2 (40 ГГц) 2,6 (90 ГГц)	0,4 (10 ГГц) 1,2 (40 ГГц) 2,5 (90 ГГц)	0,25 (10 ГГц) 0,6 (40 ГГц) 1,2 (90 ГГц)	-	1,1 (10 ГГц) 2,3 (20 ГГц)	0,7 (10 ГГц) 1,2 (25 ГГц)	1,5 (25 ГГц)
$P_{\text{out}}$ , Вт/мм	0,7-0,8 (10 ГГц)	0,8-1,0 (10 ГГц)	0,8-1,0 (10 ГГц)	0,4 (60 ГГц)	-	10 (10 ГГц)	-	-
Пробивное напряжение, В	10 (150 нм)	10 (150 нм)	10 (150 нм)	10	8	50	3	3
Стадия внедрения	производство	производство	производство	производство	производство	испытания	производство	производство
Топологическая норма в производстве, нм	150	150	150	150	-	-	-	-
Диаметр подложки, мм	150	150	150	100	75	-	200	200

В таблице 5.2 обозначено:  $f_s$  – граничные частоты усиления по току,  $NF_{\min}$  – коэффициент шума,  $P_{\text{out}}$  – мощность.

На основе анализа литературы, сведений о современных и перспективных технологиях зарубежных компаний, а также данных таблиц 5.1 и 5.2 существующие технологии изготовления СВЧ МИС можно охарактеризовать следующим образом.

### **10.1.5 Технологии на основе кремния (КМОП) и соединения кремний-германий (БиКМОП)**

Кремниевая технология полевых транзисторов КМОП (комплиментарная структура металл-оксид-полупроводник; англ. CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) традиционно применяется при создании устройств цифровой техники, например, микропроцессоров. Характерной ее чертой является использование на подложке из объемного кремния комплиментарных и симметричных пар MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) транзисторов *p*- и *n*-типа. В связи с непрерывным уменьшением топологической нормы (до 28 нм и менее) MOSFET-транзисторы в настоящее время имеют граничные частоты до 100-150 ГГц и, следовательно, могут использоваться в СВЧ диапазоне, несмотря на то, что кремниевые СВЧ МИС по-прежнему уступают по значениям параметров компонентам, выполненным на  $A_3B_5$  [48, 49].

В данной технологии используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости. Отличительной особенностью КМОП-схем по сравнению с биполярными технологиями (ГТЛ, ЭМС) является очень малое энергопотребление в статическом режиме (энергия потребляется только во время переключения состояний). Отличием структуры КМОП по сравнению с другими МОП-структурами (*N*-МОП, *P*-МОП) является наличие как *n*-канальных, так и *p*-канальных полевых транзисторов на кристалле; вследствие меньшего расстояния между элементами КМОП-схемы имеют более высокую скорость действия и меньшее энергопотребление, однако характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки [49, 50].

Структуры *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов аналогичны и отличаются видом носителей (электроны и дырки соответственно), переносящих заряд от истока к стоку при приложении порогового напряжения. Так, *n*-МОП обозначает транзистор, в котором области истока и стока имеют *n*-тип проводимости, сформированные в подложке *p*-типа. Область между истоком и стоком формирует канал, над которым размещен металлический или поликремниевый затвор, отделенный от канала диэлектриком – оксидом кремния [50]. При подаче на затвор положительного напряжения возникает электрическое поле, отталкивающее от него носители заряда *p*-типа - положительные дырки (рисунок 10.11). В то же время оно притягивает в область канала электроны. По достижении порогового напряжения количество электронов в канале существенно превосходит количество дырок –

происходит инвертирование. При этом образуется проводящий канал n-типа, соединяющий исток со стоком, причем подзатворный диэлектрик предотвращает попадание электронов в затвор [50].

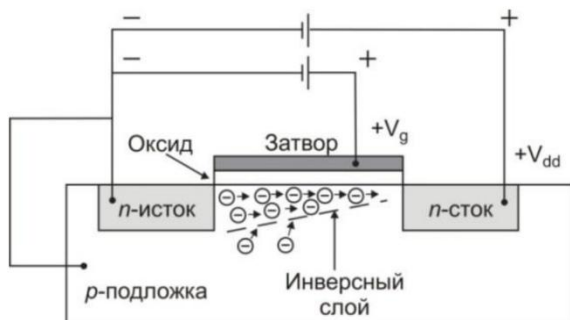
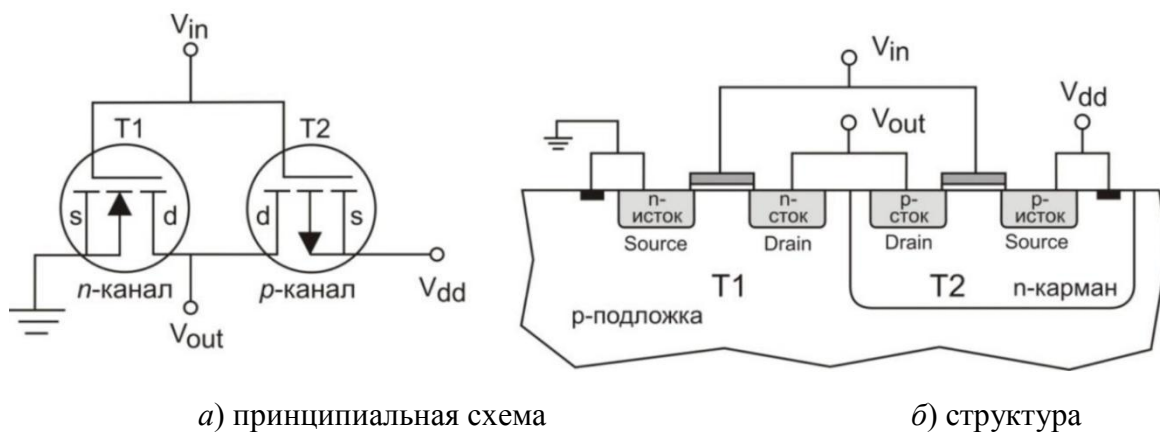


Рисунок 10.11 – Структура n-MOS транзистора

Аналогично, p-MOS транзистор содержит исток и сток в виде областей p-типа в подложке n-типа, а основными переносчиками заряда являются дырки. Подача на затвор отрицательного напряжения ведет к инвертированию и формированию канала p-типа. Объединение пары дополняющих друг друга (комплиментарных) n-MOS и p-MOS транзисторов в единую КМОП структуру позволяет получить, например, схему инвертора, широко применяемого в современных микросхемах (рисунок 10.12)



а) принципиальная схема

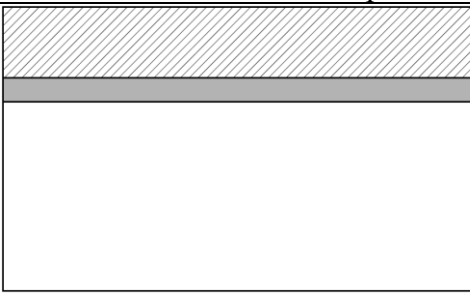
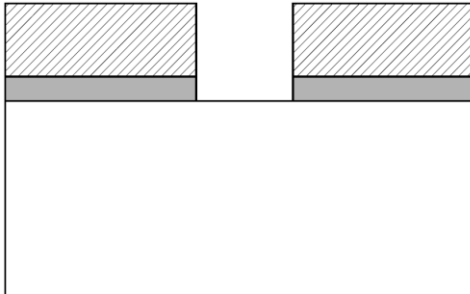
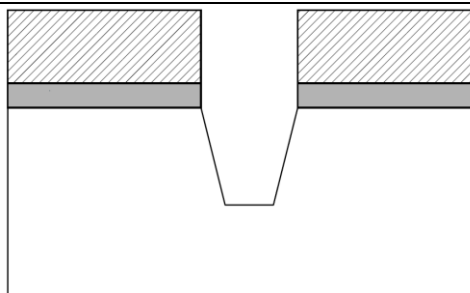
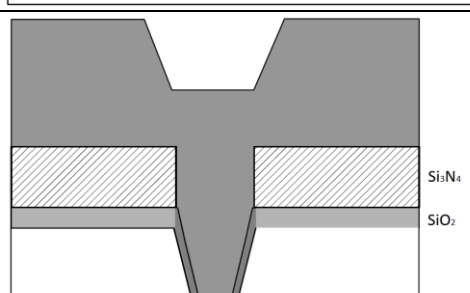
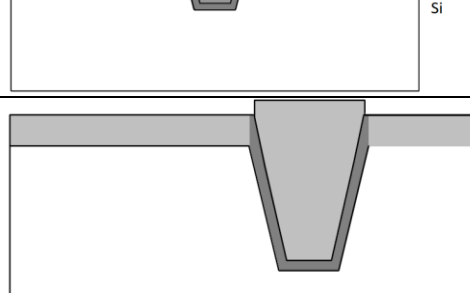
б) структура

Рисунок 10.12 – КМОП инвертор

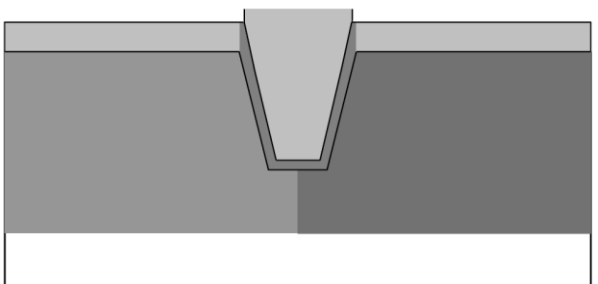
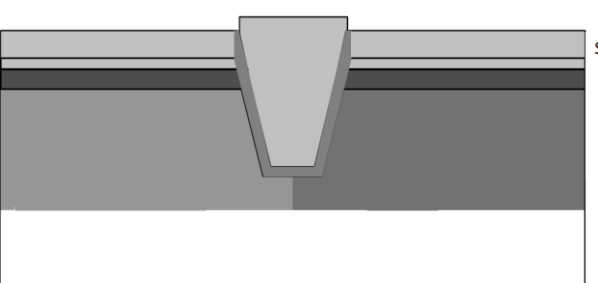
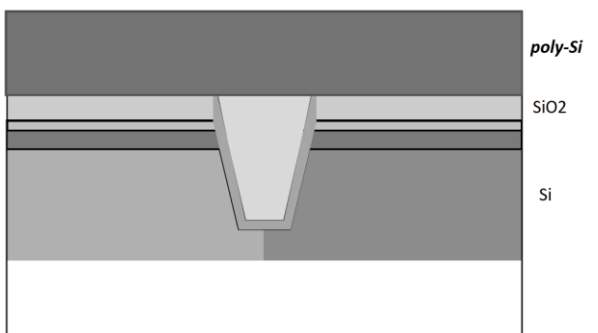
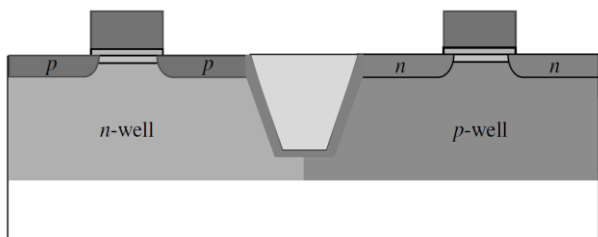
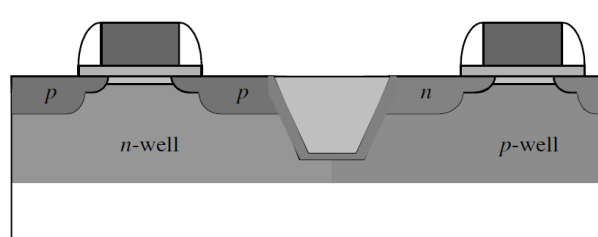
В инверторе транзисторы T1 и T2 соединены последовательно так, что к их затворам подведено общее входное напряжение  $V_{in}$ , а стоки имеют общий выход  $V_{out}$  (рисунок 10.12 а). В n-канальном транзисторе T1 подложка p-типа обозначена стрелкой, направленной внутрь, а в p-канальном транзисторе T2 подложка n-типа обозначена стрелкой, направленной наружу [50]. В стационарном состоянии один из транзисторов комплиментарной пары всегда закрыт, поэтому ток открытого транзистора зависит от тока утечки p-n переходов сток-подложка и при комнатной температуре равен единицам нА. Это обеспечивает мощность рассеивания одного инвертора в статическом режиме порядка  $10^{-8}$  Вт. КМОП-процесс с поликремневым затвором (poly gate) широко используется в настоящее время

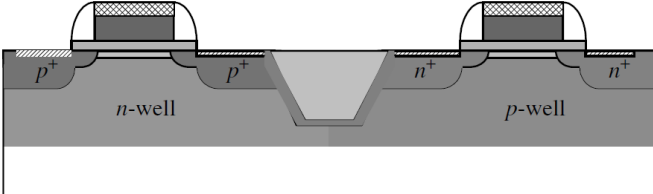
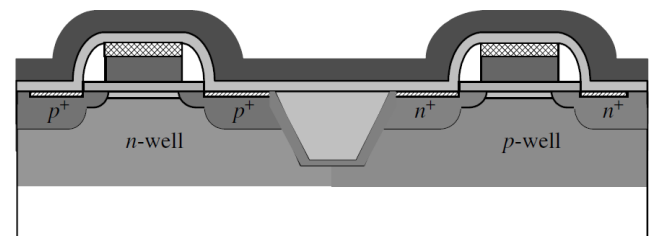
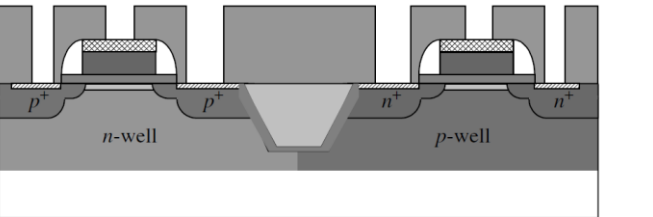
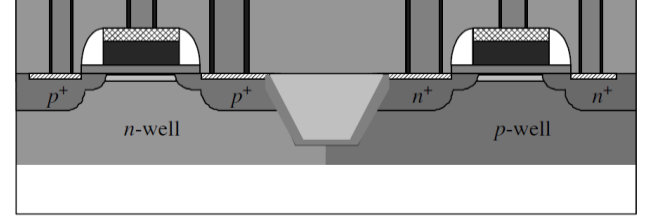
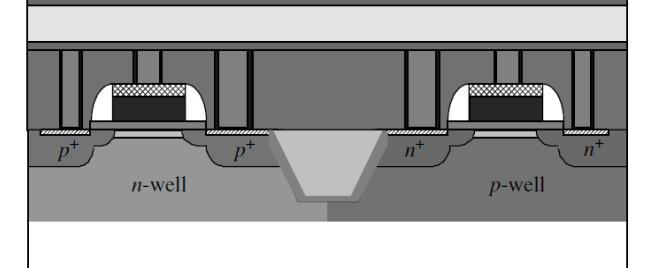
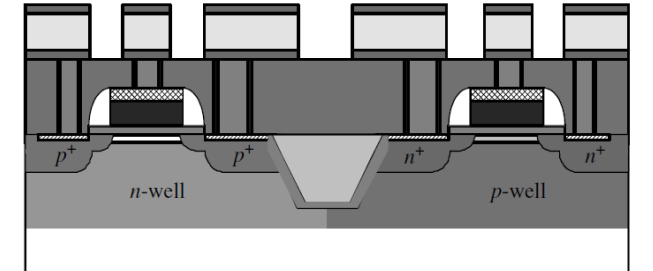
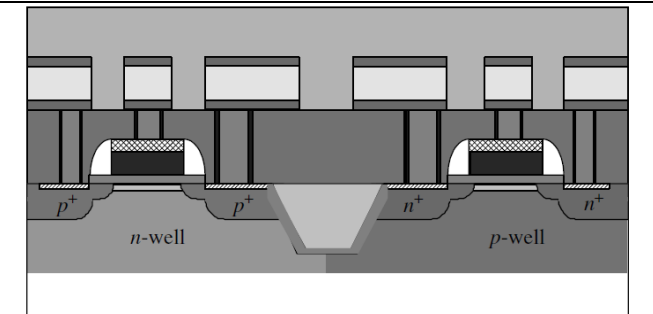
для изготовления ИС. Основные этапы технологического процесса изготовления МОП-транзистора по КМОП-технологии с затвором из поликремния описаны в таблице 10.3 [51].

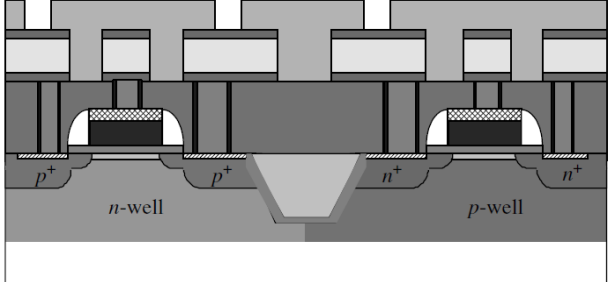
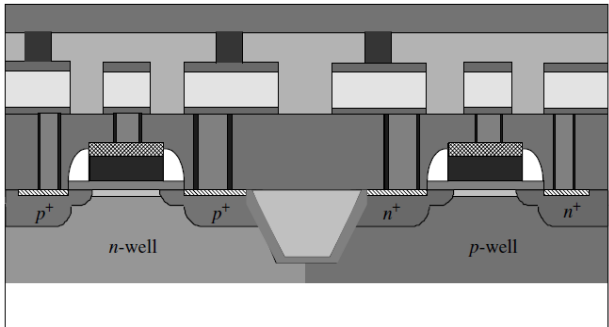
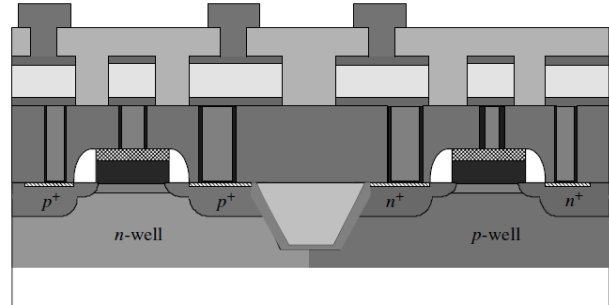
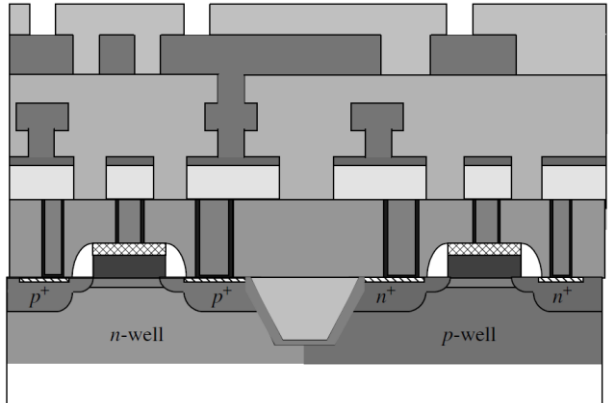
Таблица 10.3 – Основные технологические операции технологии КМОП

№	Схема операции	Описание
1		Подложка после окисления и формирования слоя нитрида кремния
2		Удаление слоя нитрида и оксида кремния для создания области щелевой изоляции (STI - Shallow trench isolation)
3		Травление STI
4		Химическое осаждение оксида кремния в высокоплотной плазме (HDPCVD)
5		Химико-механическая планаризация (Chemical mechanical polishing, CMP)



№	Схема операции	Описание
6		Формирование <i>n</i> -кармана
7		Формирование <i>p</i> -кармана
8		Имплантация для увеличения пробивного напряжения
9		Создание подзатворного окисла и осаждение поликремния
10		Создание затвора из поликремния для <i>n/p</i> -МОП транзистора и формирование областей LDD (Lightly Doped Drain) для транзисторов обоих типов
11		Создание нитридного спейсерного слоя и имплантация областей стока/истока.

№	Схема операции	Описание
12		«Силицидный» процесс для стока/истока
13		Создание изолирующего слоя
14		Травление к контактным областям
15		Металлизация к областям стока/истока и затвора
16		Осаждение слоя Металл 1
17		Травление слоя Металл 1
18		Формирование межслойной изоляции

№	Схема операции	Описание
19		Травление отверстий к контактам
20		Осаждение слоя Металл 2
21		Травление слоя Металл 2
22		Формирование изоляции, пассивация, вскрытие контактных окон

Монокристаллический кремний получают методом Чохральского (вытягивание из расплава). Скорость вытягивания и скорость охлаждения будут определять диаметр стержня. Также на данном этапе можно вводить в необходимом соотношении легирующий материал в расплав. Так как активные элементы создаются в ограниченном слое поверхности кристалла (на глубине  $<10$  мкм), кристалл нарезается на множество тонких пластин. Данная пластина представляет собой тонкую (250—1000 мкм) пластину диаметром в современных технологических процессах до 450 мм, на поверхности которой с помощью операций планарной технологии формируется массив дискретных полупроводниковых приборов

или интегральных схем. Чем больше диаметр пластин, тем больше на ней можно разместить ИС и соответственно снизить стоимость производства в целом [51, 52].

Чтобы получить области с высокой степенью легирования, которые требуются некоторым активным устройствам, используют процесс эпитаксии. КМОП ИС обычно изготавливаются на подложке р-типа (100), легированной бором. Для обеспечения лучшей защиты от эффекта «защелкивания» КМОП-структуры, подложка обычно легируется настолько высоко, насколько это возможно, (ограничение лишь по растворимости лигатуры в твердой фазе), чтобы минимизировать удельное сопротивление подложки.

Создание приборов и устройств на поверхности подложки в планарном исполнении заключается в процессе селективного осаждения либо удаления материала в некоторых регионах. Фотолитография отвечает за процесс создания топологии, то есть ориентации и взаимного расположения элементов и контактов ИС на подложке [51, 52].

Самое широкое применение получила технология КМОП для РЧ и цифро-аналоговых устройств. Во многом данные технологии заимствуют возможности цифровой КМОП-технологии, с дополнительными компонентами, такими как поликремниевые резисторы, изолированные МДМ-конденсаторы, дополнительные высоковольтные транзисторы, индуктивности с высокой добротностью, варакторные диоды. В таблице 10.4 приведены основные особенности для РЧ и аналого-цифровых КМОП-устройств [52].

Таблица 10.4 – Основные особенности РЧ и аналого-цифровых КМОП-устройств

Активные компоненты	Низковольтные цифровые НВ КМОП
	Высоковольтные аналоговые ВВ КМОП
	НВ и ВВ изолированные n-МОП-ПТ
	«Drain-extended» n-МОП-ПТ (DECMOS)
Пассивные компоненты	Поликремниевые резисторы
	МДМ-конденсаторы
	Индуктивности
	Варакторные диоды
Требования к компонентам	Аналоговые КМОП (1.8-3.3 В)
	Резисторы $R_s \sim 300 \text{ Ом/кв.}$
	Конденсаторы с удельной емкостью $\sim 1 \text{ фФ/мкм}^2$
	DECMOS ( $V_p = 5\text{В}$ )
	Индуктивность ( $Q > 10$ )
	Низкий шум и минимальное рассогласование
Образцы устройств	Сотовые телефоны, передатчики, GPS, WLAN, Bluetooth, Цифровые радиосистемы, аудио конверторы, высокопроизводительные конверторы данных

С целью упрощения технологии резисторы целесообразно формировать в полупроводниковых слоях, используемых для создания транзисторов (рисунок 10.13).

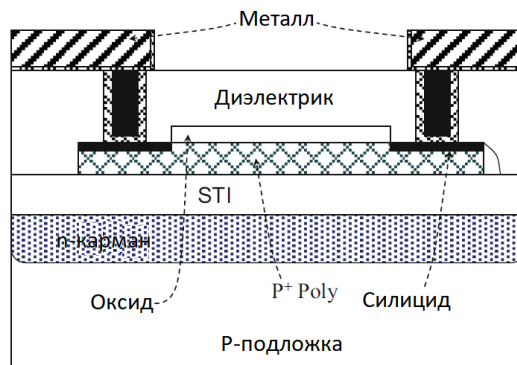


Рисунок 10.13 – Поликремниевый резистор

МДМ-конденсаторы (рисунок 10.14) или lateral flux capacitor (LFC) (рисунок 5.15), могут быть выполнены с использованием существующих слоев металлизации без существенного усложнения технологического процесса. В зависимости от подхода к разработке топологии и норм проектирования можно получить конденсаторы с различной удельной емкостью. На рисунке 10.15 разные обкладки конденсатора обозначены светлым и темным тоном.

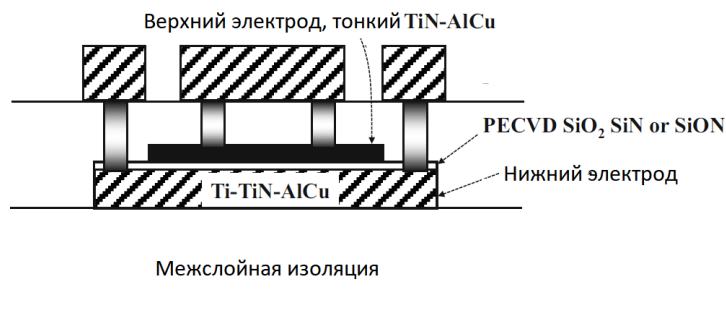


Рисунок 10.13 – МДМ-конденсатор

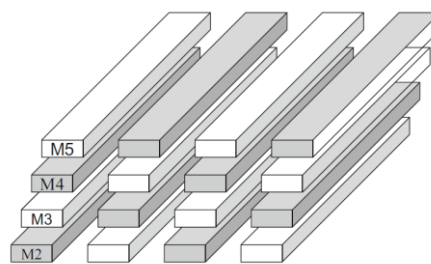


Рисунок 10.14 – LFC конденсатор

Пленочные индуктивные элементы представляют собой плоские прямоугольные или круглые спирали (рисунок 10.15), формируемые на основе тех же пленок, что и проводники [53].

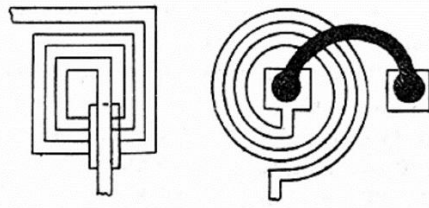


Рисунок 10.15 – Структура индуктивных элементов ИМС

Из-за распространения шума от коммутации логических элементов на чувствительные аналоговые функциональные блоки, в технологический процесс включен модуль для формирования глубокого  $n$ -кармана, в котором формируется структура изолированного  $n$ -МОП транзистора (рисунок 10.16).

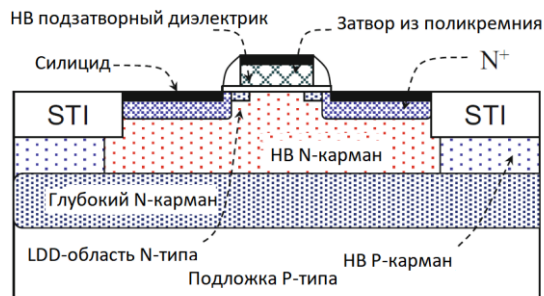


Рисунок 10.16 – Поперечное сечение изолированного  $n$ -МОП-транзистора

Это позволяет совместить на одном кристалле цифровые и аналоговые блоки, упростить конструкцию, и минимизировать непреднамеренные перекрестные помехи в схеме [52].

При создании СВЧ МИС CMOS-технология имеет ряд достоинств по сравнению с НЕМТ-технологиями: позволяет одновременно выполнить функции обработки аналоговых и цифровых сигналов в одном кристалле, т.е. реализовать концепцию «система на кристалле» (SOC – System On a Chip); имеет меньшие размеры компонентов, в связи с чем допускает более плотную упаковку элементов; разрешает увеличить площадь кристалла (до  $4 \text{ см}^2$ ) и может содержать большее число транзисторов на кристалле; кремниевые подложки могут иметь диаметр до 300 мм; кремниевые МИС значительно дешевле МИС на основе полупроводников типа III-V и III-нитридов.

Технология БиКМОП (англ. bipolar complementary metal oxide semiconductor, BiCMOS) на основе материала SiGe предполагает изготовление на одной подложке биполярных гетероструктурных (HBT) транзисторов и полевых MOSFET-транзисторов (по CMOS-технологии). Она также использует кремниевую подложку и разрешает одновременно реализовать аналоговые и цифровые функции. При этом технология BiCMOS сочетает достоинства CMOS-технологии (малое потребление мощности, высокая степень интеграции) и биполярной технологии (малые фазовые шумы, низкий коэффициент шума). В

технологии BiCMOS HBT-транзисторы на основе SiGe более высокочастотные, чем кремниевые MOSFET-транзисторы в CMOS-технологии, их граничная частота может достигать 190 ГГц (при базовом размере 0,25 мкм) и 300 ГГц (при 0,13 мкм). Однако в связи с затратами при формировании HBT-транзисторов BiCMOS-технология дороже технологии CMOS [54].

БиКМОП-технология характеризуется изготовлением на одном кристалле транзисторов — n-МОП- (1), p-МОП- (2), n-p-n- (3), p-n-p- (4) транзисторов, а также целого ряда пассивных элементов. На рисунке 10.17 приведен пример БиКМОП-технологии.

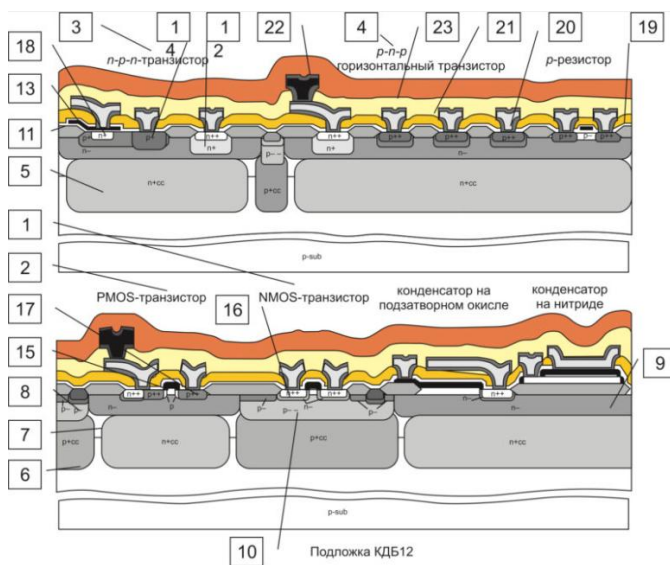


Рисунок 10.17 – Типовая структура элементной базы, изготовленной по БиКМОП-технологии

На подложке *p*-типа проводимости методом диффузии или ионным легированием сурьмы (или мышьяка) формируют *p+*-скрытый слой 5. Методом диффузии или ионным легированием бора формируют *p+*-скрытый слой 6. Выращивается эпитаксиальный слой *n*-типа проводимости 7 толщиной 2,4 мкм с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см. Методом диффузии или ионного легирования формируют слой «разделение» *p*-типа 8. Формируют карманы *n*-типа 9 и *p*-типа проводимости 10. Наносится маска Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, проводится легирование бора (*p*-тип), делается локальное окисление, удаляется Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, проводится легирование фосфора (*n*-тип). Формируют LOCOS-изоляция 11 толщиной 0,52 мкм. Ионным легированием фосфора формируют глубокий коллектор 12. Ионным легированием бора формируют слои «база» 13 и «*p+*-база» 14. Общим подлегированием бора обеспечивают требуемый порог *p*-МОП-транзистора. Для *n*-МОП-транзистора регулирование порога проводится подлегированием в канал. Далее выращивают подзатворный окисел толщиной 0,013 мкм. Наносят поликристаллический кремний 15 толщиной 0,35 мкм. Легируют его диффузией фосфором (удельное сопротивление 90 Ом/кВ.), проводят травление. Проводят леги-

рование n-истоков (фосфор) и p+-истоков (мышьяк) 16. Так же, как и в КМОП-технологии, активация легированных фосфором n-истоков и легированных бором p-истоков проводится после плазмохимического травления «спейсеров». Причем слой «затвор» 15 является одно-сторонней маской для n+— и p+-истоков, а слой «затвор» со «спейсерами» — для n— и p-истоков. Затем проводят легирование p+-истоков 17. Формируют p+-эмиттер n-p-n-транзистора 18. Для этой цели используют поликристаллический кремний, легированный фосфором для уменьшения глубины p-n-перехода. Наносят первый междууровневый диэлектрик 19 СТО (среднетемпературный окисел) толщиной 0,12 мкм и БФСС (борофосфоросиликатное стекло) толщиной 0,65 мкм. Затем наносят первый слой металла 20 толщиной 0,5 мкм. Наносят второй слой диэлектрика 21 (ПХО). Вскрывают вторые междууровневые контакты. Наносят второй слой металла 22 толщиной 0,9 мкм. Наносят пассивирующее покрытие 23 — 0,4 мкм ПХО и 0,7 мкм Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [54, 55].

В то же время технологии на основе материалов Si и SiGe имеют два значительных недостатка в сравнении с НЕМТ-технологиями. Во-первых, при одинаковой топологической норме CMOS- и BiCMOS-технологии уступают в значении предельной частоты НЕМТ- и НВТ-технологиям на базе соединений III-V, особенно на базе InP (при топологической норме 50 нм предельная частота CMOS-транзистора составляет 170 ГГц, а НЕМТ-транзистора на InP – 560 ГГц). Тем не менее, рабочие частоты существующих СВЧ МИС на основе CMOS- технологий достигают 150 ГГц, а на основе BiCMOS-технологий - 300 ГГц. Во-вторых, в связи с меньшими значениями пробивных напряжений уровень сигнала СВЧ МИС на Si значительно ниже, поэтому эти технологии не могут применяться для создания усилителей с высокой выходной мощностью [50, 51].

Еще одной проблемой при изготовлении СВЧ МИС на подложках из объемного кремния является значительно меньшее удельное сопротивление Si по сравнению с подложками GaAs и InP, это приводит к уменьшению добротности и увеличению потерь в пассивных элементах МИС (катушках индуктивности, конденсаторах, линиях передачи). Одним из выходов является использование на кремниевой подложке дополнительного изолирующего слоя SiO<sub>2</sub> (технология КНИ, или SOI – Silicon On Insulator), однако это усложняет и удорожает изготовление МИС.

#### **10.1.6 Кремниевые КНИ процессы на полуизолирующих подложках**

Технология изготовления МИС "кремний-на-изоляторе" (КНИ, англ. SOI) – технология, основанная на использовании трехслойной подложки со структурой кремний-диэлектрик-кремний вместо традиционных монокристаллических кремниевых пластин. Технология КНИ позволяет изолировать канал КМОП от кремниевой подложки благодаря буферному



диэлектрическом слое, тем самым снижаются токи утечки и паразитные емкости, что резко повышает ВЧ свойства транзисторов, снижается взаимное влияние компонентов друг на друга, уменьшаются эффекты возникновения паразитных обратных связей и, в конечном итоге, повышает стабильность и плотность упаковки схем.

К недостаткам технологии следует отнести более низкую по сравнению с кремнием теплопроводность, в среднем она в два раза хуже. Кроме того, технология обладает более высокой стоимостью, чем традиционная кремниевая.

Структуры КНИ можно формировать различными технологическими методами. На практике используют структуры двух типов:

1) На массивной диэлектрической подложке формируется тонкий слой монокристаллического кремния. Примером может служить кремний на сапфире (КНС) или кремний на боросиликатном стекле (SOG-silicon on glass).

2) Подложкой является монокристаллический кремний, а тонкий рабочий слой монокристаллического кремния отделен от подложки пленкой диэлектрика, например, из двуокиси кремния.

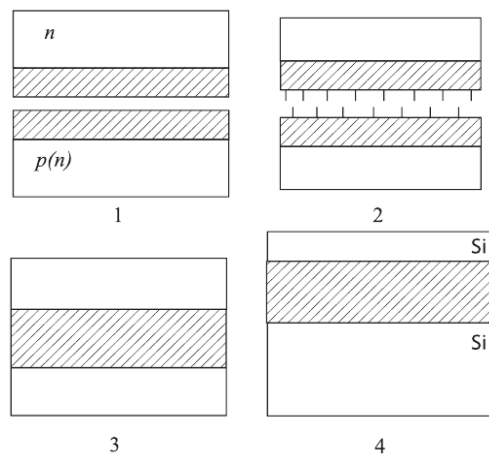
В обоих случаях по существу изготавливаются подложки ИС с островками монокристаллического кремния, предназначенными для формирования в них элементов ИС. Это позволяет отделить производство подложек от производства ИС, и подложки могут изготавливаться на специализированных предприятиях. Основным достоинством такого типа подложек является полная изоляция участков кремния друг от друга, причем исключены короткие замыкания между разводкой и подложкой, так как последняя является диэлектриком. Немаловажным фактором является и то, что с использованием таких подложек можно создавать торцевые *p-n* переходы, имеющие малую площадь, а, следовательно, и низкое значение паразитных емкостей.

Существует много методов формирования КНИ-структур, но наибольшее практическое применение нашли два метода:

1) прямое сращивание (бондинг) окисленных пластин кремния с последующим почти полным удалением одной из них шлифовкой и травлением (BESOI) или, как вариант, удаление части подложки путем ее расщепления пузырьками имплантированного водорода (Smart-Cut SOI);

2) SIMOX-процесс, основанный на ионной имплантации в глубину кремниевой пластины ионов кислорода с последующим отжигом для создания скрытого изолирующего слоя из двуокиси кремния [56].

Схема метода сращивания окисленных пластин кремния приведена на рисунке 10.18.



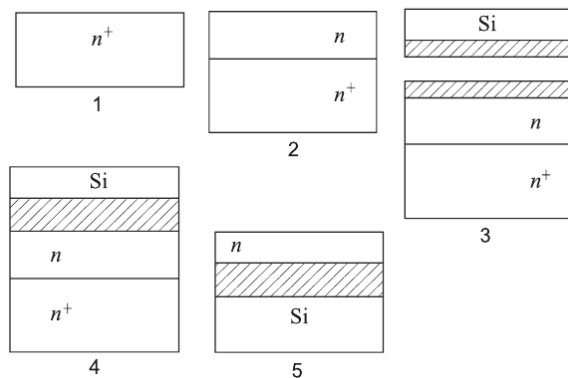
1 - окисление кремниевых пластин; 2 - поверхностные связи окисленных пластин кремния; 3 – термокомпрессионное сращивание пластин кремния; 4 – шлифовка и полировка одной из пластин кремния (формирование КНИ-структуры).

Рисунок 10.18 – Процесс сращивания окисленных пластин кремния

В этом методе используются две окисленные пластины кремния, которые соединяются окисленными плоскостями и подвергаются термокомпрессионной обработке (шаг 1-2). В результате формируется структура, состоящая из исходных пластин кремния, разделенных слоем двуокиси кремния (шаг 3). Плотное сращивание пленок двуокиси кремния объясняется возникновением кислородных мостиков между окисленными поверхностями пластин в результате химического преобразования адсорбированных молекул воды, которое происходит при температурах выше 700°C. Далее одна из кремниевых пластин (рабочая) уменьшается до необходимой толщины (шаг 4) с помощью различных методов:

- химико-механическая полировка;
- плазменное травление;
- жидкостное травление со стоп-слоем (рисунок 10.19).

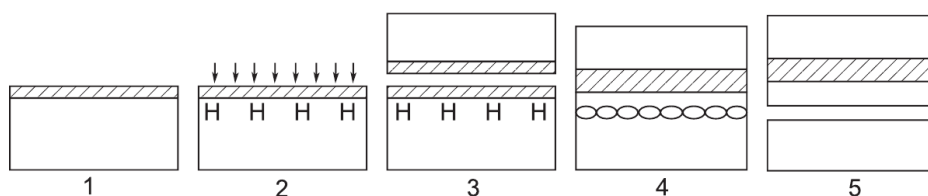
В этом случае используется эффект более быстрого растворения n+-кремния в селективных травителях. Первый способ не позволяет получать сверхтонкие рабочие слои кремния, второй – обладает низкой производительностью и создает поверхностные дефекты, третий – достаточно сложный, что приводит к увеличению стоимости подложки.



1 – исходная пластина кремния; 2 – эпитаксия кремния  $n$ -типа; 3 – окисление кремниевых пластин; 4 – термокомпрессионное сращивание пластин кремния; 5 – удаление кремния  $n^+$  типа с помощью шлифовки, полировки и электрохимического травления в селективном травителе.

Рисунок 10.19 – Метод сращивания кремниевых пластин с использованием стоп-слоя

Наиболее перспективным методом является Smart-Cut-технология получения рабочего слоя. В этом процессе используется эффект образования нанопор (пузырьков) в узком слое, пересыщенном легкими газами, такими как водород, гелий (рисунок 10.20). На первом этапе проводится имплантация водорода или гелия через окисленную поверхность кремниевой пластины на необходимую глубину, определяющую толщину рабочего слоя полупроводника (шаг 1-2). Для обеспечения эффекта пересыщения доза имплантации должна быть не менее  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ .



1 – окисление кремниевой пластины; 2 – ионная имплантация водорода; 3 – термокомпрессионное сращивание кремниевых пластин; 4 – образование пузырьков водорода; 5 – удаление части подложки.

Рисунок 10.20 – Smart-Cut-метод

Далее следует стандартная операция сращивания этой пластины с другой окисленной пластиной при температуре не выше  $300^\circ\text{C}$ . Затем структура подвергается термообработке при  $350\text{--}400^\circ\text{C}$ . При этом происходит собирание водорода в пузырьки на глубине пробега ионов, которые за счет внутреннего давления молекулярного водорода, превышающего предел упругости кремния, отрывают подложку, оставляя на поверхности другой пластины промежуточный диэлектрик с прилегающим к нему тонким слоем монокристал-

лического кремния. Далее следует отжиг структуры при 1200°C с целью устранения поверхностных дефектов в рабочем слое кремния [56].

Процесс формирования ИС на основе КНС (кремний на сапфире)-структуры достаточно прост. На поверхности сапфира методом гетероэпитаксии выращивается пленка монокристаллического кремния. Затем с помощью фотолитографии и травления кремния создают изолированные окислом кремния или канавками островки, в которых формируют активные и пассивные элементы ИС (рисунок 10.21).

К числу достоинств КНС технологии относится следующее:

- малая высота островков кремния (0,5–2 мкм), что позволяет создавать в них области с высоким градиентом концентрации примеси, что имеет важное значение при формировании торцевых  $p-n$  переходов;
- возможность создания торцевых  $p-n$  переходов малой площади;
- технологичность (материал подложки не травится в травителях обычно применяемых для вскрытия окон в пленке двуокиси кремния, что позволяет избежать проблем при проведении процесса фотолитографии);
- высокая механическая прочность сапфира.

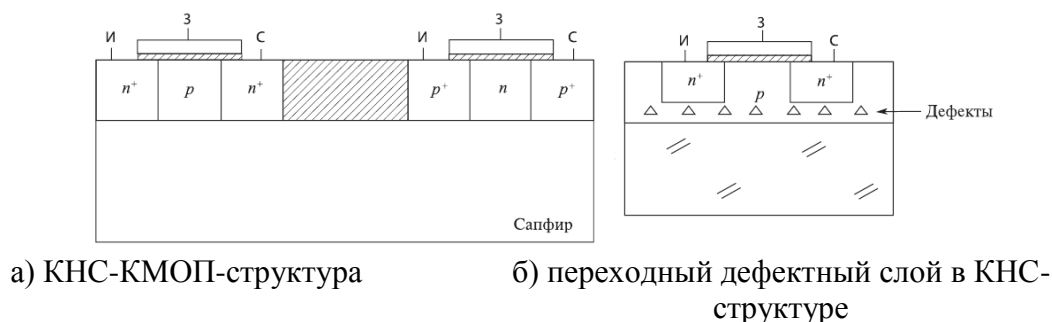


Рисунок 10.21 – КНС структура

Недостатками КНС-технологии являются:

- высокая стоимость сапфировых подложек;
- неоднородность параметров эпитаксиальной пленки кремния по высоте островка. У границы раздела кремний–сапфир повышенная концентрация дефектов роста, число которых при проведении последующих термических операций увеличивается из-за несоответствия ТКР кремния и сапфира;
- подлегирование эпитаксиальной пленки кремния вследствие проникновения алюминия из подложки.

Перечисленные недостатки уменьшают область использования КНС-структур при изготовлении ИС. Поэтому более широкое распространение получили КНИ-структуры. Основное преимущество технологии КНИ состоит в том, что за счет малой толщины по-

верхностного слоя и изоляции транзистора от кремниевого основания удастся многократно снизить паразитную емкость (рисунок 10.22), а значит, и снизить время ее зарядки вкупе с потребляемой мощностью и повысить быстродействие ИС.

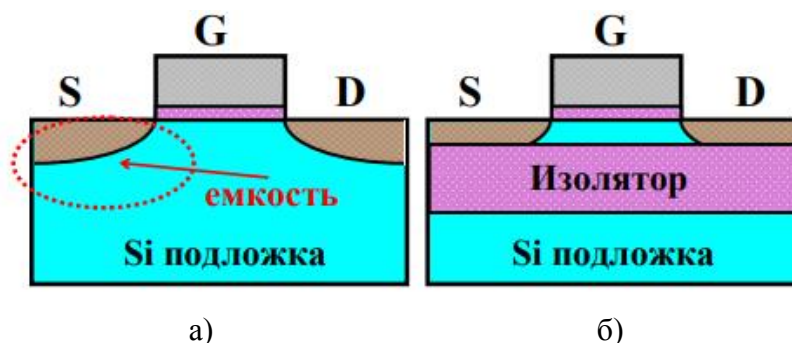


Рисунок 10.22 – Схема структуры МОП-транзисторов, выполненных на объемном кремнии (а) и по технологии КНИ (б)

Технология была впервые представлена компанией IBM и в настоящее время получила широкое внедрение на основных зарубежных фабриках: IBM (Global Foundries) (130, 90, 45 нм), Tower Jazz (180 нм), STMicroelectronics (130, 65, 28 нм), Freescale (130, 90 нм), Peregrine (130, 90 нм, Silicon on Sapphire), XFAB (180, 130 нм). Среди отечественных компаний, КМОП КНИ (CMOS SOI) технологию, можно выделить Микрон (250, 180 нм), НИИ СИ (250 нм), Ангстрем (0,6 мкм).

КНИ–технология признана рядом ведущих мировых фирм (IBM, AMD, Motorola и другими, в том числе в последнее время и Intel) генеральным направлением развития кремниевой микроэлектроники, обеспечивающим наибольшие преимущества при создании сверхбыстрых транзисторов (например, 3,3 ТГц в варианте IBM) и ультрабольших интегральных схем (УБИС). КНИ в настоящее время является наиболее эффективной и наиболее дешевой технологией, которая позволяет продолжать повышение производительности современных логических цифровых ИС, включая и уже внедренные в производство многозатворные МОП-транзисторы (FinFET MOS).

Помимо очевидных преимуществ КНИ для цифровых схем, данный процесс обладает важными достоинствами для разработки аналоговых и РЧ схем. Благодаря применению подложек с высоким удельным сопротивлением и изоляции элементов от подложки, удается повысить качество и высокочастотные свойства всех пассивных компонентов. Пассивные компоненты играют очень важную роль в проектировании именно РЧ схем. Можно добиться существенного снижения вносимых потерь на высоких частотах в микрополосковых и копланарных линиях передачи. Например, высококачественные копланарные линии передачи с вносимыми потерями менее 2 дБ на частотах 200 ГГц, а также ФНЧ и ФВЧ в миллиметровом диапазоне были успешно спроектированы благодаря КНИ [57, 58].

Применение технологии КНИ может заметно улучшить характеристики резисторов: резистор в такой технологии ведет себя близко к идеальному резистору на частотах до 18 ГГц, в то время как резистор на объемном кремнии имеет удовлетворительные характеристики лишь до 5 ГГц. Аналогичное улучшение характеристик наблюдается также у конденсаторов и индуктивностей на высоких частотах.

Другая ключевая проблема, возникающая в РЧ цифро-аналоговых схемах, заключается в необходимости устранения перекрестных связей между высокочастотными и цифровыми устройствами, расположенными на одном кристалле. Данная проблема легко решается в КНИ ИС, так как благодаря диэлектрику и полуизолирующей подложке удастся существенно повысить развязки по пластине между отдельными блоками и снизить паразитное проникновение сигналов. Также удастся улучшить и шумовые характеристики транзисторов.

Еще одним достоинством техпроцесса КНИ для РЧ схемотехники можно назвать существенное улучшение параметров ключей, которые широко используются в переключателях, цифровых аттенуаторах, фазовращателях и др. Показателем качества работы РЧ переключателя обычно является произведение  $R_{on}C_{off}$ , где  $R_{on}$  -сопротивление в режиме «включено»,  $C_{off}$  – емкость в режиме «выключено». При этом от значения  $R_{on}$  зависят вносимые потери переключателя в режиме "включено", а от значения  $C_{off}$  - его развязка, т.е. потери в режиме "выключено". Величина  $R_{on}$  определяется, в первую очередь, сопротивлением затвора транзистора, когда он находится во включенном состоянии. Величина  $C_{off}$  определяется значением емкостей стока, истока и затвора, когда прибор находится в выключенном состоянии.

В технологии КНИ за счет небольшой толщины поверхностного слоя и изоляции транзистора от кремниевого основания удастся многократно снизить паразитную емкость  $C_{off}$ . Это, в свою очередь, дает возможность использовать транзисторы с большей общей шириной затвора, а значит, снизить также и  $R_{on}$ . Таким образом, технологический процесс КНИ позволяет получить меньшие значения произведения  $R_{on}C_{off}$  и, следовательно, добиться низких вносимых потерь и обеспечения хорошей развязки РЧ переключателей.

Помимо вышесказанного, процесс КНИ обладает и следующими эксплуатационными достоинствами:

- 1) Изоляция элементов ИС от подложки диэлектриком, а не *p-n* переходом, значительно более надежна и позволяет поднять верхний предел рабочих температур с 120–150 °С для обычной КМОП технологии до 300–350 °С. При такой изоляции не возникает необходимости в создании изолирующих канавок между соседними элементами, что

позволяет повысить плотность упаковки элементов в 1,5–3 раза и исключить из процесса несколько литографических этапов.

2) Упрощение технологического процесса и увеличение плотности упаковки, в свою очередь, повышает процент выхода годных изделий и снижает их стоимость.

3) Сохраняются возможности адаптации всех существующих и проверенных на практике конструктивных и технологических решений стандартной КМОП–технологии к КНИ–подложкам.

4) Наконец, изготовленные по технологии КНИ устройства обладают значительно большей радиационной стойкостью, особенно важной для применения электроники в космической и атомной технике. Это связано с тем, что в таких ИС рабочий сбой, вызванный нештатным пробоем между истоком и стоком, происходит только при попадании ионизирующей частицы непосредственно в область канала, а ионизация в остальной подложке никакой роли не играет.

Все вышесказанное определяет повсеместное использование КНИ-процессов для создания ВЧ и СВЧ схем с высокой степенью интеграции. Интеграция малошумящих транзисторов в эти технологические процессы позволяет создавать приемные РЧ тракты с превосходными характеристиками [56-58].

### **10.1.7 Технологические процессы на базе полупроводниковых соединений АЗВ5**

Особенностью гетероструктурных НЕМТ (High Electron Mobility Transistor)-технологий на подложках GaAs и InP является использование тонких слоев полупроводниковых материалов AlGaAs/InGaAs (на GaAs) или InAlAs/InGaAs (на InP). Наличие гетероперехода, т.е. сочетание широкозонного и узкозонного полупроводников, приводит к увеличению подвижности электронов и соответственно улучшению частотных свойств транзисторов. В настоящее время на подложках GaAs более часто используются рНЕМТ- и мНЕМТ-технологии, в которых соответственно используется тонкий слой одного из материалов или используется буферный слой между широкозонным и узкозонным полупроводниками.

По сравнению с материалом InP НЕМТ-, рНЕМТ- и мНЕМТ- технологии на подложках GaAs характеризуются большими рабочими напряжениями, большей удельной выходной мощностью, большим размером пластины (диаметр 6 дюймов), меньшими стоимостью и сложностью в производстве. Однако GaAs МИС на основе НЕМТ- и рНЕМТ- технологий обладают меньшими граничными частотами ( $f_t < 150$  ГГц при длине затвора 150 нм) и большим коэффициентом шума. Причиной этого является возможность использования лишь ограниченной концентрации In (не более 25%) в слое InGaAs.

В то же время НЕМТ-технология на базе соединения InP благодаря более высокой подвижности электронов обеспечивает в настоящее время рекордные значения граничной частоты ( $f_t=600$  ГГц) и коэффициента шума ( $F_{\min}=1,2$  дБ на 95 ГГц), хотя и является более дорогой и сложной (диаметр пластины 4 дюйма). Компромисс между полезными качествами НЕМТ-технологий на подложках GaAs и прекрасными частотными свойствами НЕМТ-технологии на подложках InP обеспечивается при применении mНЕМТ-технологии на GaAs, которая допускает значительно большую концентрацию In в слое InGaAs.

#### *Пример технологии изготовления ИС на GaAs.*

В последнее время распространение получают технологические маршруты изготовления арсенид-галлиевых ИС на базе эпитаксиальных структур, включая гетероструктуры. Важным преимуществом такого подхода служит возможность использования для создания ИС как на обычных эпитаксиальных структурах, так и на более сложных и обладающих лучшими параметрами гетероструктурах, одного и того же набора технологического оборудования (технологической линейки). Для изготовления интегральных схем используются эпитаксиальные структуры арсенида галлия или полупроводниковые гетероструктуры соединений АЗВ5. Эпитаксиальные структуры изготавливаются на полуизолирующих подложках методом пиролиза (разложения) из металлоорганических соединений и молекулярно-лучевой эпитаксии. Полупроводниковые гетероструктуры выращиваются методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Одной из существенных технологических операций при изготовлении приборов на основе эпитаксиальных структур является изготовление омических контактов. Первыми технологическими операциями служат отмывка пластин, фотолитографии формирования омических контактов и обработка в кислородной плазме. Все активные элементы схемы должны быть изолированы друг от друга. На арсениде галлия изоляция элементов осуществляется ионным легированием бора  $B^+$ . Для этих целей проводится операция фотолитографии, в результате которой омические контакты элементов схем и расположенные между ними активные объемы эпитаксиальных структур транзисторов и диодов защищаются фоторезистом, а остальные области полупроводниковой структуры открыты. При внедрении ионов бора в арсенид галлия происходит нарушение кристаллической структуры, которое превращает проводящие эпитаксиальные слои в высокоомные изолирующие области. Контроль качества изоляции проверяется по токам утечки тестового элемента. При отсутствии высокотемпературных процессов изолирующие свойства обработанных ионным внедрением структур сохраняются в процессе всего технологического цикла изготовления интегральных схем на арсениде галлия (рисунки 10.23, 10.24).



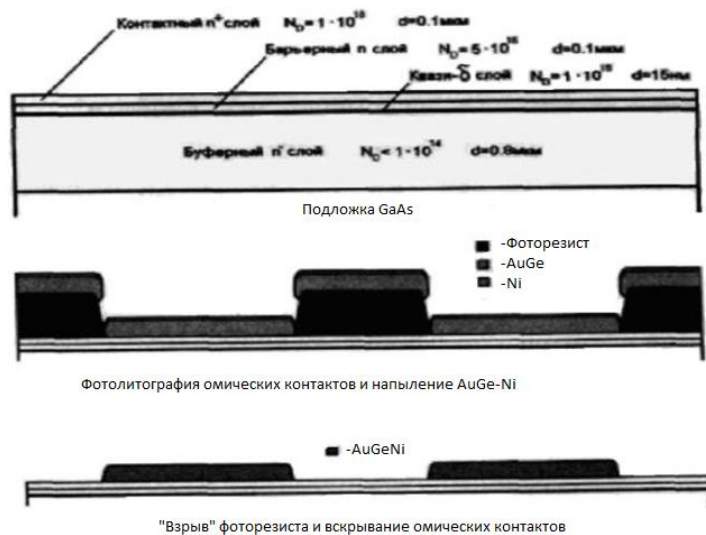


Рисунок 10.23 – Формирование омических контактов



Рисунок 10.24 – Изоляция объемов

Важнейшей технологической операцией при изготовлении ИС является формирование канала транзистора с последующим напылением металла затвора. Для этого проводится процесс фотолитографии, при котором между омическими контактами стока и истока формируется окно в фоторезисте, равное заданному топологическому размеру затвора. После допроявления фоторезиста в плазме проводится операция подгонки канала транзистора по току насыщения между стоком и истоком тестового транзистора. Многократно помещая пластину в травитель и подвергая ее промывке в деионизованной воде и сушке на центрифуге, измеряют ток насыщения формируемого канала. После напыления металла затворов проводится «взрыв» фоторезиста и в областях затворов транзисторов остается металл (рисунок 10.25).

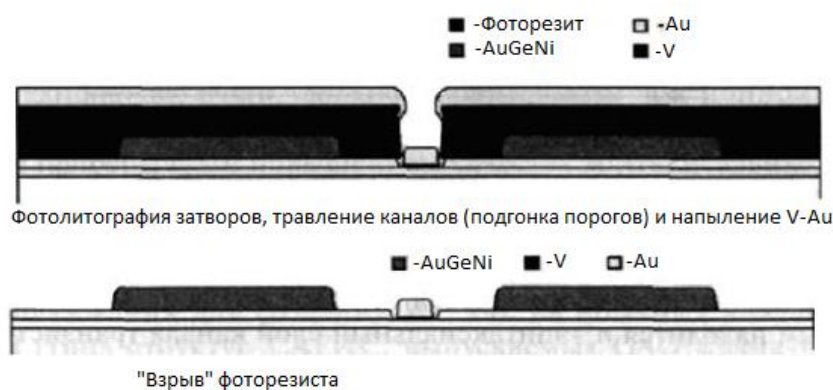


Рисунок 10.25 – Изготовление затворов транзисторов

Затворы изготовленных транзисторов и электроды диодов Шоттки располагаются в *n*-эпитаксиальном слое исходной структуры, что увеличивает пробивные напряжения и уменьшает токи утечки затворов транзисторов, и в то же время канал транзистора под затвором имеет высокую концентрацию, которая обеспечивает высокую крутизну транзисторов с затвором Шоттки. При наличии в схеме двух типов транзисторов (нормально закрытых и нормально открытых) технологический процесс повторяется дважды. Отличием их является различная глубина травления канала транзисторов.

К диэлектрическим слоям, используемым при изготовлении приборов на арсениде галлия, предъявляются следующие требования: хорошая адгезия к поверхности GaAs, высокая однородность и воспроизводимость параметров пленки по диаметру пластины и от пластины к пластине, радиационная стойкость, температура процесса не должна вызывать деградацию элементов ИС, совместимость с другими операциями технологического маршрута.

Низкая температура процесса, а также хорошие электрофизические и механические свойства получаемых пленок позволяют широко использовать метод плазмохимического осаждения на всех этапах технологического маршрута изготовления приборов на арсениде галлия.

По слою диэлектрика проводится процесс фотолитографии рисунка первого уровня разводки и последующее травление диэлектрика в буферном травителе (рисунок 10.26). После этого на пластины напыляется металл затвора. Если межоперационное хранение пластин превышает 30 мин, то производится непосредственно перед загрузкой пластин в вакуумную камеру освежение в 5%-м HCl для снятия собственного окисла арсенида галлия.

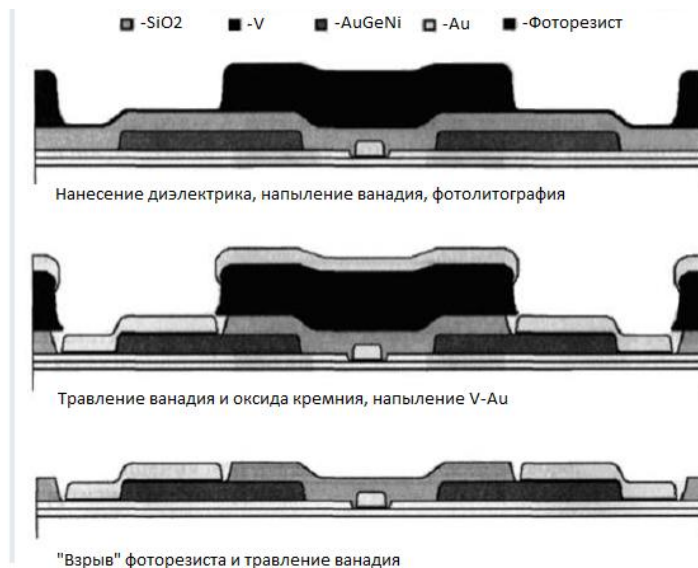


Рисунок 10.26 – Изготовление первого уровня разводки

Пластины с первым уровнем разводки поступают на тестовый контроль, где проводится измерение статических и динамических характеристик элементов и фрагментов интегральных схем. На прошедших тестовый контроль пластинах изготавливается второй уровень металлизации. Для этого на пластины наносится слой SiO<sub>2</sub>. По слою диэлектрика проводится процесс фотолитографии формирования окон в диэлектрике для контактирования к первому уровню разводки. Травление SiO<sub>2</sub> в окнах проводится в буферном травителе (рисунок 10.27). Далее проводится формирование второго уровня металлизации (рисунок 10.28). На аттестованные пластины наносится пассивирующий слой диэлектрика (SiO<sub>2</sub>), и проводятся процессы фотолитографии и травления диэлектрика в окнах над контактными площадками (рисунок 10.29).

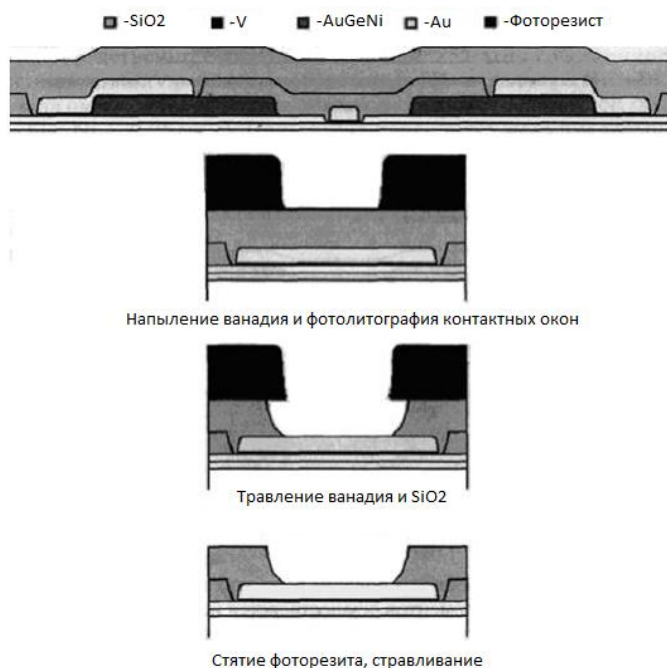


Рисунок 10.27 – Изготовление контактных окон

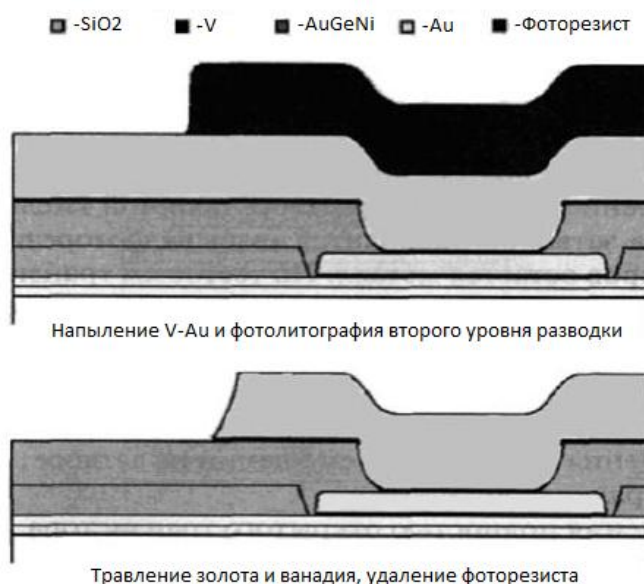


Рисунок 10.28 – Изготовление второго уровня разводки

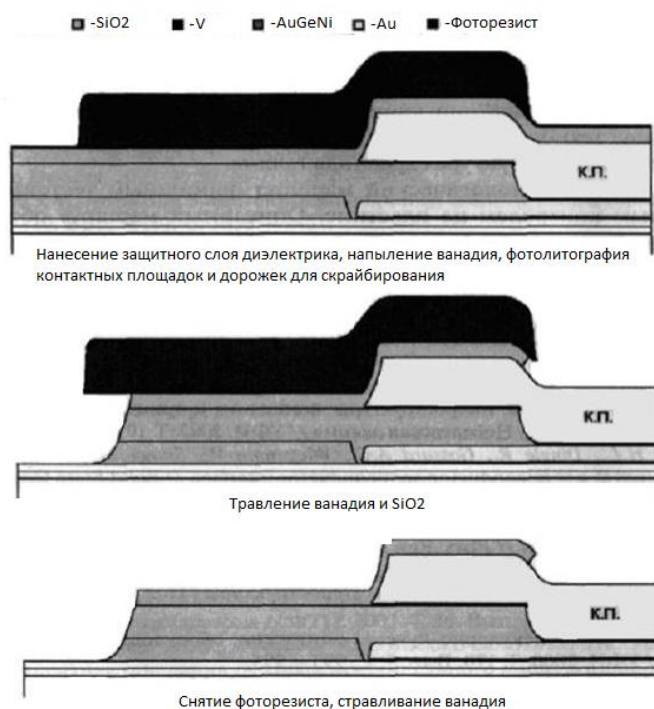


Рисунок 10.29 – Пассивация

Завершается технологический маршрут финишным тестовым и функциональным контролем на пластине. Описанный маршрут обеспечивает создание цифровых и цифро-аналоговых ИС средней и большой степени интеграции на базе эпитаксиальных структур GaAs и полупроводниковых гетероструктур соединений A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц при проектных нормах 0,5 мкм [59].

Ведущими контрактными производителями на мировом рынке GaAs-микросхем являются компании TriQuint Semiconductor (37% рынка) и WIN Semiconductor (36%). На долю Advanced Wireless Semiconductor (AWS) приходится 12% рынка, Global Communica-

tion Semiconductor (GCS) – 6% (таблица 10.5). Продукция этих компаний предназначена в основном для массового рынка МИС для различных устройств и систем мобильной связи. Наиболее крупные европейские компании – United Monolithic Semiconductor (UMS) и OMMIC – специализируются главным образом на мелкосерийном выпуске схем аэрокосмического и военного назначения, но вместе с тем стремятся расширить свое присутствие на глобальном рынке GaAs МИС [59].

Таблица 10.5 –GaAs-технологии ведущих компаний

Тип прибора	TriQuint	WIN	AWSC	GCS	OMMIC	UMS
Мощные PHEMT с длиной затвора 0,5 мкм	-	+	+	+	-	+
Мощные PHEMT с длиной затвора 0,25 мкм	+	+	-	+	-	+
Переключающие PHEMT с длиной затвора 0,5 мкм	+	+	+	+	-	+
Переключающие PHEMT с длиной затвора 0,25 мкм	+	-	-	-	-	-
PHEMT с длиной затвора 0,15 мкм	+	+	-	-	+	+
PHEMT с длиной затвора $\leq 0,15$ мкм	+	+	-	-	+	-
Линейные HFET с длиной затвора 0,5 мкм	+	-	-	+	-	-
Линейные HFET с длиной затвора 0,25 мкм	-	-	-	+	-	-
BiHEMT	+	-	+	-	-	-
MHEMT	+	+	-	-	+	-
MESFET	+	-	-	-	-	-
Диоды	+	-	+	+	+	-
Пассивные МИС	+	-	+	+	-	-

Наиболее крупные компании-foundries обрабатывают GaAs-пластины диаметром 150 мм и выполняют заказ в течение шести-восьми недель. Компания WIN гарантирует исполнение заказа в срок от 23 до 48 календарных дней. Некоторые компании с небольшим объемом выпуска сохраняют производственные линии по обработке пластин диаметром 100 мм. Типичная производительность foundries – от нескольких сотен до нескольких тысяч пластин в месяц. Многие контрактные производители помимо выпуска МИС оказывают различные услуги в проектировании, моделировании, корпусировании и испытаниях. При этом сами они пользуются услугами других специализированных компаний по программному обеспечению, графическим системам и т.п.

## **10.2 Исследование вариантов построения радиотракта и проектирование отдельных узлов**

В данном подразделе рассмотрены вопросы исследования вариантов построения и проектирование функциональных узлов радиотракта на уровне принципиальных схем и топологий на основе выбранных полупроводниковых GaAs, GaN, КМОП, КНИ и SiGe БиКМОП технологических процессов. Рассмотрены вопросы проектирования МШУ, УМ, СВЧ переключателей, ЗУ, смесителей, ФВ, ячеек ЦАТТ, симметрирующих устройств и сумматоров/делителей мощности. Также проведен анализ воздействия дестабилизирующих факторов (температура, технологический разброс) на характеристики указанных устройств. Результатом данного раздела являются несколько вариантов схемного и технологического исполнения узлов радиотракта с оценочными характеристиками и габаритами.

### **10.2.1 Малошумящие усилители**

В данном подразделе представлены результаты разработки принципиальных схем и моделирования СВЧ МИС МШУ для различных технологических процессов. Для реализации МШУ выбраны технологии 0,25 мкм GaN НЕМТ (WIN), 0,25 мкм GaAs рНЕМТ (WIN), 0,13 мкм КНИ (X-FAB), 0,18 мкм SiGe БиКМОП (TSMC).

К разрабатываемым МШУ в диапазоне частот 14-16 ГГц предъявляются требования по обеспечению широкополосного согласования по входу и выходу, не менее  $-10$  дБ; достаточного уровня КУ, более 15 дБ, а также минимального достижимого уровня КШ, не более 2 дБ. Разрабатываемые МШУ должны быть абсолютно устойчивы во всем частотном диапазоне.

Структура кремниевых МШУ (и, соответственно, итоговые характеристики) во многом определяется типом применяемого корпуса и качеством заземления. Для GaAs и GaN заземление реализуется при помощи металлизированного сквозного отверстия, при этом паразитная индуктивность такого заземления очень мала и составляет  $L_{\text{par}} < 0,05$  нГн. В то время как для кремниевых технологий сквозное травление трудно реализуемо (однако, для некоторых технологий есть такая опция, например, IHP). Это приводит к тому, что заземление кремниевых ИС осуществляется через площадки на кристалле. Таким образом, паразитная индуктивность  $L_{\text{par}}$  зависит от количества площадок заземления, а также от типа корпуса.

При использовании корпусов типа QFN для соединения площадок заземления ИС и заземления корпуса используется разварочная проволочка, паразитная индуктивность которой составляет  $L_{\text{par}} \sim 0,5$  нГн. Соответственно импеданс этой проволочки на частоте 16 ГГц составляет  $Z_{\text{par}}(16 \text{ ГГц}) \approx j \times 50$  Ом, что довольно сильно ухудшает характеристики

МШУ. Решением является использование дифференциальной схемотехники [60], однако это приводит к увеличению потребления, площади и КШ устройства.

Технологии корпусирования типа flip-chip или WLCSP (wafer level chip scale package), используют в качестве соединения металлические столбики/шарики. Их паразитная индуктивность составляет порядка  $L_{par} < 0,1$  нГн. Низкая паразитная индуктивность при корпусировании типа flip-chip или WLCSP позволяет использовать недифференциальные схемотехнические решения, таким образом итоговый КШ для МШУ снижается (т.к. нет ни симметрирующего трансформатора, ни активного балуна и т.п.). С другой стороны, для последующих каскадов (векторного ФВ, VGA и т.п.) требуется обеспечение дифференциального сигнала [60-62]. Выходом является реализация активного или пассивного СТ во втором каскаде МШУ.

В ходе работы по данному проекту было принято решение оценивать параметры МШУ с учетом того, что будет использоваться корпусирование типа flip-chip или WLCSP. Поэтому первый каскад кремниевых МШУ реализуется в виде каскада с несимметричным входом. Второй каскад для кремниевых МШУ рассмотрен в двух вариантах: 1) несимметричный; 2) дифференциальный, т.е. с функцией преобразования в симметричный тракт. Далее рассмотрены варианты проектируемых МШУ.

#### *Малошумящий усилитель на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии TSMC*

Для входного каскада МШУ был выбран транзистор hbt\_mb\_hs с длиной эмиттера  $L_e = 10,16 \times 2$  мкм (TSMC, высокоскоростной,  $V_{cc} = 1,2$  В), как компромисс между КШ, потреблением и линейностью. Данный БТ обладает  $NF_{min} = 2,4$  дБ,  $G_{assoc} = 9,9$  дБ при  $V_{cc} = 1,2$  В и  $I_{cc} = 5$  мА ( $I_b = 25$  мкА). Таким образом, для достижения усиления более 15 дБ МШУ на основе этой технологии должен быть двухкаскадным. Второй каскад МШУ выполняется в виде каскода (на основе hbt\_mb\_hs с длиной эмиттера  $L_e = 10,16 \times 2$  мкм), так как каскодная схема обладает высоким КУ и более высокой выходной мощностью по сравнению со схемой с ОЭ. Отметим, что для достижения требуемого усиления более 15 дБ МШУ можно реализовать в однокаскадном виде, используя каскодное соединение транзисторов, однако при этом будет увеличен КШ на  $\sim 0,3-0,5$  дБ.

На рисунке 10.30 представлена схема разработанного МШУ. Первый каскад охвачен отрицательной последовательной обратной связью, реализованной в виде индуктивности, для совмещения условий согласования по шуму и усилению. Согласование входного каскада реализовано при помощи последовательного LC контура. Для коррекции АЧХ и улучшения согласования во второй каскад включена параллельная обратная связь в виде RC цепи. В СЦ для учета потерь и оценки размера ИС были использованы модели индуктивностей из PDK, остальные элементы были реализованы в виде идеальных компонентов.

При реализации топологии МШУ с использованием МПЛ, «реальной» земли и неоднородностей межсоединений неизбежно вырастет КШ на  $\sim 0,5$  дБ и снизится КУ на 0,5-1 дБ.

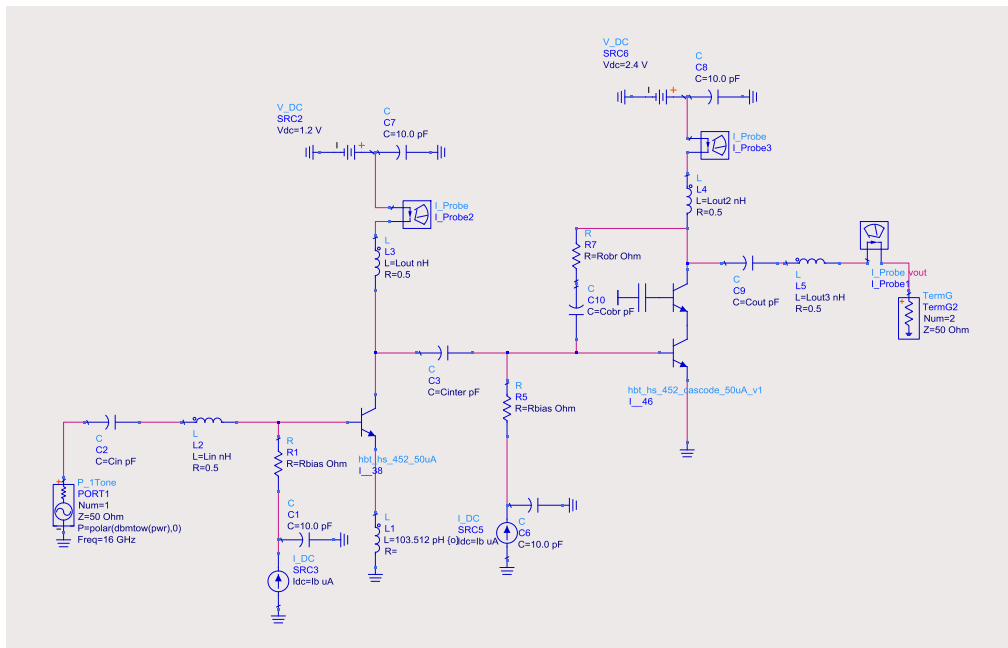
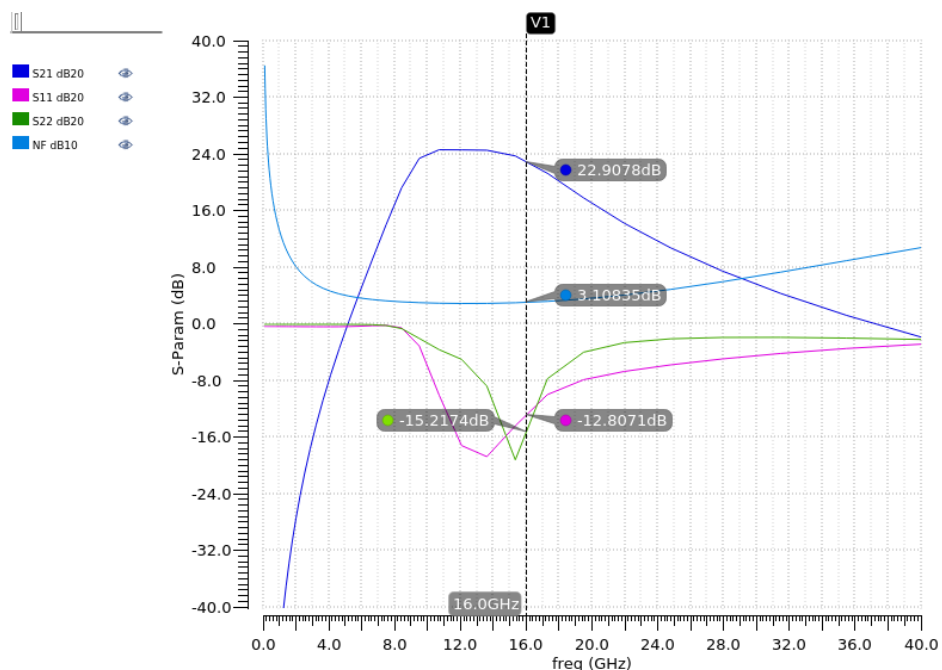


Рисунок 10.30 – Принципиальная схема двухкаскадного МШУ на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии TSMC

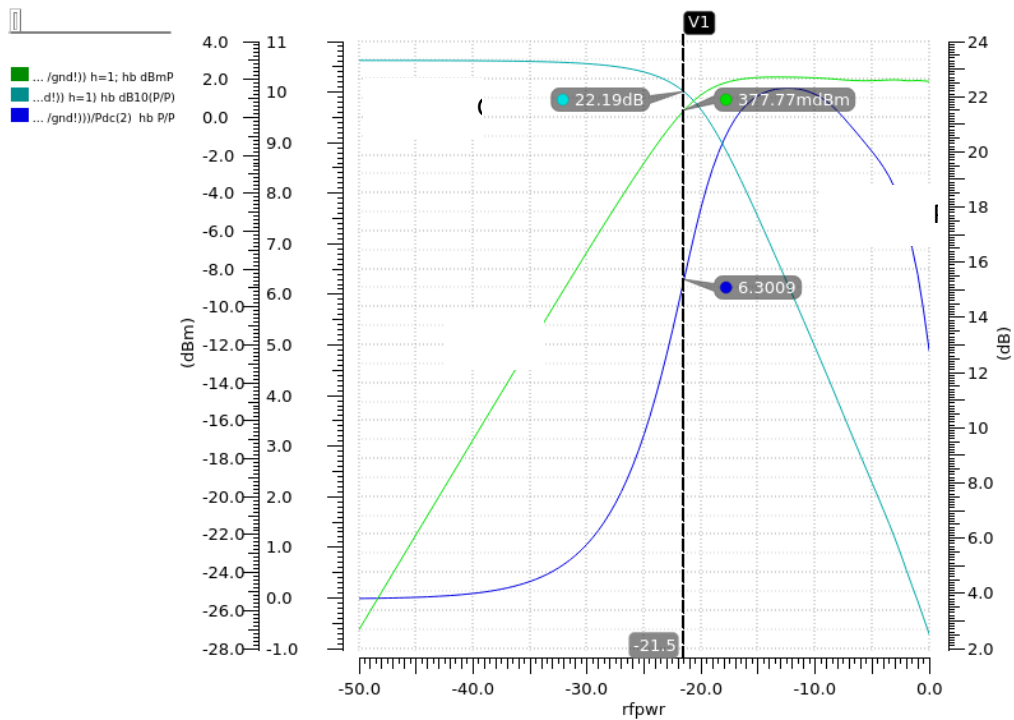
На рисунке 10.31 *а* представлены результаты моделирования  $S$ -параметров и КШ двухкаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии (TSMC). На рисунке 10.31 *б* изображены результаты моделирования выходной мощности, КУ и КПД по добавленной мощности PAE в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц.



*а)*

Рисунок 1.31 (начало)





б)

Рисунок 10.321 – Параметры двухкаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии (TSMC): а) S-параметры и коэффициент шума; б) выходная мощность, КУ и PAE на частоте 16 ГГц

На рисунке 10.32 представлена схема разработанного двухкаскадного МШУ с дифференциальным выходом. Второй каскад МШУ реализован в виде активного СТ на основе дифференциального усилителя. Одной из проблем при реализации такого активного СТ является неидеальность дифференциального источника тока, реализованного в виде транзистора [63-65]. Причиной неидеальности являются паразитные емкости транзистора, которые снижают импеданс источника тока на высоких частотах, что приводит к значительному амплитудному и фазовому разбалансу. Одним из возможных решений является добавление дополнительной индуктивности в цепь эмиттера источника тока, что приводит к увеличению импеданса, видимого со стороны дифференциальной пары.

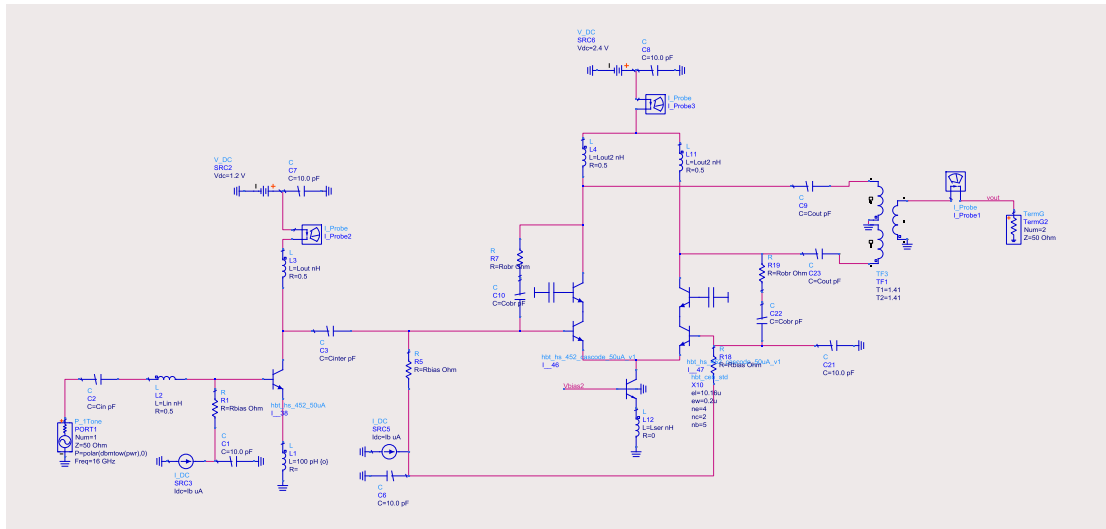


Рисунок 10.32 – Принципиальная схема двухкаскадного МШУ с дифференциальным выходом на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии (TSMC)

Основные характеристики разработанных МШУ на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии (TSMC) сведены в таблице 10.6.

Таблица 10.6 – Параметры разработанных МШУ на частоте 16 ГГц на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологии (TSMC)

Структура	$S_{21}$ , дБ	NF, дБ	$S_{11}$ , дБ; $S_{22}$ , дБ	$IP_{1dB}$ , дБм	$OP_{1dB}$ , дБм	$V_{CC}$ , В $I_{CC}$ , мА	$P_{dc}$ , мВт	Размеры, мм <sup>2</sup>
Несим. выход, двухкаскадный	22,9	3,1	-12,8; -15,2	-21,5	0,3	1,2; 2,4 5; 5	18	0,9×0,6
Диф. выход, двухкаскадный	19,5	3,4	-10; -12	-18,5	3	1,2; 2,4 5; 11	32,4	1,1×0,8

#### Малощумящий усилитель на основе 0,13 мкм КНИ технологии X-FAB

Далее был разработан прототип МШУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). Исходя из результатов анализа для входного каскада МШУ был выбран транзистор с длиной затвора  $L_g = 0,1$  мкм и шириной  $W_g = 40 \times 2,2$  мкм, как компромисс между КШ, потреблением и линейностью. Данный транзистор обладает  $NF_{min} = 0,94$  дБ,  $G_{assoc} = 11,4$  дБ при  $V_{ds} = 1,2$  В и  $I_{ds} = 10,4$  мА ( $V_{gs} = 0,45$  В). Таким образом, для достижения усиления более 15 дБ МШУ на основе этой технологии должен быть двухкаскадным. С целью повышения выходной мощности МШУ выполним второй каскад в виде каскода (на основе двух транзисторов с  $W_g = 40 \times 2,2$  мкм).

На рисунке 10.33 представлена схема разработанного МШУ. Первый каскад охвачен отрицательной последовательной обратной связью в виде индуктивности. Входная СЦ реализована при помощи последовательного LC контура. Для коррекции АЧХ и улучшения согласования в цепь обратной связи второго каскада включена параллельная обратная связь в виде RC цепи. В СЦ для учета потерь и оценки размера ИС были использованы модели индуктивностей из PDK, остальные элементы были реализованы в виде идеальных

компонентов. При реализации топологии МШУ с использованием МПЛ, «реальной» земли и неоднородностей межсоединений неизбежно вырастет КШ на  $\sim 0,5$  дБ и снизиться КУ на 0,5-1 дБ.

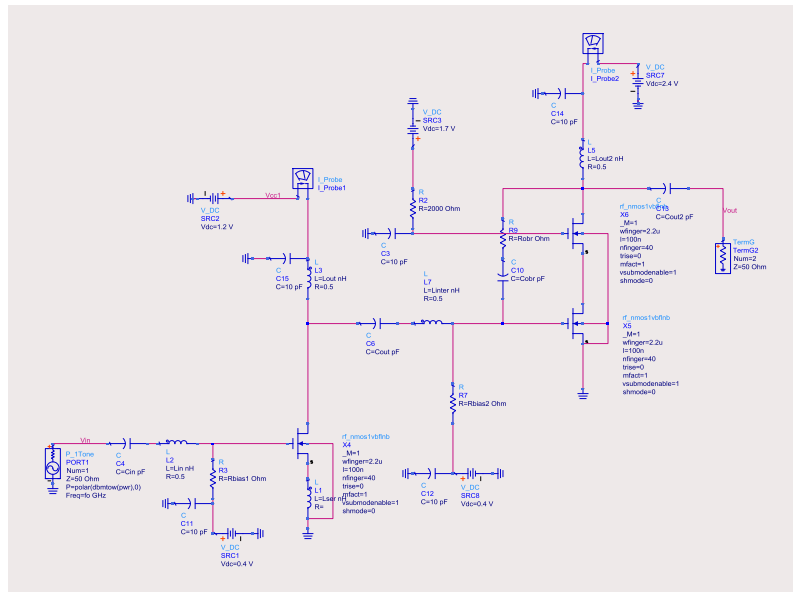
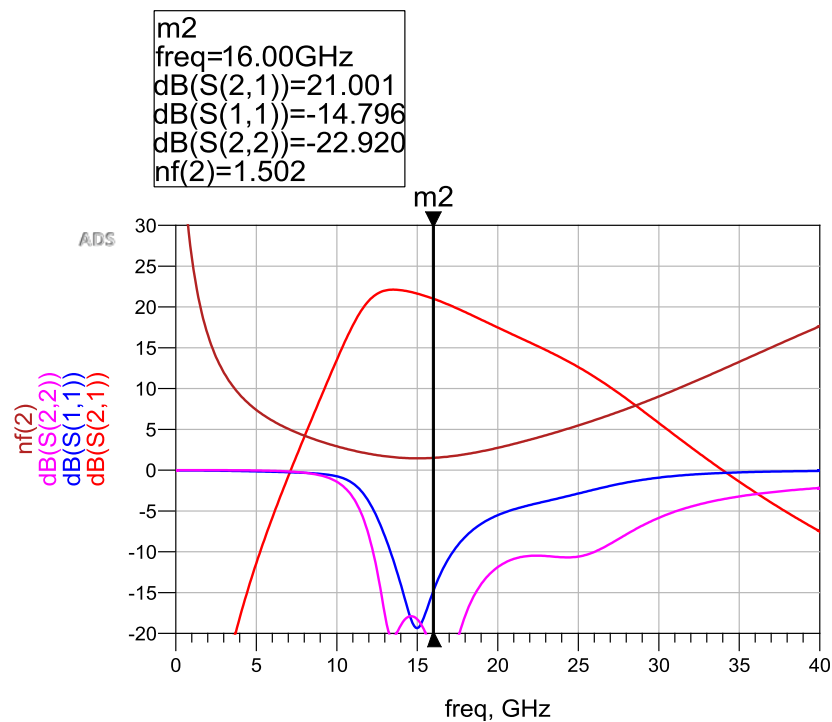


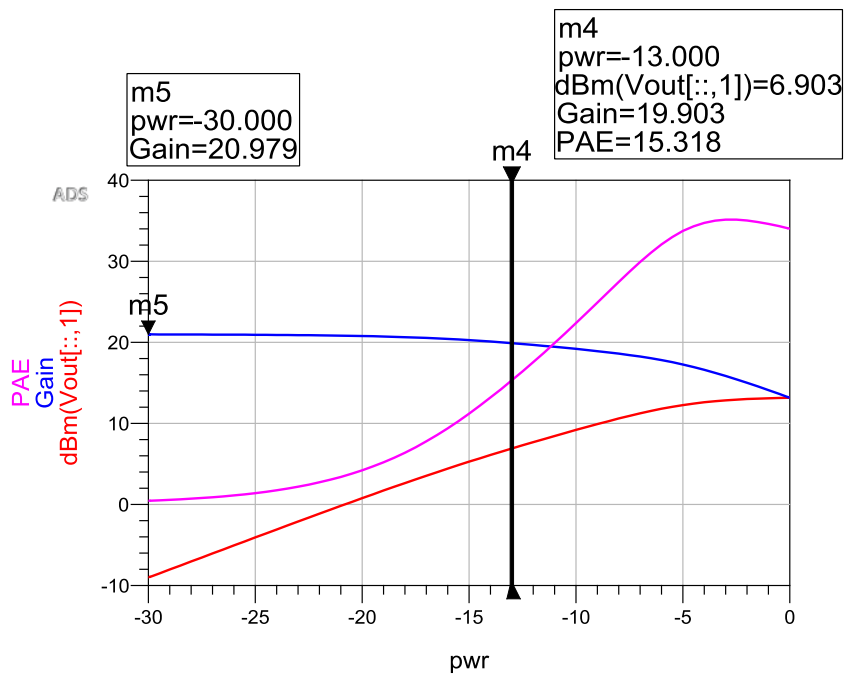
Рисунок 10.33 – Принципиальная схема двухкаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

На рисунке 10.34 а представлены результаты моделирования S-параметров и КШ двухкаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). На рисунке 10.34 б изображены результаты моделирования выходной мощности и КУ в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц.



а)

Рисунок 10.34 (начало)



б)

Рисунок 10.34 – Параметры двухкаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB): а) S-параметры и коэффициент шума; б) выходная мощность, КУ и PAE на частоте 16 ГГц

На рисунке 10.35 представлена схема разработанного двухкаскадного МШУ с дифференциальным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии. Второй каскад МШУ реализован в виде активного СТ на основе дифференциального усилителя. Для снижения амплитудного и фазового разбаланса в дифференциальном источнике тока используется дополнительная индуктивность.

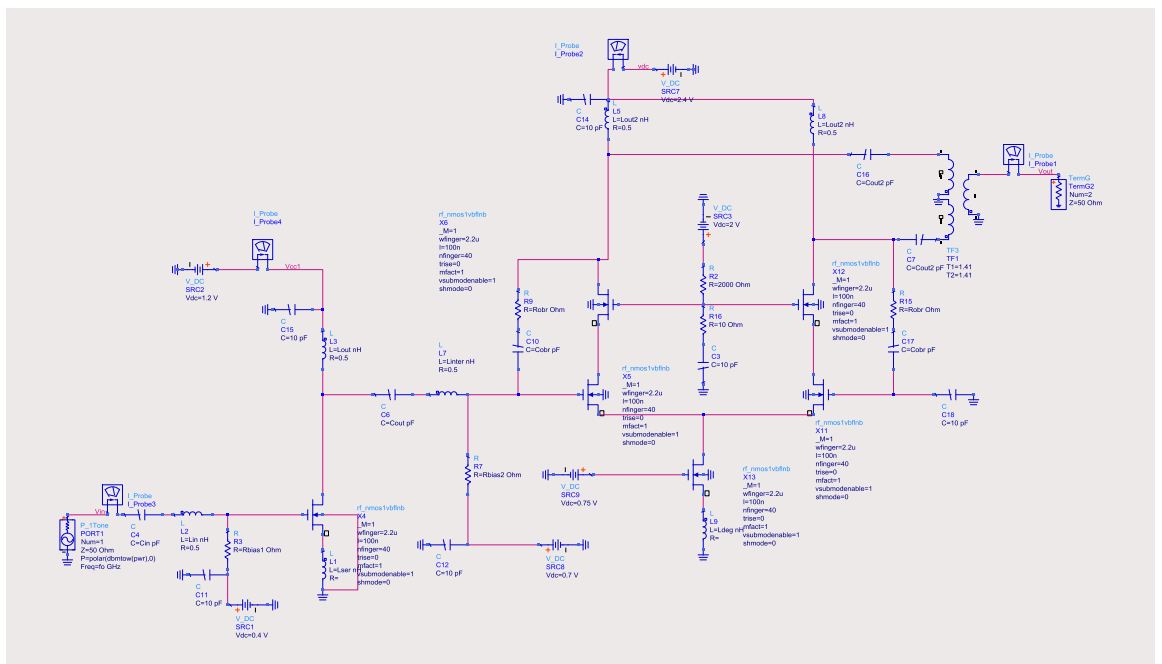
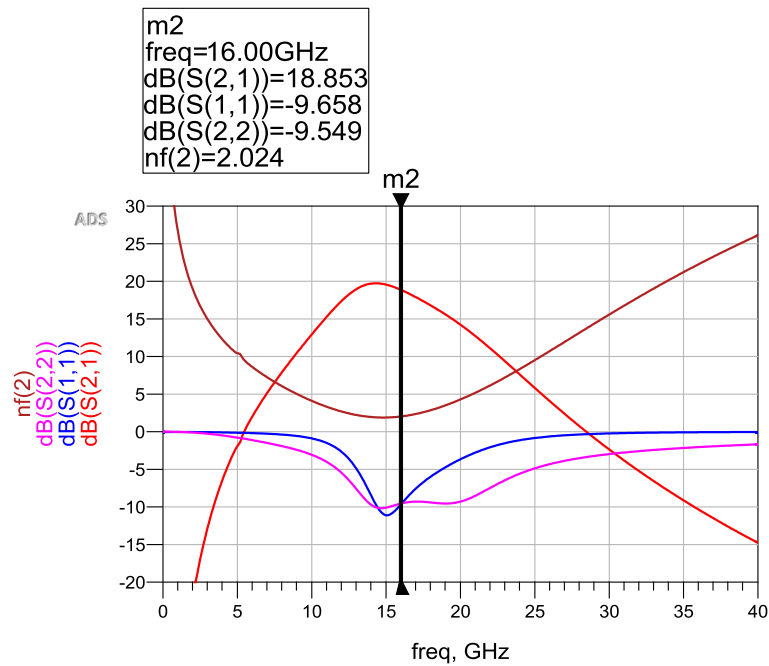
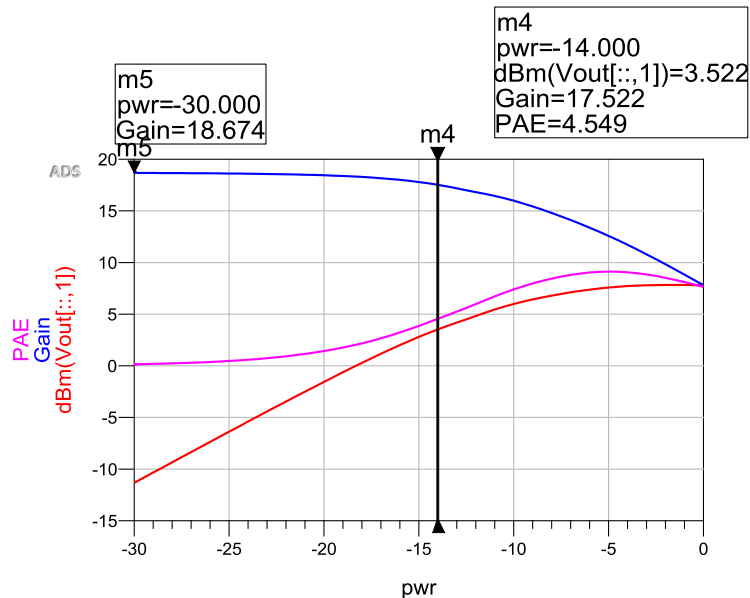


Рисунок 10.35 – Принципиальная схема двухкаскадного МШУ с дифференциальным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

На рисунке 10.36 а представлены результаты моделирования S-параметров и КШ двухкаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). На рисунке 10.36 б изображены результаты моделирования выходной мощности, КУ и КПД по добавленной мощности PAE в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц. По сравнению с МШУ с несимметричным выходом вырос КШ, т.к. дифференциальный каскад вносит больше шума. Выходная мощность на выходе дифференциального каскада снижена, т.к. ток потребления зафиксирован дифференциальным источником тока.



а)



б)

Рисунок 10.36 – Параметры двухкаскадного МШУ с дифференциальным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB): а) S-параметры и коэффициент шума; б) выходная мощность, КУ и PAE на частоте 16 ГГц

При заданном КУ более 15 дБ, разрабатываемый МШУ может быть реализован на одном каскаде, но с ухудшением КШ. Достоинством такого варианта является уменьшение площади ИС МШУ. На рисунке 10.37 представлена схема разработанного однокаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе каскода с использованием 0,13 мкм КНИ технологии. В качестве активного элемента в каскаде был выбран транзистор с длиной затвора  $L_g = 0,1$  мкм и шириной  $W_g = 40 \times 2,2$  мкм.

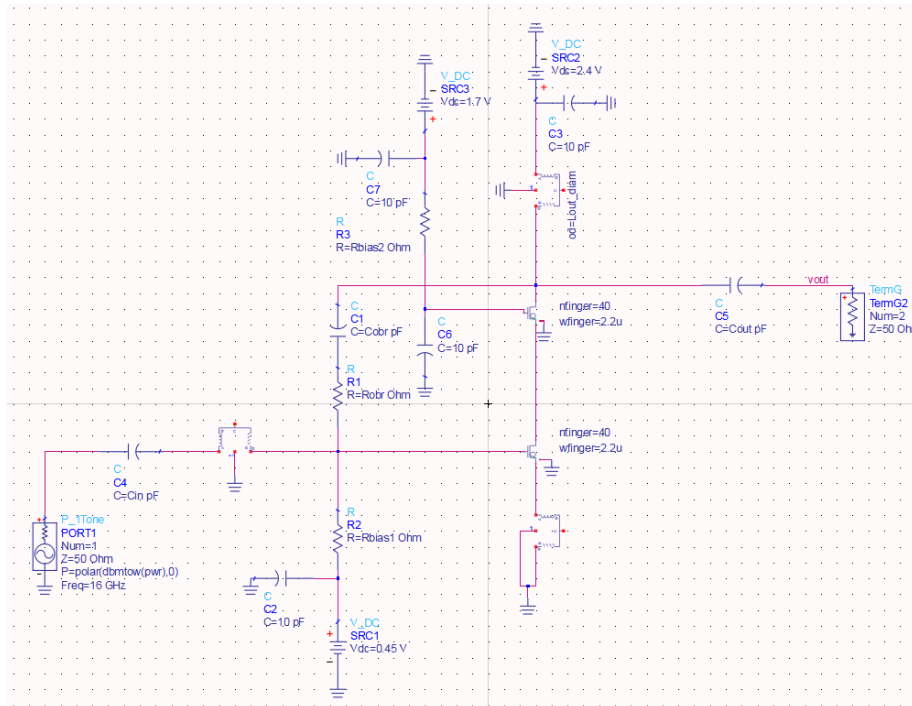
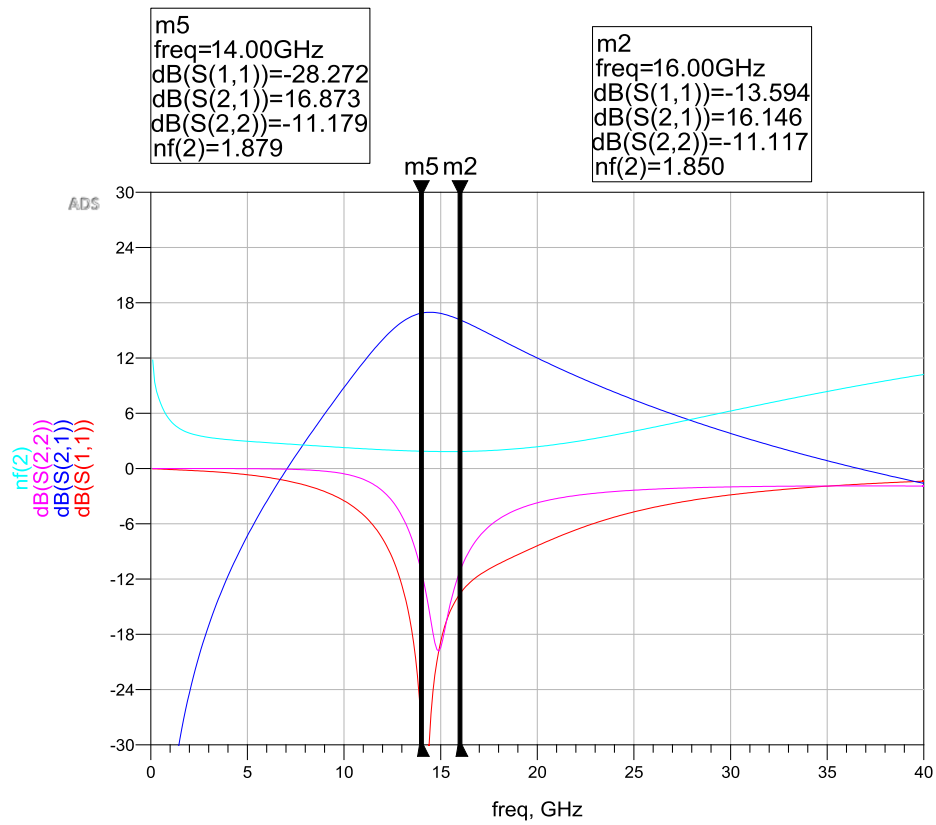
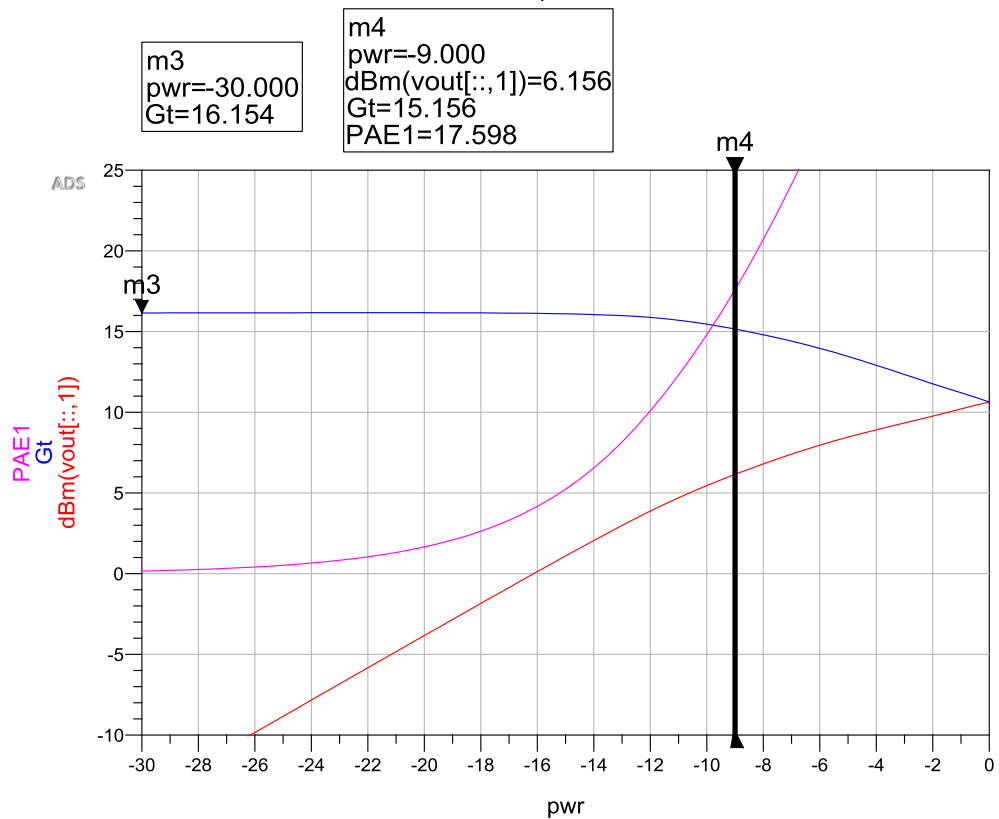


Рисунок 10.37 – Принципиальная схема однокаскадного МШУ на основе каскодной схемы, 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

На рисунке 10.38 а представлены результаты моделирования S-параметров и КШ однокаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). На рисунке 10.38 б изображены результаты моделирования выходной мощности, КУ и КПД по добавленной мощности PAE в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц.



a)



б)

Рисунок 10.38 – Параметры однокаскадного МШУ с несимметричным выходом на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB): а) S-параметры и коэффициент шума; б) выходная мощность, КУ и PAE на частоте 16 ГГц

Для преобразования в дифференциальный сигнал для однокаскадного МШУ используем пассивный СТ на основе моста Маршанда с лицевой связью. Размеры СТ  $0,25 \times 0,35 \text{ мм}^2$ , разбаланс по амплитуде  $\Delta A \leq 0,8 \text{ дБ}$  и по фазе  $\Delta \varphi \leq 4^\circ$ .

Основные характеристики разработанных МШУ на основе  $0,13 \text{ мкм}$  КНИ технологии (X-FAB) сведены в таблицу 10.7.

Таблица 10.7 – Параметры разработанных МШУ на частоте  $16 \text{ ГГц}$  на основе  $0,13 \text{ мкм}$  КНИ технологии (X-FAB)

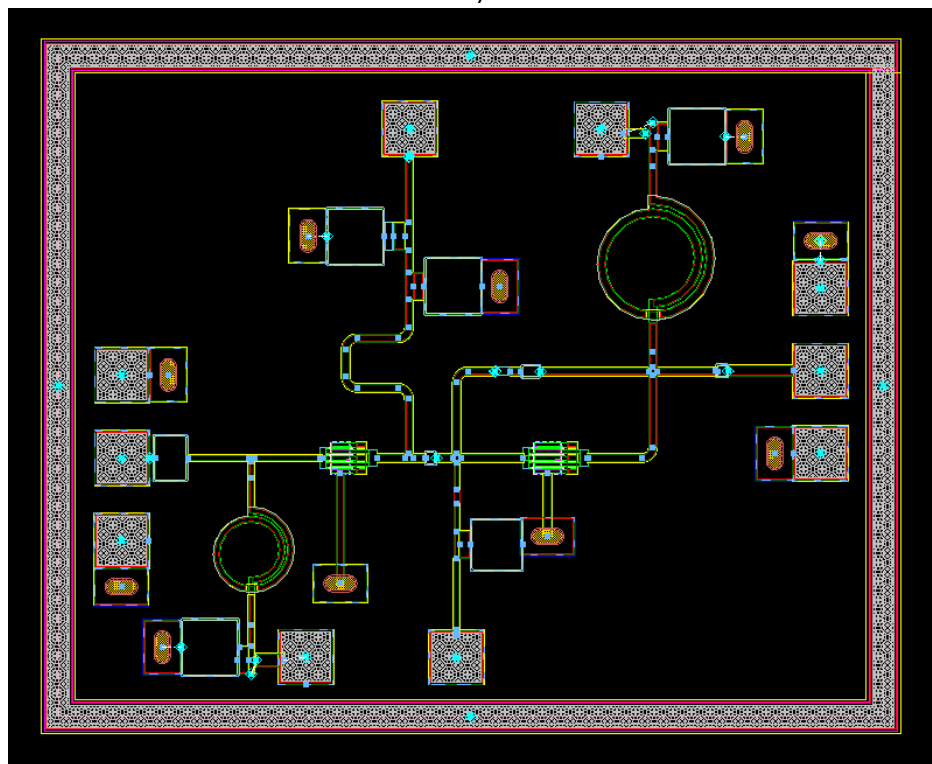
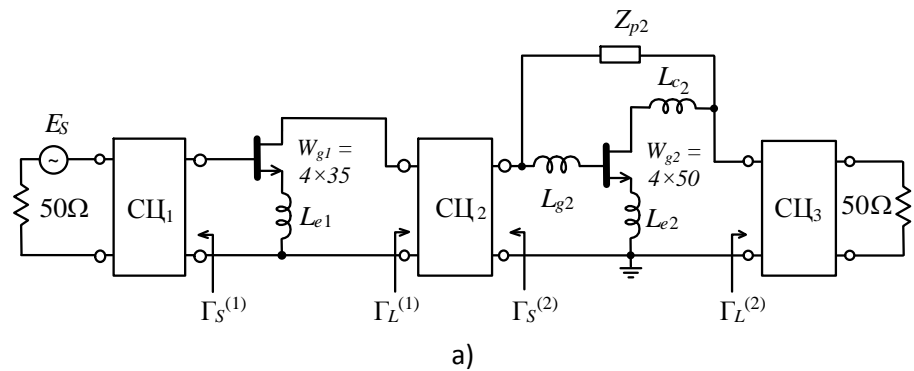
Структура	$S_{21}$ , дБ	NF, дБ	$S_{11}$ , дБ; $S_{22}$ , дБ	$IP_{1dB}$ , дБм	$OP_{1dB}$ , дБм	$V_{cc}$ , В $I_{cc}$ , мА	$P_{dc}$ , мВт	Размеры, $\text{мм}^2$
Несим. выход, двухкаскадный	21	1,5	-14,8; -22,3	-13	7	1,2; 2,4 8; 8	30	$0,8 \times 0,6$ (0,48)
Диф. выход, двухкаскадный + активный балун	18,5	2,1	-10,5; -9,6	-14	3,5	1,2; 2,4 8; 16	48	$1,1 \times 0,7$ (0,77)
Несим. выход, однокаскадный (каскод)	16	1,9	-12; -10	-9	6	2,4 11	26,4	$0,5 \times 0,55$ (0,28)
Диф. выход, однокаскадный (каскод) + пассивный балун	15	2	-10; -10	-9	5	2,4 11	26,4	$0,9 \times 0,55$ (0,5)

#### *МШУ на основе $0,25 \text{ мкм}$ GaAs pHEMT технологии WIN*

Далее был разработан МШУ на основе  $0,25 \text{ мкм}$  GaAs pHEMT технология (PD2500, WIN). Для входного каскада МШУ был выбран транзистор с шириной  $W_g = 4 \times 35 \text{ мкм} = 140 \text{ мкм}$ , как компромисс между КПД, потреблением и линейностью. Данный транзистор обладает  $NF_{min} = 0,8 \text{ дБ}$ ,  $G_{assoc} = 11,2 \text{ дБ}$  при  $V_{ds} = 4 \text{ В}$  и  $I_{ds} = 7,8 \text{ мА}$  ( $V_{gs} = 0,45 \text{ В}$ ). Второй каскад выполнен на основе транзистора с шириной  $W_g = 4 \times 50 \text{ мкм} = 200 \text{ мкм}$ , рабочая точка  $V_{ds} = 4 \text{ В}$  и  $I_{ds} = 17,7 \text{ мА}$  ( $V_{gs} = 0,5 \text{ В}$ ).

На рисунке 10.39 а представлена структурная схема разработанного МШУ. Первый каскад охвачен отрицательной последовательной индуктивной обратной связью, реализованной в виде микрополоска. Второй каскад охвачен последовательной и параллельной обратными связями с целью коррекции АЧХ, улучшения согласования и стабилизации. На рисунке 10.39 б представлен прототип топологии двухкаскадного МШУ, который был разработан для оценки характеристик усилителя с учетом моделей элементов и МПЛ, а также для размеров.





а)  
б)  
Рисунок 10.39 – Принципиальная схема (а) и прототип топологии (б) двухкаскадного МШУ (PD2500, WIN), размеры  $1,5 \times 1,2$  мм<sup>2</sup>

На рисунке 10.40 а представлены результаты моделирования S-параметров и КШ прототипа двухкаскадного МШУ на моделях реальных компонентов на основе 0,25 мкм GaAs рHEMT технологии (WIN). На рисунке 10.40 б изображены результаты моделирования выходной мощности и КУ в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц.

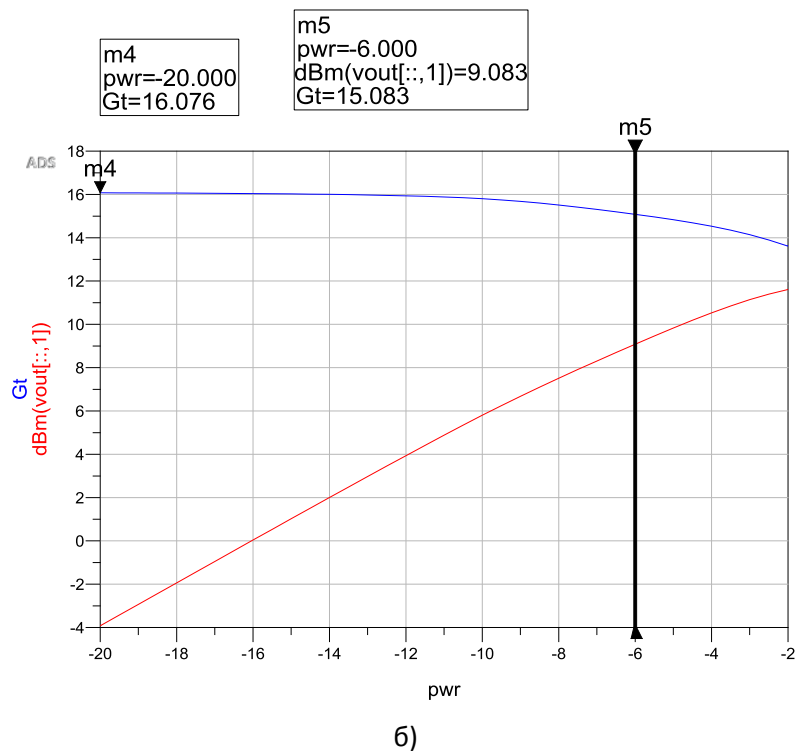
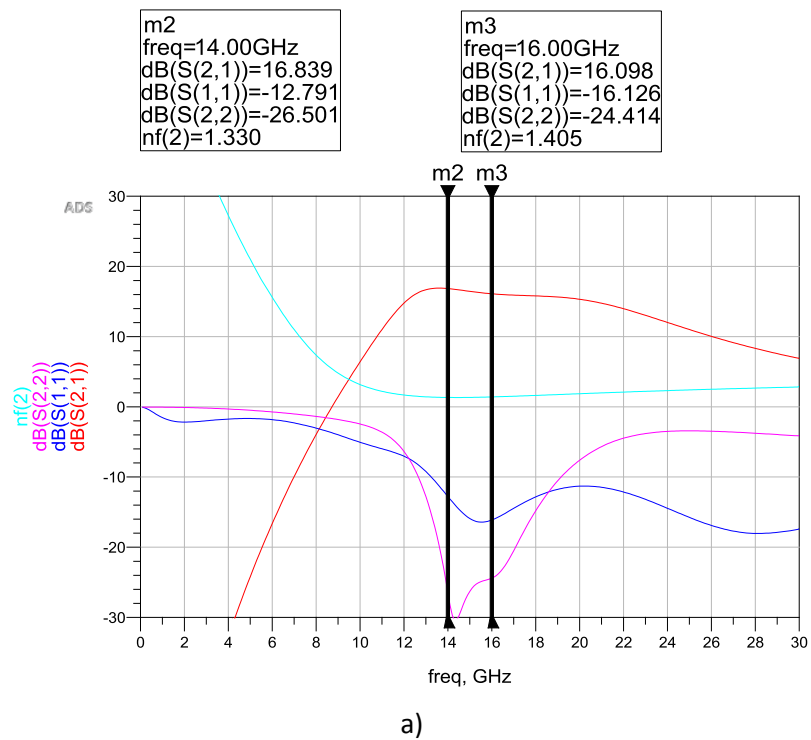


Рисунок 10.40 – Параметры прототипа двухкаскадного МШУ на моделях реальных компонентов на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN): а) S-параметры и коэффициент шума; б) выходная мощность и КУ на частоте 16 ГГц

Основные характеристики разработанных МШУ на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN) сведены в таблицу 10.8.

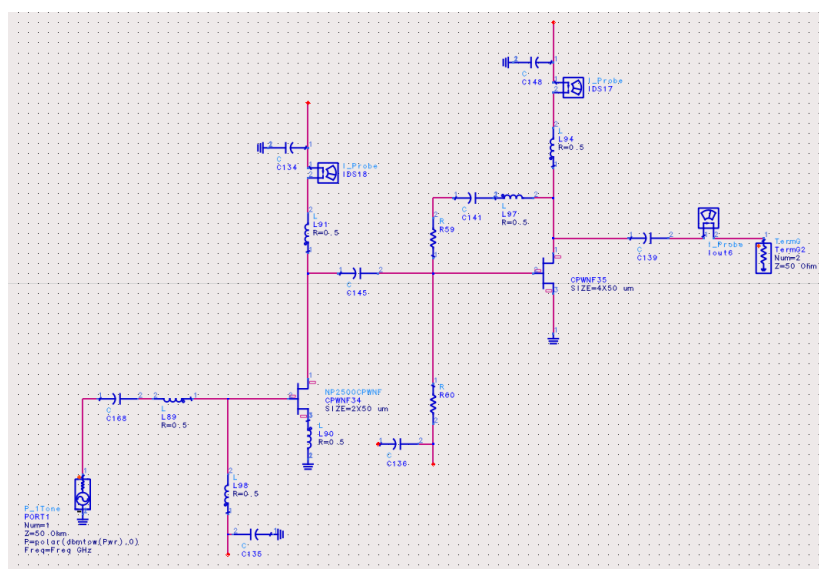
Таблица 10.8 – Параметры разработанных МШУ на частоте 16 ГГц на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN)

Структура	$S_{21}$ , дБ	NF, дБ	$S_{11}$ , дБ	$S_{22}$ , дБ	$IP_{1dB}$ , дБм	$OP_{1dB}$ , дБм	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{dc}$ , мВт	Размеры, мм <sup>2</sup>
Двухкаскадный	16	1,4	-16,1	-24	-6	9	4 26	104	1,5×1,2
Трехкаскадный	25	1,45	-15	-20	-9	15	4 50	200	1,9×1,2

### МШУ на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии WIN

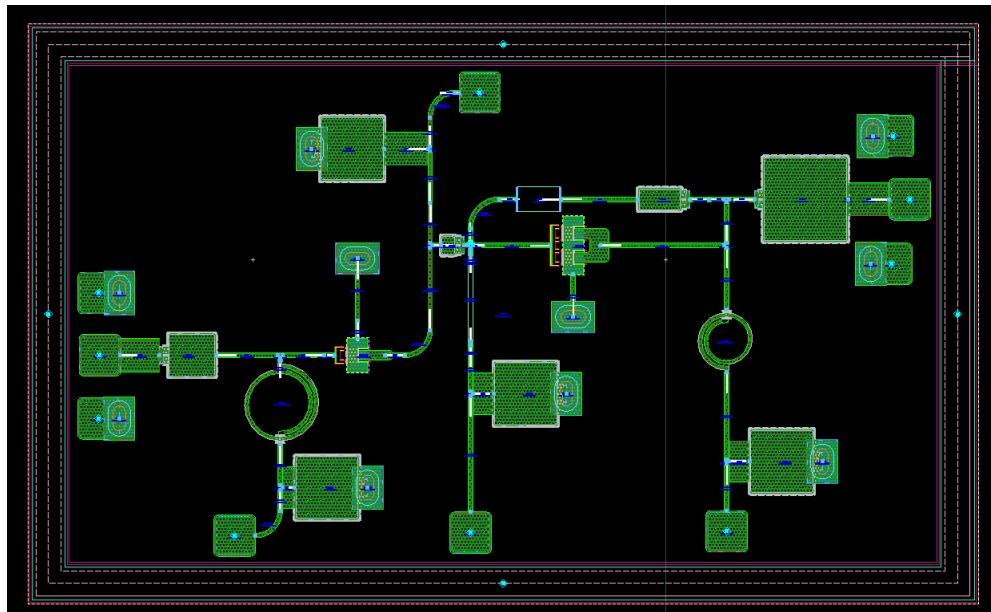
Следующая на очереди технология, на которой реализовывалась схема МШУ, является 0,25 мкм GaN HEMT технология (NP2500, WIN). В качестве усилительного элемента для первого каскада выбрана линейная модель транзистора с измеренными S-параметрами и КШ, предоставленная фабрикой производителем, с шириной  $W_g = 2 \times 50$  мкм. Данный транзистор обладает  $NF_{min} = 1,16$  дБ,  $G_{assoc} = 7,34$  дБ при  $V_{ds} = 10$  В и  $I_{ds} = 10$  мА ( $V_{gs} = -3$  В). Второй каскад выполнен на основе транзистора с шириной  $W_g = 4 \times 50$  мкм, рабочая точка  $V_{ds} = 10$  В и  $I_{ds} = 19,9$  мА ( $V_{gs} = -2,2$  В).

На рисунке 10.41 а представлена принципиальная схема двухкаскадного МШУ. Первый каскад охвачен отрицательной последовательной индуктивной обратной связью, реализованной в виде микрополоска. Входная СЦ реализована при помощи последовательного LC контура. Для коррекции АЧХ и улучшения согласования в цепь обратной связи второго каскада включена параллельная обратная связь в виде RCL цепи. На рисунке 10.41 б представлен прототип топологии двухкаскадного МШУ, который был разработан для оценки характеристик усилителя с учетом моделей элементов и МПЛ, а также для размеров ИС.



а)

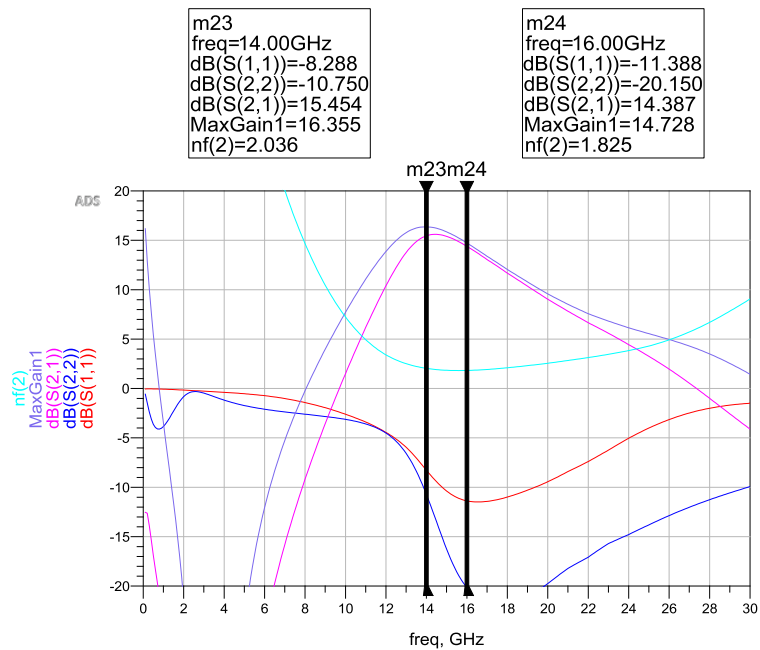
Рисунок 10.41 (начало)



б)

Рисунок 10.41 – Принципиальная схема (а) и прототип топологии (б) двухкаскадного МШУ на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии (WIN), размеры 2,2×1,2 мм<sup>2</sup>

На рисунке 10.42 представлены результаты моделирования, S-параметры и КШ прототипа топологии двухкаскадного МШУ на моделях реальных компонентов на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии (WIN).



а)

Рисунок 10.42 (начало)

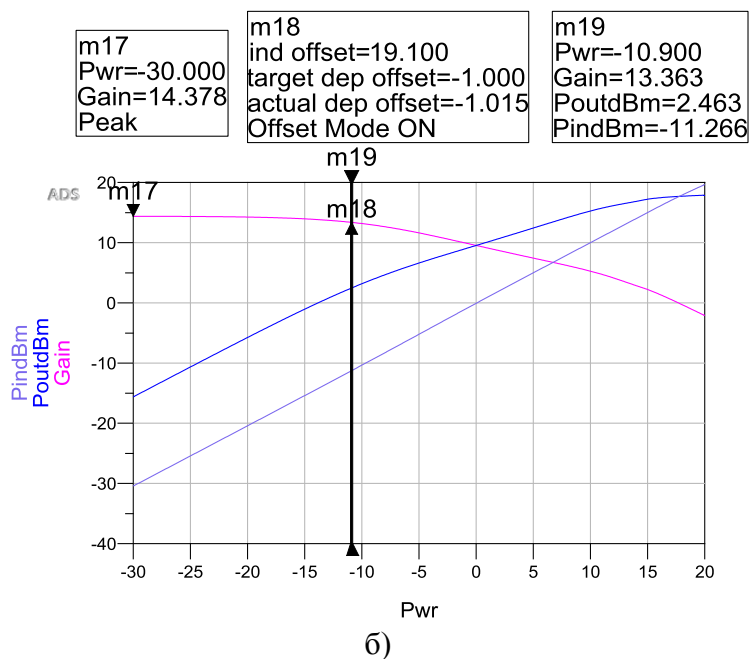


Рисунок 10.42 – Параметры прототипа топологии двухкаскадного МШУ на моделях реальных компонентов на основе 0,25 мкм GaN НЕМТ технологии (WIN): а) S-параметры и коэффициент шума; б) выходная мощность и КУ на частоте 16 ГГц

Основные характеристики разработанного МШУ на основе 0,25 мкм GaN НЕМТ технологии (WIN) сведены в таблице 10.9. Значения мощности OP1dB и IP1dB получены при помощи нелинейной модели, однако скорее всего они являются заниженными, т.к. напряжение питания МШУ составляет 10 В при токе потребления 30 мА. Скорее всего, нелинейная модель выдает неверные значения и не оптимизирована для расчета характеристик при напряжении питания 10 В. Оценочное значение выходной мощности OP1dB для двухкаскадного МШУ на GaN технологии составляет порядка 12-15 дБм.

Таблица 10.9 – Параметры разработанных МШУ на частоте 16 ГГц на основе 0,25 мкм GaN НЕМТ технологии (WIN)

Структура	S <sub>21</sub> , дБ	NF, дБ	S <sub>11</sub> , дБ	S <sub>22</sub> , дБ	IP <sub>1dB</sub> , дБм	OP <sub>1dB</sub> , дБм	V <sub>dd</sub> , В I <sub>dd</sub> , мА	P <sub>dc</sub> , мВт	Размеры, мм <sup>2</sup>
Двухкаскадный	14,3	1,8	-11,3	-20,1	-11,2	2,1	10 30	300	2,2×1,3

### 10.2.2 Анализ воздействия дестабилизирующих факторов на МШУ

#### Однокаскадный МШУ на основе 0,13 мкм КНИ (X-FAB)

Был проведен анализ воздействия дестабилизирующих факторов на характеристики однокаскадного МШУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). Библиотека XR013 верифицирована в области температур от -40 °С до +125 °С. В таблице 10.10 приведены значения основных параметров МШУ полученные в результате моделирования для трёх значений температуры: -65 °С, +25 °С, +125 °С. Рабочая точка МШУ была следующей: V<sub>ds</sub>

= 2,4 В,  $V_{gs} = 0,45$  В. Дополнительно был вычислен температурный коэффициент (ТКС) для указанных характеристик.

Таблица 10.10 – Результаты моделирования однокаскадного МШУ на частоте 16 ГГц на основе 0,13 мкм КНИ технологии в диапазоне температур -65 ...125 °С

Однокаскадный МШУ (X-FAB XR013)	T, °С	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	NF, дБ	OP <sub>1dB</sub> , дБм	P <sub>dc</sub> , мВт
	-40	17,0	-233,6	1,22	6,62	33,1
	+25	15,97	-236,6	1,79	6,11	25,8
	+125	14,53	-240,5	2,73	5,48	21,7
	ТКС	-0,015 дБ/°С	-0,042 °/°С	0,009 дБ/°С	-0,006 дБм/°С	-0,06 мВт/°С

Разброс параметров в зависимости от температуры можно уменьшить, если подстраивать значение напряжения смещения  $V_{gs}$ . В таблице 10.11 приведены результаты моделирования однокаскадного МШУ на частоте 16 ГГц в диапазоне температур -65...125 С при подстройке напряжения смещения  $V_{gs}$ .

Таблица 10.11 – Результаты моделирования однокаскадного МШУ на частоте 16 ГГц на основе 0,13 мкм КНИ технологии в диапазоне температур -65 ...125 °С при подстройке напряжения смещения  $V_{gs}$

Однокаскадный МШУ (X-FAB XR013)	T, °С	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	NF, дБ	OP <sub>1dB</sub> , дБм	P <sub>dc</sub> , мВт	$V_{gs}$ , В
	-40	15,86	-236,9	1,43	5,6	21	0,3
	+25	15,97	-236,6	1,79	6,11	25,8	0,45
	+125	14,82	-240,4	2,61	6,31	37,9	0,6
	ТКС	-0,006 дБ/°С	-0,02 °/°С	0,0062 дБ/°С	0,0037 дБм/°С	0,089 мВт/°С	-

Таким образом, удалось снизить влияние температуры на характеристики МШУ. Отсюда следует вывод, что для однокаскадного МШУ необходимо разработать активную схему подачи напряжения смещения  $V_{gs}$ , которая бы формировала напряжение от 0,3 В до 0,6 В в диапазоне температур от -40 до 125 °С.

Далее был проведен анализ влияния технологического разброса на параметры однокаскадного МШУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии. Рассмотрены три граничных случая технологического разброса (Corners): типичный случай (ТТ), лучший случай (FF) и худший случай (SS) (таблица 10.12).

Таблица 10.12 – Результаты моделирования влияния технологического разброса на характеристики однокаскадного МШУ на 0,13 мкм КНИ технологии ( $f_0=16$  ГГц)

Граничный случай	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	NF, дБ	OP <sub>1dB</sub> , дБм	P <sub>dc</sub> , мВт
FF	16,4	-234,8	1,58	6,22	42,3
ТТ	15,97	-236,6	1,79	6,11	25,8
SS	15,18	-239,8	2,11	5,2	14,9
Разброс, %	7,6	2,1	29,6	16,7	106

### Двухкаскадный МШУ на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT (WIN PD2500)

Библиотека WIN PD2500 верифицирована в области температур от -20°C до 85°C. В таблице 10.13 приведены результаты моделирования  $S_{21}$ , NF, OP<sub>1dB</sub> и P<sub>dc</sub> для двухкаскадного МШУ (0,25 мкм GaAs pHEMT, WIN PD2500) на частоте 16 ГГц в диапазоне температур -20 ...85°C.

Таблица 10.13 – Результаты моделирования двухкаскадного МШУ на частоте 16 ГГц на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии в диапазоне температур -20 ...125 °C

	T, °C	S <sub>21</sub> , дБ	φ(S <sub>21</sub> ), °	NF, дБ	OP <sub>1dB</sub> , дБм	P <sub>dc</sub> , мВт
Двухкаскадный МШУ (WIN PD2500)	-20	16,3	-130,22	1,35	9	87
	25	16	-130,46	1,4	9	104
	85	15,5	-131,5	1,52	9	122
	ТКС	-0,0076 дБ/°C	-0,0096 °/C	0,0016 дБ/°C	-	0,33 мВт/°C

Отметим, что влияние температуры на МШУ на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии меньше чем на МШУ на основе 0,13 мкм КНИ.

Далее был проведен анализ влияния технологического разброса на параметры двухкаскадного МШУ. Рассмотрены три граничных случая технологического разброса (Corners): типичный случай (TT), лучший случай (FF) и худший случай (SS) (таблица 10.14).

Таблица 10.14 – Результаты моделирования влияния технологического разброса на характеристики МШУ на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT ( $f_0=16$  ГГц)

Граничный случай	S <sub>21</sub> , дБ	φ(S <sub>21</sub> ), °	NF, дБ	OP <sub>1dB</sub> , дБм	P <sub>dc</sub> , мВт
FF	15,4	-116,8	1,4	10,4	228
TT	16	-130,46	1,4	9	104
SS	15,3	-119,2	1,73	9,7	80
Разброс, %	4,5	10,5	23,6	15	120%

Отметим, что КУ, КШ и выходная мощность для GaAs и КНИ технологий зависят от технологического разброса приблизительно одинаково. В то время как разброс фазы КУ для МШУ на GaAs составляет 10%, а для КНИ разброс фазы 2%.

### 10.2.3 Анализ технических решений по обеспечению прочности комплектов МИС к воздействующей мощности

Согласно проведенному обзору, при разработке МШУ на основе GaAs/GaN для ограничения входной мощности используются PIN-диоды (либо диоды Шоттки). Вносимые потери для подавляющего большинства устройств в интересующем частотном диапазоне находятся в пределах от 0,5 до 1 дБ. При максимальной входной мощности до 40 дБм (10 Вт) мощность просачивания составляет от 10 до 20 дБм.

Для кремниевых технологий также возможна реализация ЗУ на основе диодов и ключевых транзисторов. Однако для разработки ЗУ на кремниевых технологиях необходимо оценить уровень максимальной входной мощности, при которой произойдет отказ работоспособности МШУ. В данном разделе приводятся результаты экспериментального исследования максимальной допустимой пиковой мощности для буферного усилителя 1–4 ГГц на основе 0,25 мкм КМОП технологии. Далее, исходя из полученных данных по максимальной входной мощности, рассмотрено проектирование ЗУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии.

Для исследования максимальной допустимой пиковой мощности использовался интегральный двухкаскадный усилитель, выполненный по 0,25 мкм КМОП технологии (ИНР). Рабочий диапазон частот усилителя 1-4 ГГц, напряжение питания  $V_{dd} = 2,5$  В (пробивное напряжение  $\sim 4,5$  В), ток потребления  $I_{dd} = 60$  мА, выходная мощность 15 дБм, коэффициент усиления более 15 дБ. Конструкция печатной платы с корпусированным усилителем (в составе сложнофункционального узла) представлена на рисунке 10.43.

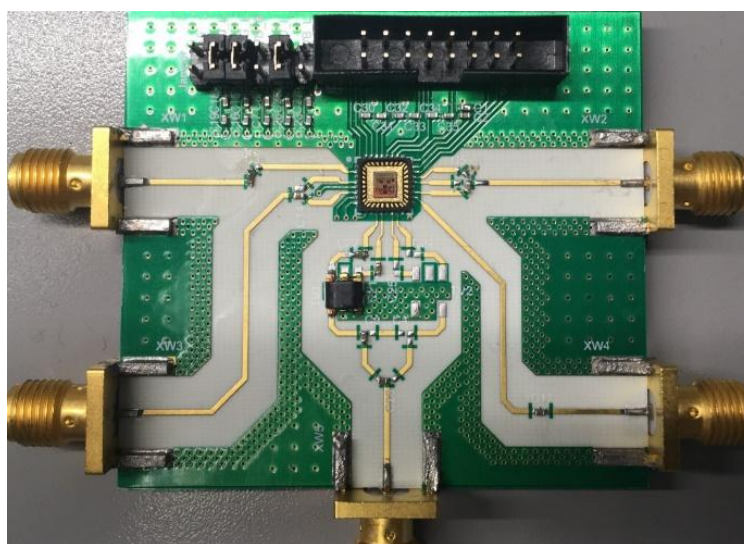


Рисунок 10.43 – Конструкция печатной платы с корпусированным исследуемым кремниевым усилителем (в составе сложно-функционального узла)

При исследовании на вход усилителя подавался периодический РЧ импульсный сигнал:  $f_0 = 1,5$  ГГц, ширина импульса  $\tau_{и} = 10$  мкс, период  $T = 50$  мкс (скважность  $Q = 5$ ). На выходе усилителя через коаксиальный аттенюатор с ослаблением 20 дБ был подключен детектор мощности. На рисунке 10.44 приведена зависимость пиковой выходной мощности исследуемого усилителя от входной. Катастрофическая деградация усилителя наступила при пиковой входной мощности около 24 дБм (250 мВт).



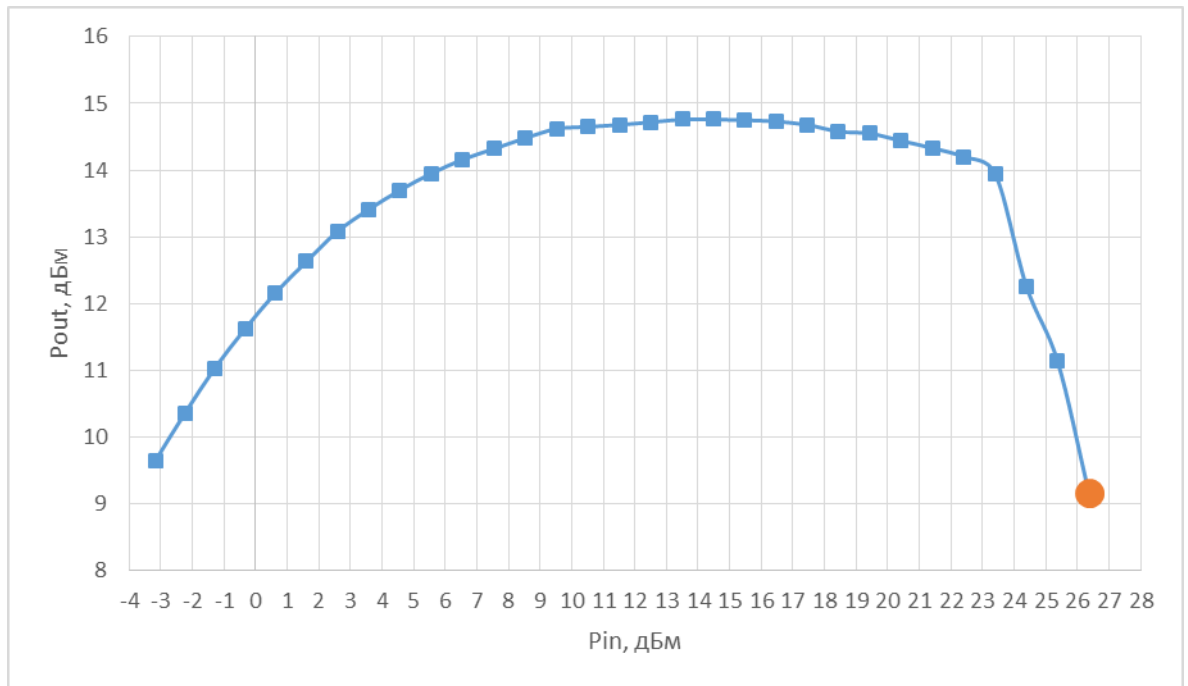


Рисунок 10.44 – Зависимость выходной мощности от входной для буферного усилителя на 0,25 мкм КМОП технологии

#### Защитное устройство на основе 0,13 мкм КНИ (X-FAB)

Исходя из рисунка 10.44 максимальная входная мощность для МШУ не должна превышать 10–15 дБм. Разрабатываемое ЗУ состоит из стека последовательно включенных диодов (для повышения пробивного напряжения), выполняющих функцию детектора мощности входного сигнала. Напряжение, детектируемое на выходе диодов, открывает ячейки КМОП переключателей, которые шунтируют входной сигнал. Схема, реализованная на библиотечных элементах XFAB XR013, приведена на рисунке 10.45.

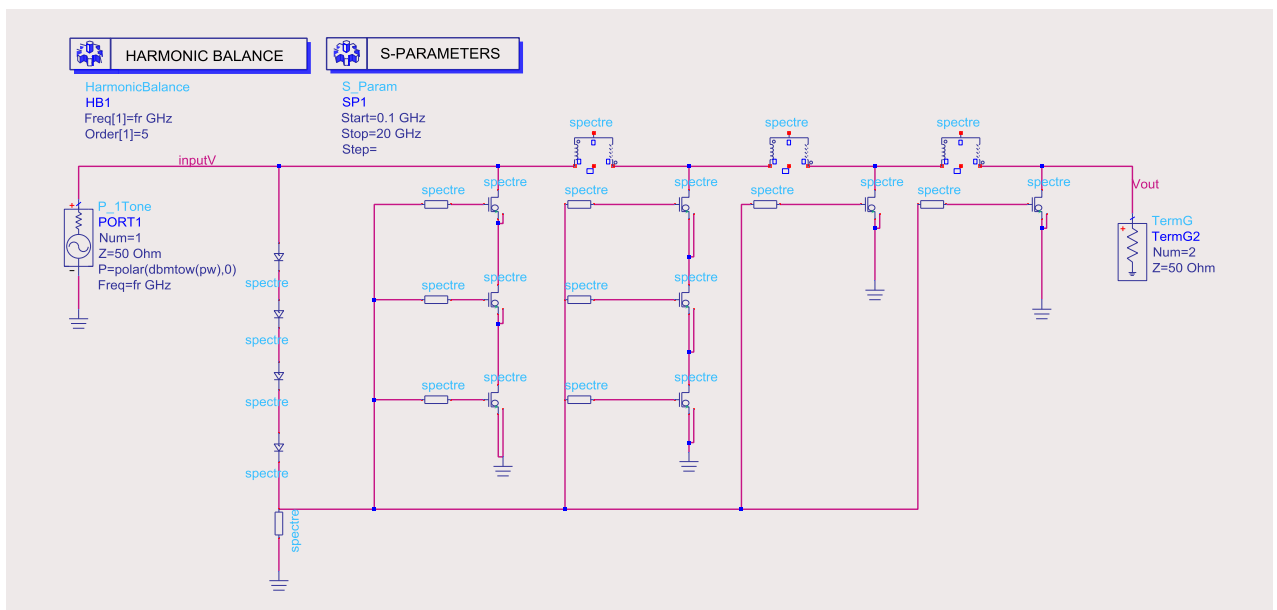


Рисунок 10.45 –Схема ЗУ на КМОП переключателях

Каскады n-МОП транзисторов (ширина затвора  $W_g = 50 \times 4,2$  мкм) подобраны таким образом, чтобы падение напряжения на всех участках не превышало пробивного напряжения транзисторов. Во время нормального режима работы, когда падающая мощность сигнала ниже 10 дБм, напряжение на затворах транзисторов остается малым, они остаются закрыты. Таким образом, данная схема работает как линия передачи с потерями 0,24 дБ на частоте 15 ГГц. Для согласования ЗУ необходимо использовать индуктивности между каскадами переключателей.

Когда падающая мощность превышает определенное значение, на выходе диодного детектора генерируется напряжение достаточное для открытия транзисторов, которые в свою очередь замыкаются на землю, и выполняют функцию ограничения мощности. Результаты моделирования представлены на рисунке 10.46 и рисунке 10.47.

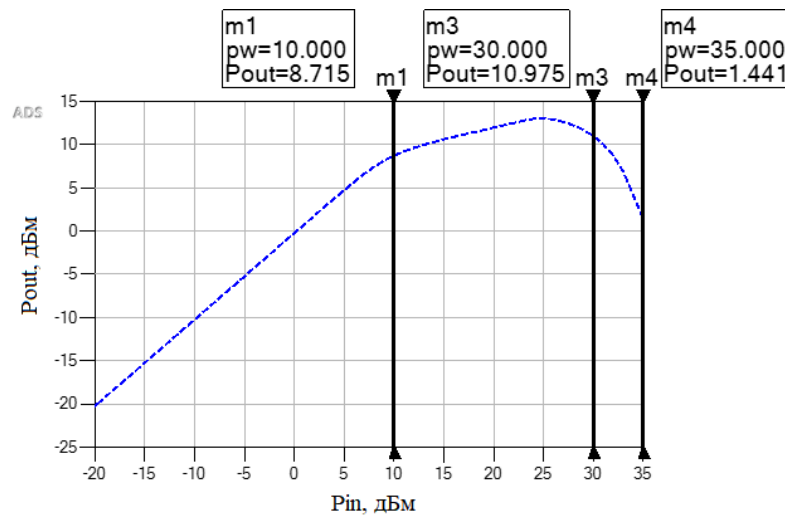


Рисунок 10.46 – Зависимость выходной мощности от входной для ЗУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

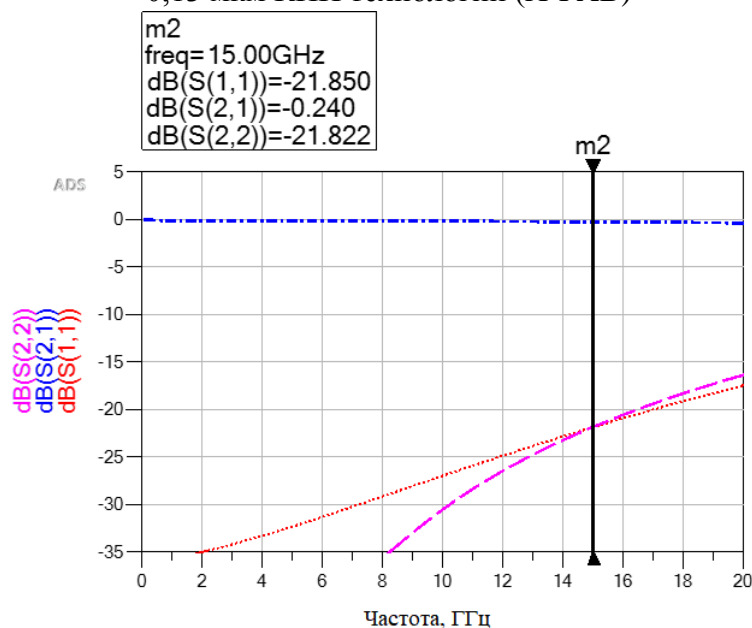


Рисунок 10.47 – S-параметры ЗУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

В таблице 10.15 приведены характеристики смоделированного ЗУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). Вносимые потери составили порядка 0,3-0,5 дБ, максимальная входная мощность 35-38 дБм, мощность просачивания не более 13 дБм. Размеры ЗУ составили 0,35×0,6 мм<sup>2</sup>.

Таблица 10.15 – Характеристики ЗУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

Технология	$\Delta f$ , ГГц	$S_{21}$ , дБ	$S_{11}$ , дБ; $S_{22}$ , дБ	Максимальная $P_{in}$ , дБм	Мощность просачивания, дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
0,13 мкм КНИ	14-16	-0,3 ...-0,5	< -20; < -20	35-38	10...13	0,35×0,6

Результаты моделирования МШУ с несимметричным выходом для различных кремниевых и АЗВ5 технологий в полосе 14-16 ГГц представлены в таблице 10.16.

Таблица 10.16 – Параметры разработанных МШУ в полосе частот 14-16 ГГц с недифференциальным выходом

Технология	$S_{21}$ , дБ	NF, дБ	$S_{11}$ , дБ; $S_{22}$ , дБ	IP <sub>1dB</sub> , дБм	OP <sub>1dB</sub> , дБм	V <sub>dd</sub> , В I <sub>dd</sub> , мА	P <sub>DC</sub> , мВт	Размеры, мм <sup>2</sup>
0,18 мкм SiGe БиКМОП (TSMC), двухкаскадный	22,9	3,1	-12,8; -15,2	-21,5	0,3	1,2; 2,4 5; 5	18	0,9×0,6 (0,54)
0,13 мкм КНИ (XFAB), двухкаскадный	21	1,5	-14,8; -22,3	-13	7	1,2; 2,4 8; 8	30	0,8×0,6 (0,48)
0,13 мкм КНИ (XFAB), однокаскадный	16	1,9	-12; -10	-9	6	2,4 11	26,4	0,5×0,55 (0,28)
0,25 мкм GaAs рHEMT (WIN), двухкаскадный	16	1,4	-16,1; -24	-6	9	4 26	104	1,5×1,2 (1,8)
0,25 мкм GaAs рHEMT (WIN), трехкаскадный	25	1,45	-15; -20	-9	15	4 50	200	1,9×1,2 (2,3)
0,25 мкм GaN HEMT (WIN), двухкаскадный	14,3	1,8	-11,3; -20,1	-11,2	2,1	10 30	300	2,2×1,3 (2,86)

Отметим, что при физической реализации КШ для кремниевых СВЧ ИС возрастает на 1-1,5 дБ, а для МШУ на основе технологий GaAs и GaN на 0,5-1 дБ. Как правило, это связано с погрешностью используемых моделей, потерями в МПД, дополнительными потерями и индуктивностью по земле и т.п.

Усилители на основе АЗВ5 технологий обладают большей линейностью и более низким значением КШ, но в то же время потребляемая мощность и площадь СВЧ ИС значительно выше кремниевых аналогов. Значения мощности OP<sub>1dB</sub> и IP<sub>1dB</sub> для GaN полу-

чены при помощи нелинейной модели, однако они являются заниженными, скорее всего нелинейная модель выдает неверные значения и не оптимизирована для расчета характеристик при напряжении питания 10 В. Оценочные значения выходной мощности OP1dB для двухкаскадного МШУ на GaN технологии составляет порядка 12-15 дБм.

МШУ на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП обладает значительным КШ ( $NF = 3,1$  дБ) и самой низкой выходной мощностью, но при этом самым низким значением потребляемой мощности. Отметим, что при физической реализации КШ на основе 0,18 мкм SiGe БиКМОП составит порядка 4-4,5 дБ.

МШУ на основе 0,13 мкм КНИ (XFAB) обладают сравнимым с АЗВ5 технологиями значением КШ ( $NF = 1,5$  дБ) и выходной мощностью, но при этом потребляемая мощность и занимаемая площадь гораздо меньше. Стоит отметить однокаскадное решение на основе каскода, которое незначительно увеличивает КШ до 2 дБ, но в то же время сокращает занимаемую площадь кристалла до  $\sim 0,3$  мм<sup>2</sup>. Оценочное значение реального КШ для однокаскадного МШУ на каскоде с использованием 0,13 мкм КНИ технологии составляет 2,5-3 дБ.

Сравнительная таблица с результатами моделирования кремниевых МШУ с дифференциальным выходом представлена в таблице 10.17. Среди дифференциальных реализаций стоит отметить однокаскадный МШУ с пассивным балуном на выходе, т.к. по совокупности всех характеристик данное решение превосходит все остальные.

Таблица 10.17 – Параметры разработанных кремниевых МШУ в полосе частот 14-16 ГГц с дифференциальным выходом

Технология	$S_{21}$ , дБ	NF, дБ	$S_{11}$ , дБ; $S_{22}$ , дБ	$IP_{1dB}$ , дБм	$OP_{1dB}$ , дБм	$\Delta A$ , дБ $\Delta \varphi$ , °	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{DC}$ , мВт	Размеры, мм <sup>2</sup>
0,18 мкм SiGe BiCMOS (TSMC), двухкаскадный	19,5	3,4	-10; -12	-18,5	3	$<0,8 < 10$	1,2; 2,4 5; 11	32,4	1,1×0,8
0,13 мкм КНИ (XFAB), двухкаскадный	18,5	2,1	-10,5; -9,6	-14	3,5	$<0,2 < 8$	1,2; 2,4 8; 16	48	1,1×0,7 (0,77)
0,13 мкм КНИ (XFAB), однокаскадный+пассивный СТ	15	2	-10; -10	-9	5	$<0,8 < 5$	2,4 11	26,4	0,9×0,55 (0,5)

Применение ЗУ на основе 0,13 мкм КНИ технологии увеличит КШ на 0,3-0,5 дБ и габариты МШУ на  $0,35 \times 0,6$  мм<sup>2</sup>. Но при этом мощность просачивания для ЗУ составит не более 13 дБм при максимальной входной мощности 35-38 дБм.

## 10.2.4 Усилители мощности

В данном разделе проведено моделирование СВЧ МИС УМ на уровне принципиальных схем для выбранных технологических процессов и фабрик, а также произведена оценка конечных характеристик УМ: выходной мощности, к.п.д., усиления, нелинейных искажений и размеров ИС. Для реализации УМ с выходной мощностью 2,5 и 5 Вт были выбраны технологии 0,25 мкм GaN (WIN) и 0,25 мкм GaAs (WIN). Для реализации УМ с выходной мощностью 100 мВт выбрана технология 0,13 мкм КНИ (X-FAB), а для УМ с выходной мощностью до 1 Вт – технология 0,25 мкм SiGe БиКМОП (INP).

Выходная мощность, по возможности, должна быть обеспечена с запасом 0,5-1,0 дБ с учетом потерь в выходной СЦ и реализации широкополосного согласования в диапазоне 14-16 ГГц. Для достижения требуемой выходной мощности применяется схема суммирования мощности. Дополнительно была рассмотрена возможность реализации УМ с настройкой оптимального импеданса на гармониках для реализации высокоэффективного F или F/E класса, с целью повышения КПД оконечного каскада.

Разрабатываемые УМ должны обеспечивать достаточное усиление при входном сигнале с ИС формирователя диаграммы направленности (ФДН) равном не более 13-16 дБм. Таким образом, для достижения мощности насыщения  $P_{sat} = 37$  дБм (для GaN и GaAs УМ 5 Вт) потребуется коэффициент усиления GP порядка 21-24 дБ. Как правило, выходной каскад на мощных транзисторах с суммированием мощности в требуемом диапазоне частот обладает невысоким коэффициентом усиления, порядка 8 дБ (с учетом широкополосного согласования). Поэтому для реализации УМ с усилением до 20 дБ стоит рассмотреть двухкаскадный вариант.

Отметим, что суммарный к.п.д. каскадного соединения УМ будет меньше, чем к.п.д. оконечного каскада. На рисунке 10.48 приведен пример каскадного соединения двух УМ, а ниже приведен расчет суммарного к.п.д.

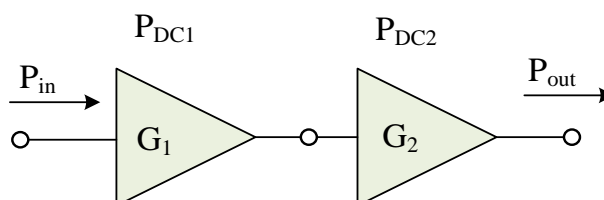


Рисунок 10.48 – Пример двухкаскадного УМ для расчета суммарного КПД

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC1} + P_{DC2}} = \frac{\eta_2}{1 + \frac{P_{DC1}}{P_{DC2}}} = \frac{\eta_2}{1 + \frac{\eta_2}{\eta_1 \cdot G_2}} \quad (10.1)$$

Исходя из полученного выражения (5.1), следует, что при  $\eta_1 = \eta_2 = 50\%$  (0,5) и коэффициенте усиления оконечного каскада  $G_2 = 10$  дБ (т.е. 10 раз по мощности), суммарное

КПД будет равно ~45 %. При  $G_2 = 6$  дБ (4 раза по мощности), суммарное КПД равно ~40%. Чем ниже коэффициент усиления, тем сильнее влияние на суммарный КПД предыдущего усилителя.

### Разработка УМ до 5 Вт на основе GaN технологии

Исходя из результатов Load Pull моделирования на частоте 16 ГГц (п. 2.3.5) и измеренных данных на 10 ГГц для одиночного транзистора с общей шириной затвора  $W_g = 4 \times 200$  мкм (WIN NP2500), можно достичь КПД по добавленной мощности PAE = 48 % при выходной мощности  $P_{out} = 35,9$  дБм и усилении  $GP = 7,4$  дБ (рабочая точка  $V_{ds} = 28$  В,  $V_{gs} = -2,5$  В). Либо в этой же рабочей точке можно достичь PAE = 60 % при выходной мощности  $P_{out} = 35,9$  дБм и усилении  $GP = 9,4$  дБ. Полученные данные сильно зависят от выбранных условий согласования, поэтому для определения характеристик транзистора с  $W_g = 4 \times 200$  мкм с заданной выходной мощностью более 34 дБм (2,5 Вт) в условиях широкополосного согласования была реализована схема на реальных элементах, изображенная на рисунке 10.49. С целью повышения КПД рабочая точка транзистора была выбрана для глубокого класса АВ ( $V_{ds} = 28$  В,  $V_{gs} = -2,5$  В,  $I_{ds} = 11$  мА).

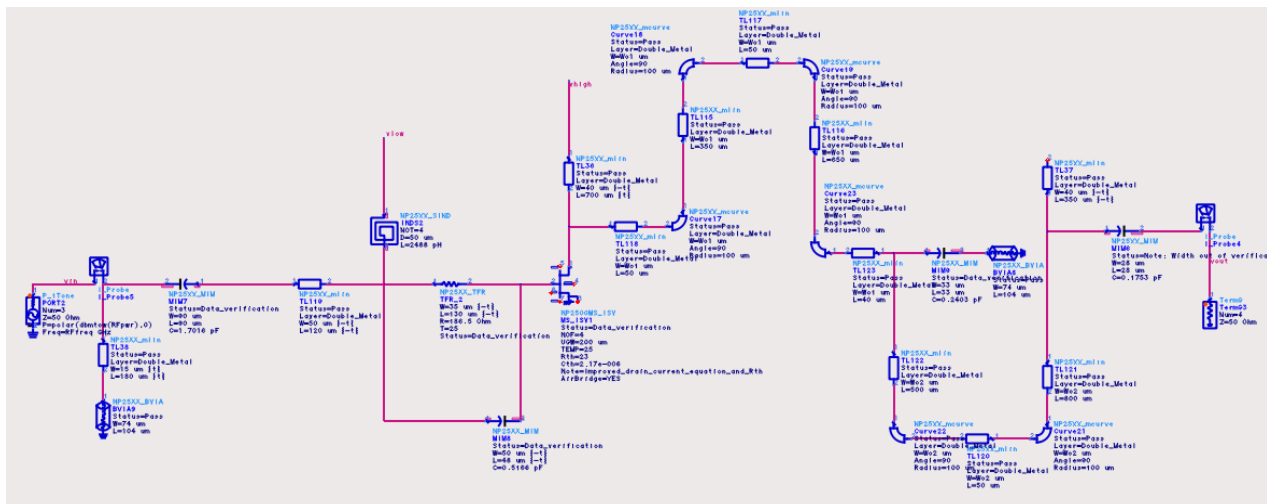


Рисунок 10.49 – Принципиальная схема одного каскада УМ на реальных элементах для диапазона 14-16 ГГц на основе GaN НЕМТ транзистора с  $W_g = 4 \times 200$  мкм

Получившиеся мощностные характеристики УМ при входной мощности  $P_{in} = 27,4$  дБм изображены на рисунке 10.50. КПД по добавленной мощности PAE в полосе 14-16 ГГц составляет не менее 48%. Выходная мощность  $P_{out}$  в полосе составляет более 34 дБм при коэффициенте усиления  $GP > 6,7$  дБ. При изменении рабочей точки до тока потребления  $I_{ds} = 89$  мА, КПД по добавленной мощности падает до значений 40-45% в полосе 14-16 ГГц, но при этом возрастает коэффициент усиления по мощности.

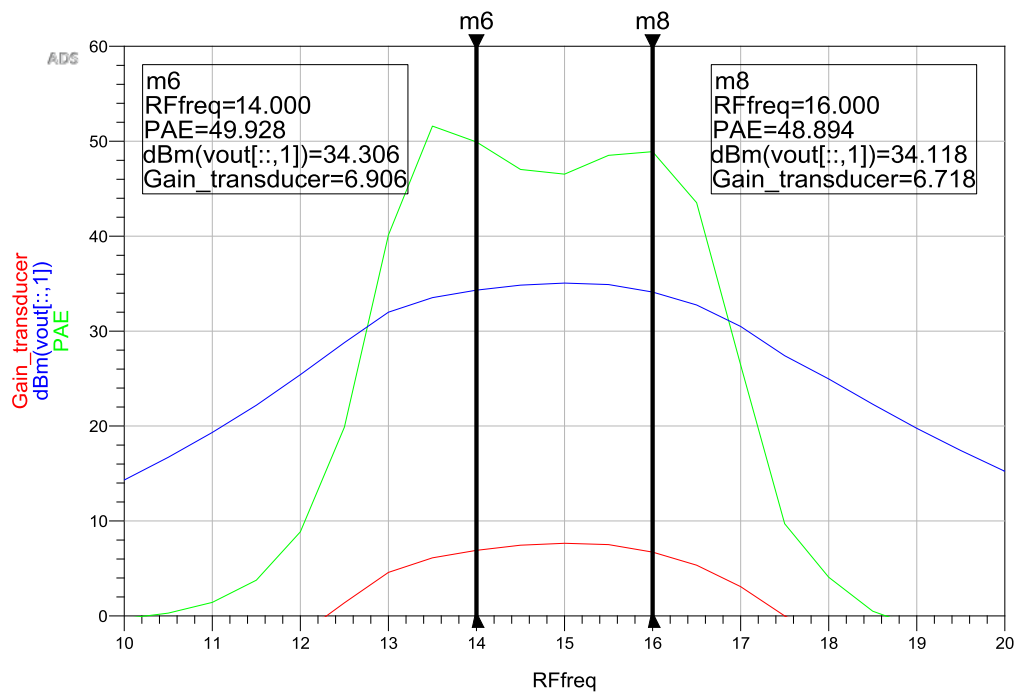


Рисунок 10.50 – Результаты моделирования выходной мощности  $P_{out}$ , КПД по добавленной мощности PAE, коэффициент усиления по мощности GP для одного каскада УМ диапазона 14-16 ГГц на основе GaN HEMT транзистора с  $W_g = 4 \times 200$  мкм

*Разработка предварительной топологии УМ 2,5 Вт на GaN.*

Для оценки итоговых характеристик и размеров двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт была разработана предварительная топология (размеры  $2,9 \times 1,7$  мм<sup>2</sup>), которая изображена на рисунке 10.51. В окончательном каскаде была использована модель WIN\_NP2500\_ISV с  $W_g = 4 \times 200$  мкм, для предусилителя была использована модель с размерами  $W_g = 2 \times 200$  мкм. На рисунках 10.52– 10.54 приведены результаты моделирования прототипа топологии двухкаскадного УМ 2,5 Вт на GaN технологии.

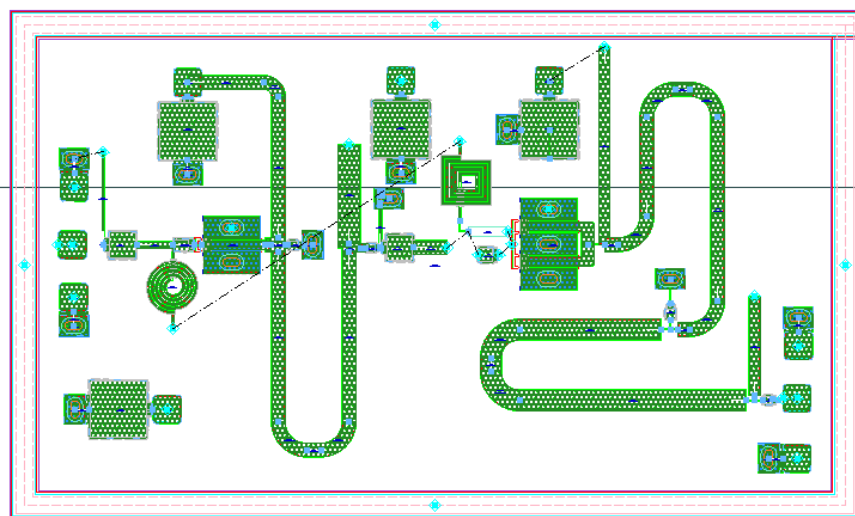


Рисунок 10.52 – Прототип топологии двухкаскадного УМ 2,5 Вт на основе 0,25 мкм GaN/SiC HEMT технологии (WIN NP2500), размеры  $2,9 \times 1,7$  мм<sup>2</sup>

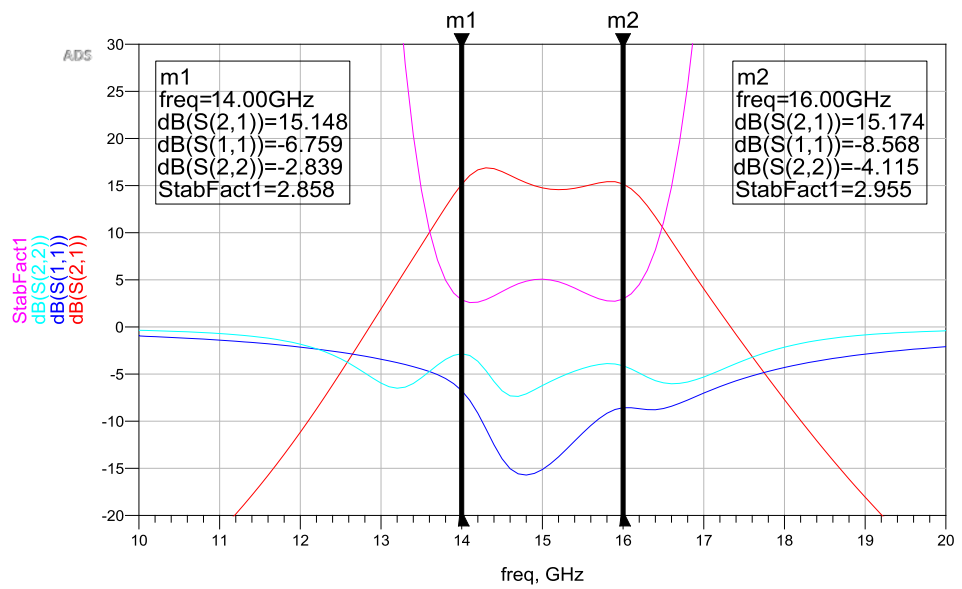
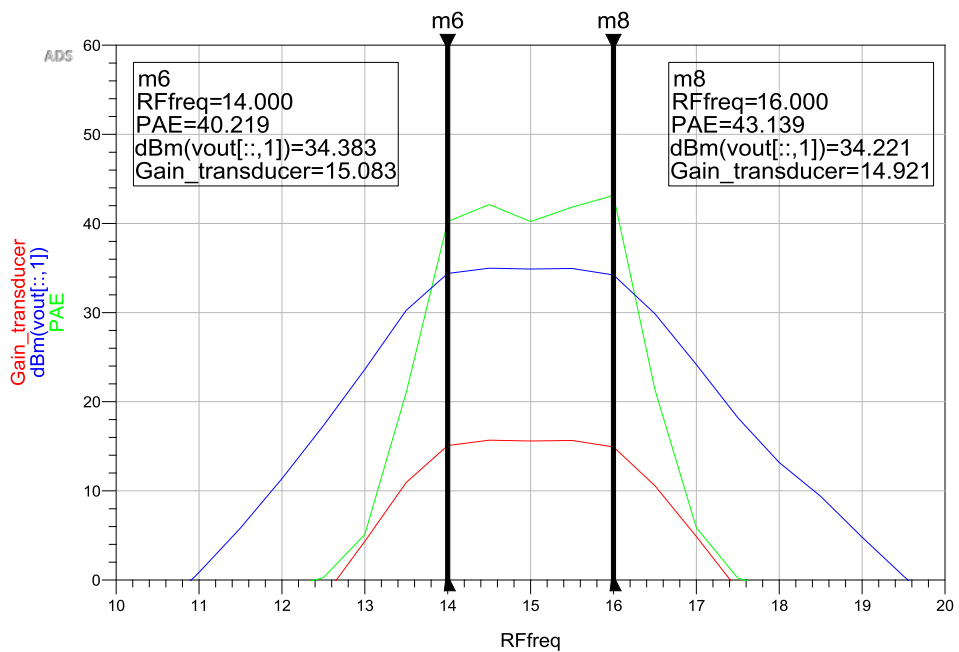


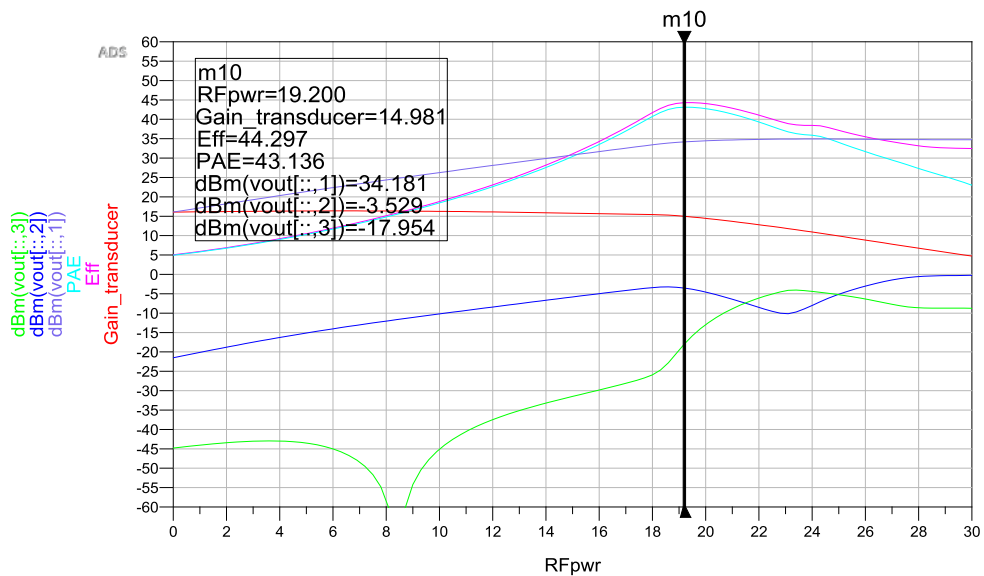
Рисунок 10.53 – S-параметры и Куост для двухкаскадного УМ 2,5 Вт на основе 0,25 мкм GaN/SiC HEMT технологии в зависимости от частоты



а)

Рисунок 10.54 (начало)





б)

Рисунок 10.54 – Результаты моделирования прототипа топологии двухкаскадного УМ 2,5 Вт на основе GaN технологии (WIN NP2500):  
а) при  $P_{in} = 19,3$  дБм; б) на частоте 16 ГГц

*Разработка УМ на основе GaN с выходной мощностью 5 Вт.*

На рисунке 10.55 представлена структурная схема двухкаскадного УМ и результаты системного расчета. Для получения требуемой мощности  $>5$  Вт было просуммировано 2 усилительных ячейки (суммарная периферия  $0,8 \times 2 = 1,6$  мм). Потери в выходной и входной СЦ были приняты равными 0,5 дБ, а потери в межкаскадной СЦ 1 дБ.

Согласно проведенному системному расчету двухкаскадного УМ со сложением 2 ячеек выходная мощность в насыщении составила  $P_{out} = 37,5$  дБм,  $PAE = 40\%$ ,  $GP = 12,5$  дБ, потребляемая мощность  $P_{DC} = 12,5$  Вт. Расчетная входная мощность составляет  $P_{in} = 25$  дБм.

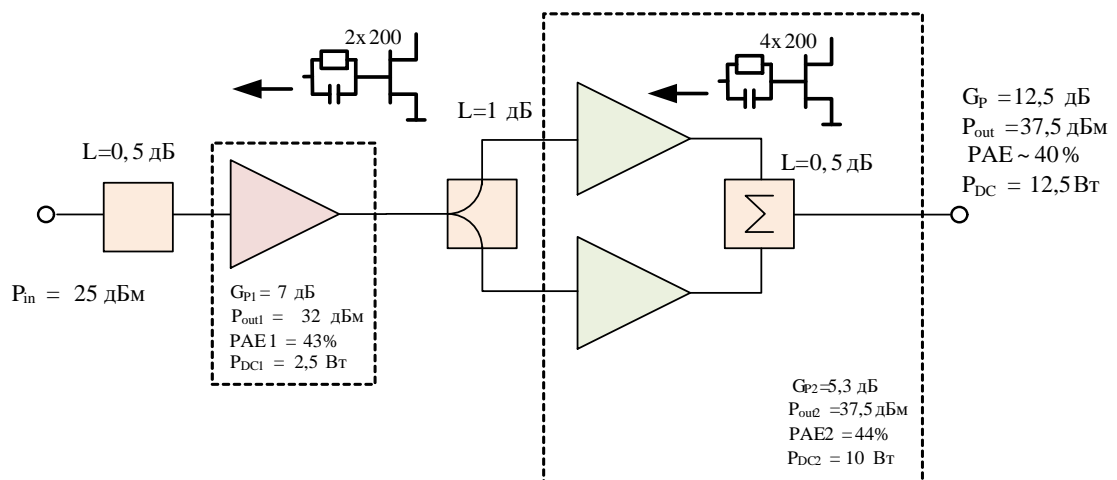


Рисунок 10.55 – Структурная схема двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN/SiC HEMT технологии (WIN NP2500)

Для оценки итоговых характеристик и размеров двухкаскадного УМ 5 Вт на GaN технологии была разработана предварительная топология (размеры  $3,3 \times 2,4 \text{ мм}^2$ ), которая изображена на рисунке 10.56. На рисунке 10.57 приведены результаты моделирования прототипа двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт.

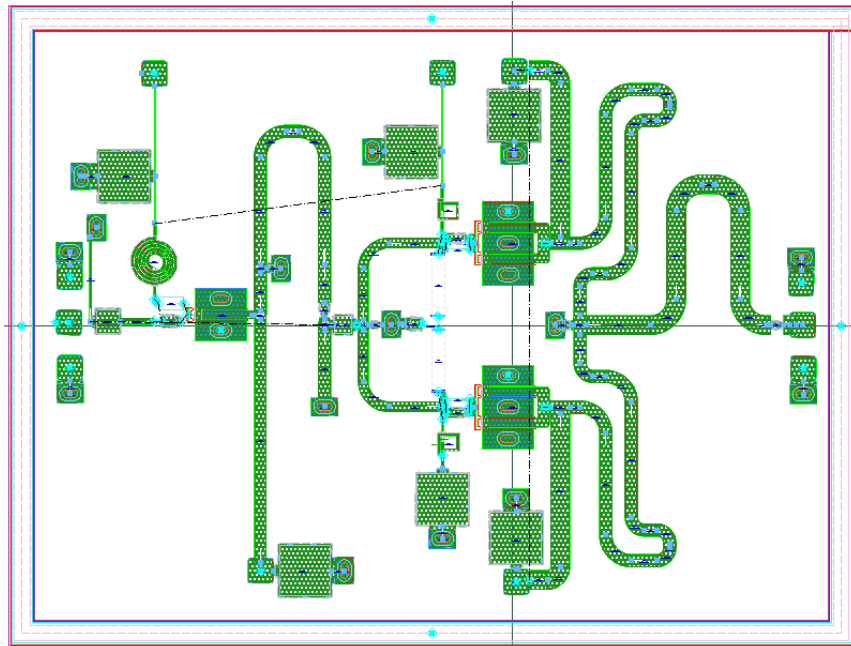
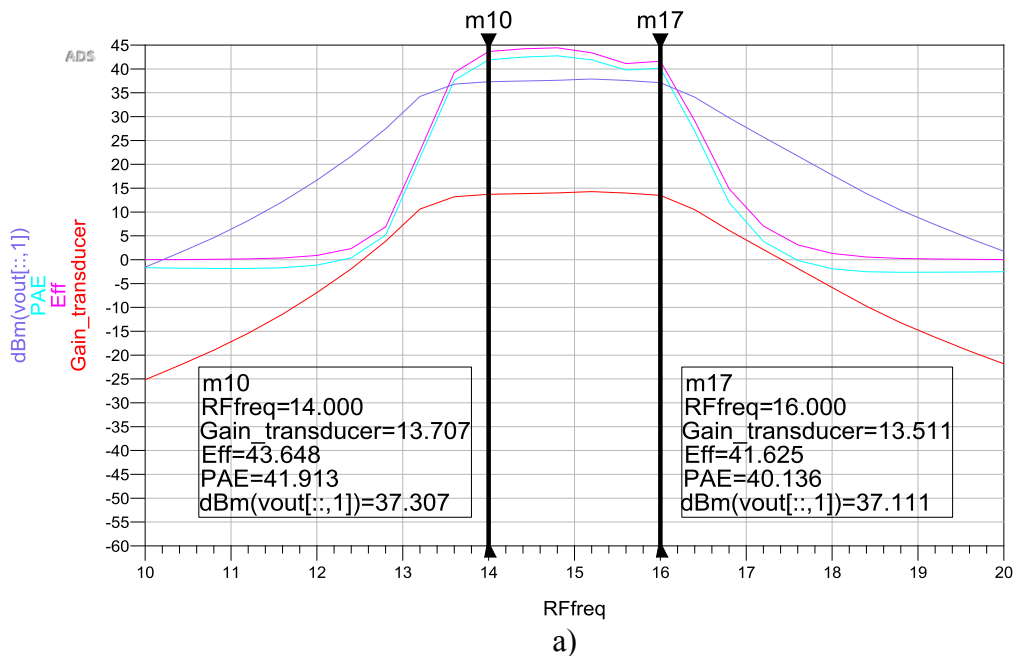
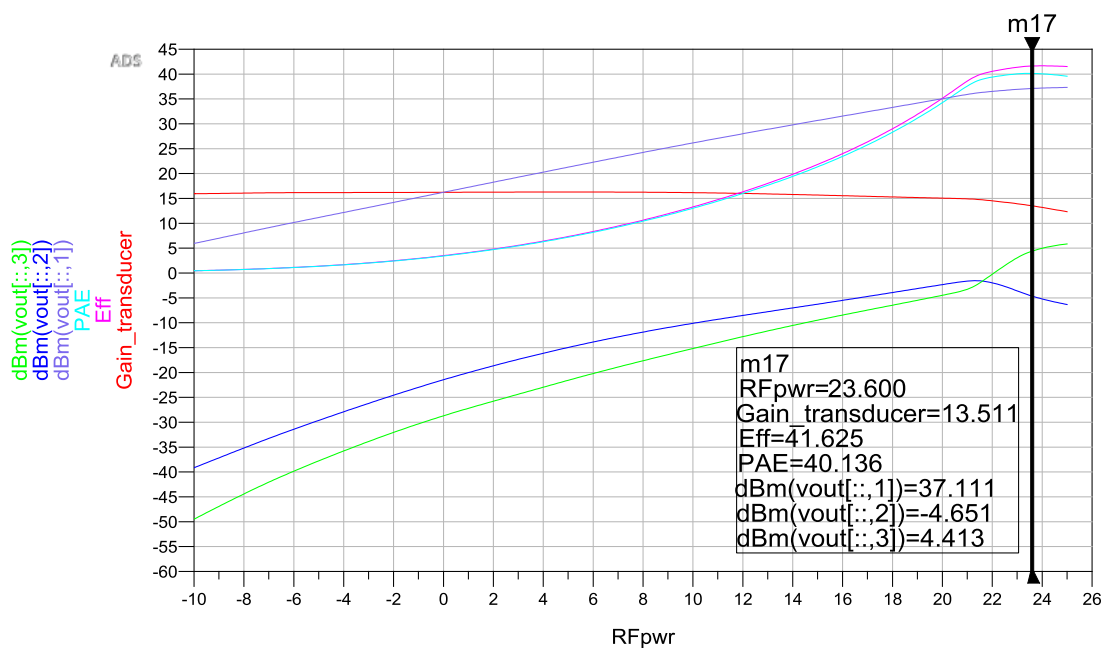


Рисунок 10.55 – Прототип топологии двухкаскадного УМ 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN/SiC HEMT технологии (WIN NP2500), размеры  $3,2 \times 2,4 \text{ мм}^2$





б)

Рисунок 10.56 – Результаты моделирования прототипа топологии двухкаскадного УМ 5 Вт со сложением мощности на основе GaN технологии (WIN NP2500):

а) при  $P_{in} = 23,6$  дБм; б) на частоте 16 ГГц

Итоговые характеристики УМ с выходной мощностью до 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии приведены в таблице 10.18. Для трехкаскадного УМ 5 Вт оценка размеров, потребления и усиления произведена на основе экспертных оценок. Отметим, что представленные результаты являются предварительными, т.к. топология не проходила этапы ЭМ моделирования, разработки цепей смещения/подачи питания, DRC проверки и т.п.

Таблица 10.18 – Результаты моделирования прототипов топологий УМ 2,5 Вт и 5 Вт на основе 0,25 GaN HEMT технологии в диапазоне 14-16 ГГц

	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f0}$ , дБм	$P_{3f0}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
Двухкаскадный УМ 2,5 Вт	34,2	40...43	15	-10 -5	28 210	5,9	-3,5	-18	2,9×1,7
Двухкаскадный УМ 5 Вт	37,1	40...42	13,6	-10 -5	28 440	12,3	-4,7	4,4	3,2×2,4
Трехкаскадный УМ 5 Вт	37,1	38	24	-15 -5	28 480	13,4	-4,7	4,4	3,6×2,4

### Разработка УМ до 5 Вт на основе GaAs технологии

Исходя из результатов Load Pull моделирования на частоте 16 ГГц и измеренных данных на 10 ГГц для одиночного транзистора с общей шириной затвора  $W_g = 8 \times 150$  мкм (WIN PP2521), можно достичь КПД по добавленной мощности PAE = 65% при выходной мощности  $P_{out} = 30,6$  дБм и усилении  $GP = 11,4$  дБ (рабочая точка  $V_{ds} = 8$  В,  $V_{gs} = -0,7$  В,  $I_{ds} = 167$  мА). Однако, достижение таких параметров возможно при узкополосном согла-

совании частоте  $f_0$ . При реализации широкополосной СЦ, как правило, стремятся выполнить требования по оптимальному импедансу в требуемой полосе частот. При этом из-за потерь и рассогласования не удастся обеспечить оптимальный импеданс во всей требуемой полосе. Поэтому для системного расчета примем следующие параметры выходной усилительной ячейки на основе транзистора  $W_g = 8 \times 150$  мкм = 1,2 мм (WIN PP2521) в полосе частот 14-16 ГГц: выходная мощность  $P_{out} = 30$  дБм, коэффициент усиления по мощности  $G_p = 10$  дБ, к.п.д. по добавленной мощности  $PAE = 55\%$ , мощность потребления  $P_{DC} = 1,6$  Вт.

*Системный расчет УМ на основе GaAs с выходной мощностью 2,5 Вт.*

На рисунке 10.57 представлена структурная схема двухкаскадного УМ и результаты системного расчета, для получения требуемой мощности  $> 2,5$  Вт было просуммировано 4 усилительных ячейек (суммарная периферия  $1,2 \times 4 = 4,8$  мм). Потери в выходной и межкаскадных цепях были приняты равными 1 дБ, потери во входной 0,5 дБ.

Согласно проведенному системному расчету двухкаскадного УМ со сложением 4 ячейек выходная мощность в насыщении составила  $P_{out} = 35$  дБм,  $PAE = 38\%$ ,  $GP = 18,5$  дБ, потребляемая мощность  $P_{DC} = 8,2$  Вт. Расчетная входная мощность составляет  $P_{in} = 16-17$  дБм.

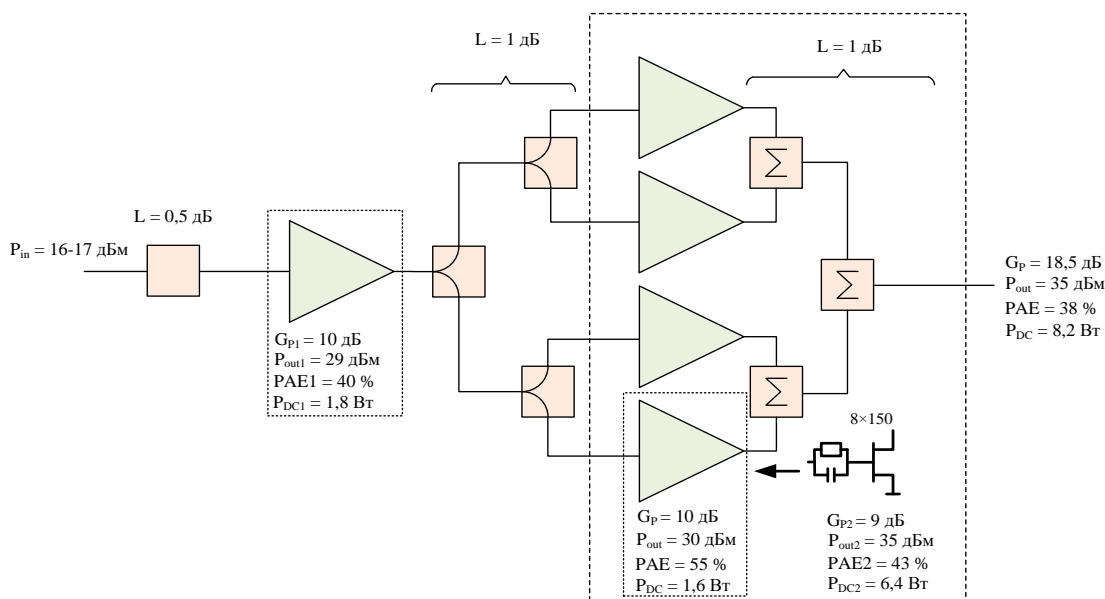


Рисунок 10.57 – Структурная схема двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN PP2521)

*Разработка предварительной топологии УМ 2,5 Вт на GaAs.*

Для оценки итоговых характеристик и размеров двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт на основе сложения 4 ячейек была разработана предварительная топология (прототип, размеры  $3,2 \times 1,7$  мм<sup>2</sup>), которая изображена на рисунке 10.58. В качестве нелинейной модели была использована модель WIN\_PP2521\_MS с  $W_g = 8 \times 150$  мкм. На рисунке

10.59 приведены результаты моделирования прототипа двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт.

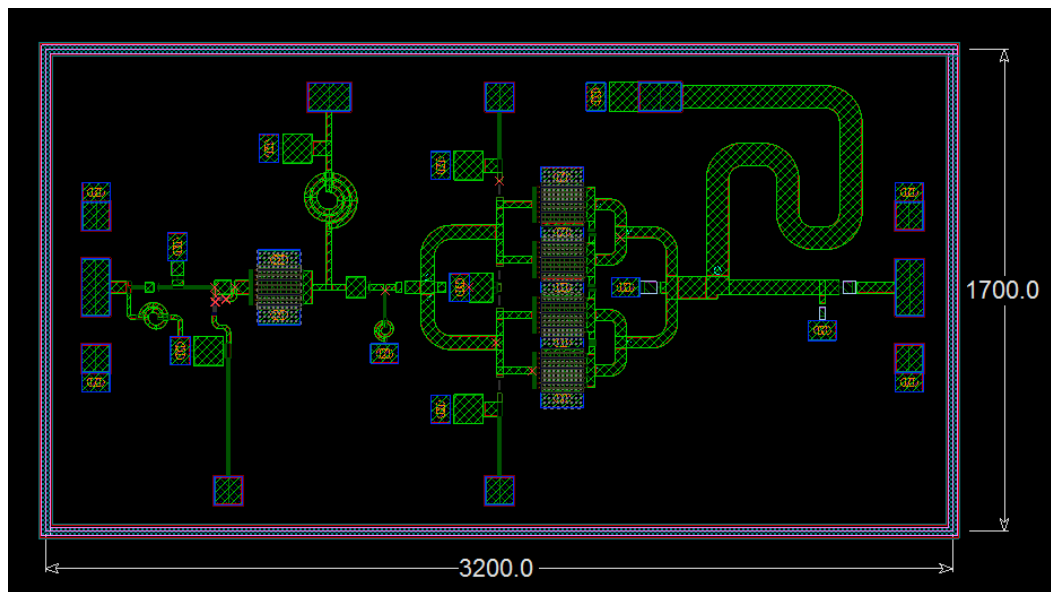
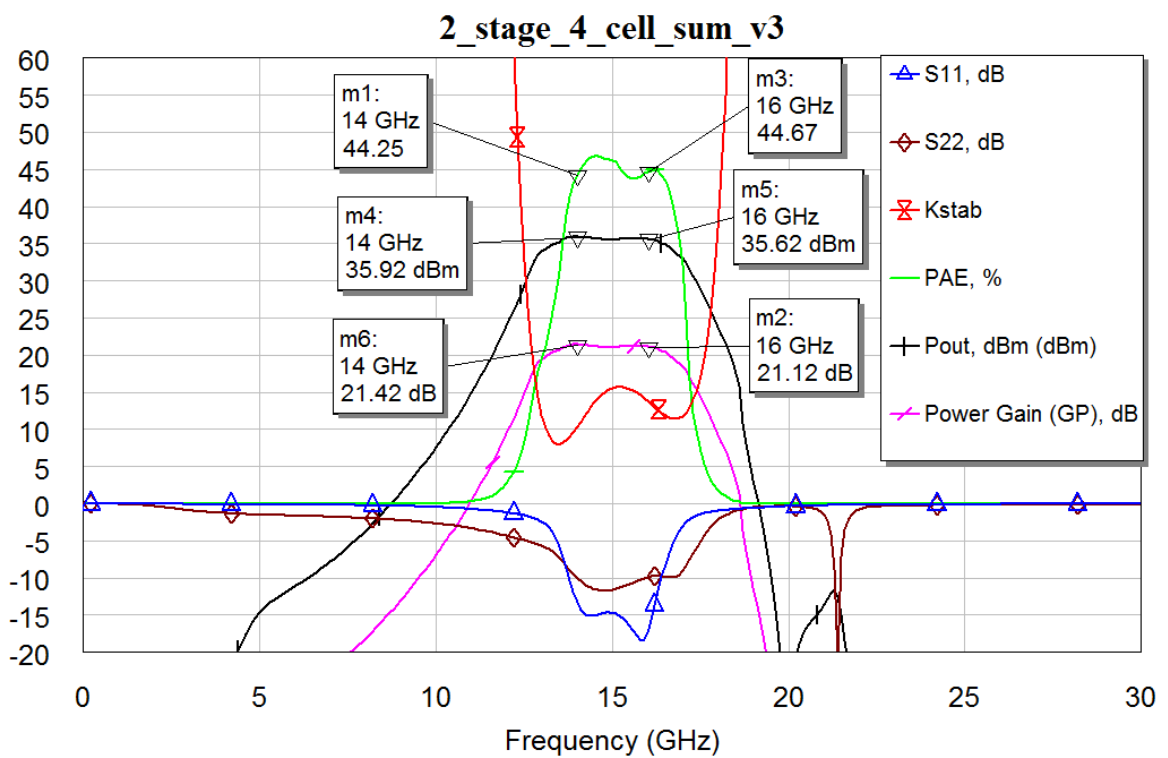
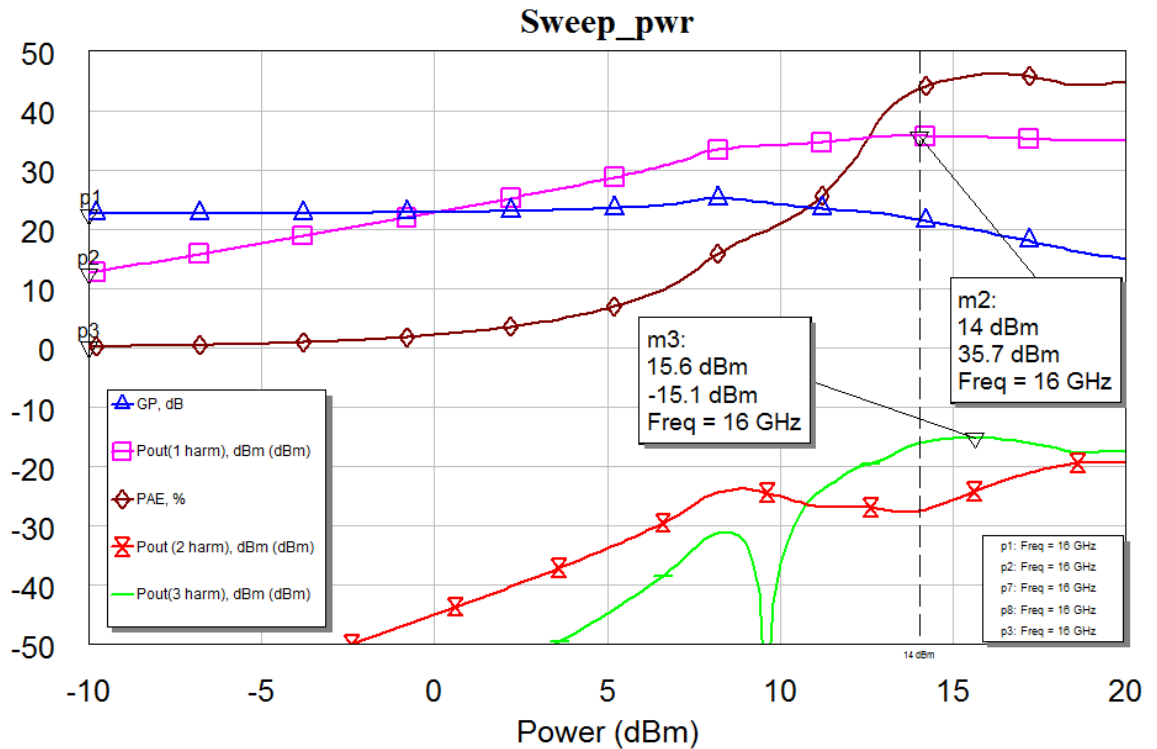


Рисунок 10.58 – Прототип топологии двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт на основе сложения 4 ячеек (0,25 мкм GaAs pHEMT технология, WIN PP2521), размеры 3,2×1,7 мм<sup>2</sup>



a)

Рисунок 10.59 (начало)



б)

Рисунок 10.59 – Результаты моделирования прототипа топологии двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт на основе сложения 4 ячеек (0,25 мкм GaAs рНЕМТ технология, WIN PP2521): а) при  $P_{in} = 14,5$  дБм в зависимости от частоты; б) на частоте 16 ГГц в зависимости от входной мощности

*Системный расчет УМ на основе GaAs с выходной мощностью 5 Вт.*

На рисунке 10.60 представлена структурная схема УМ, для получения требуемой мощности  $> 5$  Вт было просуммировано 8 усилительных ячеек с  $W_g = 8 \times 150$  мкм (суммарная периферия  $1,2 \times 8 = 9,6$  мм). Потери в выходной цепи приняты равными 1,5 дБ, а в межкаскадной и входной цепях равными 1 дБ.

Согласно проведенному системному расчету двухкаскадного УМ со сложением 8 ячеек, выходная мощность в насыщении составила  $P_{out} = 37,5$  дБм,  $PAE = 34$  %,  $G_P = 17,5$  дБ, потребляемая мощность  $P_{DC} = 16,4$  Вт. Расчетная входная мощность составляет  $P_{in} = 20-21$  дБм. Коэффициент усиления может быть увеличен на  $\sim 10$  дБ добавлением третьего каскада, при этом потребляемая мощность возрастет на 300-400 мВт.

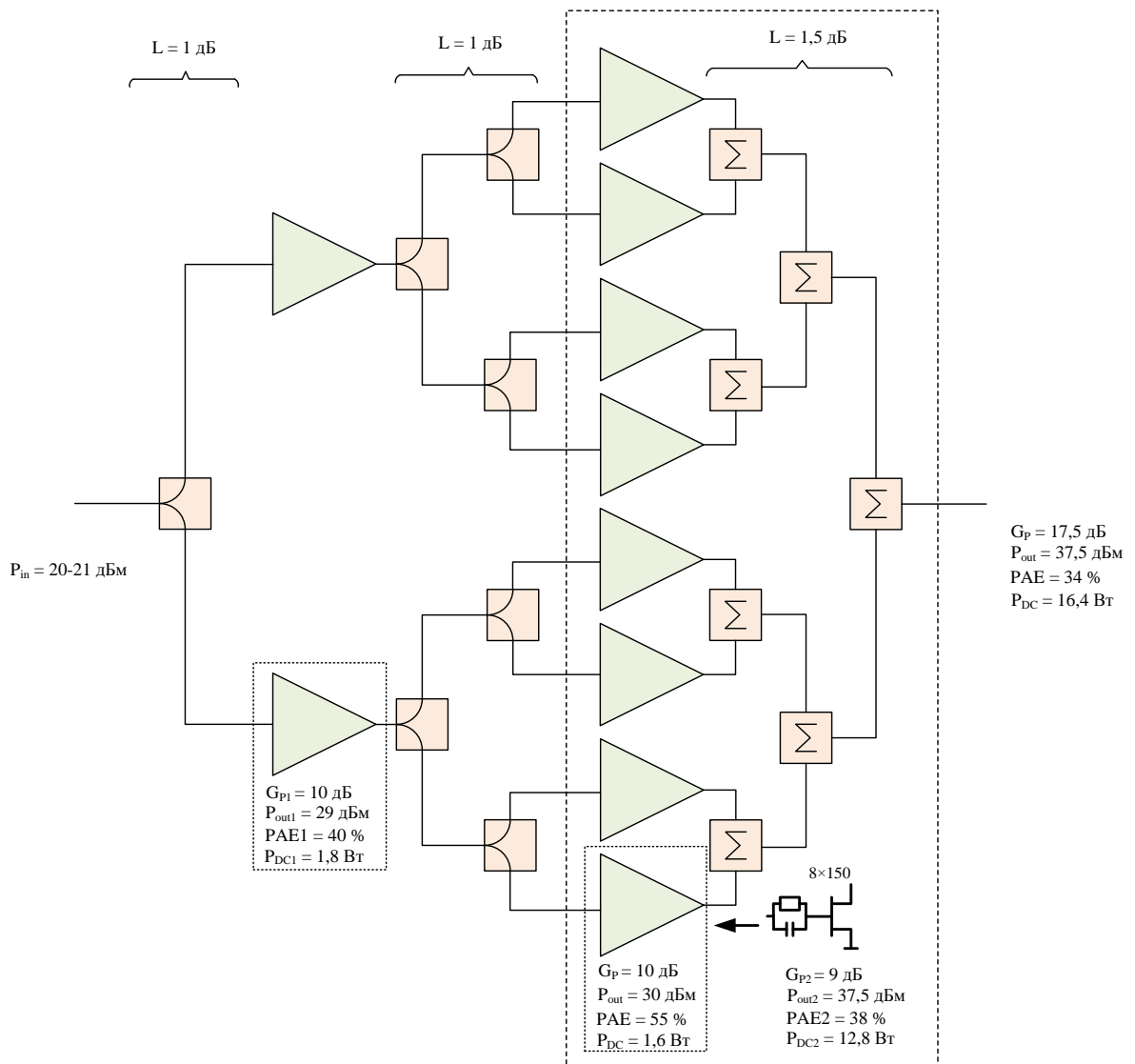


Рисунок 10.60 – Структурная схема УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии

*Разработка предварительной топологии УМ 5 Вт на GaAs.*

Для оценки итоговых характеристик и размеров двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе сложения 8 ячеек была разработана предварительная топология (прототип). Топология УМ 5 Вт получена на основе двух УМ 2,5 Вт разработанных ранее, мощность которых складывает при помощи моста Вилкинсона (рисунок 10.61). Размеры предварительной топологии двухкаскадного УМ 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN PP2521) составили 3,2×2,9 мм<sup>2</sup>.

На рисунке 10.62 приведены результаты моделирования прототипа двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт.

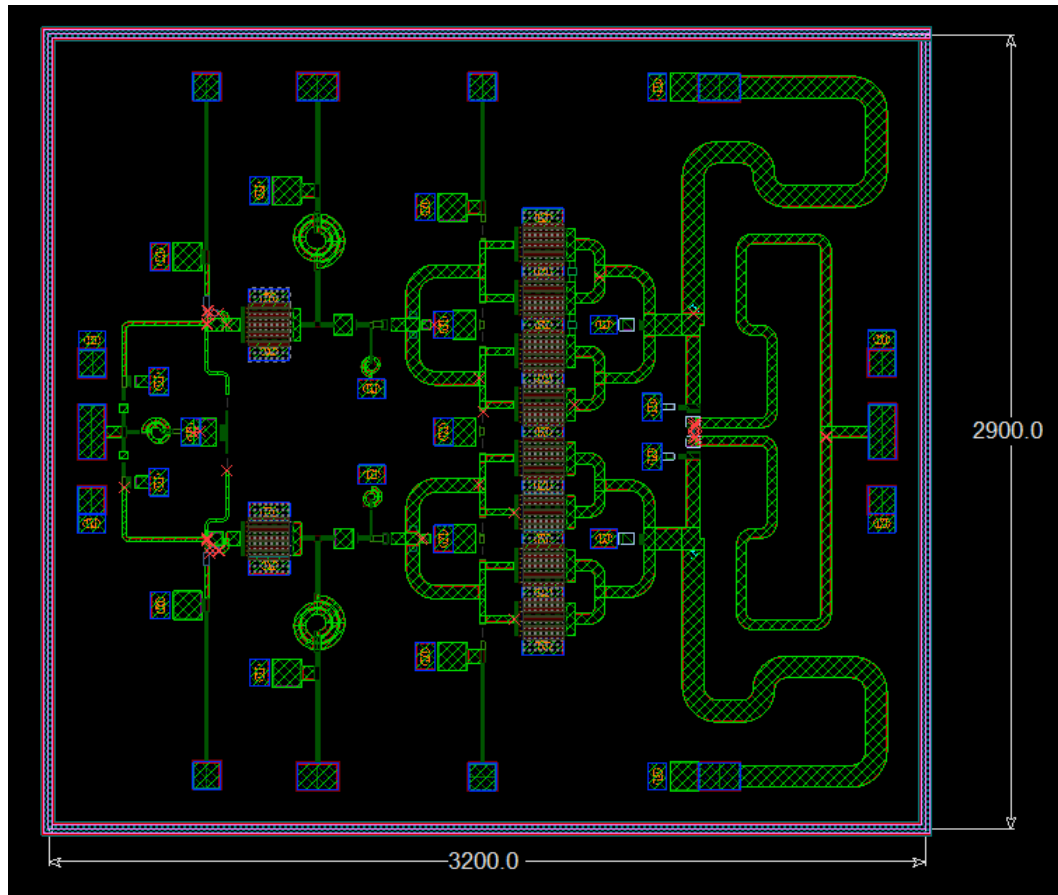
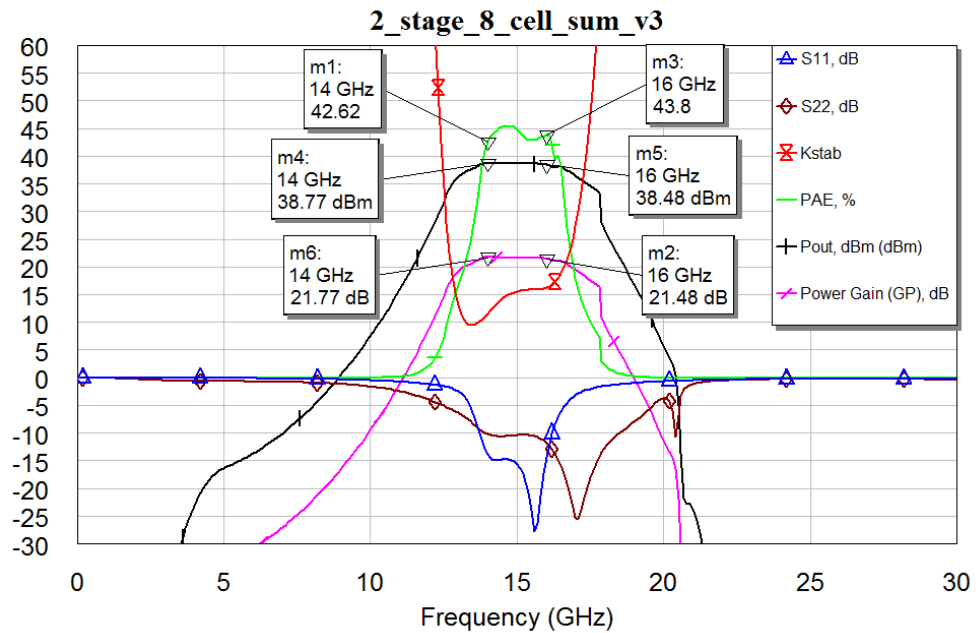


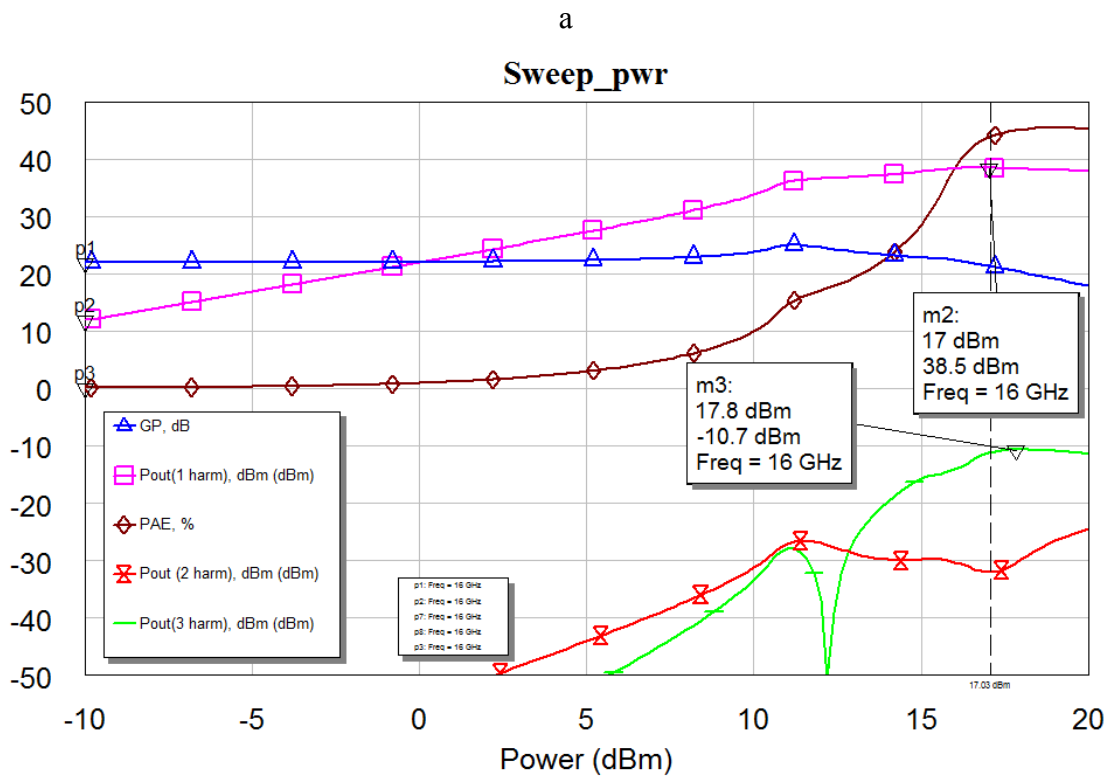
Рисунок 10.61 – Прототип топологии двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе сложения 8 ячеек (0,25 мкм GaAs pHEMT технология, WIN PP2521)



a)

Рисунок 10.62 (начало)





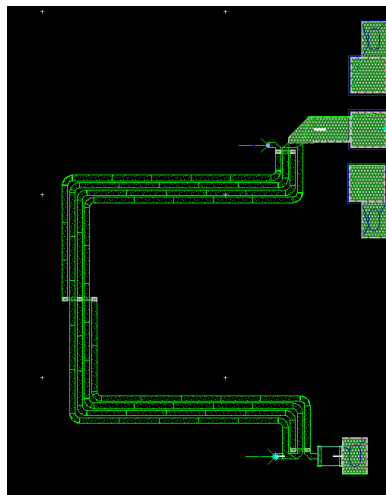
б)

Рисунок 10.62 – Результаты моделирования прототипа топологии двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе сложения 8 ячеек (0,25 мкм GaAs pHEMT технология, WIN PP2521): а) при  $P_{in} = 14,5$  дБм в зависимости от частоты; б) на частоте 16 ГГц в зависимости от входной мощности

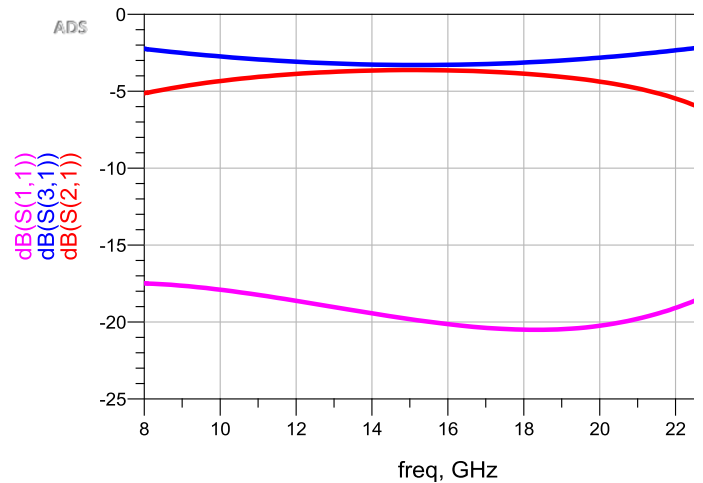
*Разработка предварительной топологии балансного УМ 5 Вт на GaAs.*

Коэффициент отражения от излучателя передающей ФАР зависит от частоты и от направления сканирования. Амплитуда коэффициента отражения составляет не более -10 дБ, а фаза коэффициента отражения зависит от направления сканирования и принимает все возможные значения при изменении направления сканирования. Если пересчитать коэффициент отражения в эквивалентное сопротивление 50-омной линии, то получаем, что сопротивление меняется в пределах от 25 Ом до 100 Ом. Также сопротивление может иметь комплексную составляющую, меняющуюся в зависимости от фазы отражённого сигнала. Как правило, для снижения воздействия изменения импеданса нагрузки используют балансную схему УМ на основе использования 3-дБ гибридных мостов (например, мост Ланге) на входе и выходе.

Для разработки балансного УМ был спроектирован мост Ланге на диапазон 14-16 ГГц (рисунок 10.63). Мост Ланге свернут для того, чтобы уменьшить размер балансного УМ. Вносимые потери составили порядка 0,4 дБ, фазовый разбаланс 3°, размеры моста  $0,9 \times 1,3$  мм<sup>2</sup>.



а)



б)

Рисунок 10.63 – а) Топология (размеры  $0,9 \times 1,3$  мм<sup>2</sup>) и б) результаты ЭМ моделирования моста Ланге на диапазон 14-16 ГГц

Для оценки итоговых характеристик и размеров двухкаскадного балансного УМ 5 Вт была разработана предварительная топология (прототип). Топология балансного УМ 5 Вт получена на основе двух УМ 2,5 Вт разработанных ранее, на входе и выходе использованы мосты Ланге (рисунок 10.64). Размеры предварительной топологии двухкаскадного балансного УМ 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ технологии (WIN PP2521) составили  $3,6 \times 2,9$  мм<sup>2</sup>, т.е. больше чем для УМ 5 Вт с сумматором Вилкинсона на выходе.

На рисунке 10.65 и в таблице 10.20 приведены результаты моделирования прототипа двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт. Выходная мощность и КУ меньше на 0,5 дБ чем для УМ 5 Вт с сумматором Вилкинсона, к.п.д. PAE составило в среднем 38 %.

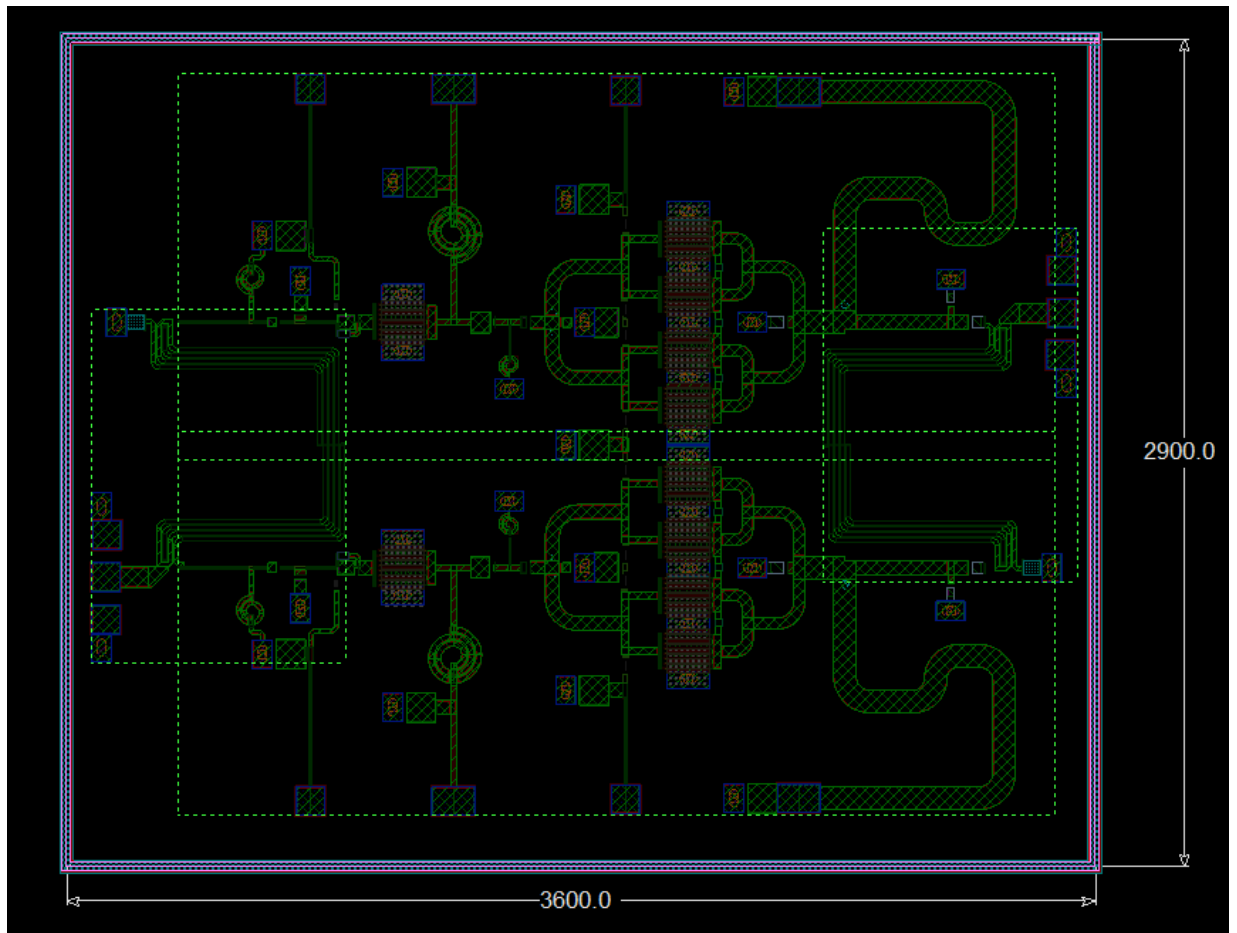
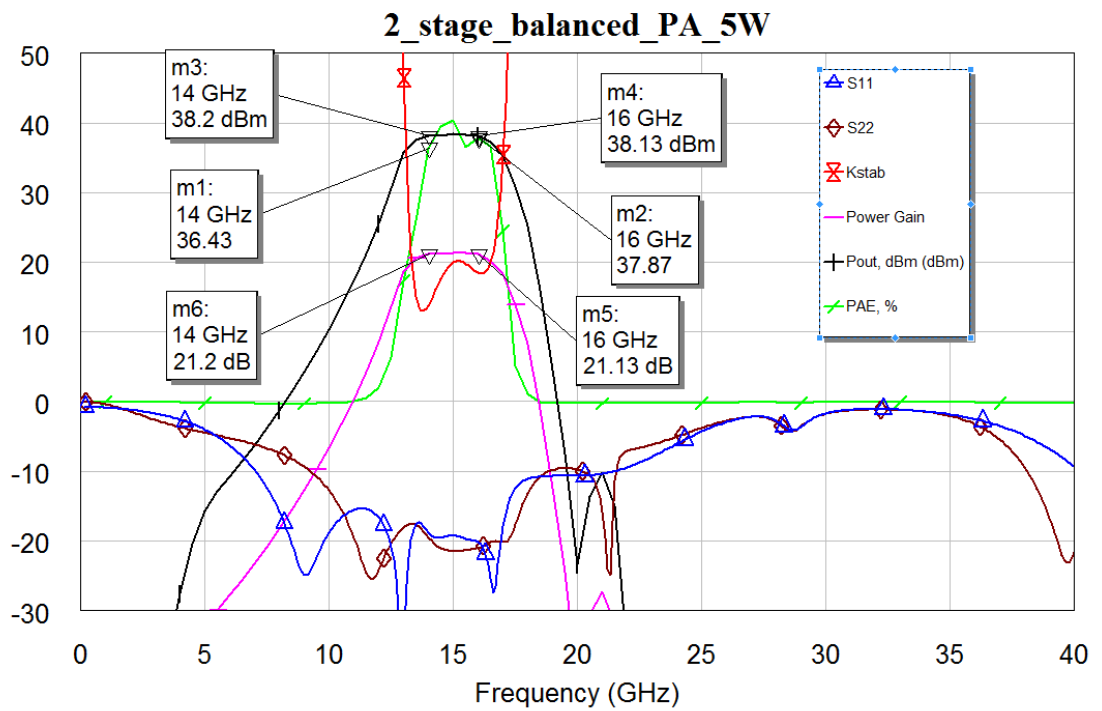
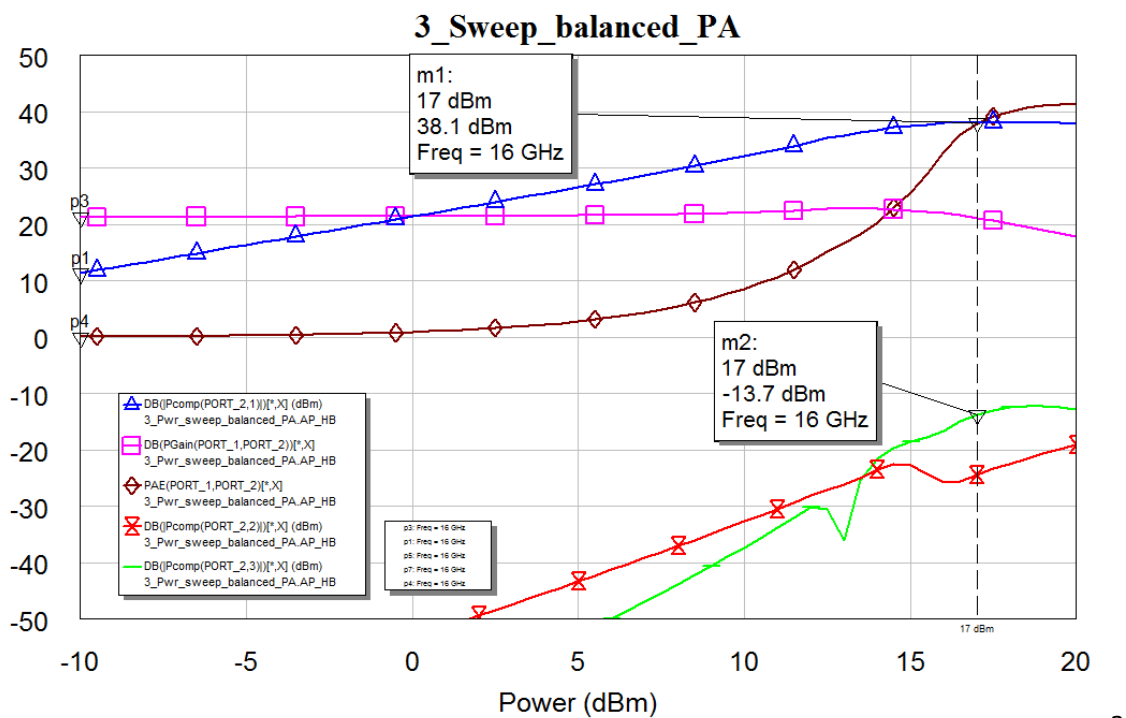


Рисунок 0.33 – Прототип топологии двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе сложения 8 ячеек (0,25 мкм GaAs рHEMT технология, WIN PP2521)



a)



a

б)

Рисунок 10.65 – Результаты моделирования прототипа топологии двухкаскадного балансного УМ 5 Вт на основе сложения 8 ячеек (0,25 мкм GaAs pHEMT технология, WIN PP2521): а) при  $P_{in} = 17$  дБм в зависимости от частоты; б) на частоте 16 ГГц в зависимости от входной мощности.

Итоговые характеристики УМ с выходной мощностью до 5 Вт приведены в таблице 10.19. Для трехкаскадного УМ 5 Вт оценка размеров, потребления и усиления произведена на основе экспертных оценок. Результаты моделирования прототипов топологии и системного расчета хорошо совпадают. Отметим, что представленные результаты являются предварительными, т.к. топология не проходила этапы ЭМ моделирования, разработки цепей смещения/подачи питания, DRC проверки и т.п.

Таблица 10.19 – Результаты моделирования прототипов топологий УМ с выходной мощностью 2,5 Вт и 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии в диапазоне 14-16 ГГц

	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
Двухкаскадный УМ 2,5 Вт	35,7	40...45	21,5	-15 -10	8 1000	8	<-15	<-12	3,2×1,7
Двухкаскадный УМ 5 Вт	38,5	43	21,5	-15 -10	8 2000	16	<-19	<-10	3,2×2,9
Двухкаскадный балансный УМ 5 Вт	38,2	38	21,2	-20 -20	8 2000	16	<-14	<-13	3,6×2,9
Трехкаскадный УМ 5 Вт	38,4	40	30	-15 -10	8 2050	16,4	<-19	<-10	3,6×2,9

Также заметим, что модели для 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии довольно неточные с точки зрения КПД. Так в документации библиотеки приводятся графики зависимостей смоделированной и измеренной выходной мощности, КПД по добавленной мощности и усиления для транзистора  $W_g = 2 \times 75$  мкм (рисунок 10.66). Для КПД разница между измерениями и моделью составляет более 10%. Точные значения выходной мощности  $P_{out}$ , к.п.д. PAE, а также мощности второй  $P_{2f_0}$  и третьей  $P_{3f_0}$  гармоники можно будет уточнить только на этапе экспериментальной отработки.

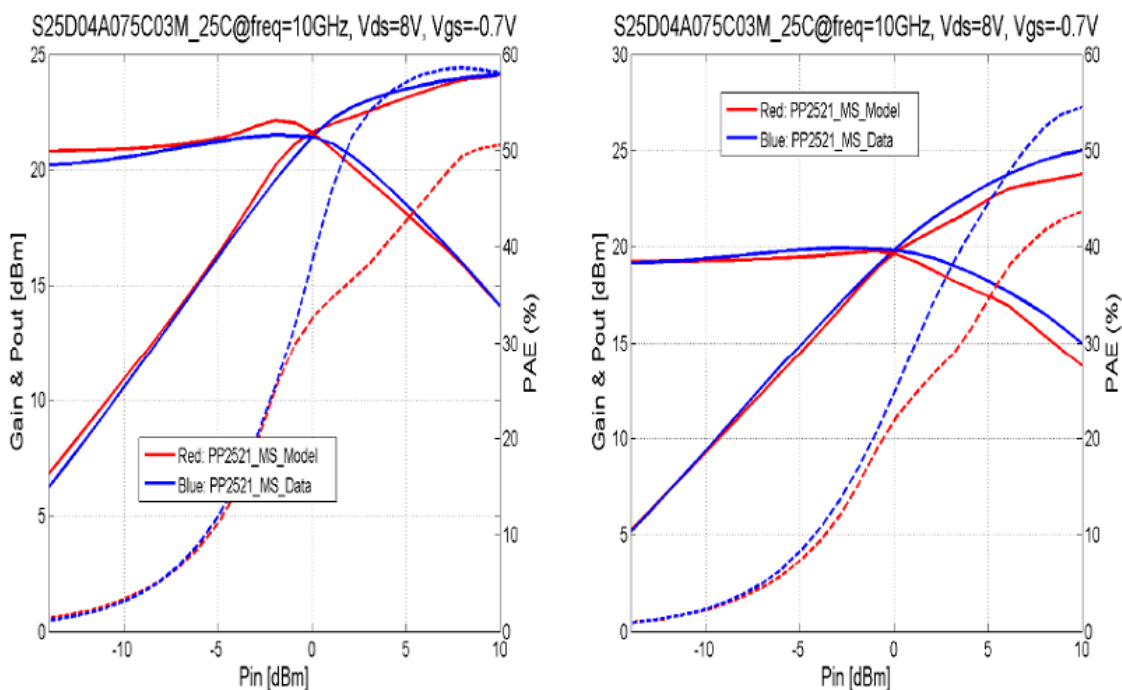


Рисунок 10.66 – Измеренные и смоделированные зависимости выходной мощности, КПД по добавленной мощности и усиления для транзистора  $W_g = 2 \times 75$  мкм ( $V_{ds} = 8$  В,  $V_{gs} = -0.7$  В) на частоте 10 ГГц

#### Разработка УМ до 1 Вт

Для оценки параметров УМ с выходной мощностью до 1 Вт была выбрана 0,25 мкм SiGe БикМОП технология фирмы ИНР, а именно биполярные транзисторы с площадью эмиттера  $0,42 \times 0,84 \times 32$  мкм<sup>2</sup>. В качестве базовой усилительной ячейки было решено использовать 4 параллельных каскода. Количество параллельных ячеек определяется размерами усилительной ячейки, длина соединительных проводников не должна превышать  $\lambda/16$ , для того, чтобы можно было считать их сосредоточенными. Также немаловажным фактором является максимально пропускаемый постоянный ток для верхних металлов ТМ2 и ТМ1, который составляет 16 и 15 мА/мкм, соответственно. Максимальная ширина для металлов в технологии ИНР составляет 30 мкм, что приводит к допустимому току 450-480 мА для дифференциального каскада (без учета запаса). Отметим также, что увеличение

количества параллельных ячеек ведет к снижению коэффициента усиления, росту паразитной выходной емкости и т.п.

Результаты Load Pull моделирования выходной мощности  $P_{out}$  и КПД по добавленной мощности PAE для базовой ячейки из 4 параллельных каскодов: выходная мощность  $P_{зdB} = 20,76$  дБм, КПД по добавленной мощности PAE = 28,5 % ( $V_{dd} = 3$  В,  $I_{dd} = 150$  мА). Далее была разработана упрощенная принципиальная схема дифференциального усилителя на основе разработанной ячейки на 4 параллельных каскодах (рисунок 10.67). Выходная СЦ может быть уменьшена за счет расчета СТ с необходимым комплексным импедансом. Также подача напряжения питания может быть осуществлена через среднюю точку во вторичной обмотке СТ.

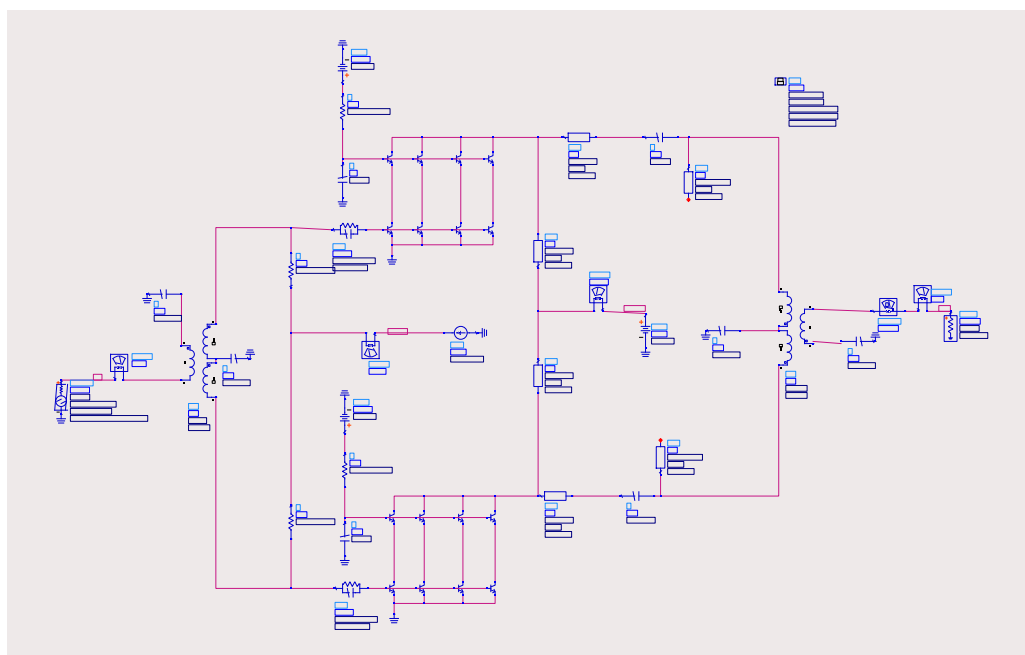


Рисунок 10.67 – Дифференциальный УМ с использованием 4 параллельных каскодов в каждом плече на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии

Характеристики полученного дифференциального УМ с использованием 4 параллельных каскодов в каждом плече приведены на рисунке 10.68 и в таблице 10.20. Отметим, что высокие значения выходной мощности и КПД реализуются при сжатии на более чем 3 дБ, что приводит к значительным нелинейным искажениям, при сжатии  $\Delta GP = 5$  дБ). Данная ситуация может быть улучшена при помощи активной схемы питания (инжектор питания), которая будет увеличивать ток базы  $I_b$  при увеличении входной мощности и тем самым увеличивая линейность усилителя.

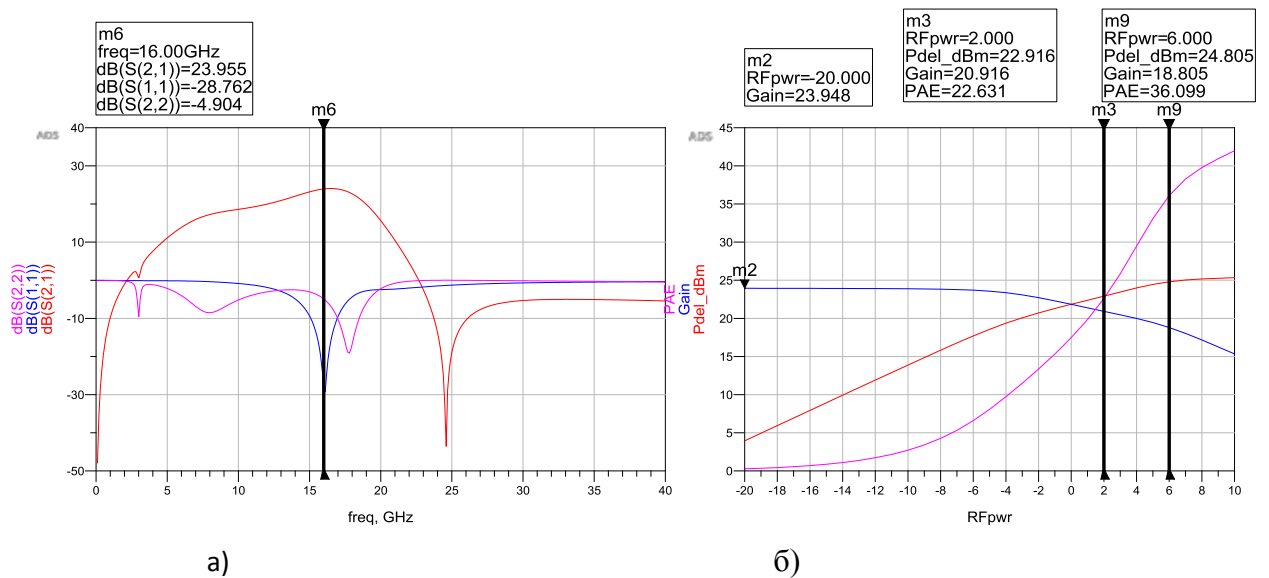
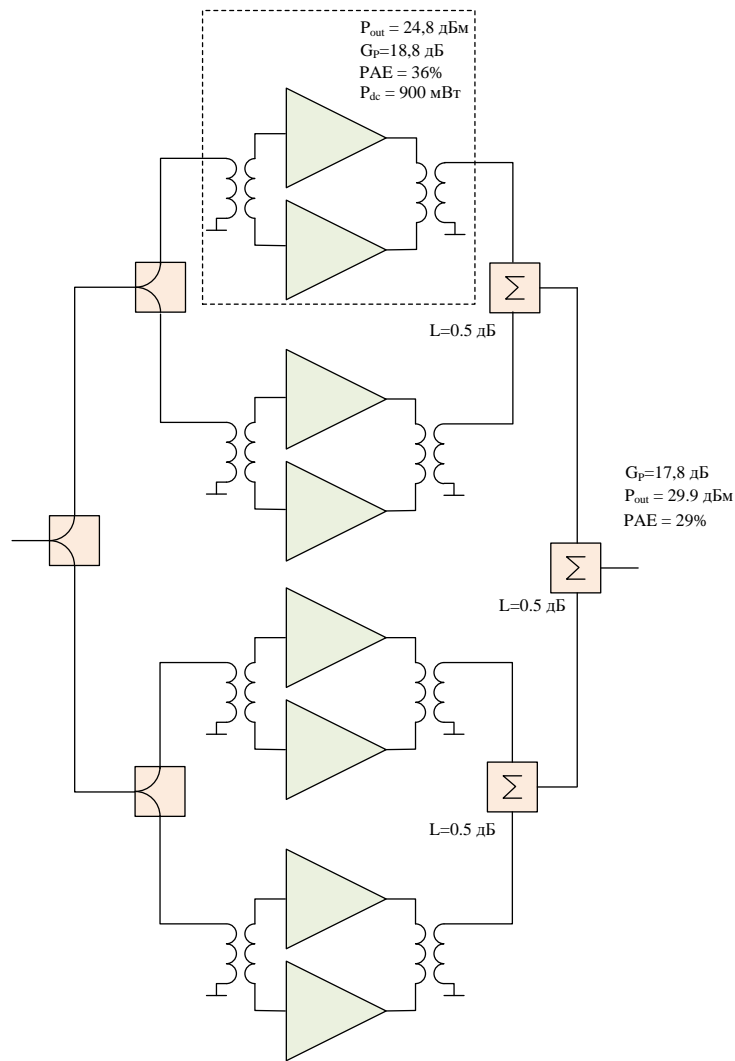


Рисунок 10.68 – Результаты моделирования дифференциального УМ с использованием 4 параллельных каскодов: а) S-параметры; б)  $P_{out}$ ,  $G_P$  и  $PAE$  от входной мощности на частоте 16 ГГц

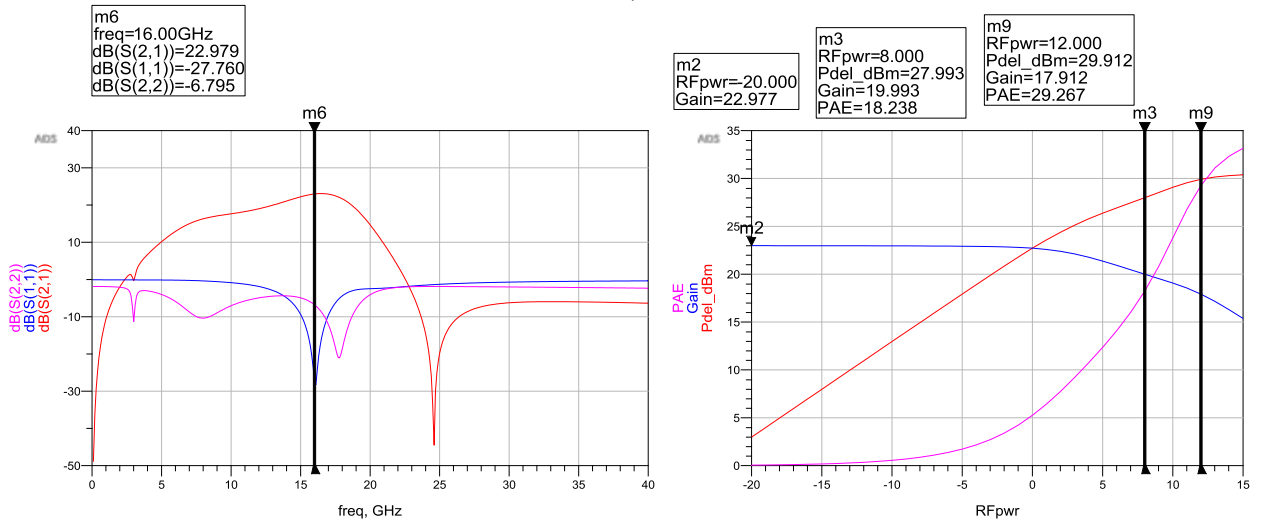
Таблица 10.20 – Характеристики дифференциального УМ с использованием 4 параллельных каскодов в каждом плече

Технология	$\Delta G_P$ , дБ	$P_{in}$ , дБм	$P_{out}$ , дБм	$PAE$ , %	$G_P$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм
0,25 мкм SiGe БиКМОП	3	2	22,9	22,6	20,9	3 300	-16	-16,6
	5	6	24,8	36,1	18,8		-13,5	-7,5

Далее была произведена оценка выходной мощности, КПД и нелинейных искажений при суммировании 4 разработанных дифференциальных УМ. На рисунке 10.69 а приведена структурная схема, которая использовалась при моделировании усилителя в ADS. Потери в сумматорах были приняты равными  $L = 0,5$  дБ. На рисунке 10.69 б и в таблице 10.19 приведены результаты моделирования однокаскадного дифференциального УМ с выходной мощностью порядка 1 Вт на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии.



а)



б)

Рисунок 10.69 – Структурная схема (а) и результаты моделирования S-параметров и зависимости  $P_{out}$ ,  $G_P$  и  $PAE$  в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц (б) для 1 Вт УМ на основе 0,25 мкм SiGe БикМОП технологии

Достоинство полученной схемы 1 Вт УМ на основе 0,25 мкм SiGe БикМОП технологии – это высокий коэффициент усиления, учитывая применение только одного каскада



усиления. При реализации топологии КУ для УМ составит порядка 14-15 дБ, поэтому для достижения КУ более 20 дБ потребуется предусилитель.

Недостатками полученной схемы является высокая нелинейность, которая приводит к высокому уровню второй и третьей гармоники (порядка -35 дБн). Данная нелинейность обусловлена тем, что для достижения высокой выходной мощности УМ работает в режиме сжатия порядка 5 дБ. Данный факт согласуется с результатами, полученными в литературе [66]. Одним из способов повышения линейности является использование схемы активного питания [67].

В таблице 10.21 приведены сводные характеристики УМ с выходной мощностью до 1 Вт на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии. Расчеты для двухкаскадного УМ были проведены на системном уровне, оценка габаритов – с помощью экспертных оценок.

Таблица 10.21 – Характеристики однокаскадного и двухкаскадного УМ 1 Вт на основе 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии

	$\Delta G_P$ , дБ	$P_{in}$ , дБм	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_P$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{2fo}$ , дБм	$P_{3fo}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
Однокаскадный УМ	3	8	28	18,2	20	3 1200	<-10,3	<-17,6	1,8×2,5
	5	12	29,9	29,3	17,8		<-8	<-4,3	
Двухкаскадный УМ	5	<5	29,9	27	>25	3 1300	<-8	<-4,3	2,5×2,5

### Разработка УМ до 100 мВт

Для проектирования УМ с выходной мощностью до 100 мВт была разработана базовая ячейка выходного каскада на основе 2 параллельно соединенных каскодов. Ячейка каскода состоит из двух транзисторов (rf\_nmos1vbc\_I0\_12) с шириной затвора  $W_g = 50 \times 4,2$  мкм, рабочая точка  $V_{ds} = 2,4$  В,  $I_{ds} = 17$  мА,  $V_{gs} = 0,5$  В. Согласно Load Pull моделированию, выходная мощность насыщения данной базовой ячейки составила  $P_{out} = 20$  дБм, к.п.д. по добавленной мощности PAE = 52%, коэффициент усиления GP = 15,4 дБ. Согласно требованиям к УМ на основе кремниевой технологии, коэффициент усиления должен быть более 25 дБ, для компенсации потерь в ФВ, поэтому было решено использовать двухкаскадную схему.

На рисунке 10.70 представлена упрощенная принципиальная схема двухкаскадного УМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии. Для первого каскада был использован каскод на основе транзисторов с  $W_g = 40 \times 4,2$  мкм.

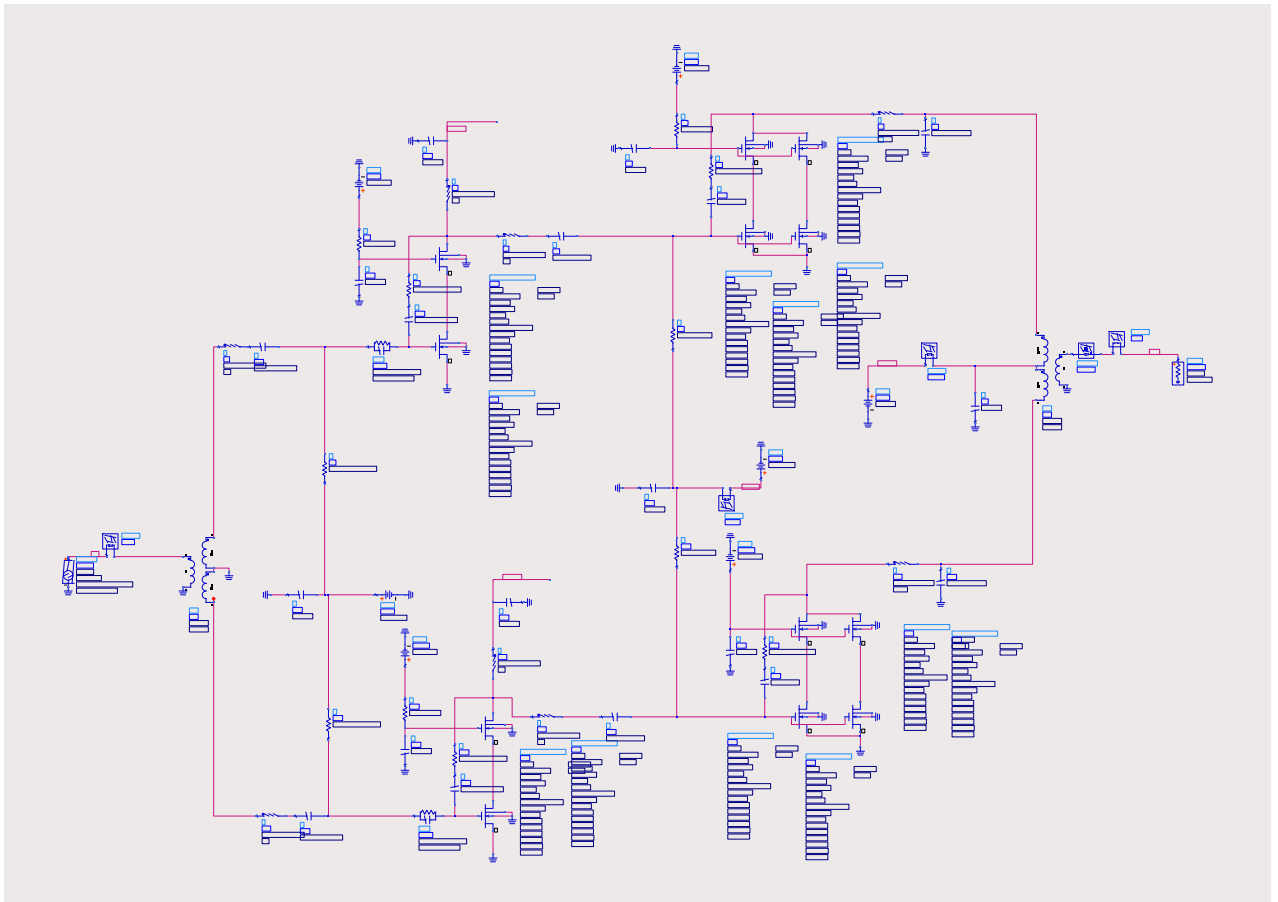
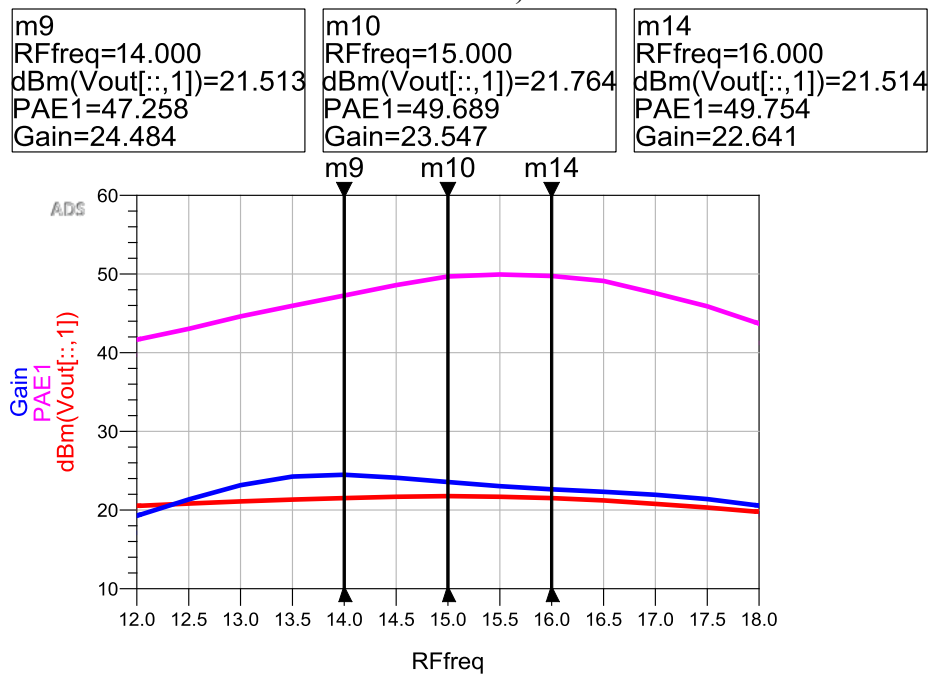
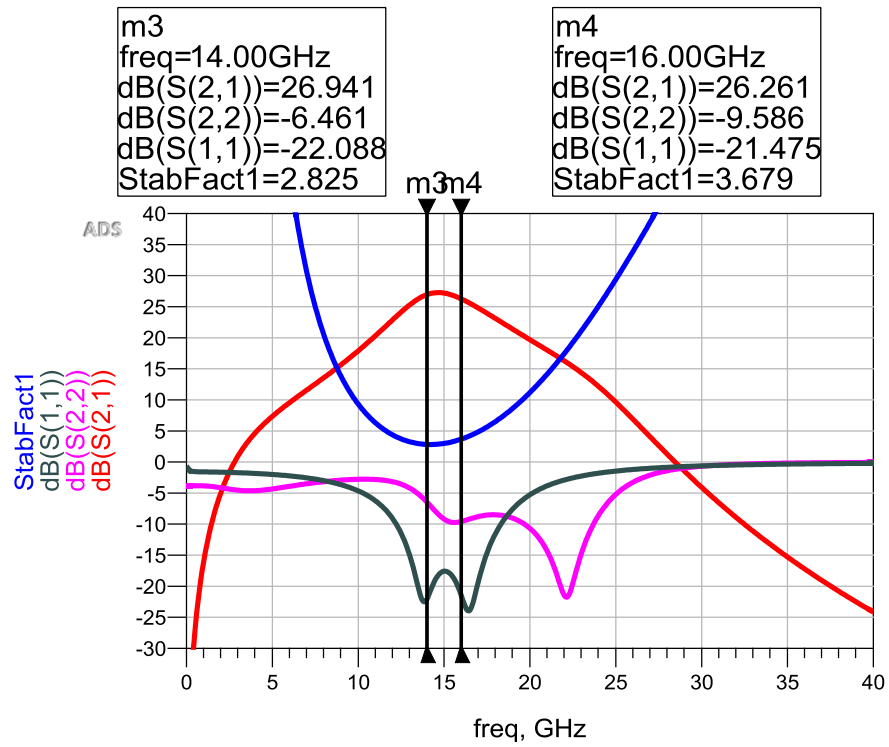


Рисунок 10.70 – Принципиальная схема двухкаскадного УМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии

На рисунке 10.71 *а* представлены  $S$ -параметры и коэффициент устойчивости для двухкаскадного УМ 100 мВт, на рисунке 10.71 *б* изображена выходная мощность  $P_{out}$ , к.п.д. PAE и усиление  $G_P$  при сжатии 3 дБ, а на рисунке 10.71 *в* – зависимость  $P_{out}$ ,  $P_{2f0}$ ,  $P_{3f0}$ , PAE и  $G_P$  от входной мощности на частоте 16 ГГц.



б)  
Рисунок 10.71 (начало)

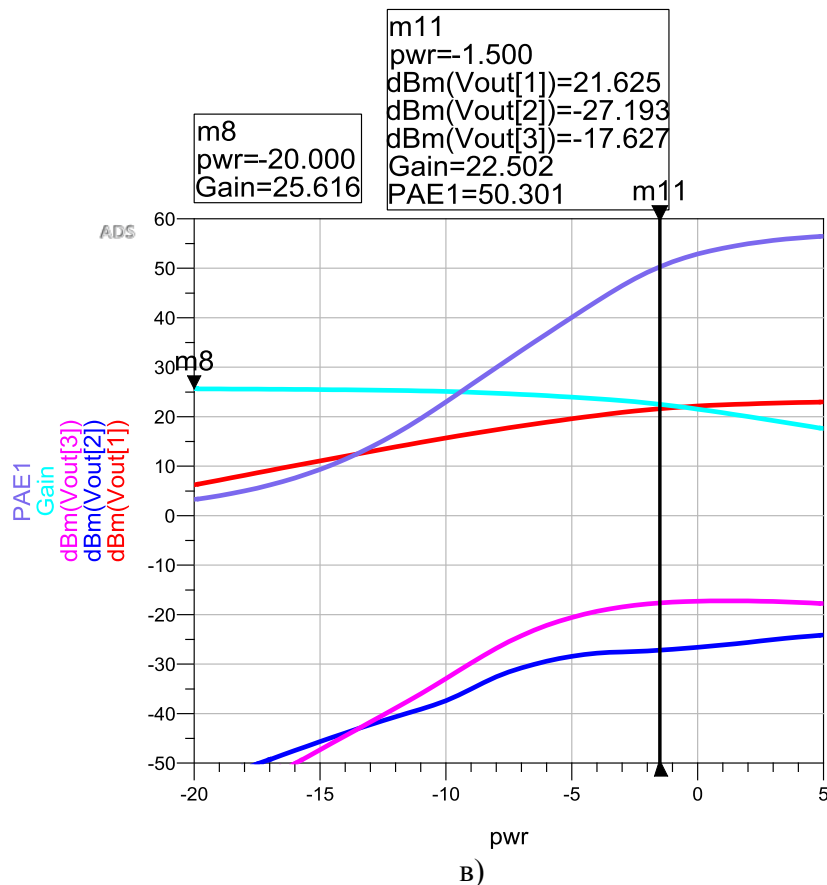


Рисунок 10.71 – Результаты моделирования двухкаскадного УМ 100 мВт на основе 0,13 мкм КНИ технологии: а) S-параметры; б) выходная мощность  $P_{out}$ , PAE и GP при сжатии 3 дБ; в) зависимость  $P_{out}$ ,  $P2f_0$ ,  $P3f_0$ , PAE и GP от входной мощности на частоте 16 ГГц

В таблице 10.22 представлены результаты моделирования двухкаскадного УМ с выходной мощностью 100 мВт на основе 0,13 мкм КНИ технологии. Согласно проведенному моделированию, выходная мощность в насыщении составила  $P_{out} = 21,5$  дБм, к.п.д. по добавленной мощности PAE = 47 %, коэффициент усиления по мощности GP =  $23,5 \pm 1$  дБ, потребляемая мощность PDC = 300 мВт (ток потребления 125 мА, напряжение питания 2,4 В), уровень мощности второй  $P2f_0$  и третьей гармоники  $P3f_0$  не более -26 дБм и -15 дБм, соответственно. Также отметим, что для увеличения выходной мощности возможно повышение напряжения питания до  $V_{ds} = 3$  В, т.к. выбранные транзисторы могут работать при напряжении 1,5 В. Так, выходная мощность при напряжении 3 В для двухкаскадного УМ составит 23,5-24 дБм.

Оценочная площадь двухкаскадного УМ с выходной мощностью 100 мВт составила  $1,2 \times 1,0$  мм<sup>2</sup>. При оценке размеров УМ была использована топологическая модель транзистора с шириной затвора  $W_g = 50 \times 4,2$  мкм, модели индуктивностей и выходного СТ. Дополнительно была проведена оценка однокаскадного УМ с выходной мощностью 100 мВт, однокаскадного и двухкаскадного УМ с выходной мощностью 30 мВт. Для УМ 30 мВт характеристики указаны для точки сжатия 1 дБ.

Таблица 10.22 – Результаты моделирования УМ с выходной мощностью до 100 мВт на основе 0,13 мкм КНИ технологии в диапазоне 14-16 ГГц

	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_P$ , дБ	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
Однокаскадный УМ 100 мВт	21,5	48	11	-10; -8	2,4 120	290	<-30	<-16	0,5×0,8
Двухкаскадный УМ 100 мВт	21,5	45	23,5±1	-15; -8	2,4 130	310	<-26	<-15	1,2×1,0
Однокаскадный УМ 30 мВт	14 (P <sub>1дБ</sub> )	23	13	-15; -6	2,4 34	82	<-45	<-25	0,5×0,8
Двухкаскадный УМ 30 мВт	14 (P <sub>1дБ</sub> )	20	25	-15; -6	2,4 55	130	<-43	<-26	0,8×0,8

Отметим, что при использовании реального СТ потери в выходной цепи увеличатся на 1-1,5 дБ, что приведет снижению выходной мощности и потере к.п.д. Таким образом, более реальные оценки параметров двухкаскадного УМ следующие: выходная мощность  $P_{out} = 20$  дБм, к.п.д. по добавленной мощности составит PAE = 33-35%, усиление  $G_P = 22±1$  дБ.

### 10.2.5 Анализ воздействия дестабилизирующих факторов на УМ

#### УМ до 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии (WIN)

Библиотека WIN NP2500 PP2521 верифицирована в области температур от 25°C до 125°C. В таблице 10.23 приведены результаты моделирования прототипов топологий УМ 2,5 Вт и 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN pHEMT технологии на частоте 16 ГГц в диапазоне температур -20 ...125°C. Входная мощность была зафиксирована на уровне  $P_{in} = 19,3$  дБм и  $P_{in} = 23,6$  дБм для УМ 2,5 Вт и УМ 5 Вт, соответственно.

Таблица 10.23 – Результаты моделирования прототипов топологий УМ 2,5 Вт и 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN HEMT технологии на частоте 16 ГГц в диапазоне температур  $T = 25 \dots 125$  °C

	T, °C	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_P$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм
Двухкаскадный УМ 2,5 Вт	25	34,2	40...43	15	-73,8	5,9	<-3,5	<-18
	85	33,7	35...40	14,8	-71,3	6,3	<-3,3	<-20
	125	33,2	30...35	14	-70	6,35	<-3,5	<-21
ТКС		-0,01 дБм/°C	-0,1 %/°C	-0,008 дБ/°C	0,038 °/°C	0,038 °/°C	-	-
Двухкаскадный УМ 5 Вт	25	37	40...42	13,6	-78,5	12,3	<-4,7	<4,4
	85	36,8	34...36	13,2	-76,36	13,2	<-4,5	<3,8
	125	36,5	30...35	12,9	-75,2	13,7	<-4,4	<3,2
ТКС		-0,005 дБм/°C	-0,08 %/°C	-0,01 дБ/°C	0,033 °/°C	0,0045 Вт/°C	-	-

Далее был проведен анализ влияния технологического разброса на параметры УМ 5 Вт на GaN технологии (таблица 10.24). Рассмотрены три граничных случая технологического разброса (Corners): типичный случай (ТТ), лучший случай (FF) и худший случай (SS). Моделирование производилось при  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для худшего случая была произведена подстройка напряжения затвора. Таким образом, в худшем случае выходная мощность УМ на GaN может снизиться до значений 35,3 дБм (3,4 Вт). Разброс фазы составляет 70%, поэтому для установки точного значения фазы в радиотракте необходима калибровка.

Таблица 10.24 – Результаты моделирования влияния технологического разброса на характеристики двухкаскадного УМ с выходной мощностью 5 Вт на основе 0,25 мкм GaN/SiC НЕМТ технологии (WIN NP2500) ( $f_0=16\text{ ГГц}$ )

	Граничный случай	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм
Двухкаскадный УМ 5 Вт	FF ( $V_g = -2,5\text{ В}$ )	36,6	26,6	12,7	-10 -10	-21,2	15,2	-5	-1,6
	ТТ ( $V_g = -2,5\text{ В}$ )	37	40...42	13,6	-10 -8	-78,5	12,3	-4,7	4,4
	SS ( $V_g = -1,5\text{ В}$ )	35,3	32,4	11,7	-10 -10	-132,3	10	3,3	-6,1
	Разброс, %	4,5	30	14	-	70	20	-	-

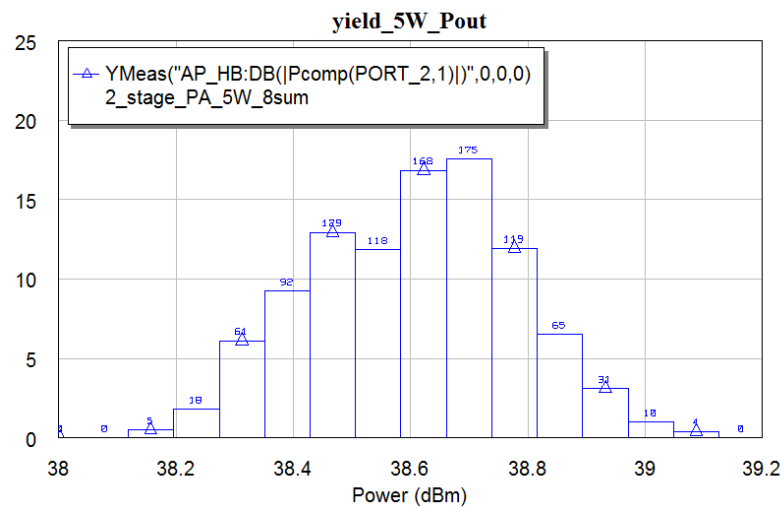
#### УМ до 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии (WIN)

Библиотека WIN PP2521 верифицирована в области температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ . В таблице 10.25 приведены результаты моделирования прототипов топологий УМ 2,5 Вт и 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии на частоте 16 ГГц в диапазоне температур  $-20 \dots 125^{\circ}\text{C}$ . Входная мощность была зафиксирована на уровне  $P_{in} = 14\text{ дБм}$  и  $P_{in} = 17\text{ дБм}$  для УМ 2,5 Вт и УМ 5 Вт, соответственно.

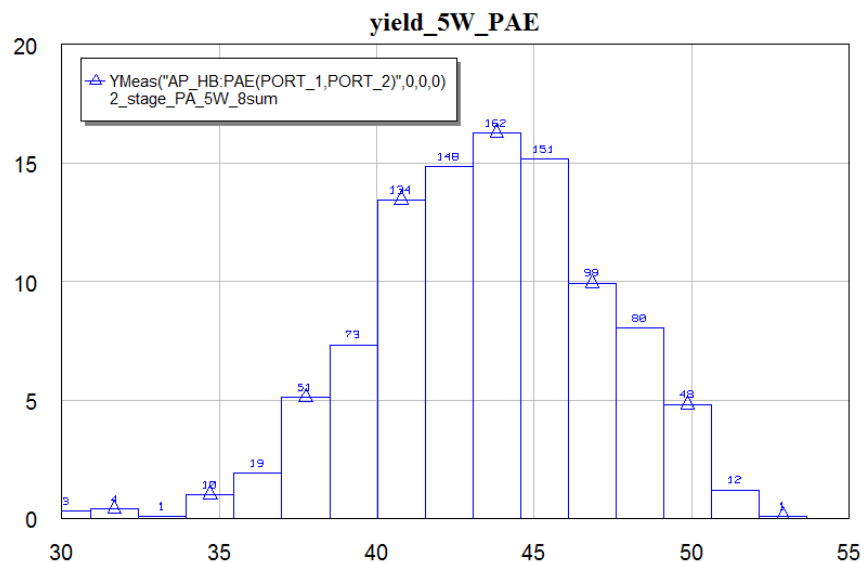
Таблица 10.25 – Результаты моделирования прототипов топологий УМ 2,5 Вт и 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии на частоте 16 ГГц в диапазоне температур  $T = -20 \dots 125\text{ }^{\circ}\text{C}$

	$T$ , °C	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм
Двухкаскадный УМ 2,5 Вт ( $P_{in} = 14\text{ дБм}$ )	-20	35,8	46	21,8	-96,4	7,5	<-14	<-11
	25	35,7	43	21,5	-95,7	8	<-15	<-12
	125	34,6	33	20,6	-95	9	<-14	<-20
ТКС		-0,011 дБм/°C	-0,1 %/°C	-0,009 дБ/°C	0,015 °/°C	0,01 Вт/°C	-	-
Двухкаскадный УМ 5 Вт ( $P_{in} = 17\text{ дБм}$ )	-20	38,5	44	21,5	170,6	15	<-20	<-10
	25	38,4	43	21,5	171,7	16	<-19	<-10
	125	37,4	33	20,5	173,3	18	<-17	<-21
ТКС		-0,01 дБм/°C	-0,1 %/°C	-0,01 дБ/°C	0,015 °/°C	0,02 Вт/°C	-	-

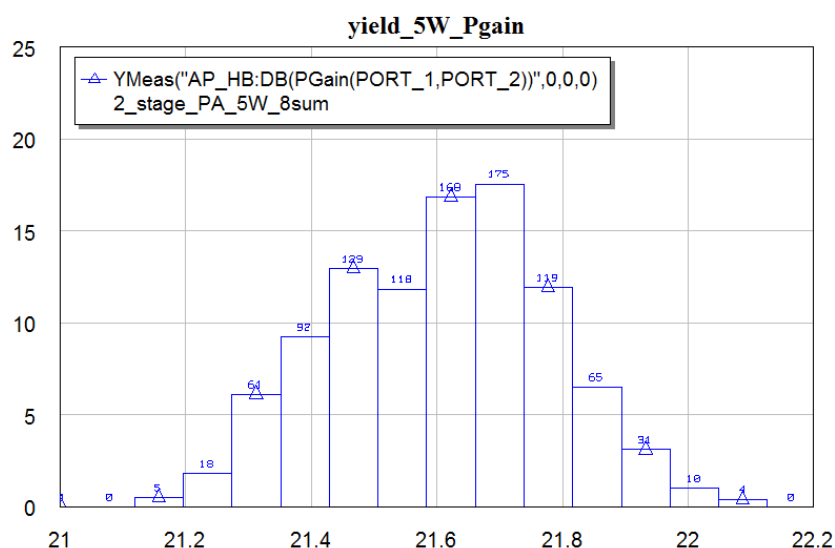
Далее был проведен анализ влияния технологического разброса на параметры УМ 5 Вт методом Монте-Карло (количество итераций  $N = 200$ ). Ниже на рисунке 10.73 приведены гистограммы разброса выходной мощности  $P_{out}$ , к.п.д. по добавленной мощности PAE, коэффициента усиления по мощности GP и фазы коэффициента усиления  $\phi(S_{21})$  для УМ 5 Вт при  $T = 25$  °C. Разброс выходной мощности находится в диапазоне от 38,1 дБм до 39 дБм и не снижается ниже 38 дБм (6,3 Вт). Разброс PAE составляет от 30% до 53%, причем в  $\sim 70\%$  случаев PAE превышает значение 40%. Разброс усиления GP находится в диапазоне от 21 дБ до 22 дБ. Разброс фазы  $\phi(S_{21})$  для УМ 5 Вт указывает на необходимость начальной калибровки радиотракта.



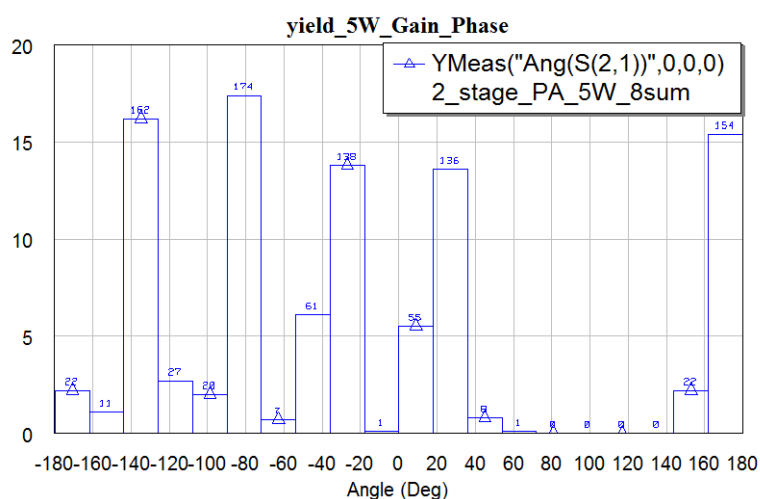
а)



б)



В)

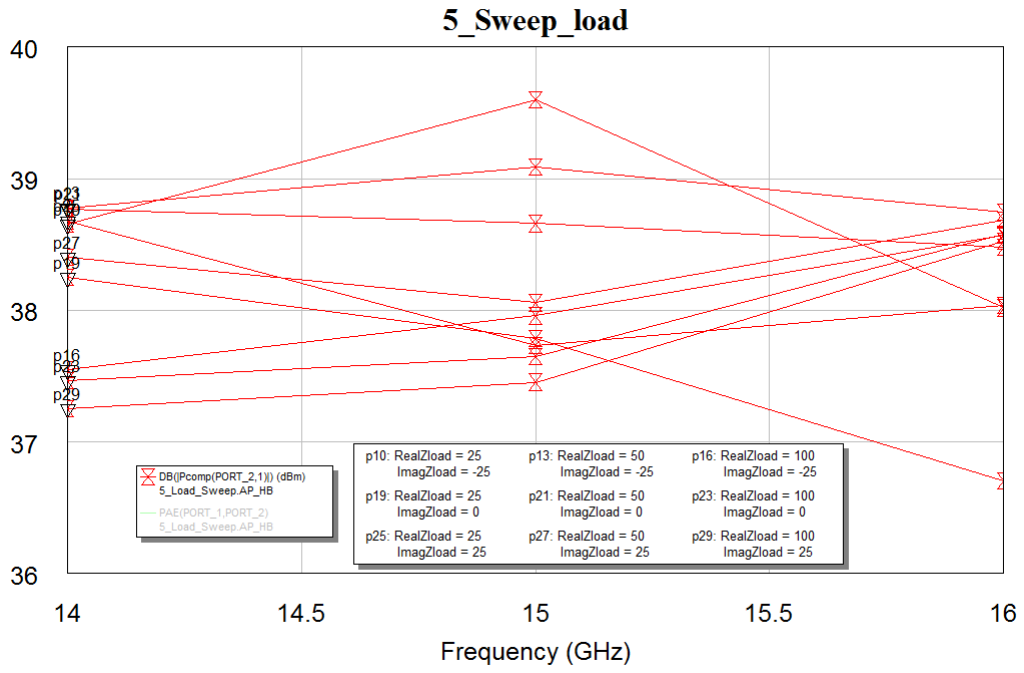


Г)

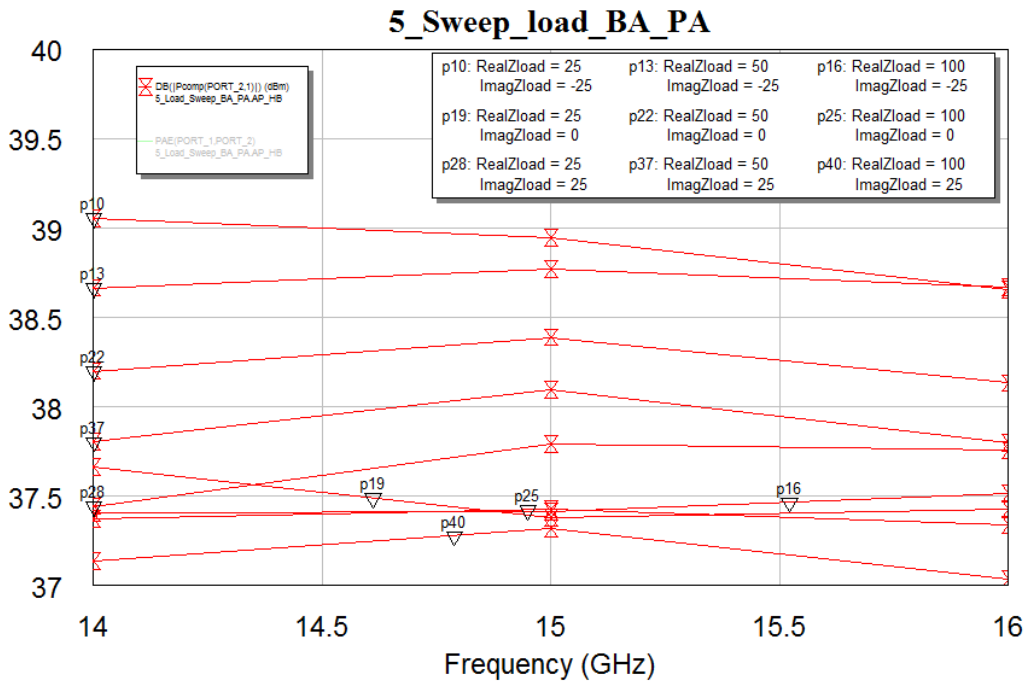
Рисунок 10.73 – Гистограммы  $P_{out}$ , PAE, GP и  $\phi(S_{21})$  для УМ 5 Вт при  $T = 25^\circ\text{C}$

Так как коэффициент отражения антенны составляет -10 дБ ( $\Gamma = 0,33$ ) и может изменяться в процессе сканирования от 25 до 100 Ом, то необходимо оценить влияния импеданса нагрузки на характеристики УМ. Для этого промоделируем выходную мощность и к.п.д. для УМ 5 Вт с сумматором Вилкинсона и балансного УМ 5 Вт в зависимости от значения импеданса нагрузки. Реальная и мнимая часть импеданса нагрузки будут принимать значения дискретные значения:  $\text{Real}(Z_L) = 25, 50, 100 \text{ Ом}$ ,  $\text{Imag}(Z_L) = -25, 0, 25 \text{ Ом}$ . Таким образом получаем 9 значений импеданса нагрузки. На рисунке 10.74 приведены значения выходной мощности при разных значениях импеданса нагрузки для УМ 5 Вт на основе сумматора Вилкинсона и балансного УМ 5 Вт, а на рисунке 10.75 значения к.п.д. по добавленной мощности.



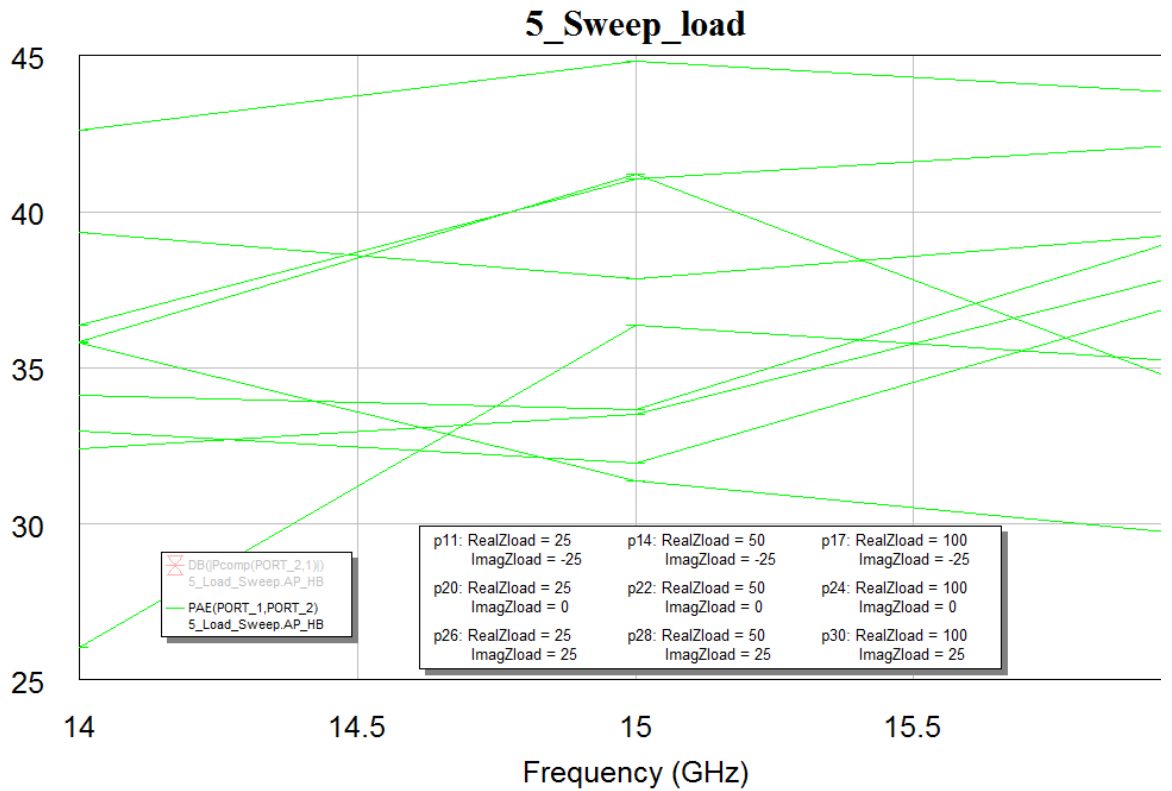


a)

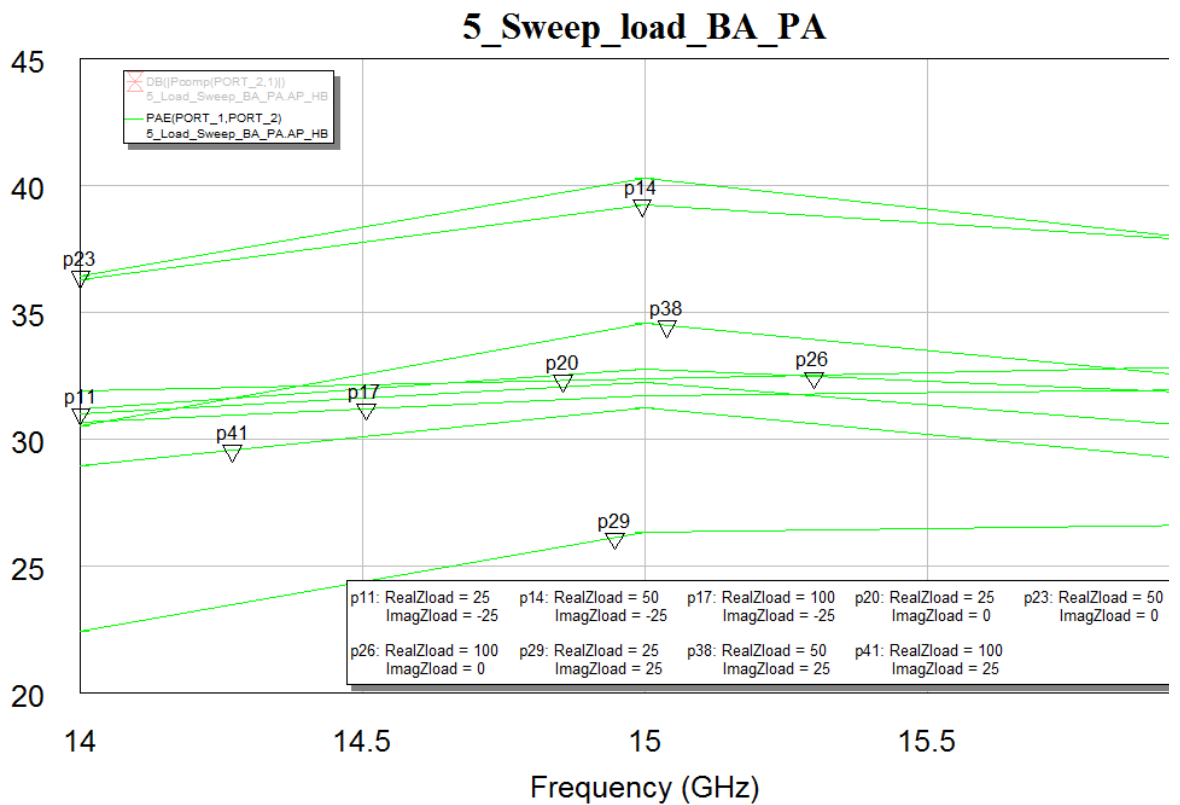


б)

Рисунок 10.74 – Выходная мощность при различных значениях импеданса нагрузки в полоса 14-16 ГГц: а) УМ 5 Вт с сумматором Вилкинсона; б) балансного УМ 5 Вт



a



б)

Рисунок 10.75 – Выходная мощность при различных значениях импеданса нагрузки в полоса 14-16 ГГц: а) УМ 5 Вт с сумматором Вилкинсона; б) балансного УМ 5 Вт

В таблице 10.26 приведены значения в худших точках для УМ 5 Вт при различных значениях нагрузки  $Z_L = (25, 50, 100) + j \times (-25, 0, 25)$  Ом при  $P_{in} = 17$  дБм. В целом балансный УМ 5 Вт показывает немного лучшие характеристики с точки зрения выходной мощности, коэффициентов отражения по входу/выходу и мощности на гармониках. К.п.д. в худшей точке обладает меньшим значением из-за более низкого коэффициента усиления.

Таблица 10.26 – Результаты моделирования прототипов топологий УМ 5 Вт в худших точках при различных значениях импеданса нагрузки  $Z_L = (25, 50, 100) + j \times (-25, 0, 25)$  Ом при  $P_{in} = 17$  дБм

	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f0}$ , дБм	$P_{3f0}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
Двухкаскадный УМ 5 Вт	36,7	26	19,2	-13 -3,5	8 2000	16	-9	-3,5	3,2×2,9
Двухкаскадный балансный УМ 5 Вт	37	22,4	18,9	-18 -5,5	8 2000	16	-9	-7	3,6×2,9

#### УМ до 100 мВт на основе КНИ технологии

Проведен анализ воздействия дестабилизирующих факторов на характеристики двухкаскадного УМ с выходной мощностью 100 мВт на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). Библиотека XR013 верифицирована в области температур от -40 °С до +125 °С. В таблице 10.27 приведены значения основных параметров УМ, полученные в результате моделирования для трёх значений температуры: -40 °С, +25 °С, +125 °С. Дополнительно был вычислен температурный коэффициент (ТКС) для указанных характеристик. Уровень входной мощности  $P_{in}$  менялся для определения выходной мощности  $P_{out}$  при сжатии 3 дБ.

Таблица 10.27 – Результаты моделирования двухкаскадного УМ 100 мВт на основе 0,13 мкм КНИ технологии на частоте 16 ГГц в диапазоне температур  $T = -65 \dots 125$  °С

	$T$ , °С	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f0}$ , дБм	$P_{3f0}$ , дБм
Двухкаскадный УМ 100 мВт	-40	21,4	47	25±1	119,7	290	<-26	<-12
	25	21,5	45	23,5±1	105	310	<-26	<-15
	125	21	43	21±1	87,8	290	<-26	<-13
ТКС		-0,003 дБм/°С	-0,024 %/°С	-0,024 дБ/°С	-0,19 °/°С	-	-	-

Далее был проведен анализ влияния технологического разброса на параметры двухкаскадного УМ 100 мВт на 0,13 мкм КНИ технологии (таблица 10.28). Рассмотрены три граничных случая технологического разброса (Corners): типичный случай (TT), лучший случай (FF) и худший случай (SS). Уровень входной мощности  $P_{in}$  менялся для определения выходной мощности  $P_{out}$  при сжатии 3 дБ.

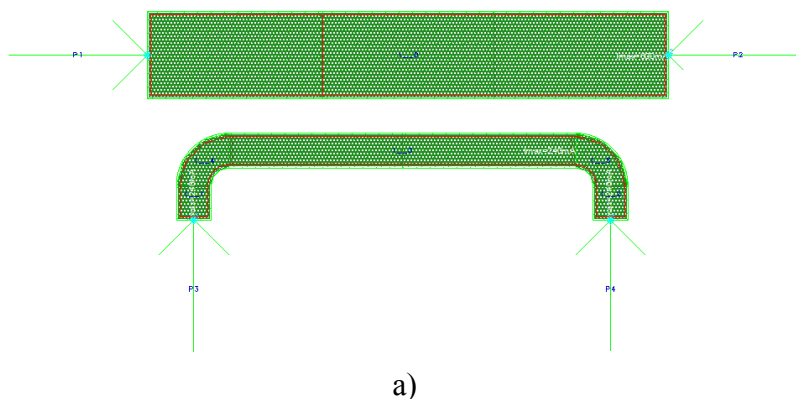
Таблица 10.28 – Результаты моделирования влияния технологического разброса на характеристики двухкаскадного УМ 100 мВт на 0,13 мкм КНИ технологии ( $f_0=16$  ГГц)

	Граничный случай	$P_{out}$ , дБм	PAE, %	$G_p$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2\%}$ , дБм	$P_{3\%}$ , дБм
Двухкаскадный УМ 100 мВт	FF	21,7	46	23,6	138	-12,8; -4	340	<-23	<-15
	TT	21,5	45	22,5	105	-19; -7	310	<-26	<-15
	SS	22,4	50	17,3	70,8	-18; -3,1	310	<-18	<-11
	Разброс, %	3,3	8,9	28	64	-	10	-	-

Больше всего разбросу подвержены модуль и фаза коэффициента усиления – 28% и 64%, соответственно. Исходя из полученных данных следует вывод о необходимости организации активной схемы смещения для стабилизации параметров УМ на 0,13 мкм КНИ в зависимости от температуры и технологического разброса. Дополнительно активная цепь смещения может компенсировать мягкое сжатие КМОП транзисторов и увеличить линейность усилителя путем управления напряжением смещения в зависимости от входной мощности. Также возможно стоит пересмотреть принципиальную схему УМ 100 мВт с целью стабилизации усиления в зависимости от технологического разброса.

### 10.2.6 Анализ реализации детектора падающей и отраженной мощности

Для реализации детектора падающей и отраженной мощности был реализован противонаправленный НО (рисунок 10.77 а) на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ технологии. НО представляет собой связанные линии передачи, основная МПЛ имеет ширину  $W = 40$  мкм и длину  $L = 300$  мкм, расстояние между линиями  $S = 20$  мкм. На рисунок 10.77 б приведены результаты моделирования НО: вносимые потери составили  $IL = 0,1$  дБ; коэффициент связи  $C = 19...20$  дБ; направленность порядка  $D = \sim 15$  дБ.



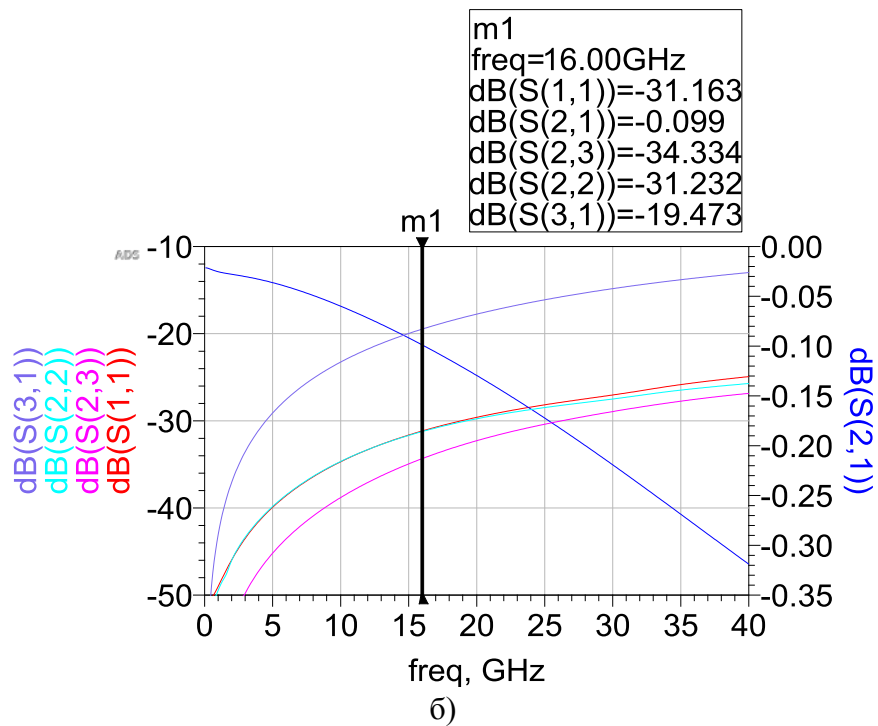
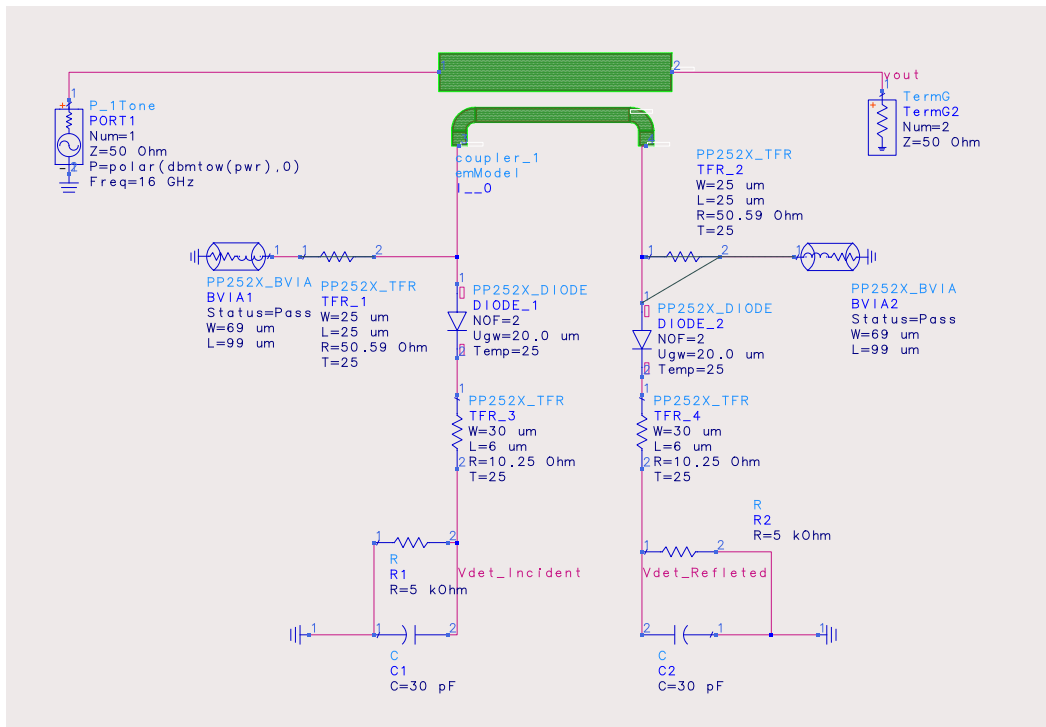
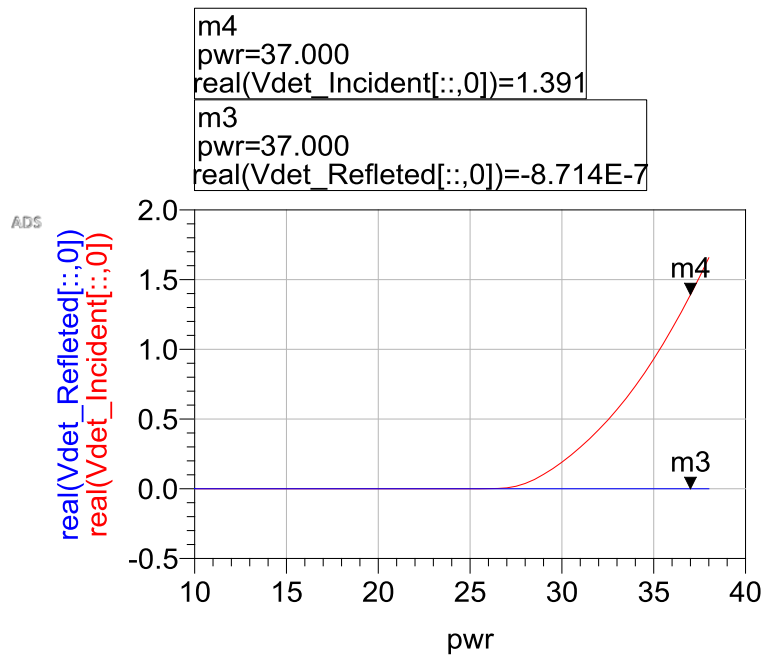


Рисунок 10.77 – а) Топология НО (длина  $L = 300$  мкм); б) смоделированные S-параметры НО

Далее, используя представленный НО, был разработан детектор падающей и отраженной мощности на основе диодов (рисунок 10.78 а). Последовательный резистор 10 Ом используется для снижения пульсаций при детектировании, для детектирования используется внешняя цепь, состоящая из резистора  $R=5$  кОм и емкости  $C=30$  пФ. На рисунке 10.78 б приведены графики выходного напряжения детектора в рабочем плече (падающая мощность) и в нерабочем плече (отраженная мощность) в зависимости от мощности УМ (до 5 Вт) при нагрузке 50 Ом. Как видно из рисунка 10.78 б, динамический диапазон детектора падающей мощности составляет от 25 до 38 дБм. При входной мощности 37 дБм детектируемое напряжение в рабочем плече составляет  $V_{det\_inc} \approx 1$  В, при этом благодаря направленности НО, напряжение в нерабочем плече составляет  $V_{det\_refl} \approx 0$  В, так как отраженная мощность отсутствует (нагрузка составляет 50 Ом).



а)



б)

Рисунок 10.78 – а) Топология детектора падающей и отраженной мощности; б) зависимость выходного напряжения детектора от проходящей мощности при нагрузке 50 Ом

Исследован детектор падающей и отраженной мощности при подаче модулированного СВЧ сигнала. На вход детектора подадим импульсный СВЧ сигнал со следующими параметрами: частота несущей  $f_0 = 16$  ГГц, PRF = 37 дБм,  $t_{\text{и}} = 0,5$  мкс,  $T = 5$  мкс, время нарастания/спада равны 10 нс. На рисунок 10.79 приведена временная диаграмма выходно-

го напряжения VRF на нагрузке 50 Ом и на выходе детектора Vdet\_inc при указанных параметрах импульсной входной мощности.

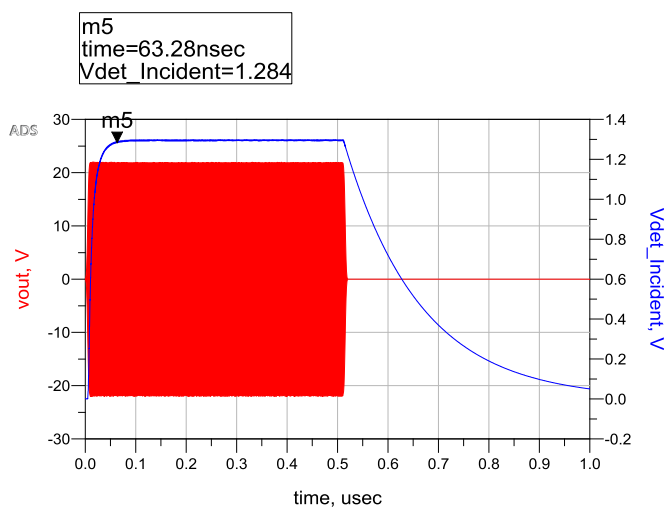


Рисунок 10.79 – Временная диаграмма выходного напряжения VRF на нагрузке 50 Ом и на выходе детектора Vdet\_inc при импульсной входной мощности на частоте 16 ГГц (PRF = 37 дБм,  $\tau_i = 0,5$  мкс,  $T = 5$  мкс)

Предыдущие результаты моделирования были получены при условии нагрузки 50 Ом, когда отраженная мощность отсутствует. На рисунке 10.80 приведены результаты моделирования детектора падающей и отражённой мощности при нагрузке 200 Ом (КСВН = 4). Отраженная от нагрузки мощность поступает в детектор отраженной мощности, который выдает постоянное напряжение на уровне  $V_{det\_refl} \approx 0,1$  В. Малый уровень детектируемого сигнала обусловлен тем, что для детекторов падающей и отраженной мощности используются одинаковые схемы. Но при необходимости детектор отраженной мощности может быть настроен на другой динамический диапазон, например, от 20 до 30 дБм.

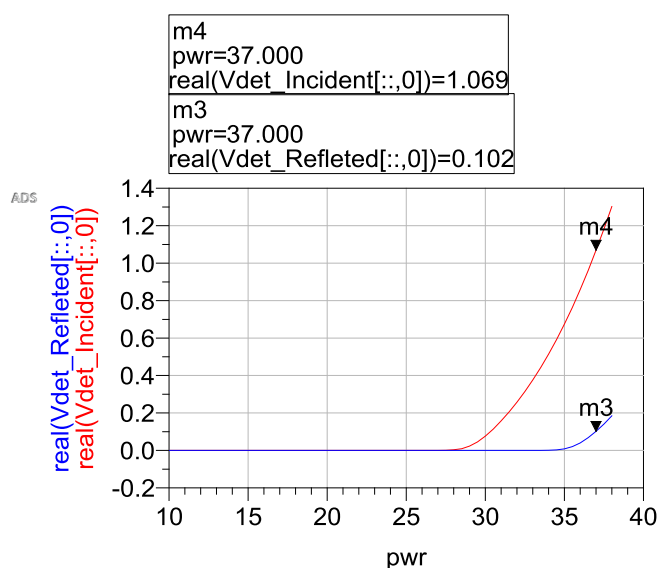


Рисунок 10.80 – Зависимость выходного напряжения детектора падающей и отраженной мощности при нагрузке 200 Ом

Выбор значений сопротивления  $R$  и емкости  $C$  нагрузки диодов, и, соответственно, постоянной времени  $\tau RC$ , в основном определяется типом детектора. Если необходим детектор средней мощности, то значение постоянной времени должно быть большим (ёмкость  $C > 1$  мкФ). Как правило, в таком случае нагрузка детектора реализуется вне ИС. Если необходим пиковый детектор, то постоянная времени должна быть меньше времени импульса приблизительно в 5 раз. Таким образом, для импульса длительностью 0,5 мкс постоянная времени  $\tau RC = 0,1$  мкс, что может быть обеспечено при помощи  $R \approx 3$  кОм и  $C \approx 30$  пФ.

Суммарные размеры детектора падающей и отраженной мощности составили  $350 \times 350$  мкм<sup>2</sup>, вносимые потери  $\sim 0,1$  дБ.

### 10.2.7 Модулятор питания

В данном подразделе приведены результаты моделирования УМ с использованием модулятора питания для управления напряжением смещения по затвору (драйвер управления смещением). Для снижения влияния драйвера управления смещением на форму выходного импульса используется гибридный способ управления: подача модулированных СВЧ импульсов на вход УМ и использование драйвера напряжения смещения (с защитным интервалом). При таком способе исключается влияние драйвера смещения на форму СВЧ импульса.

Согласно проведенному обзору, для импульсных усилителей мощности модуляторы питания (МП) по стоку, как правило, реализуются при помощи внешних активных элементов. МП по стоку в основном выполняется на силовых МОП транзисторах с низким значением  $R_{on}$ .

Технология 0,25 мкм GaAs pHEMT (PP2521, WIN). На рисунке 10.81 представлена схема моделирования УМ 1 Вт с использованием модулятора питания для управления напряжением смещения по затвору. На вход подается модулированный СВЧ сигнал со следующими параметрами: частота несущей  $f_0 = 15$  ГГц, время импульса  $\tau_i = 0,5$  мкс, период  $T = 5$  мкс (скважность  $Q = 10$ ), время нарастания/спада  $\tau_r = 10$  нс, мощность входного сигнала составляет 20 дБм.

Для управления смещением используется импульсный сигнал со следующими параметрами: время импульса управления  $\tau_{и\_упр} = 0,6$  мкс, период  $T = 5$  мкс, время нарастания/спада  $\tau_r = 10$  нс, размах управляющего напряжение  $V_p = 1$  В. Время импульса управления смещением УМ выбрано больше на 100 нс для организации защитного интервала, который нужен для того, чтобы переходные процессы в сигнале управления не влияли на форму выходного импульса.



Импульс управления смещением поступает на усилитель ( $KУ = 10$  дБ), для того, чтобы увеличить амплитуду сигнала, и далее на переключаемый транзистор. При отсутствии сигнала управления транзистор закрыт и на УМ поступает  $-5$  В от источника питания, т.е. УМ находится в выключенном состоянии. Когда управляющий сигнал поступает на транзистор, он включается и обеспечивает деление напряжения  $-5$  В до нужного напряжения (в данном случае  $-0,7$  В), УМ открывается и усиливает сигнал. На форму фронтов управляющего сигнала влияет фильтрующая ёмкость, чем меньше номинал ёмкости, тем круче фронт нарастания импульса и наоборот. Основная задача фильтра: сглаживание высокочастотных выбросов в импульсах и развязка СВЧ цепей УМ по постоянному току. Помимо фильтрующей ёмкости значительное влияние на длительность фронтов импульса оказывают внутренние паразитные ёмкости самого переключаемого транзистора.

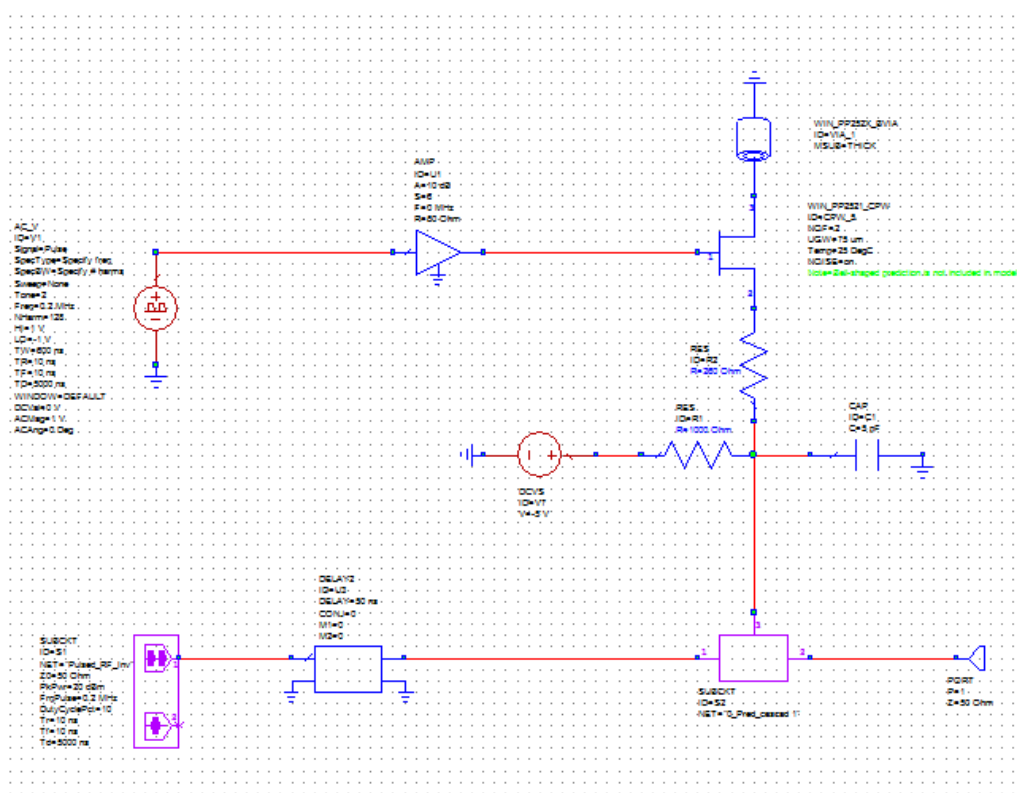
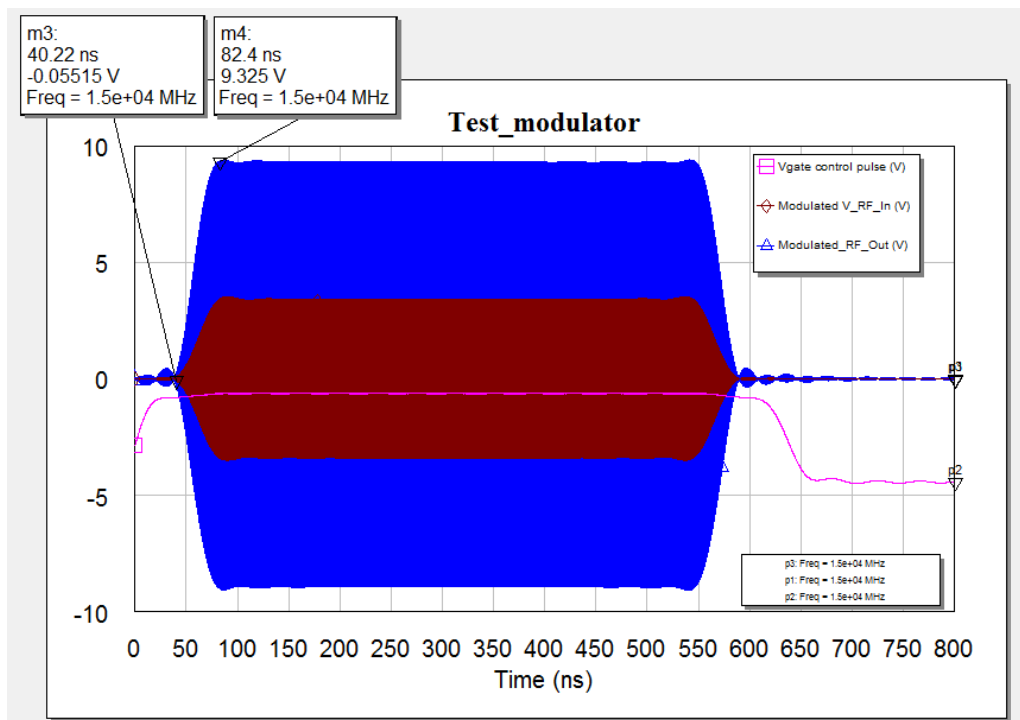
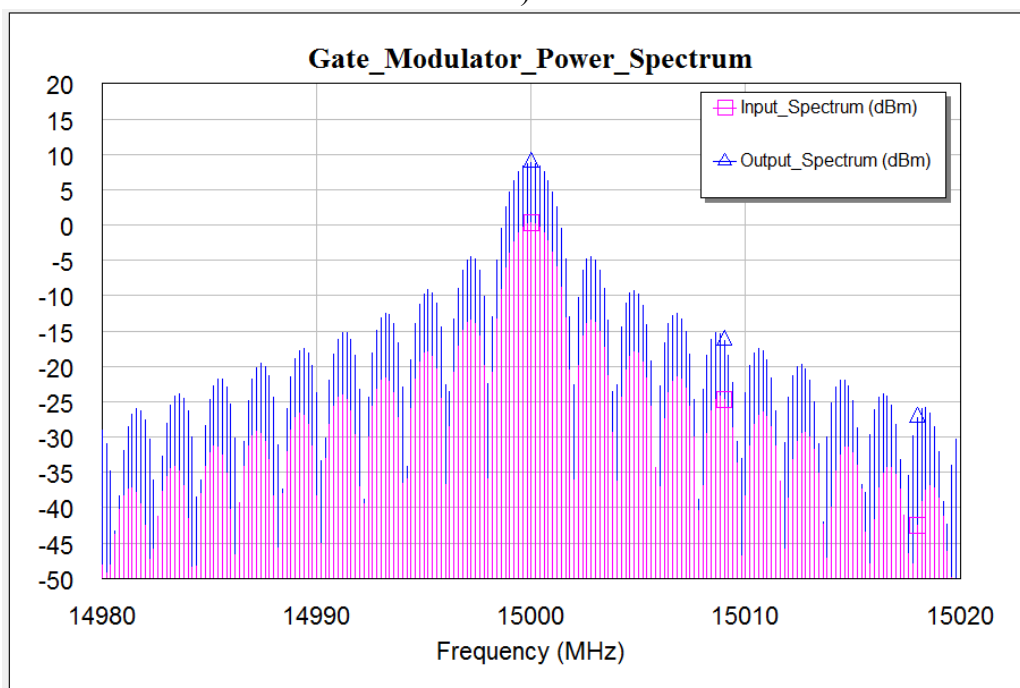


Рисунок 10.81 – Схема моделирования УМ 1 Вт с использованием модулятора питания для управления напряжением смещения по затвору

На рисунке 10.82 представлены формы напряжений на входе и выходе УМ 1 Вт, а также управляющего сигнала  $V_{gate}$  на затворе усилителя. Время нарастания модулированного СВЧ импульса составило 40 нс.



а)



б)

Рисунок 10.82 – Результаты моделирования СВЧ импульсного сигнала на входе и выходе УМ 1 Вт с использованием драйвера управления смещением:

а) формы напряжений на входе и выходе, а также управляющего сигнала Vgate;

б) Спектр на входе и выходе

Исследован спектр УМ 5 Вт на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ технологии при подаче на вход СВЧ импульсов со следующими параметрами: частота несущей  $f_0 = 15$  ГГц, время импульса  $t_{\text{и}} = 0,5$  мкс, период  $T = 5$  мкс (скважность  $Q = 10$ ), время нарастания/спада  $t_{\text{г}} = 10$  нс, мощность входного сигнала составляет 17 дБм. Как видно из спектра

выходного сигнала (рисунок 10.83), УМ 5 Вт вызывает значительные нелинейные искажения, поэтому необходима дополнительная фильтрация или использование предуслаживаний.

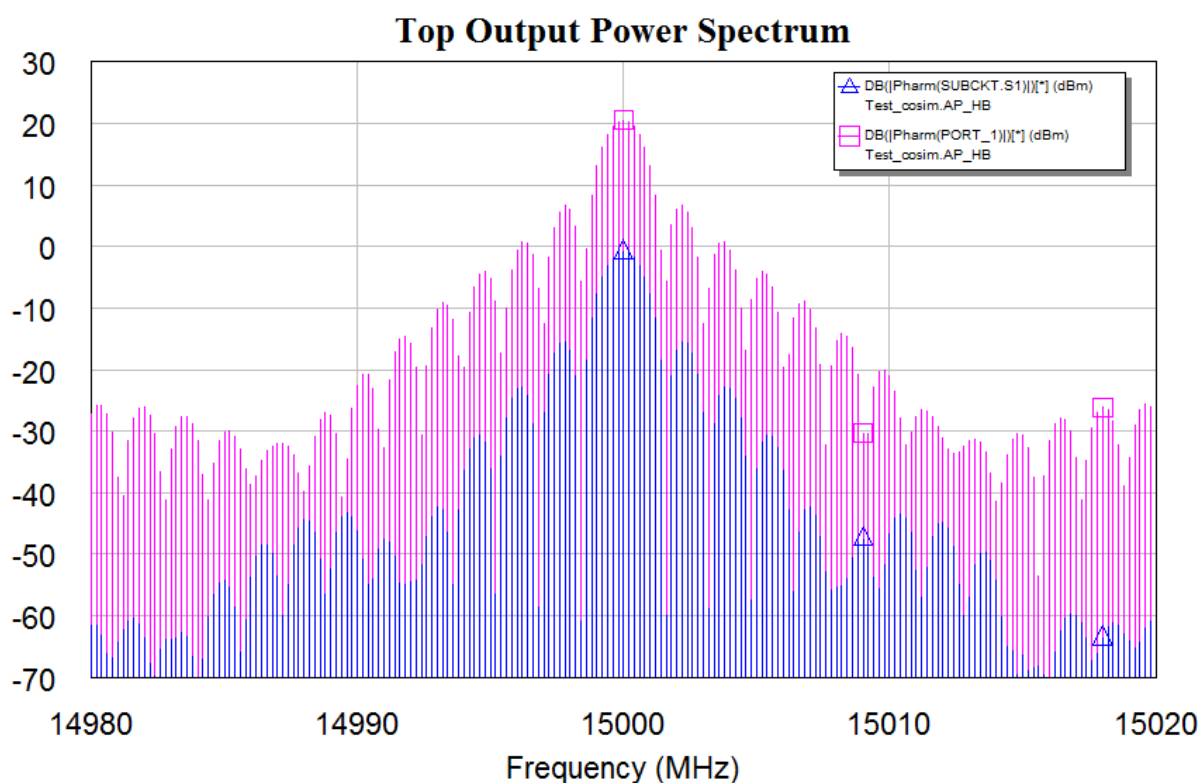


Рисунок 10.83 – Спектр сигнала на входе и выходе УМ 5 Вт при воздействии СВЧ импульсного сигнала

В данном подразделе при моделировании использовался метод управления смещением по затвору для УМ на основе 0,25 мкм GaAs технологии PP2521. Исходя из проведённого анализа, можно сказать о реализуемости импульсного МП по затвору на кристалле, согласно моделированию УМ 1 Вт время нарастания выходного СВЧ импульса составило 40 нс. Однако для получения более точных сведений о параметрах выходного СВЧ импульса необходимо провести экспериментальное исследование.

### 10.2.8 Анализ вариантов реализации УМ с высоким КПД

Рассмотрена возможность реализации высокоэффективного класса F на примере однокаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт. В качестве активного устройства была использована модель WIN\_NP2500\_ISV с  $W_g = 4 \times 200$  мкм (рабочая точка  $V_{ds} = 28$  В,  $V_{gs} = -2,5$  В). При помощи гармонического Load Pull моделирования на частоте 16 ГГц были определены оптимальные импедансы по входу  $Z_{in\_opt}$  и выходу  $Z_{out\_opt}$  на частотах  $f_0$ ,  $2 f_0$  и  $3 f_0$  для достижения максимального значения к.п.д. по добавленной мощности. Далее были реализованы указанные импедансы при помощи входной и выходной СЦ, соответствующие импедансы согласующих цепей указаны в таблице 10.29.

Таблица 10.29 – Реализованные значения оптимальных импедансов по входу  $Z_{in\_opt}$  и выходу  $Z_{out\_opt}$  на частотах  $f_0$ ,  $2f_0$  и  $3f_0$  для достижения максимального значения к.п.д. по добавленной мощности

	$Z_{out\_opt}(f_0)$ , Ом	$Z_{out\_opt}(2f_0)$ , Ом	$Z_{out\_opt}(3f_0)$ , Ом	$Z_{in\_opt}(f_0)$ , Ом	$Z_{in\_opt}(2f_0)$ , Ом	$Z_{in\_opt}(3f_0)$ , Ом
$f_0 = 16$ ГГц	$59,3+j \times 39,7$	$1,9+j \times 15$	$1,2+j \times 21$	$12,3+j \times 8,8$	$17,7+j \times 190$	$32+j \times 40$

Для оценки итоговых характеристик и размеров высокоэффективного однокаскадного УМ 2,5 Вт класса F была разработана предварительная топология (размеры  $1,5 \times 1,7$  мм<sup>2</sup>), которая изображена на рисунке 10.83.

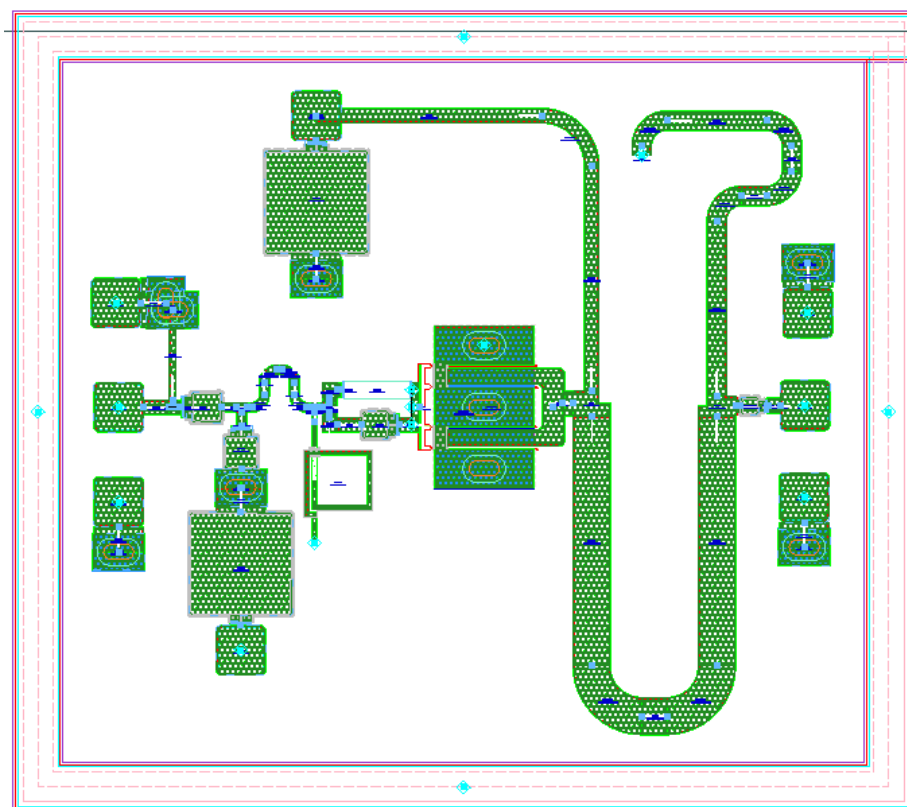
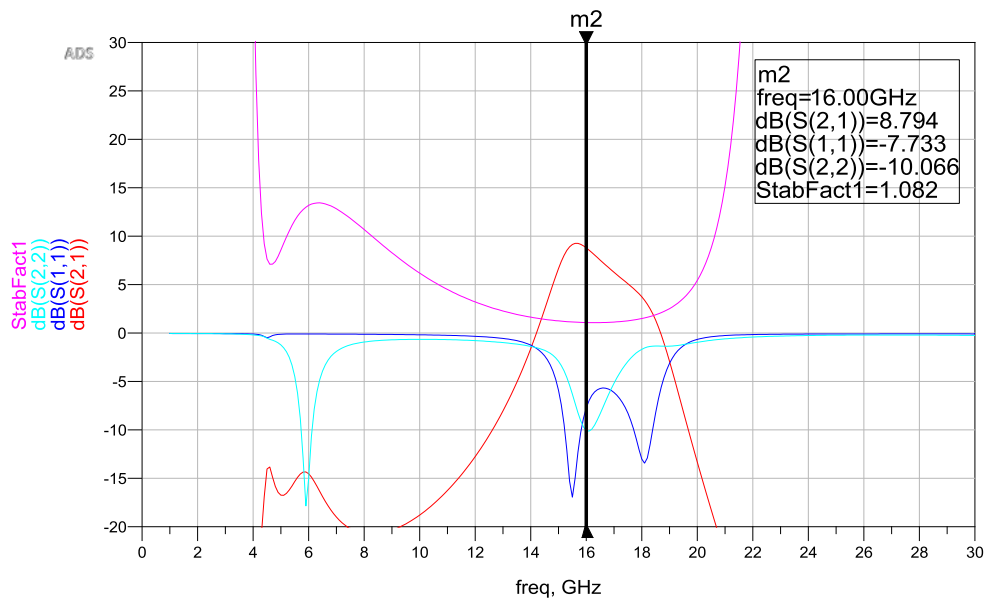
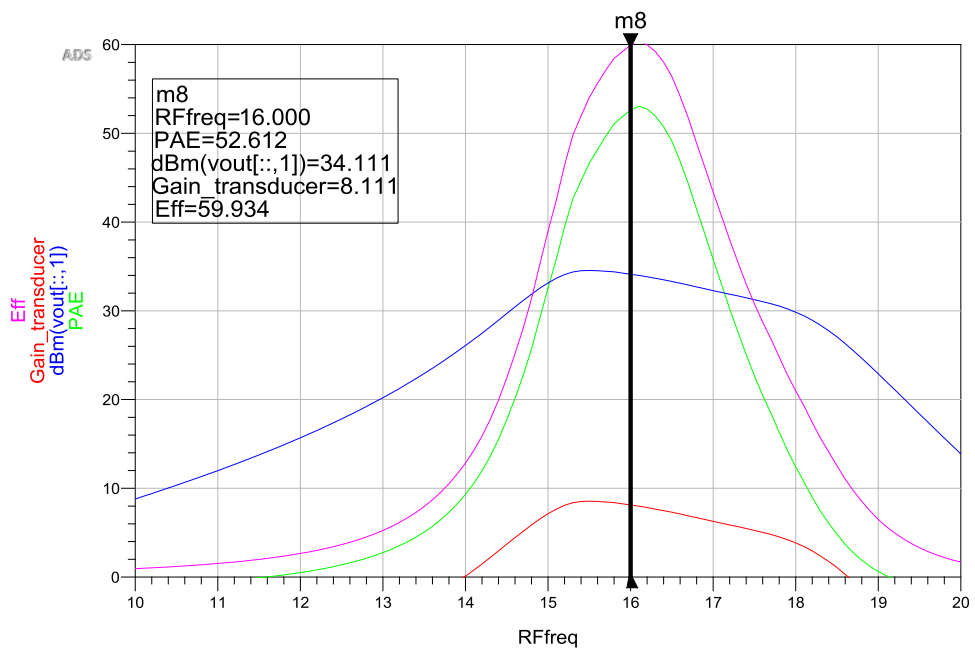


Рисунок 10.83 – Прототип топологии высокоэффективного однокаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт (WIN NP2500), размеры  $1,5 \times 1,7$  мм<sup>2</sup>

На рисунках 10.84, 10.85 и в таблице 10.30 приведены результаты моделирования прототипа топологии высокоэффективного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт на частоте 16 ГГц. Нагрузочная кривая высокоэффективного УМ класса F и формы тока и напряжения на выходе представлены на рисунке 10.86.



a)



б)

Рисунок 10.84 – Результаты моделирования высокоэффективного УМ: а) S-параметры; б) выходная мощность  $P_{out}$ , к.п.д. по добавленной мощности PAE, к.п.д. стока  $\eta$ , усиления GP в зависимости от частоты при  $P_{in} = 26$  дБм

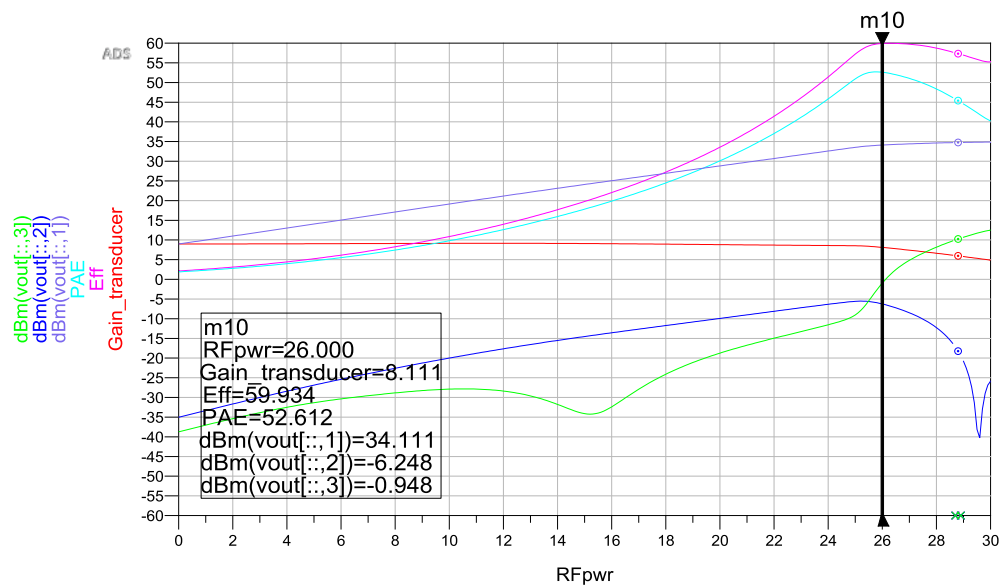


Рисунок 10.85 – Выходная мощность  $P_{out}$ , к.п.д. по добавленной мощности PAE, к.п.д. стока  $\eta$ , усиление GP, а также уровни мощности  $P_{2f_0}$  и  $P_{3f_0}$  в зависимости от входной мощности на частоте 16 ГГц

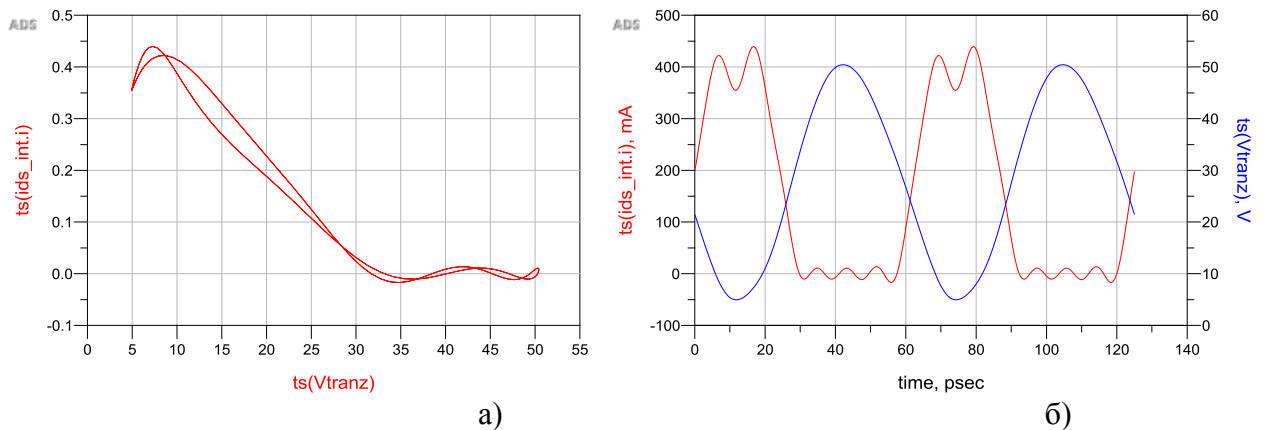


Рисунок 10.86 – Результаты моделирования высокоэффективного УМ: а) нагрузочная кривая; б) временные формы тока и напряжения на выходе

Таблица 10.30 – Результаты моделирования прототипа топологий двухкаскадного УМ с выходной мощностью 2,5 Вт на основе 0,25 мкм GaN технологии на частоте 16 ГГц

	$P_{out}$ , дБм	PAE, % $\eta$ , %	$G_P$ , дБ	$S_{11}$ , дБ $S_{22}$ , дБ	$V_{dd}$ , В $I_{dd}$ , мА	$P_{DC}$ , Вт	$P_{2f_0}$ , дБм	$P_{3f_0}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
Высокоэффективный УМ 2,5 Вт	34,1	53 60	8,1	-9 -9	28 153	4,3	-6,2	-0,9	1,5×1,7

Таким образом, реализация высокоэффективного УМ класса F на основе GaN технологии позволяет увеличить к.п.д. PAE на ~5% (до 53%), но недостатком является то, что полученное решение является сравнительно узкополосным ( $\Delta f = 500$  МГц), так как необходимо контролировать импеданс на частотах  $2f_0$  и  $3f_0$ . Дальнейшее усложнение выходной СЦ приводит к увеличению потерь и снижению выходной мощности и к.п.д. Также низкое

значение коэффициента усиления на частоте 16 ГГц снижает к.п.д. по добавленной мощности (PAE = 53 %, в то время как к.п.д. по стоку  $\eta = 60\%$ ). Низкое значение коэффициента усиления приводит к тому, что предварительные каскады УМ должны обеспечивать высокий уровень мощности, потребляя при этом значительное количество энергии постоянного тока  $P_{dc}$  и снижая общее к.п.д. многокаскадного усилителя.

### 10.2.9 Управляющие устройства

В данном подразделе рассмотрены варианты построения устройств управления амплитудой и фазой СВЧ сигнала на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB). В частности, рассмотрены и смоделированы на уровне принципиальных схем варианты пассивного и активного фазовращателя (ФВ), 16 дБ ячейки цифрового аттенюатора (ЦАТТ). Проведен анализ влияния температуры и технологического разброса. Указанные устройства разработаны на основе дифференциальной схемотехники.

#### Пассивный 6-битный ФВ

Пассивный дифференциальный коммутируемый ФВ состоит из 6 секций фазосдвигающих ячеек ( $180^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $22,5^\circ$ ,  $11,25^\circ$  и  $5,625^\circ$ ) и пассивного СТ, схема для моделирования представлена на рисунке 10.87.

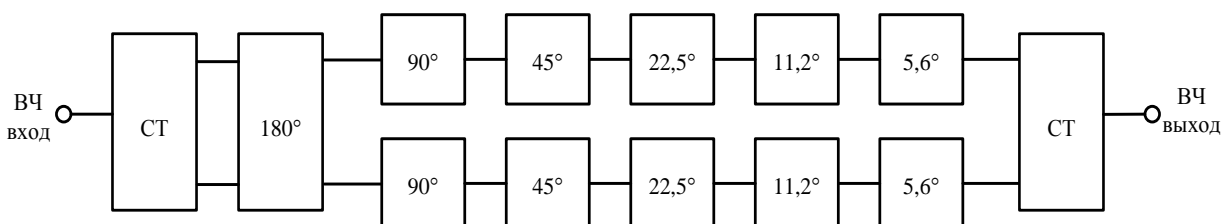


Рисунок 10.87 – Функциональная схема пассивного ФВ

Моделирование пассивного ФВ производилось в частотном диапазоне 11-17 ГГц. В качестве переключаемых элементов использовались транзисторы `rf_nmos1vbf_IO_12` техпроцесса XFAB XR013. Схемотехнические решения ячеек ( $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $22,5^\circ$ ,  $11,25^\circ$  и  $5,625^\circ$ ) пассивного ФВ основаны на решениях приведенных в подразделе 4.2.4 (см. рис. 4.56). Ячейка  $180^\circ$  основана только на переключаемых транзисторах.

На рисунке 10.88 представлены амплитудно–частотные характеристики, полученные по результатам моделирования дифференциального пассивного коммутируемого ФВ.





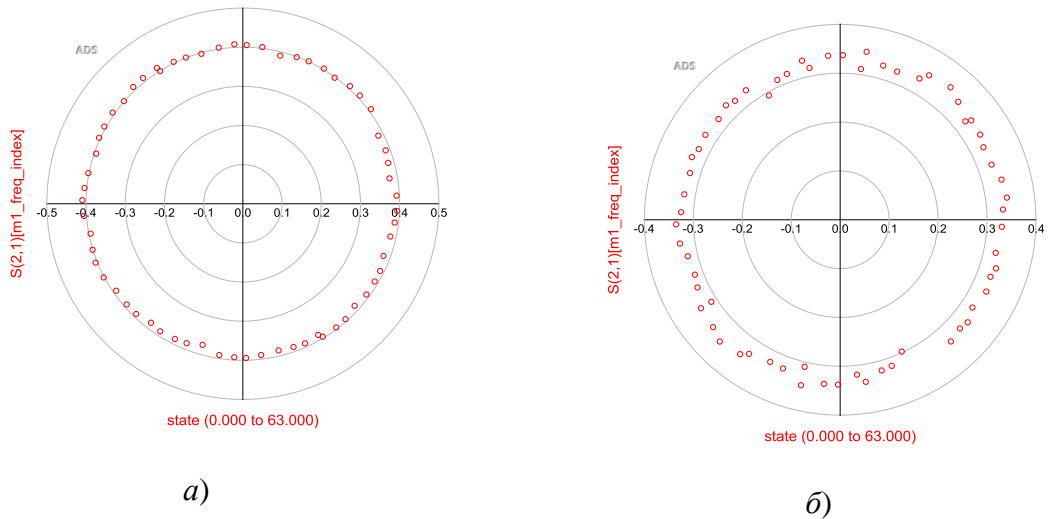


Рисунок 10.90 – Зависимость амплитуды пассивного ФВ в полярной системе координат: а) на частоте 12 ГГц; б) на частоте 16 ГГц

На рисунке 10.91 представлен прототип топологии 6-ти битного пассивного дифференциального ФВ для оценки предполагаемых размеров ИС.

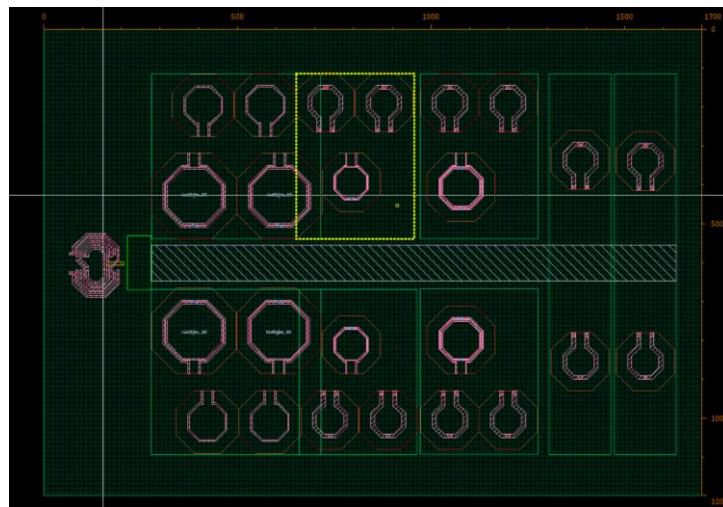


Рисунок 10.91 – Предполагаемая топология дифференциального пассивного ФВ на технологии XFAB XR013 ( $1,7 \times 1,2 \text{ мм}^2$ )

### Активный 6-битный ФВ

Принцип работы данных ФВ основан на сложении взвешенных квадратурных сигналов, в результате чего получается сдвинутый по фазе выходной сигнал. Функциональная схема такого ФВ представлена на рисунке 10.92.

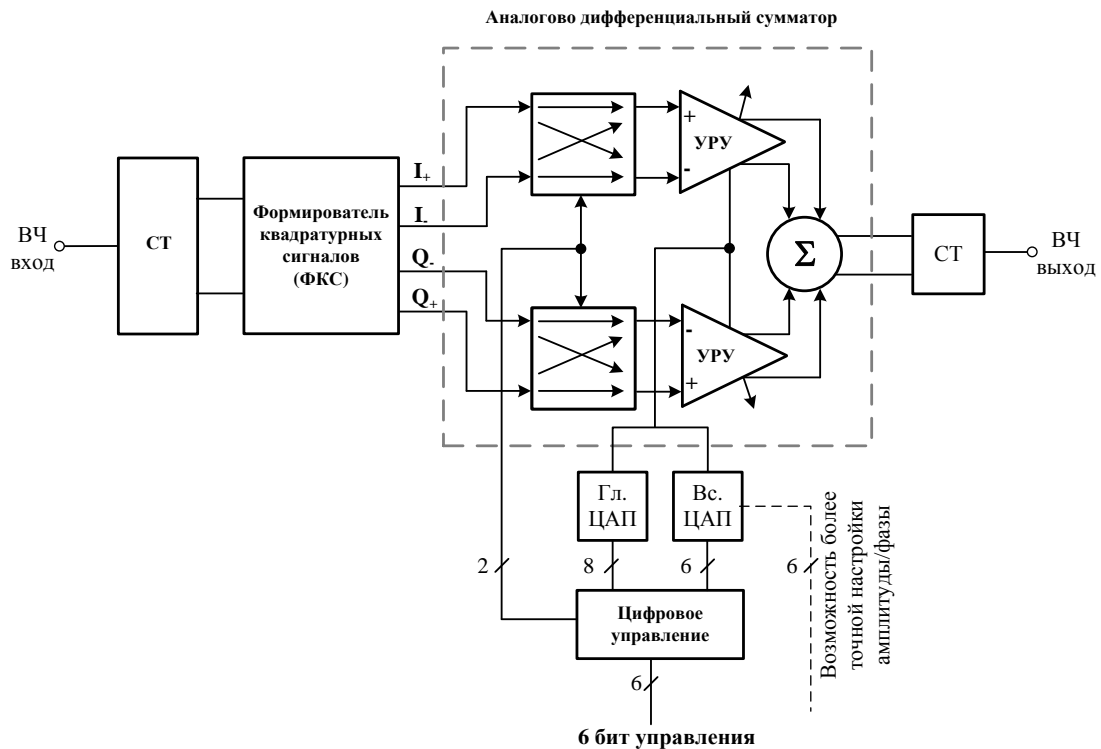


Рисунок 10.92 – Структурная схема векторного ФВ

### Формирователь квадратурных сигналов (ФКС)

К преимуществам ФКС на основе полифазных фильтров (ПФФ) относят простоту реализации, малую площадь топологии, а также малое влияние технологического разброса на характеристики ФКС. Недостатки: большие вносимые потери (~3 дБ на секцию); необходимость использования буферных каскадов, компенсирующих вносимые ПФФ потери; влияние тепловых шумов резисторов.

ФКС на RLC-цепях по сравнению с ПФФ позволяют снизить амплитудную и фазовую ошибки квадратурных сигналов примерно в два раза. Однако данный тип ФКС очень чувствителен к паразитной нагрузочной емкости. Этот недостаток частично устраняется путем усложнения структуры ФКС за счет увеличения количества индуктивностей. К сожалению, такой подход значительно увеличивает занимаемую площадь кристалла.

В таблице 10.31 представлены основные характеристики ФКС.

Таблица 10.31 – Основные параметры ФКС

Параметры	ПФФ второго порядка	RLC-фильтр
Вносимые потери, дБ	~ 14	~ 8
Разбаланс амплитуды, дБ	< 0,5	< 2
Разбаланс фазы, град	< 2	< 3
$S, \text{мм}^2$	0,0054*	0,0242*

\*без учета площадок и СТ

## Векторные фазовращатели

При помощи усилителей с регулируемым усилением осуществляется изменение амплитуд складываемых векторных сигналов. Можно выделить следующие варианты регулирования коэффициента усиления: изменение глубины обратной связи, изменением тока, изменением передаточной проводимости транзистора.

Вариант с изменением передаточной проводимости транзистора может быть реализован за счет изменения потенциалов на выходах транзистора и за счет изменения протекающего тока. В данной работе представлен вариант с изменением передаточной характеристики за счет изменения протекающего тока, так как данный вариант не требует большой потребляемой мощности и обладает низким коэффициентом шума. Реализация данных схем выполняется на основе ячейки Гильберта.

Моделирование векторного ФВ производилось в диапазоне частот 2-20 ГГц, в качестве ФКС используется ПФФ на идеальных элементах.

На рисунке 10.93 представлены фазочастотные характеристики моделирования векторного ФВ.

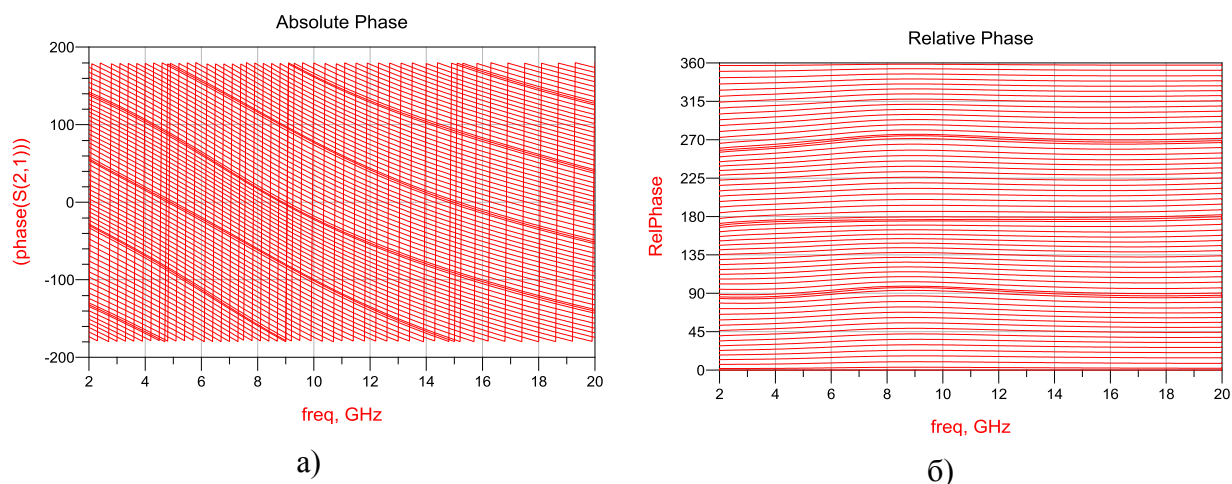


Рисунок 10.93 – Векторный ФВ: а) 64 фазовые состояния (в пределах от  $-180$  до  $180^\circ$ ); б) 64 нормированные фазовые состояния (в пределах от  $0$  до  $360^\circ$ )

На рисунке 10.94 представлена зависимость коэффициента передачи векторного ФВ во всех 64 состояниях в полярной системе координат на частоте 12 ГГц и 16 ГГц.

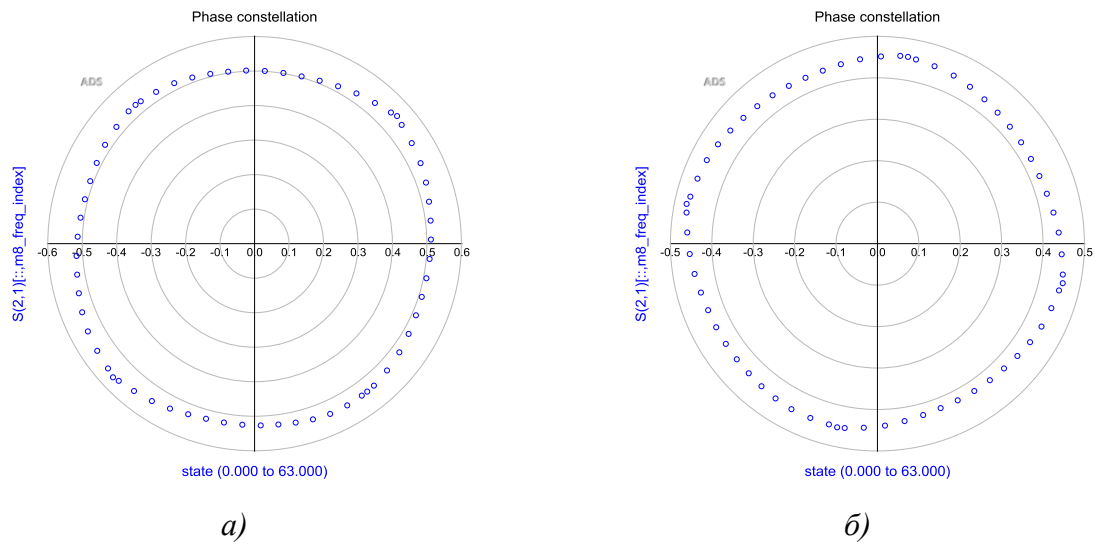


Рисунок 10.94 – Зависимость амплитуды векторного ФВ в полярной системе координат: а) на частоте 12 ГГц; б) на частоте 16 ГГц

Для оценки габаритов ИС дифференциального векторного ФВ была выполнена разработка прототипа топологии на рисунке 10.95.



Рисунок 10.95 – Предполагаемая топология дифференциального векторного ФВ (1,1×0,8 мм<sup>2</sup>, без учета площадок)

В таблице 10.32 представлены основные характеристики пассивного и векторного 6-битного ФВ.

Таблица 10.32 – Основные характеристики разработанных дифференциальных ФВ

№	Тип ФВ	N, бит	$S_{21min}$ , дБ	NF, дБ	$\delta\varphi$ , град	$\delta A$ , дБ	$IP_{1dB}$ , дБм	$P_{dc}$ , мВт	$S$ , мм <sup>2</sup>
1	Пассивный	6	-5,7 @16ГГц	5,7	<5	<1	6	0	1,7×1,2 (~2)
2	Активный	6	3,4-4,9 @16ГГц	10,2	<3	<1	-4	~100	1,1×0,8 (~1)

Согласно результатам моделирования, векторный ФВ будет обладать меньшим значением СКО по фазе, положительным коэффициентом передачи и занимать меньшую площадь на кристалле. Недостатками векторного ФВ будет большая потребляемая мощность, высокий КШ и низкие значения точки компрессии. Еще одним преимуществом для данного ФВ является возможность калибровки фазы за счет использования дополнительного подстроечного ЦАП (что приводит к снижению СКО по фазе/амплитуде).

Пассивный коммутируемый ФВ имеет преимущество по потребляемой мощности, сравнительно низкий КШ, высокие значения точки компрессии по входу  $IP_{1dB}$ . Недостатками же являются большие вносимые потери и размеры ИС.

### Анализ воздействия дестабилизирующих факторов на ФВ

В таблице 10.33 представлены результаты моделирования основных характеристик пассивного ФВ в опорном состоянии в зависимости от температуры окружающей среды ( $f_0=16$  ГГц, технология XFAB XR013).

Таблица 10.33 – Результаты моделирования пассивного ФВ от температуры ( $f_0=16$  ГГц)

T, °C	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$IP_{1dB}$ , дБм
-60	-3,48	101,4	6
25	-4,52	101,39	6
80	-5,28	101,17	6
Разброс, %	23	0,22	-
ТКС	-0,0129 дБ/°C	-0,0015 град/°C	-

В таблице 10.34 представлены результаты моделирования основных характеристик векторного ФВ в опорном состоянии в зависимости от температуры окружающей среды ( $f_0=16$  ГГц, технология XFAB XR013).

Таблица 10.34 – Результаты моделирования векторного ФВ от температуры ( $f_0=16$  ГГц)

T, °C	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	NF, дБ	$\delta\varphi$ , °	$IP_{1dB}$ , дБм	$P_{dc}$ , мВт
-60	6,69	-223,86	8,64	3,38	-6	32,2*
25	4,73	-223,79	10,18	3,47	-4	32,5*
80	3,53	-223,98	11,07	3,49	-2	32,7*
Разброс, %	41,4	0,1	15	3	50	1
ТКС,	-0,0226 дБ/°C	-0,0006 °/°C	0,0173 дБ/°C	0,0008 °/°C	-	0,0033 мВт/°C

\*потребляемая мощность только для УРУ

Как видно из таблицы 10.33, при изменении температуры моделирования разброс амплитуды пассивного ФВ составляет 23%, разброс фазы составляет 0,22%, при изменении температуры значение  $IP_{1dB}$  пассивного ФВ не изменяется.

Как видно из таблиц 10.33, 10.34, при изменении температуры моделирования разброс амплитуды векторного ФВ больше чем у пассивного ФВ и составляет 41,4%, разброс фазы составляет 0,1%, разброс коэффициента шума составляет 15%, при изменении температуры разброс значения  $IP_{1dB}$  векторного ФВ составляет 50 %.

### Влияние технологического разброса

Рассмотрим три граничных случая технологического разброса: типичный случай (ТТ), лучший случай (FF) и худший случай (SS) в процессе изготовления устройства. В таблице 10.35 представлены результаты моделирования параметров опорного состояния пассивного ФВ в зависимости от технологического разброса ( $f_0=16$  ГГц, технология XFAB XR013).

Таблица 10.35 – Результаты моделирования пассивного ФВ от технологического разброса ( $f_0=16$  ГГц)

Граничный случай	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , °	$IP_{1dB}$ , дБм
FF	-4,22	145,53	6
ТТ	-4,52	147,72	6
SS	-4,83	150	6
Разброс, %	6,85	2,85	-

В таблице 10.36 представлены результаты моделирования опорного состояния векторного ФВ в зависимости от технологического разброса ( $f_0=16$  ГГц, технология XFAB XR013).

Таблица 10.36 – Результаты моделирования векторного ФВ от технологического разброса ( $f_0=16$  ГГц)

Граничный случай	$S_{21}$ , дБ	$\varphi(S_{21})$ , град	NF, дБ	$\delta\varphi$ , град	$IP_{1dB}$ , дБм	$P_{dc}$ , мВт
FF	5,4	-222,14	9,97	3,5	-4	36*
ТТ	4,73	-223,79	10,18	3,47	-4	32,5*
SS	4,18	-225,58	10,39	3,6	-4	30,9*
Разброс, %	14	0,8	2,1	4	0	11

\*потребляемая мощность только для УРУ

При изменении параметров технологического разброса для пассивного ФВ разброс амплитуды составляет 6,85%, разброс фазы 2,85%. При изменении параметров технологического разброса для векторного ФВ разброс составляет 14%, разброс фазы 0,8%. Таким образом, характеристики пассивного ФВ менее подвержены влиянию дестабилизирующих факторов по сравнению с векторным ФВ.

### Расчет 16 дБ секции ЦАТТ

Для оценки основных параметров ЦАТТ была выбрана ячейка 16 дБ. В качестве переключаемых элементов выбраны транзисторы *rf\_nmos1vbf\_10\_12* с длиной затвора

$L_g=0,12$  мкм и шириной  $W_g=50 \times 2,2$  мкм (X-FAB). Принципиальная схема ячейки аттенюатора представлена на рисунке 10.96.

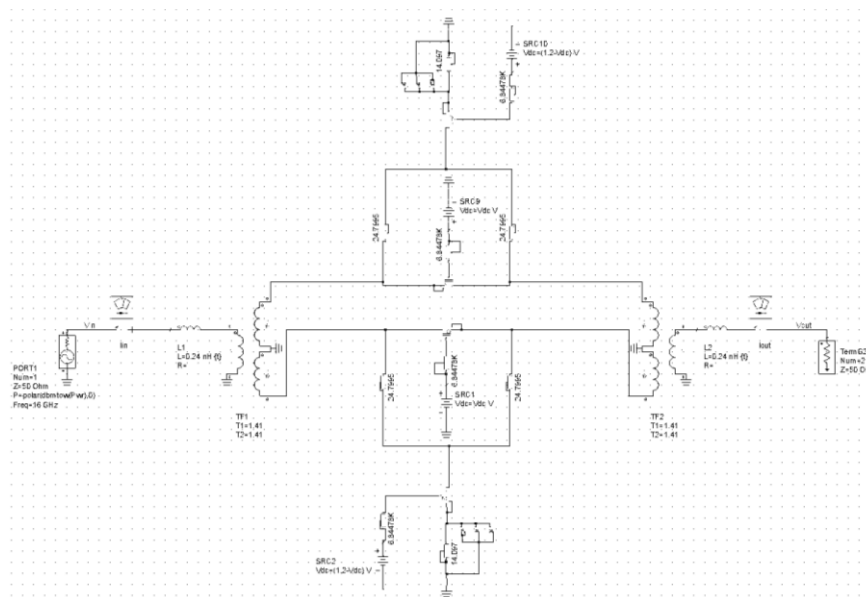


Рисунок 10.96 – Принципиальная схема дифференциальной ячейки с ослаблением 16 дБ

Для реализации выбрана дифференциальная схема звена Т-типа с идеальными балунами по входу и выходу. Для минимизации фазового сдвига сигнала по входу и выходу включены идеальные катушки индуктивности, которые будут определять итоговые размеры ячейки ЦАТТ. В качестве транзисторов, резисторов и конденсаторов используются модели реальных компонентов.

Согласно полученным результатам моделирования на рисунке 10.97 потери в опорном состоянии на частоте 16 ГГц составляют  $|S_{21}/_{\min} = -0,9$  дБ. Основные параметры дифференциальной ячейки аттенюатора с ослаблением 16 дБ сведены в таблице 10.37.

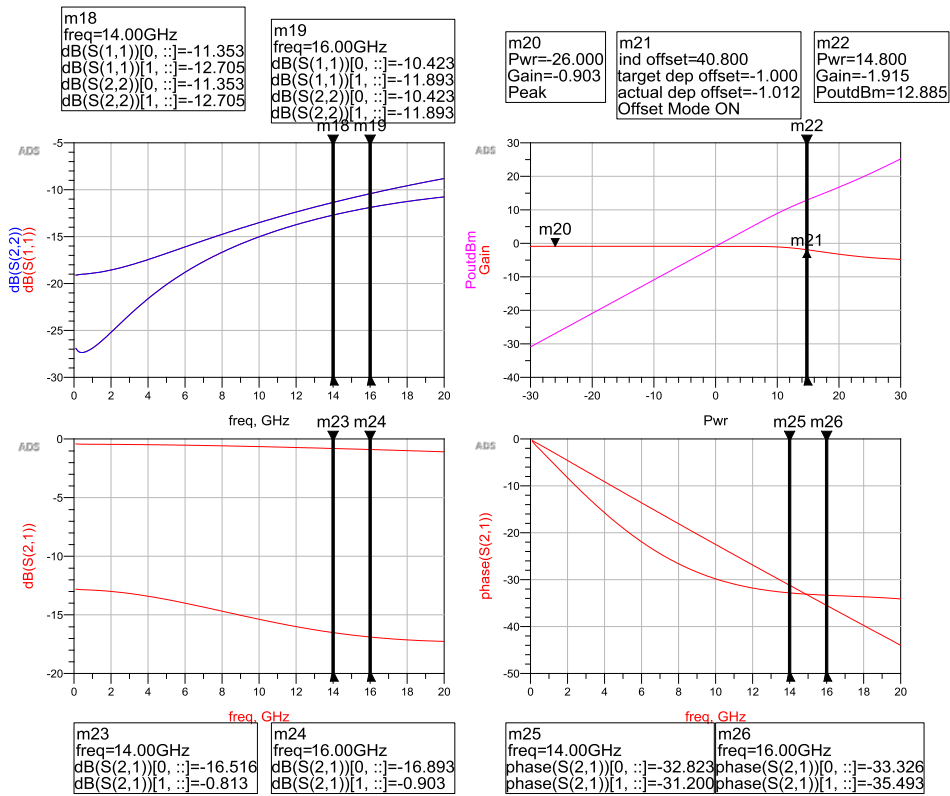


Рисунок 10.97 – Параметры дифференциальной ячейки с ослаблением 16 дБ

Таблица 10.37 – Параметры дифференциальной ячейки с ослаблением 16 дБ на двух частотных точках

$f$ , ГГц	$\Delta L/L_{st}$ , дБ	$ S_{21}/min$ , дБ	$\delta\varphi$ , град.	$ S_{11} $ , дБ	$ S_{22} $ , дБ	$OP_{1дБ}$ , дБм	Размеры, мм <sup>2</sup>
14	0..16/16	-0,813	1,62	-11,35	-11,35	13,16	
16	0..16/16	-0,903	2,16	-10,42	-10,42	12,88	

### 10.2.10 Разработка драйвера управления переключателями на основе PIN-диодов и GaAs pHEMT транзисторов

Для управления СВЧ переключателями на основе PIN-диодов и GaAs pHEMT транзисторов обычно требуется отрицательное напряжение -5...-2,5 В. Как правило, для организации импульсного режима управления СВЧ переключателями используют внешние драйверы управления, которые формируют импульсы управления из постоянных напряжений смещения. В данном подразделе рассмотрен вариант разработки драйвера управления СВЧ переключателями на основе 0,13 мкм КНИ технологии путем формирования импульсов отрицательной полярности из постоянных напряжений смещения +1 В и -6,5 В.

Как правило, кремниевые технологии обладают низкими значениями пробивного напряжения, поэтому для достижения нужного напряжения управления используют стекую схему включения рисунок 10.98 [68]). Использование pMOS и nMOS транзисторов упрощает разработку такого драйвера.



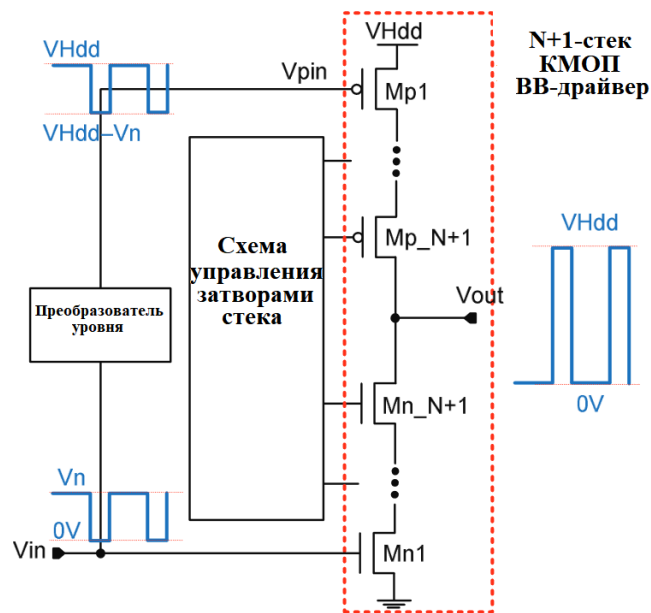


Рисунок 10.98 – Блок схема N+1-стэк КМОП высоковольтного драйвера

Для управления СВЧ переключателем на PIN-диодах или GaAs pHEMT транзисторах с использованием 0,13 мкм КНИ технологии схему необходимо модифицировать следующим образом: на вход высокого уровня  $V_{Hdd}$  подключить источник питания 1 В, что будет соответствовать прямому смещению СВЧ переключателя; а на вход  $V_{ss}$  подключить -6,5 В, что соответствует обратному смещению СВЧ переключателя. Также необходимо дополнить схему двумя преобразователями уровня для включения верхнего и нижнего плеча драйвера.

На рисунке 10.99 представлена схема высоковольтного драйвера, где стек из четырех n-МОП-транзисторов ( $Mn1$ - $Mn4$ ) и четырех p-МОП-транзисторов ( $Mp1$ - $Mp4$ ) обеспечивает переключение выходного напряжения драйвера.

Напряжения между всеми транзисторами в схеме распределяются таким образом, что на каждом транзисторе падает напряжение не более чем  $V_n$  – номинальное напряжение для данной технологии. Для моделирования драйвера управления СВЧ переключателем на PIN-диодах или на GaAs pHEMT транзисторах и преобразователей уровня использовались транзисторы `nmos2vbc_4` и `pmos2vbc_4` с номинальным напряжением 2,5 В (XFAB XR013).

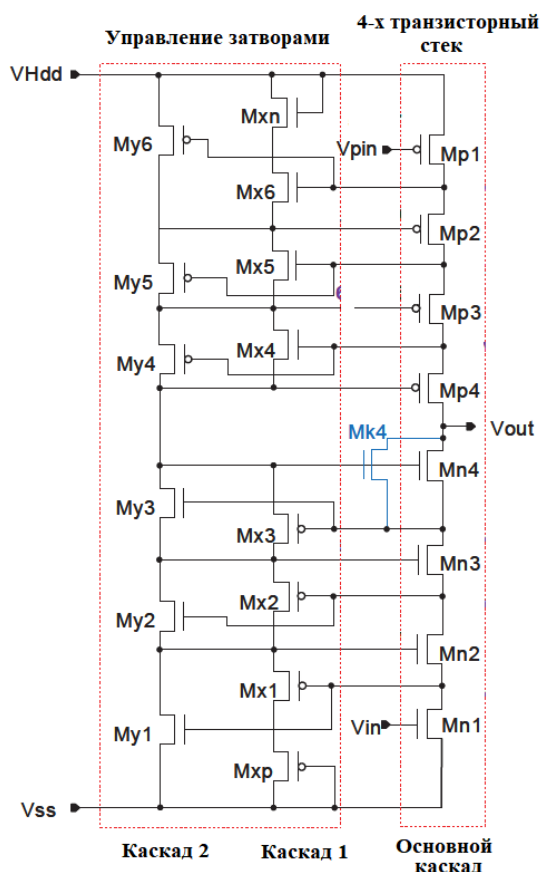


Рисунок 10.99 – Схема высоковольтного драйвера управления СВЧ переключателем

На рисунке 10.100 представлены эюры входного и выходного напряжения драйвера управления СВЧ переключателем во временной области при длительности импульса управления  $\tau_{и} = 0,5$  мкс и периодом  $T = 5$  мкс. Амплитуда входного управляющего импульса равна  $0 \dots 2,4$  В, амплитуда выходного управляющего импульса  $-6,2 \dots 0,9$  В.

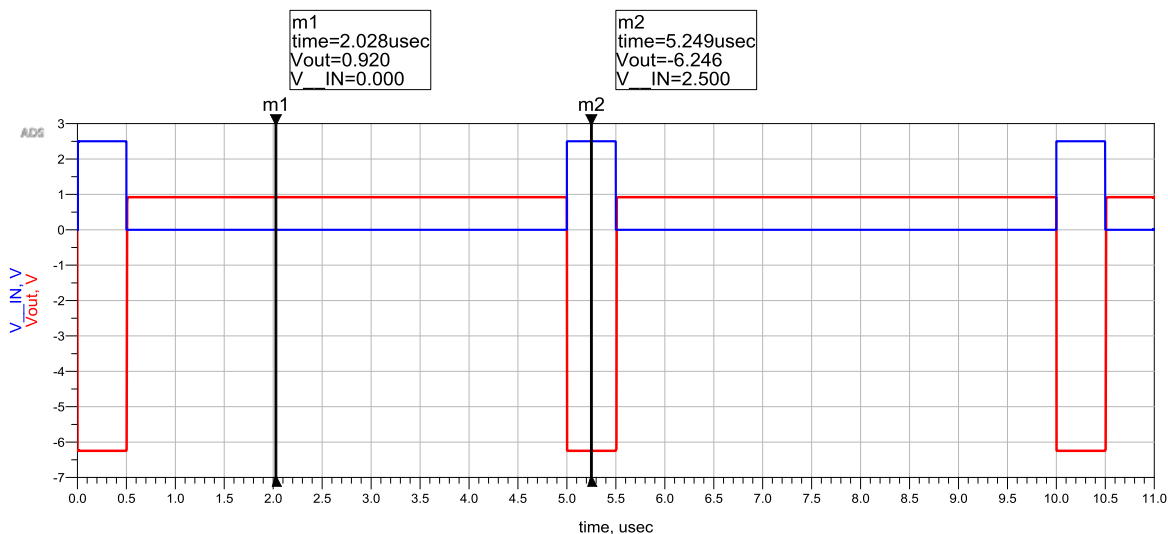


Рисунок 10.100 – Эюры входного и выходного напряжения драйвера управления СВЧ переключателе

### 10.2.11 СВЧ переключатели

В данном подразделе рассмотрены и промоделированы на уровне принципиальных схем варианты построения SPDT и SPST ключей на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT (WIN, PD2500) и 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB, XR013). Технология 0,25 мкм GaN HEMT (WIN) не рассматривалась ввиду отсутствия моделей переключательных транзисторов.

#### Разработка СВЧ переключателей на основе 0,25 мкм GaAs технологии SPST СВЧ переключатели на основе GaAs PD2500

На рисунке 10.101, представлена схема SPST СВЧ переключателя (конфигурация № 1). При проектировании SPST переключателя по данной схеме, можно добиться высокого уровня входной мощности, а при разработке топологии позволяет уменьшить размеры переключателя

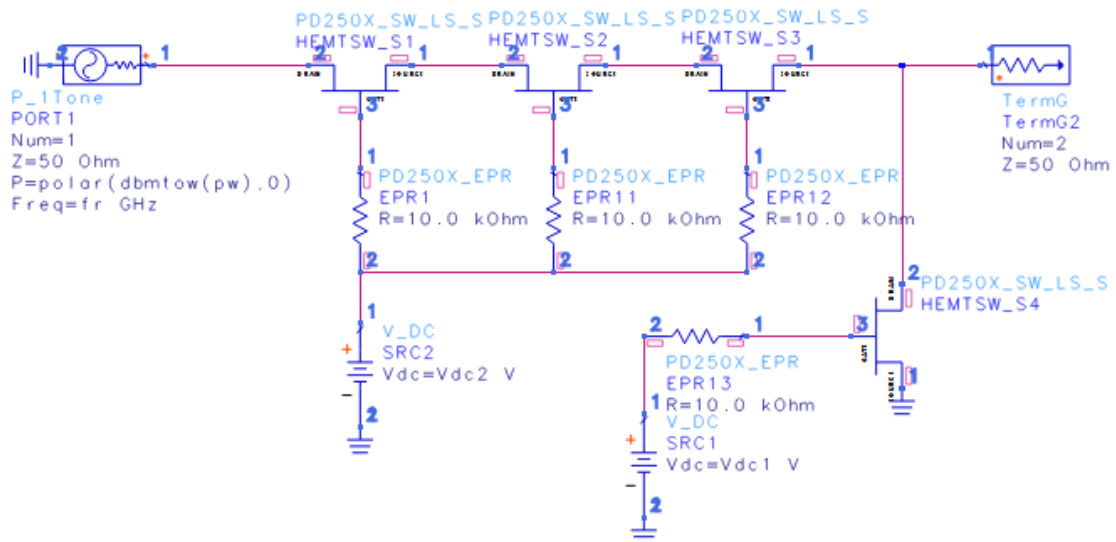


Рисунок 10.101 – Схема SPST переключателя (конфигурация № 1)

На рисунке 10.102 представлены результаты моделирования характеристик СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN).

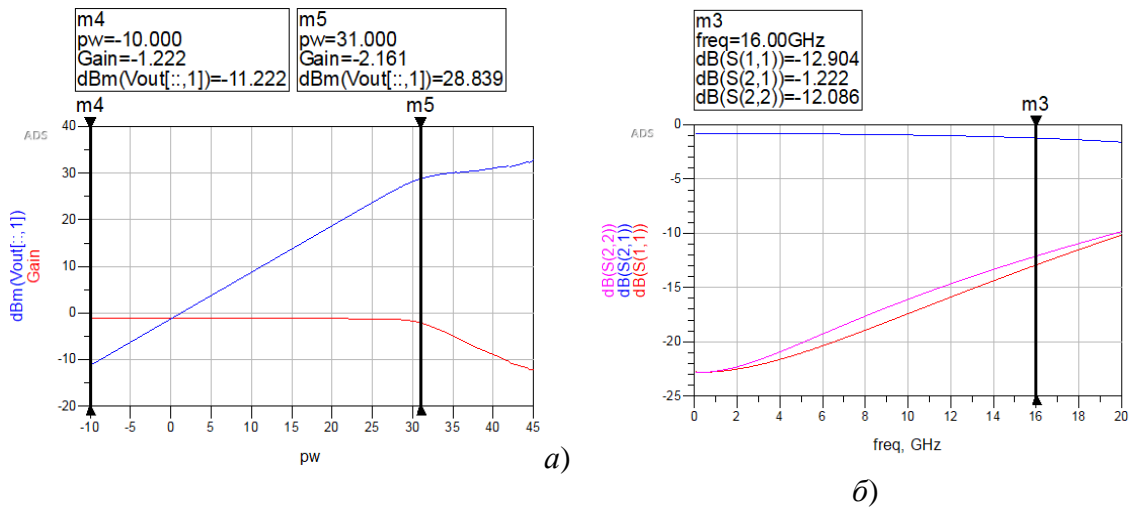


Рисунок 10.102 – Результаты моделирования SPST СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) уровень входной мощности и КП; б) S-параметры

На рисунке 10.103 представлена схема SPST СВЧ переключателя (конфигурация № 2). При проектировании SPST переключателя по данной схеме, можно добиться высокого уровня входной мощности и высокого коэффициента изоляции.

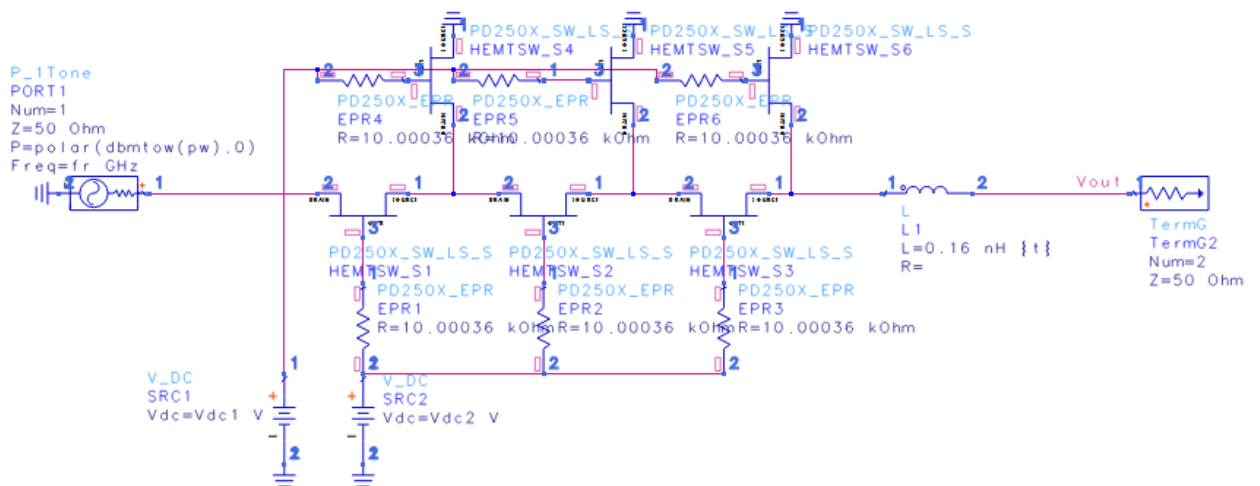


Рисунок 10.103 – Схема SPST переключателя (конфигурация № 2)

На рисунке 10.104 представлены результаты моделирования характеристик СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN).

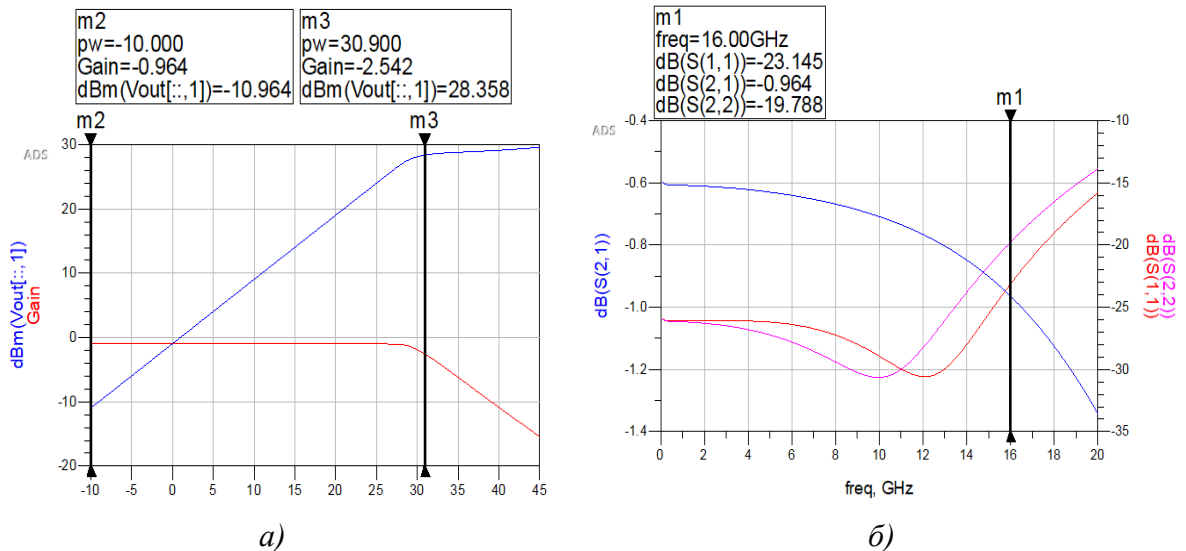


Рисунок 10.104 –Результаты моделирования SPST СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) уровень входной мощности и КП; б) S-параметры

На рисунке 10.105, представлена схема SPST СВЧ переключателя с использованием 4-х затворного переключательного транзистора, при проектировании SPST переключателя по данной схеме, можно добиться высокого уровня входной мощности.

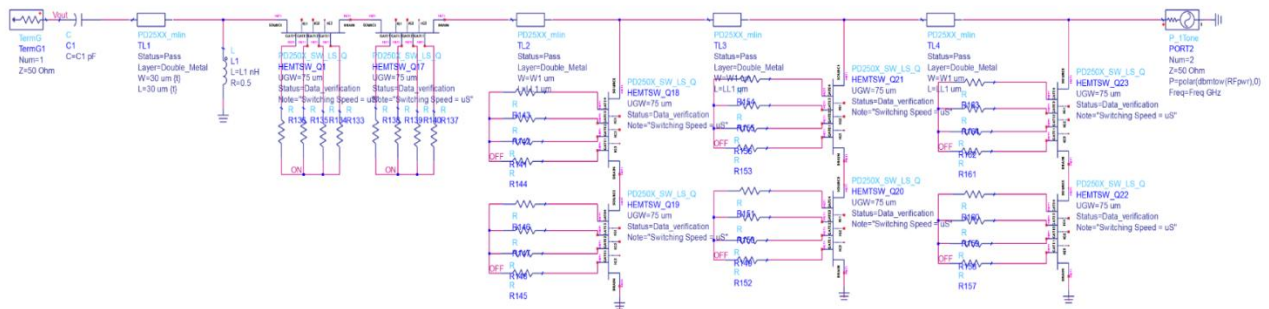


Рисунок 10.105 – Схема SPST переключателя (конфигурация № 3)

На рисунке 10.106 представлены результаты моделирования характеристик СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN).

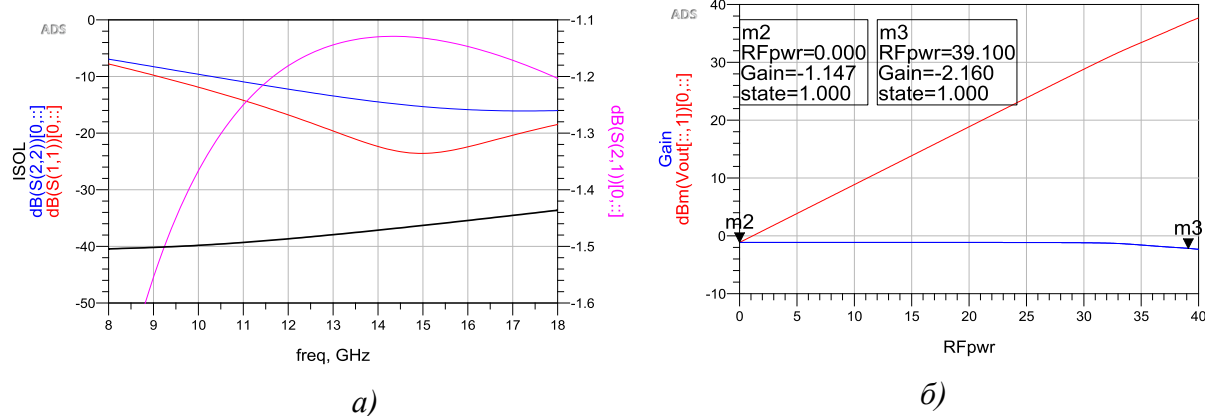


Рисунок 10.106 – Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) S-параметры; б) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной мощности

Основные характеристики моделируемого на частоте 16 ГГц СВЧ переключателя (конфигурация № 3) на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN) приведены в таблице 10.38.

Таблица 10.38 – Основные характеристики SPST СВЧ переключателей

№	Тип	ISO, дБ	IL, дБ	IP <sub>1дВ</sub> , дБм	S <sub>11</sub> , дБ; S <sub>22</sub> , дБ;	Размеры, мм <sup>2</sup>	Особенности
1	SPST	22,5	1,2	31	-12,9 -12,1	0,2	Последовательно-параллельная схема (без СЦ)
2	SPST	31	0,96	30,9	-23,16 -19,79	0,35	Последовательно-параллельная схема (СЦ по выходу)
3	SPST	35,4	1,15	39,1	-22,4 -15,9	0,5	Последовательно-параллельная схема ( $\lambda/4$ -линия в каждом плече)

### SPDT СВЧ переключатели на основе GaAs PD250

Для SPDT переключателя был выбран транзистор PD250X\_SW\_LS\_S с шириной зазор  $W_g = 9 \times 50$  мкм.

На рисунке 10.107, представлена схема SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 1). Данная схема была выбрана из-за небольших вносимых потерь и высокого коэффициента изоляции.

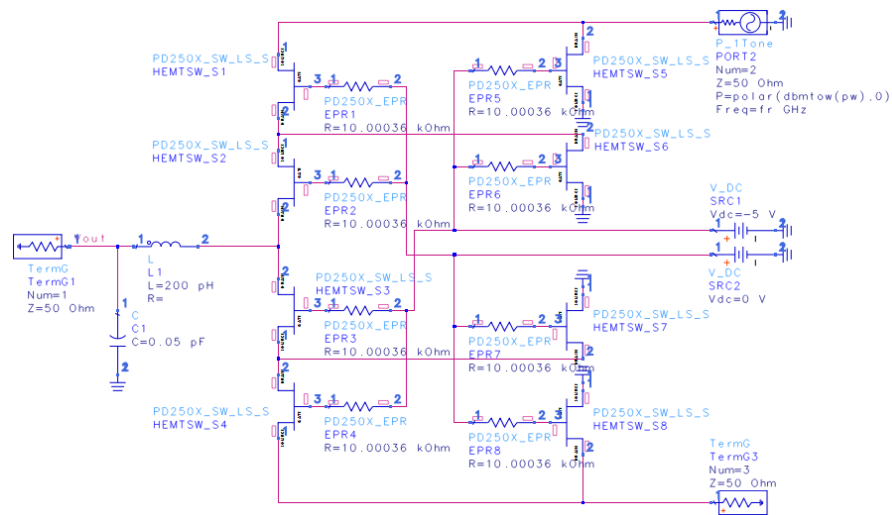


Рисунок 10.107 – Схема SPDT переключателя (конфигурация № 1)

На рисунке 10.108 представлены результаты моделирования характеристик SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN). Где  $S_{21}$ ,  $S_{31}$  – вносимые потери;  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  – коэффициент согласования по входу/выходу;  $S_{23}$  – изоляция между выходными портами.

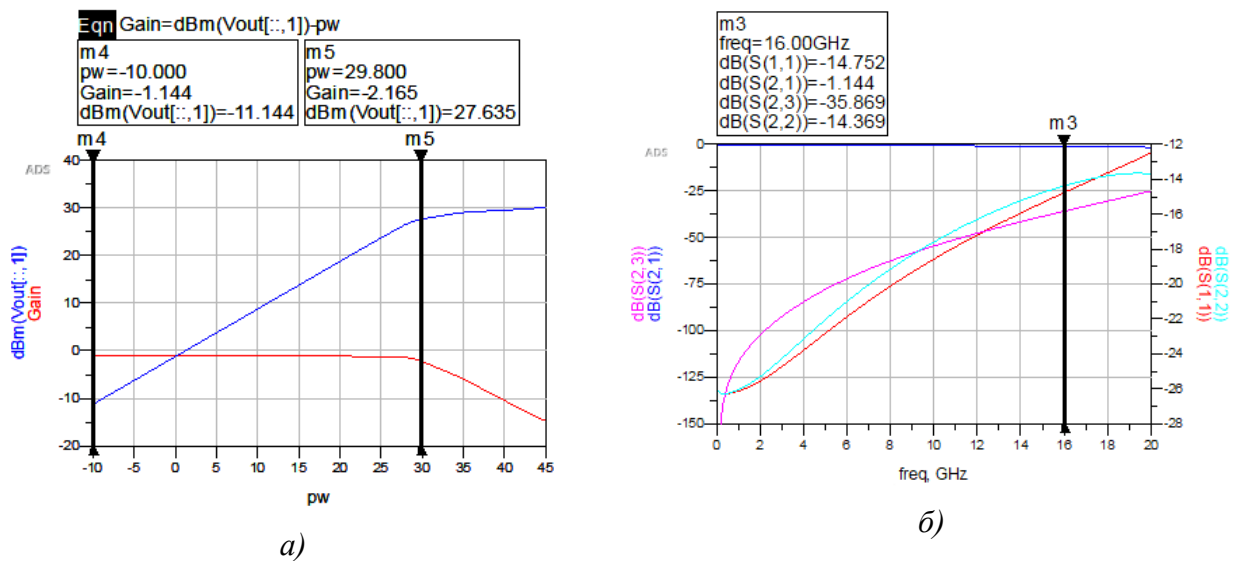


Рисунок 10.108 –Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной мощности; б) S-параметры

Основные характеристики моделируемого на частоте 16 ГГц SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 1) на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN) приведены в таблице 10.37.

На рисунке 10.109, представлена схема SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 2).

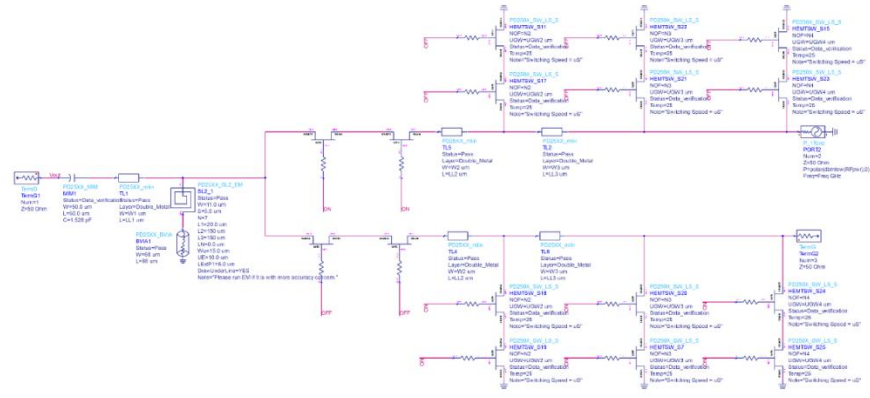


Рисунок 10.109 – Схема SPDT переключателя (конфигурация № 2)

На рисунке 10.110 представлены результаты моделирования характеристик SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN). Обозначения на рисунке 10.110:  $S_{21}$  – вносимые потери;  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  – коэффициент согласования по входу/выходу;  $S_{23}$  – изоляция между выходными портами.

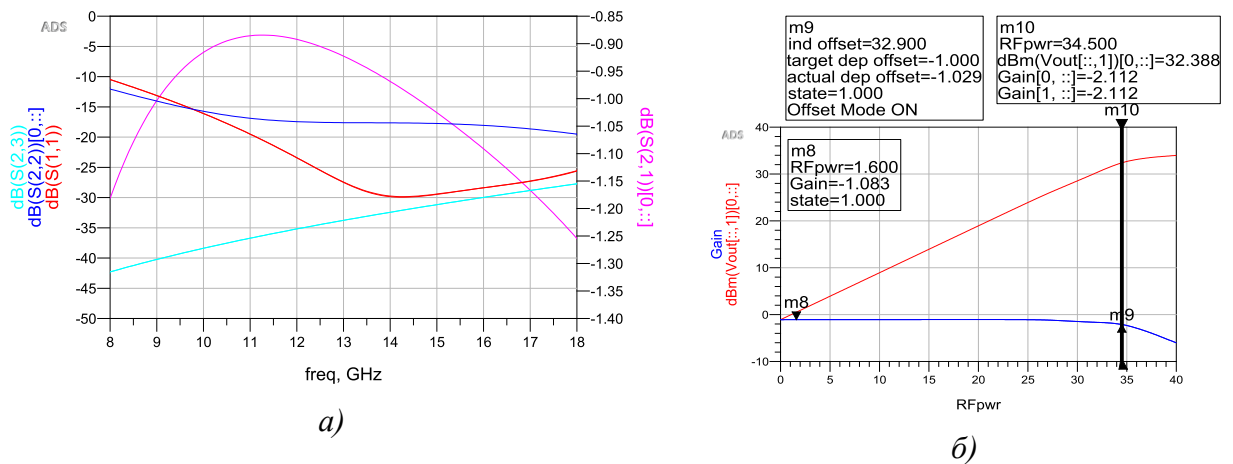


Рисунок 10.110 – Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) S-параметры; б) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной мощности

На рисунке 10.111, представлена схема SPDT СВЧ переключателя с использованием 4-х затворного переключательного транзистора. При проектировании SPDT переключателя по данной схеме можно добиться высокого уровня входной мощности и высокого уровня изоляции.



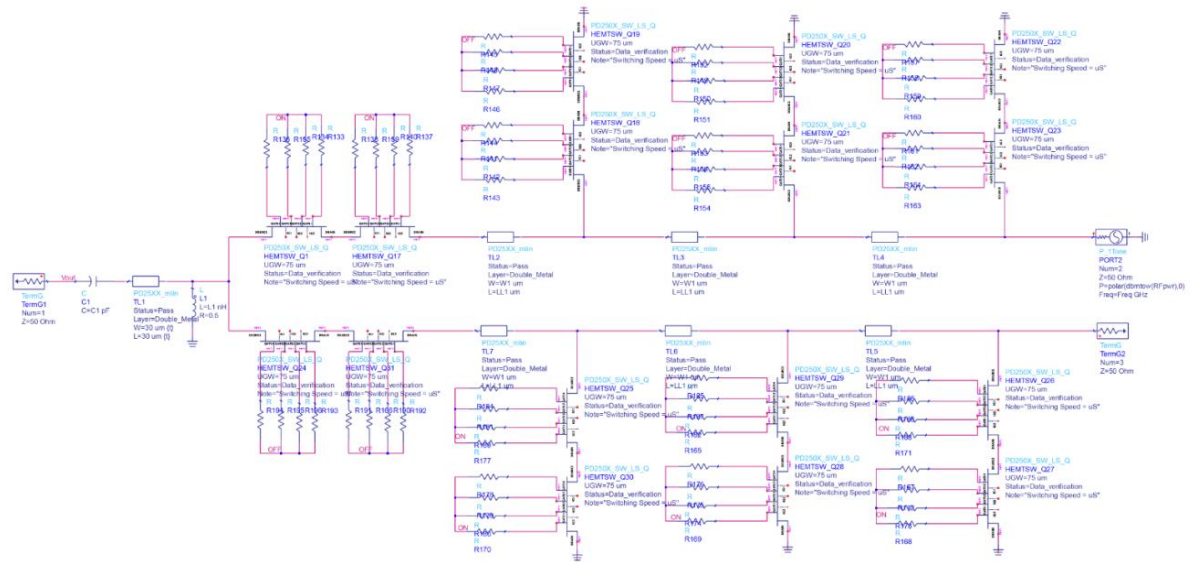


Рисунок 10.111 – Схема SPDT переключателя (конфигурация № 3)

На рисунке 10.112 представлены результаты моделирования характеристик SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN). Где  $S_{21}$  – вносимые потери;  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  – коэффициент согласования по входу/выходу;  $S_{23}$  – изоляция между выходными портами.

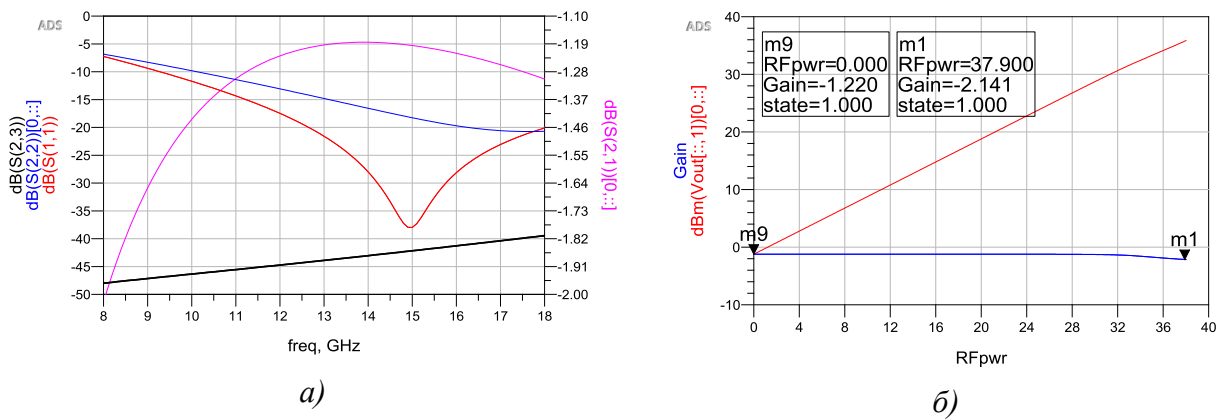


Рисунок 10.112 – Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) S-параметры; б) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной мощности (конфигурация № 3)

Основные характеристики моделируемого на частоте 16 ГГц SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 3) на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN) приведены в таблице 10.37.

На рисунке 10.113, представлена схема SPDT СВЧ переключателя с использованием 4-х затворного переключательного транзистора, SPDT переключатель по данной схеме имеет меньшие вносимые потери и высокий уровень входной мощности.

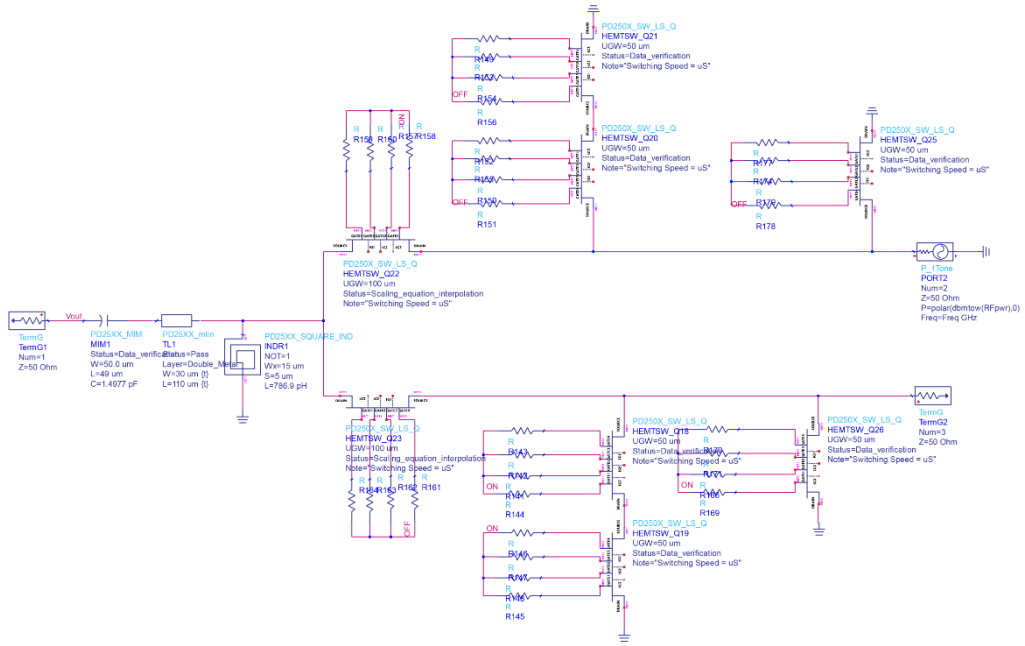


Рисунок 10.113– Схема SPDT переключателя (конфигурация № 4)

На рисунке 10.114 представлены результаты моделирования характеристик SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN). Где  $S_{21}$ – вносимые потери;  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  – коэффициент согласования по входу/выходу;  $S_{23}$  – изоляция между выходными портами.

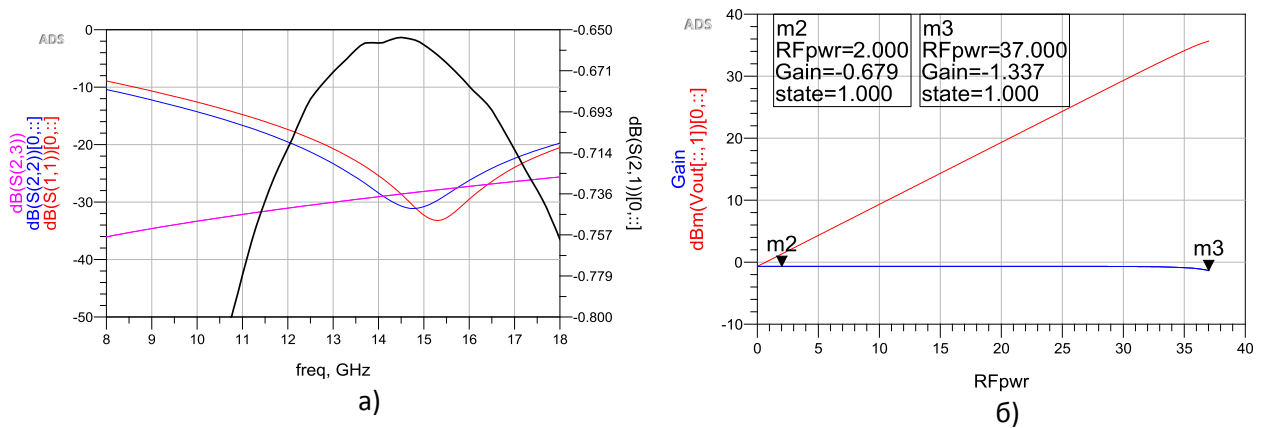


Рисунок 10.114 –Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN): а) S-параметры; б) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной мощности (конфигурация № 4)

Основные характеристики моделируемого на частоте 16 ГГц SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 4) на основе 0,25 мкм GaAs технологии (WIN) приведены в таблице 10.39.

Таблица 10.39 – Основные характеристики SPDT СВЧ переключателей

№	Тип	ISO, дБ	IL, дБ	IP <sub>1дБ</sub> , дБм	S <sub>11</sub> , дБ; S <sub>22</sub> (S <sub>33</sub> ), дБ;	Размеры, мм <sup>2</sup>	Особенности
1	SPDT	35,9	1,144	29,8	-14,75 -14,37	0,22	Последовательно-параллельная схема (СЦ по входу)
2	SPDT	29,97	1,1	34,5	-28 -18	0,6	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
	SPDT	33,37	1,4	33,2	-25 -16	0,6	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
3	SPDT	41,27	1,22	37,9	-28 -19,7	1,0	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
4	SPDT	27,27	0,68	37	-29,5 -26,2	0,6	Последовательно-параллельная схема (СЦ по входу)

### 10.2.12 Разработка СВЧ переключателей на основе 0,13 мкм КНИ

Для SPDT переключателя были выбраны транзисторы rf\_nmos1vbf\_10\_12 с шириной затвора  $W_g = 50 \times 4,2$  мкм и  $W_g = 50 \times 10$  мкм.

На рисунке 10.115, представлена схема SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 1).

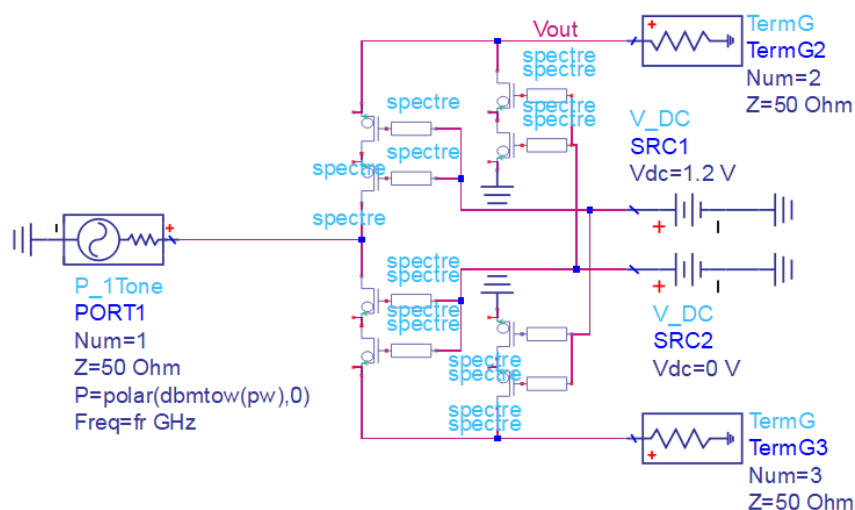


Рисунок 10.115 – Схема SPDT переключателя (конфигурация № 1)

На рисунке 10.116 представлены результаты моделирования характеристик SPDT СВЧ переключателя на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB). Где  $S_{21}$ ,  $S_{31}$  – вносимые

потери;  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  – коэффициент согласования по входу/выходу;  $S_{23}$  – изоляция между выходными портами.

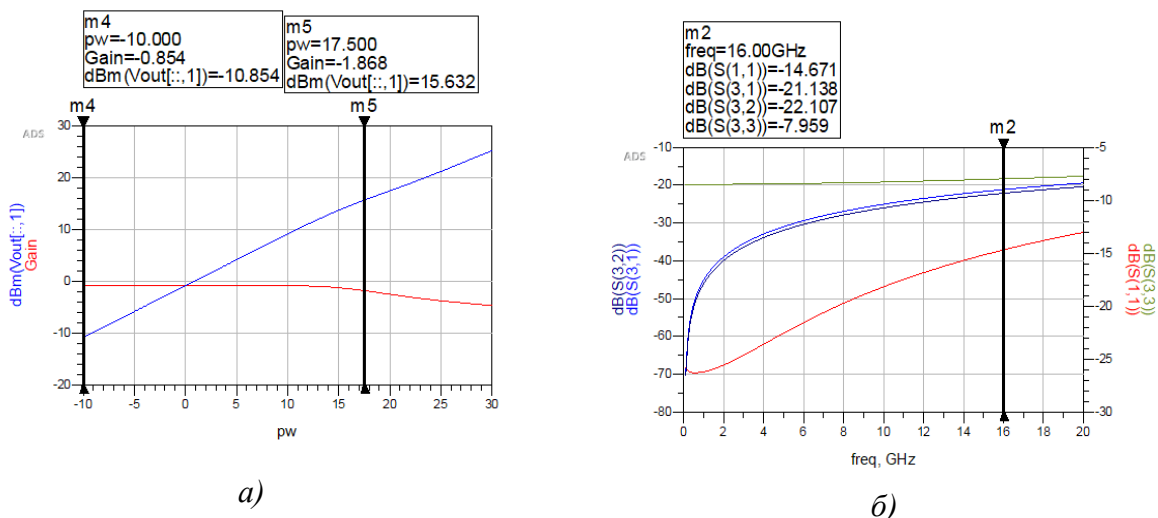


Рисунок 10.116 – Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,12 мкм КНИ технологии (XFAB): а) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной частоты; б) S-параметры

На рисунке 10.117 представлена схема SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 2).

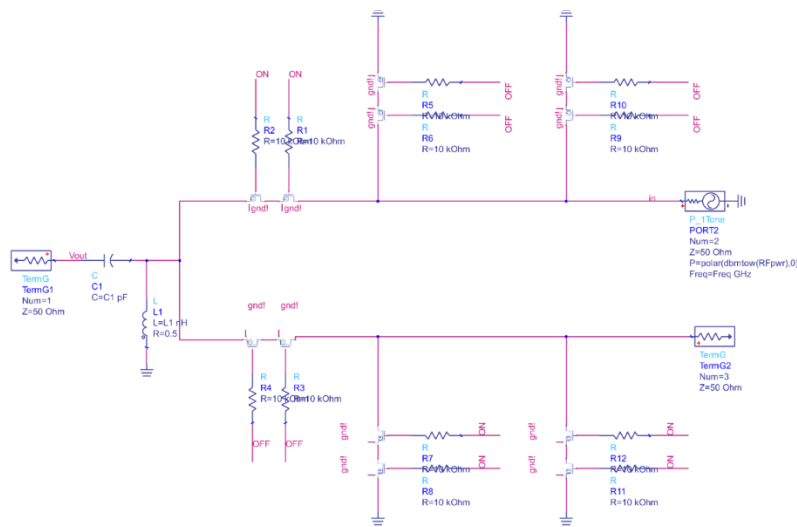


Рисунок 10.117 – Схема SPDT переключателя (конфигурация № 2)

На рисунке 10.118 показаны результаты моделирования характеристик SPDT СВЧ переключателя на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB). Где  $S_{21}$  – вносимые потери;  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  – коэффициент согласования по входу/выходу;  $S_{23}$  – изоляция между выходными портами.

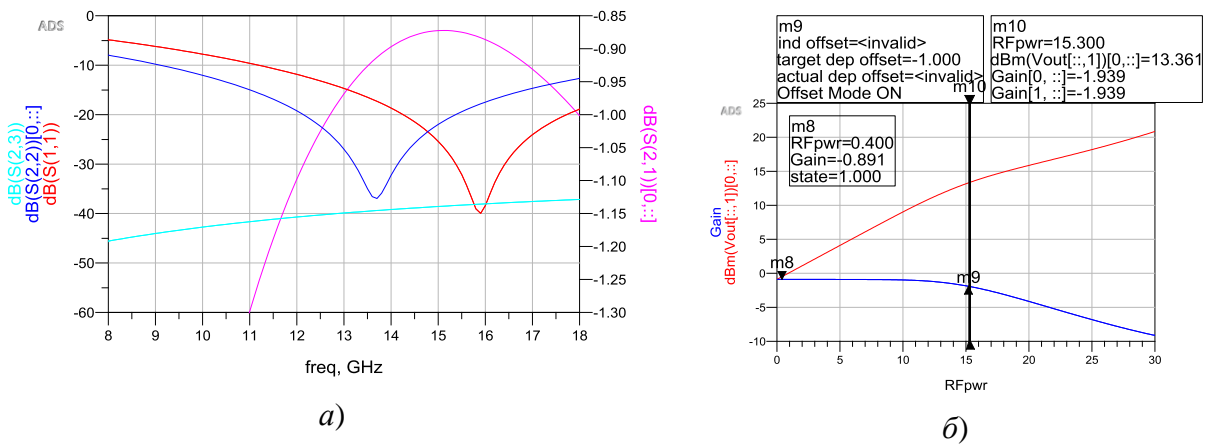


Рисунок 10.118 – Результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB): а) S-параметры; б) уровень входной мощности и КП в зависимости от входной частоты

Основные результаты моделирования SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 2) на основе 0,13 мкм технологии XFAB приведены в таблице 5.36.

На рисунке 10.119, представлена схема SPDT СВЧ переключателя (конфигурация № 3).

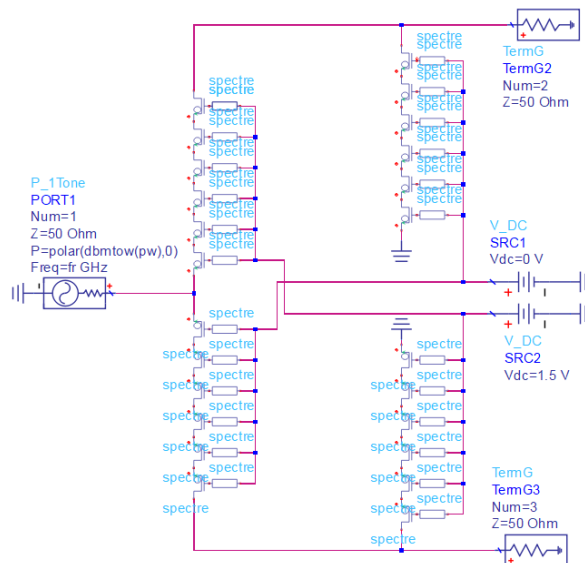


Рисунок 10.119 – Схема SPDT переключателя (Конфигурация № 3)

### 10.2.13 Выводы по СВЧ переключателям

Итоговые характеристики и оценка габаритных размеров СВЧ переключателей на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ (WIN) и 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB) приведена в таблице 10.40.

Таблица 10.40 – Итоговые характеристики и оценка габаритных размеров СВЧ переключателей на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT и 0,13 мкм КНИ технологии

№	Тип	ISO, дБ	IL, дБ	IP <sub>1дВ</sub> , дБм	S <sub>11</sub> , дБ; S <sub>22</sub> , дБ;	Размеры, мм <sup>2</sup>	Особенности
<b>GaAs SPST</b>							
1	SPST	22,5	1,2	31	-12,9 -12,1	0,2	Последовательно-параллельная схема (без СЦ)
2	SPST	31	0,96	30,9	-23,16 -19,79	0,35	Последовательно-параллельная схема (СЦ по выходу)
3	SPST	35,4	1,15	39,1	-22,4 -15,9	0,5	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
<b>GaAs SPDT</b>							
1	SPDT	35,9	1,144	29,8	-14,75 -14,37	0,22	Последовательно-параллельная схема (СЦ по входу)
2	SPDT	29,97	1,1	34,5	-28 -18	0,6	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
	SPDT	33,37	1,4	33,2	-25 -16	0,6	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
3	SPDT	41,27	1,22	37,9	-28 -19,7	1,0	Последовательно-параллельная схема (λ/4-линия в каждом плече)
4	SPDT	27,27	0,68	37	-29,5 -26,2	0,6	Последовательно-параллельная схема (СЦ по входу)
<b>Si SPDT</b>							
1	SPDT	22,1	0,85	17,5	-14,7 -15,5	0,02	Последовательно-параллельная схема (без СЦ)
2	SPDT	38	0,88	15,3	-38 -17	0,1	Последовательно-параллельная схема (СЦ по входу)
3	SPDT	33	0,984	25,9	-14,8 -14,8	0,03	Последовательно-параллельная схема (без СЦ)
4	SPDT	37,5	1,5	23,7	-21 -16	0,1	Последовательно-параллельная схема (СЦ по входу)

Согласно полученным результатам, максимальная входная мощность IP<sub>1дВ</sub> для СВЧ переключателей на 0,25 мкм GaAs pHEMT технологии составляет не более 37,9 дБм при вносимых потерях 1,2 дБ и развязке 40 дБ, что, в принципе, делает возможным их использование на выходе УМ 5 Вт. Но при этом СВЧ переключатель будет ограничивать выходную мощность УМ до 35,9 дБм (3,9 Вт), а также увеличивать уровень нелинейных искажений. Для получения более линейных СВЧ переключателей необходимо использовать GaN технологию.

Для СВЧ переключателей на основе 0,13 мкм КНИ технологии удалось достичь входной мощности  $P_{1dB}$  порядка 24-26 дБм и изоляции  $ISO \approx 33-37$  дБ при вносимых потерях  $IL = 1-1,5$  дБ. Таким образом, реализация совмещенного чипа (МШУ+УМ, работающие на один СВЧ выход) на кремниевой технологии возможна.

### 10.3 Пассивные устройства

В данном подразделе рассмотрены варианты построения, характеристики и габариты симметрирующих трансформаторов (СТ) и сумматоров/делителей для частотного диапазона 14-16 ГГц. Пассивные устройства разработаны на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB).

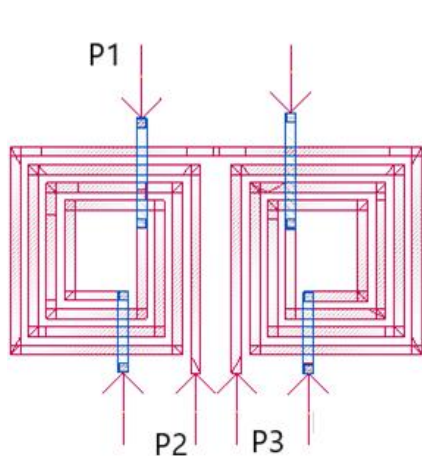
#### 10.3.1 Симметрирующие устройства

В данном подразделе рассмотрены следующие разновидности СТ:

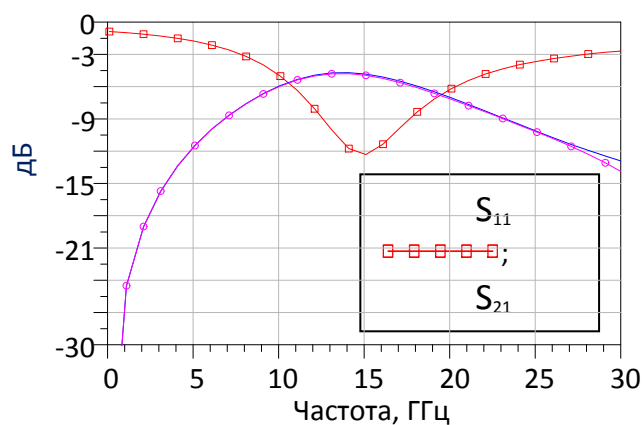
- 1) СТ Маршанда с боковой связью;
- 2) СТ Маршанда с лицевой связью;
- 3) СТ на основе связанных катушек с боковой связью;
- 4) СТ на основе связанных катушек с лицевой связью;
- 5) СТ на связанных линиях.

#### СТ Маршанда с боковой связью

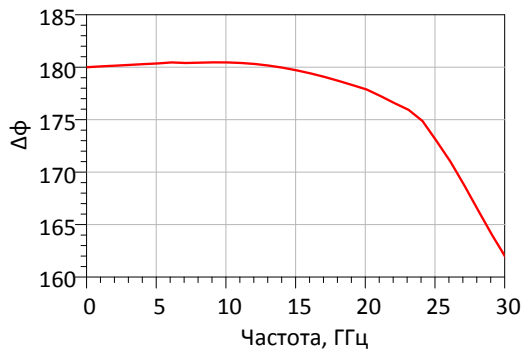
На рисунке 10.120 а представлена топология СТ Маршанда с боковой связью. Порт 1 – вход СТ, порты 2-3 – выходы СТ. Для снижения амплитудного разбаланса на выходе СТ используется корректирующая емкость 0,22 пФ. На рисунке 10.120 б изображены смоделированные S-параметры, фазовый (10.120 в) и амплитудные (рисунок 10.120 г) разбалансы.



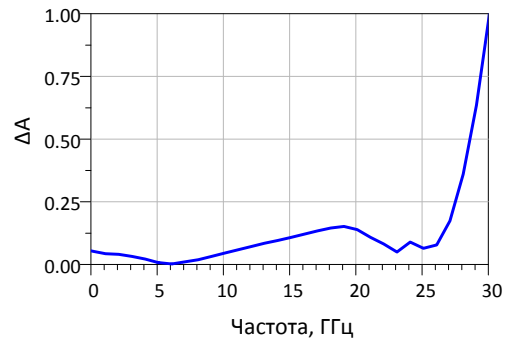
а)



б)



в)

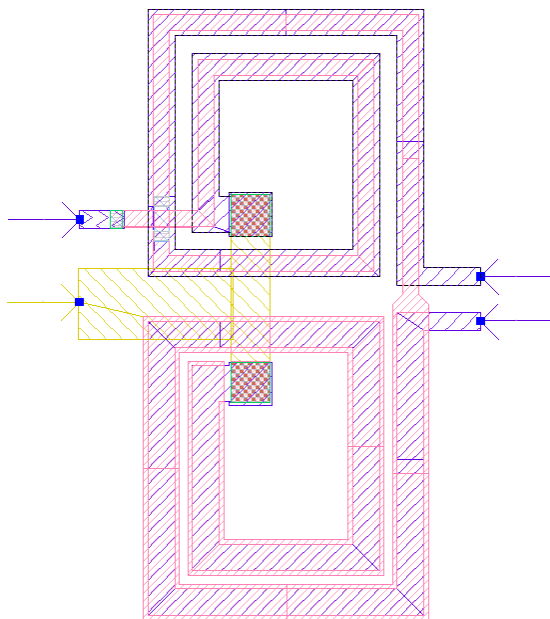


з)

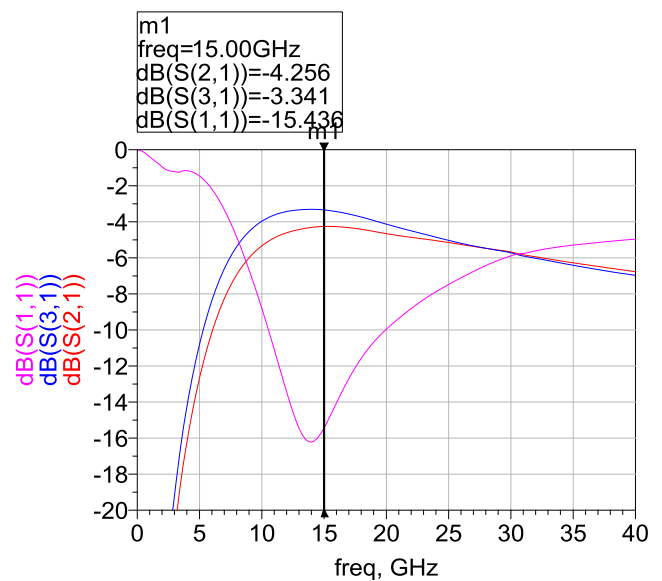
Рисунок 10.120 – СТ Маршанда с боковой связью на 0,13 мкм КНИ: а) топология; б) S-параметры; в) фазовый разбаланс; г) амплитудный разбаланс

### СТ Маршанда с лицевой связью

На рисунке 10.121 а представлена топология СТ Маршанда с лицевой связью. На рисунке 10.121 б изображены смоделированные S-параметры, фазовый (рисунке 10.121 в) и амплитудные (рисунке 10.121 з) разбалансы.

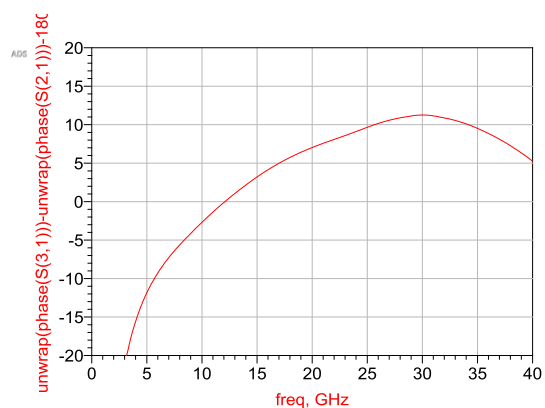


а)

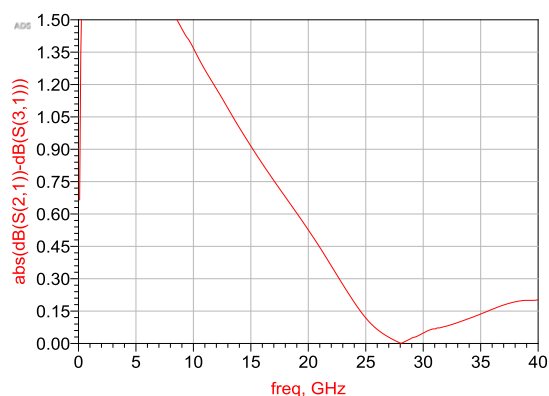


б)





б)

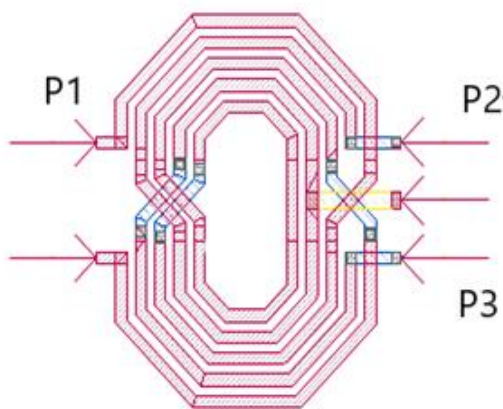


г)

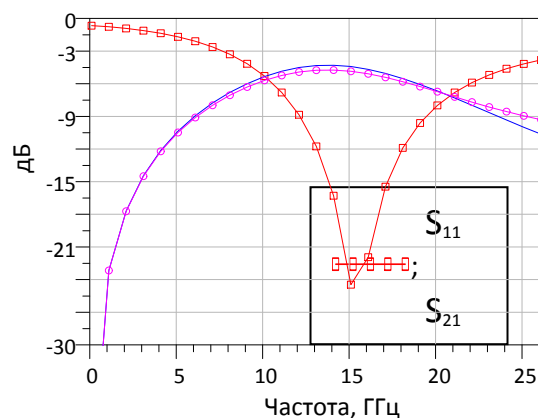
Рисунок 10.121 – СТ Маршанда с лицевой связью на 0,13 мкм КНИ: а) топология; б) S-параметры; в) фазовый разбаланс; г) амплитудный разбаланс

### СТ на основе связанных катушек индуктивности с боковой связью

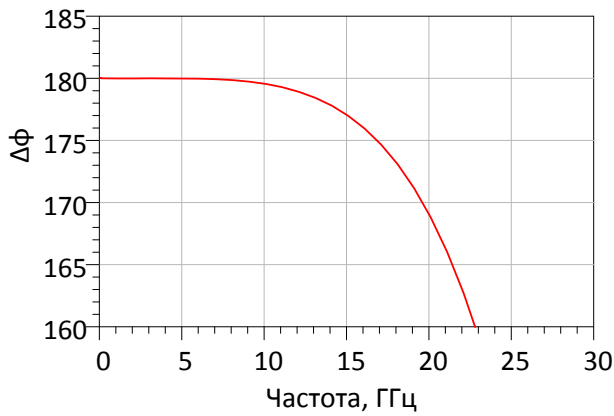
На рисунке 10.122 а представлена топология разрабатываемого СТ, результаты моделирования S-параметров на рисунке 10.122 б. Для обеспечения разности фаз во вторичной обмотке СТ средняя точка должна быть заземлена. Данная средняя точка может быть использована для подачи питания на УМ. Для подстройки амплитудного (рисунок 10.122 в) и фазового (рисунок 10.122 г) разбаланса между двумя выходами СТ используется емкость  $C = 0,29$  пФ.



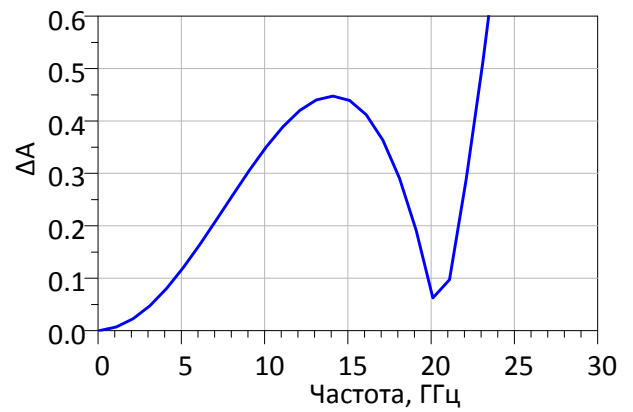
а)



б)



б)

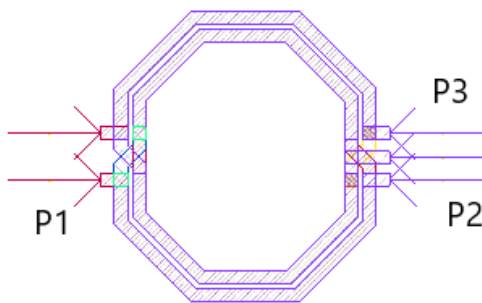


в)

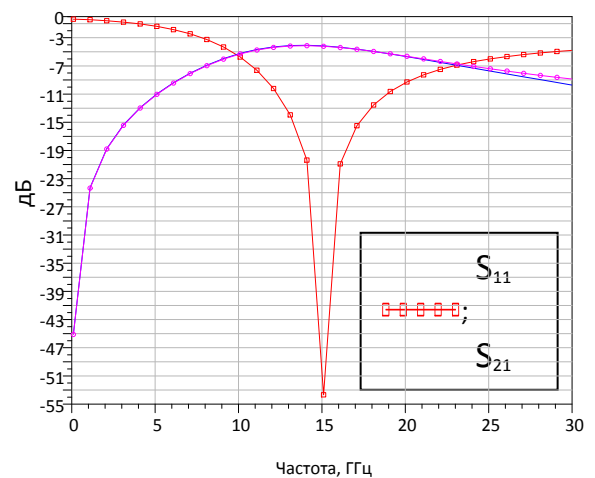
Рисунок 10.122 – СТ на основе связанных катушек индуктивности с боковой связью на 0,13 мкм КНИ: а) топология; б) S-параметры; в) фазовый разбаланс; г) амплитудный разбаланс

### СТ с лицевой связью

Ниже представлена модель СТ, выполненная на основе октагональных катушек индуктивностей с лицевой связью (рисунок 10.123). Порт 1 – вход СТ, порты 2-3 – выходы СТ. Для обеспечения разности фаз на выходе СТ используется заземление катушки. Также между двумя выходами СТ используется емкость  $C = 0,22$  пФ.



а)



б)

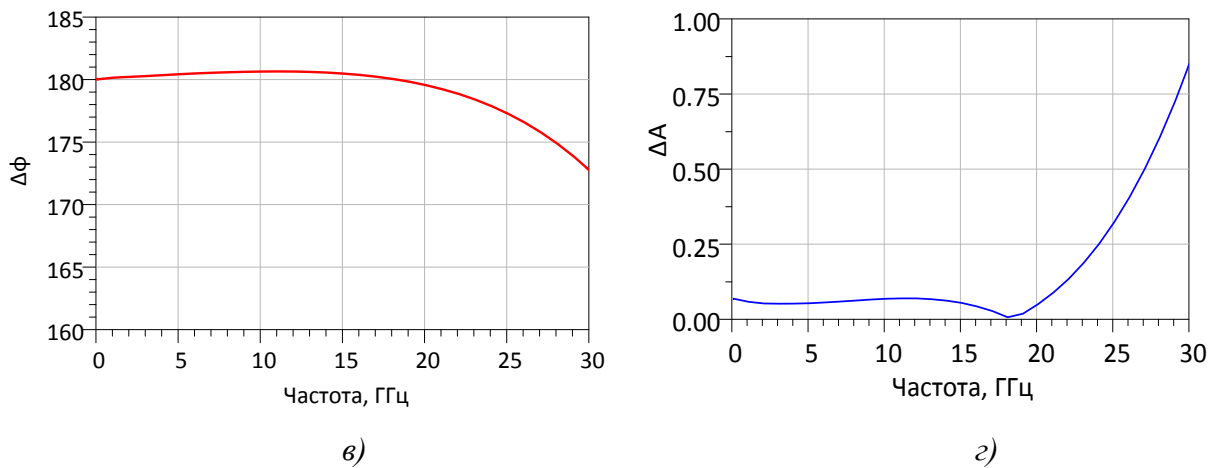
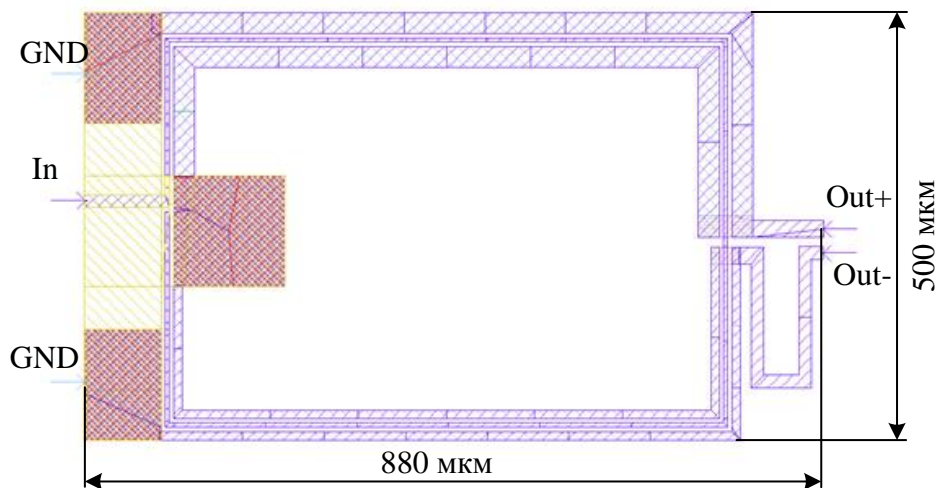


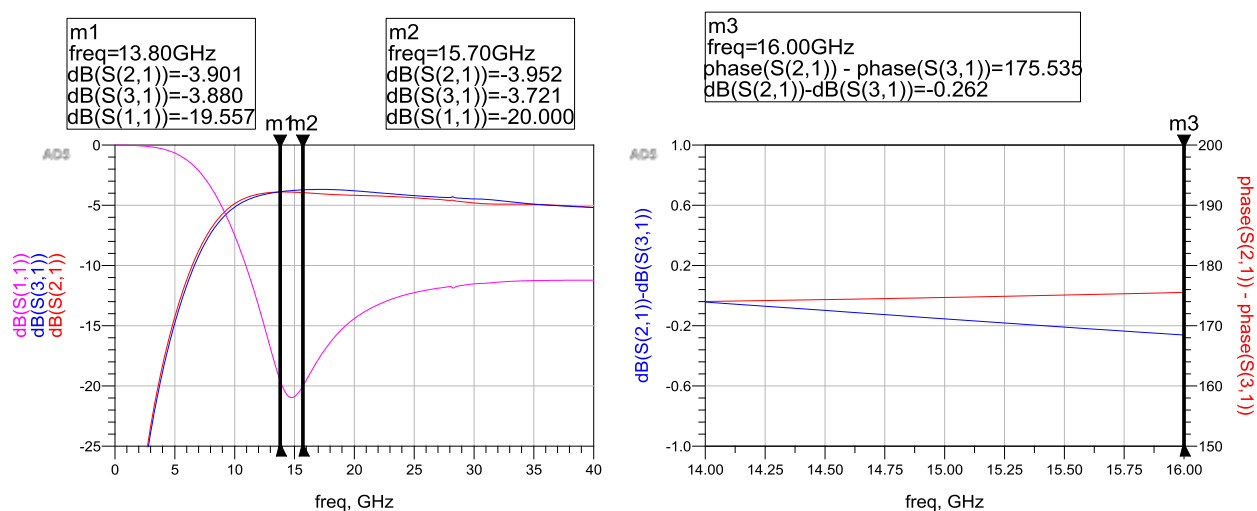
Рисунок 10.123 – СТ на основе связанных катушек индуктивности с боковой связью на 0,13 мкм КНИ: а) топология; б) S-параметры; в) фазовый разбаланс; г) амплитудный разбаланс

### СТ на связанных линиях

На рисунке 10.124 а представлена топология СТ на основе связанных линий, свернутых в кольцо для уменьшения габаритов (размеры  $0,88 \times 0,5 \text{ мм}^2$ ), а на рисунке 10.124 б его характеристики. Потери составили  $< 0,9 \text{ дБ}$ , разбаланс по амплитуде  $\Delta A < 0,25 \text{ дБ}$ , разбаланс по фазе  $\Delta\phi < 5^\circ$ , уровень согласования не менее  $|S_{11}| < -20 \text{ дБ}$ . Достоинством трансформатора такого типа является устойчивость к «плохому» заземлению (при корпусировании), недостатками является сравнительно большой размер и фазовый разбаланс.



а)



б)

Рисунок 10.124 – а) Топология симметрирующего трансформатора на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB); б) S-параметры и разбаланс по амплитуде и фазе

В таблице 10.41 внесены характеристики рассчитанных СТ.

Таблица 10.41 – Сравнение характеристик разработанных СТ на основе 0,13 мкм КНИ технологии

Тип СТ	$S_{11}$ , дБ	Вносимые потери, дБ	$\Delta\varphi$ , °	$\Delta A$ , дБ	Размеры, мм <sup>2</sup>
СТ Маршанда с боковой связью	<-11,4	<2	<0,6	<0,12	0,2×0,13
СТ Маршанда с лицевой связью	-15	<1,2	<4,1	<0,8	0,25×0,35
СТ на связанных катушках с боковой связью	<-16	<1,7	<4,1	<0,45	0,17×0,14
СТ на связанных катушках с лицевой связью	<-20	<1,3	<0,6	<0,06	0,11×0,11
СТ на связанных линиях	-20	<0,9	<5	<0,25	0,88×0,5

Из результатов в таблице 10.39 видно, что СТ с лицевой связью на связанных катушках имеет самые оптимальные характеристики амплитудного, фазового разбалансов, коэффициентов передачи в совокупности с малым размером. Так, значения амплитудного разбаланса составило менее 0,06 дБ, фазовый разбаланс менее 0,4...0,6°; вносимые потери составили 1,07...1,39 дБ, размер данного СТ 0,11×0,11мм<sup>2</sup>. Также достоинством такого СТ является возможность подачи питания через среднюю точку вторичной обмотки. Недостатком СТ с лицевой связью на связанных катушках является сильное влияние паразитной индуктивности по земле.

СТ Маршанда с боковой связью имеет более широкополосные характеристики и хороший уровень амплитудного ( $<0,12$  дБ) и фазового ( $<0,6^\circ$ ) разбаланса. Но при этом самые большие вносимые потери ( $\sim 2$  дБ), т.к. требуется линия передачи длиной  $\lambda/2$ .

Наименьшим значением вносимых потерь ( $<0,9$  дБ) и хорошим уровнем амплитудного разбаланса без внешних подстроек обладает СТ на основе связанных линий. Его недостатками являются большие габариты ( $0,88 \times 0,5 \approx 0,45$  мм<sup>2</sup>) и фазовый разбаланс.

### 10.3.2 Сумматоры/Делители

В данном подразделе рассмотрены несколько вариантов исполнения сумматоров/делителей на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB XR013). Рассмотрены несимметричный 4-х канальный делитель мощности и дифференциальные делители мощности на 2 и 4 канала.

#### 4-х канальный делитель мощности Вилкинсона на сосредоточенных элементах

На рисунке 10.125 приведена принципиальная схема 4-х канального делителя мощности Уилкинсона на сосредоточенных элементах.

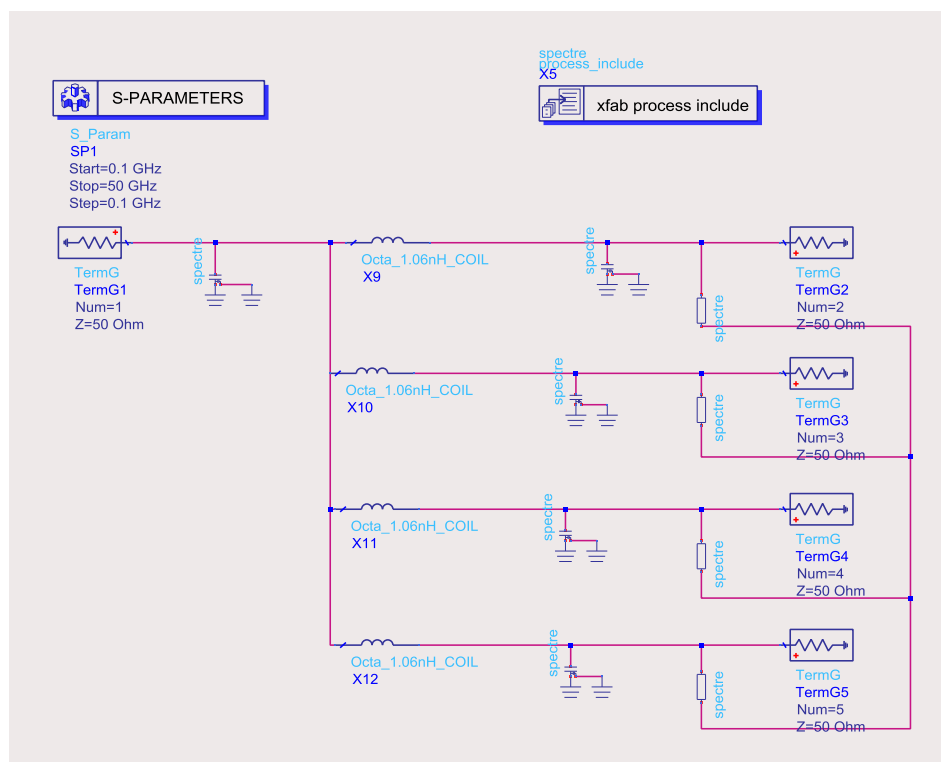


Рисунок 10.125 – Электрическая схема несимметричного 4-х канального делителя мощности Вилкинсона

Для моделирования 4-х канального делителя был проведен ЭМ расчет индуктивностей. S-параметры делителя мощности на реальных элементах приведены на рисунке 10.126. Ориентировочные размеры несимметричного 4-х канального делителя составили  $0,8 \times 0,5$  мм<sup>2</sup>.

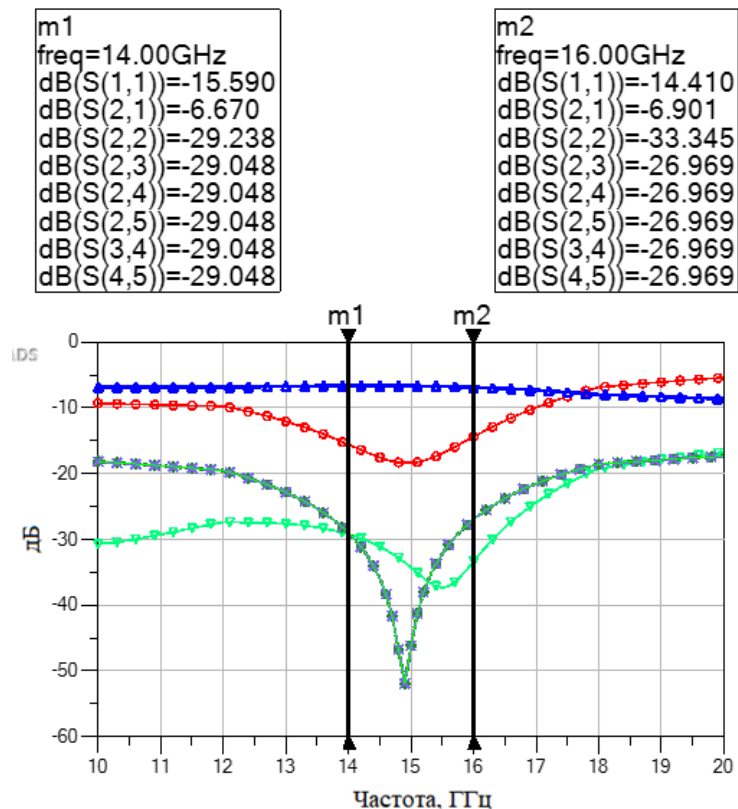


Рисунок 10. 126 – Результаты моделирования несимметричного 4-х канального делителя мощности Вилкинсона на реальных элементах

### 2-х и 4-х канальный дифференциальный делитель мощности

В работе [69] приводится пример моделирования и расчета дифференциального делителя мощности. Для расчета дифференциального делителя Вилкинсона необходима дифференциальная катушка индуктивности с коэффициентом связи  $K$  и общей индуктивностью  $M$ . Связь между индуктивностью катушек  $L_p$  и  $L_n$ , а также  $M$  и  $K$  выражается формулой  $M = K\sqrt{L_p \cdot L_n}$  (рисунок 10. 127 а). Для разработки дифференциального делителя мощности была смоделирована дифференциальная катушка индуктивности, 3D вид которой представлен на рисунке 10. 127 б. Внешний диаметр катушки 140 мкм, ширина линии 3 мкм, расстояние между витками 3 мкм.

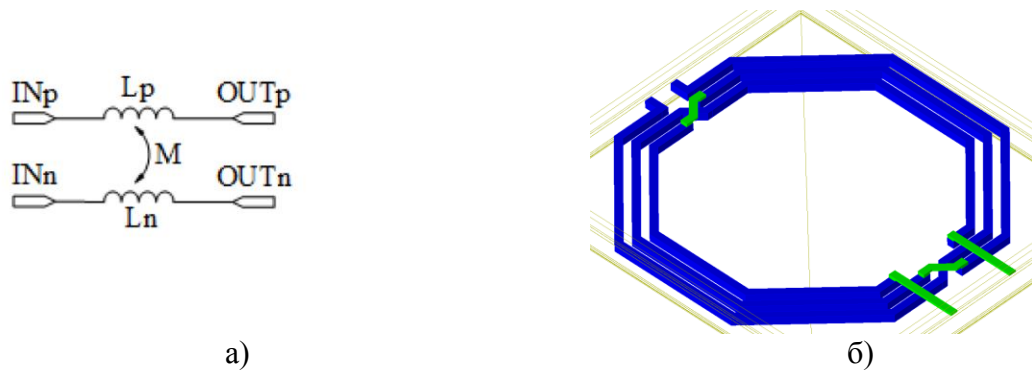


Рисунок 10.127 – а) Модель дифференциальной индуктивности на сосредоточенных элементах; б) 3D вид модели индуктивности, использованной для ЭМ

На рисунке 10.128 приведена электрическая схема дифференциального 2-х канального делителя мощности Вилкинсона.

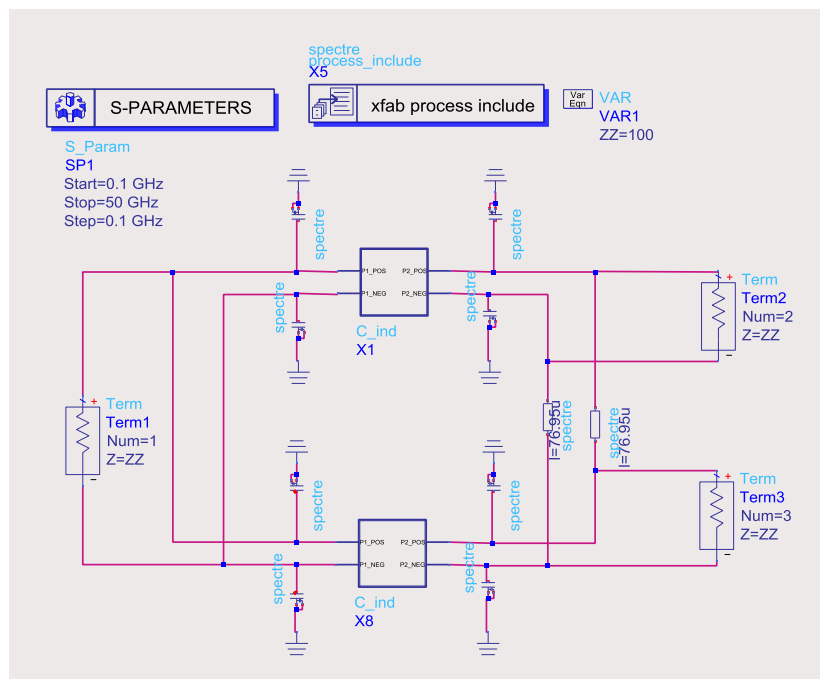


Рисунок 10.128 – Электрическая схема 2-х канального дифференциального делителя мощности Вилкинсона

На рисунке 10.129 приведены S-параметры дифференциального 2-х канального делителя мощности на реальных элементах из библиотеки XFAB XR013. Размеры дифференциального 2-х канального делителя составили  $0,45 \times 0,45 \text{ мм}^2$ .

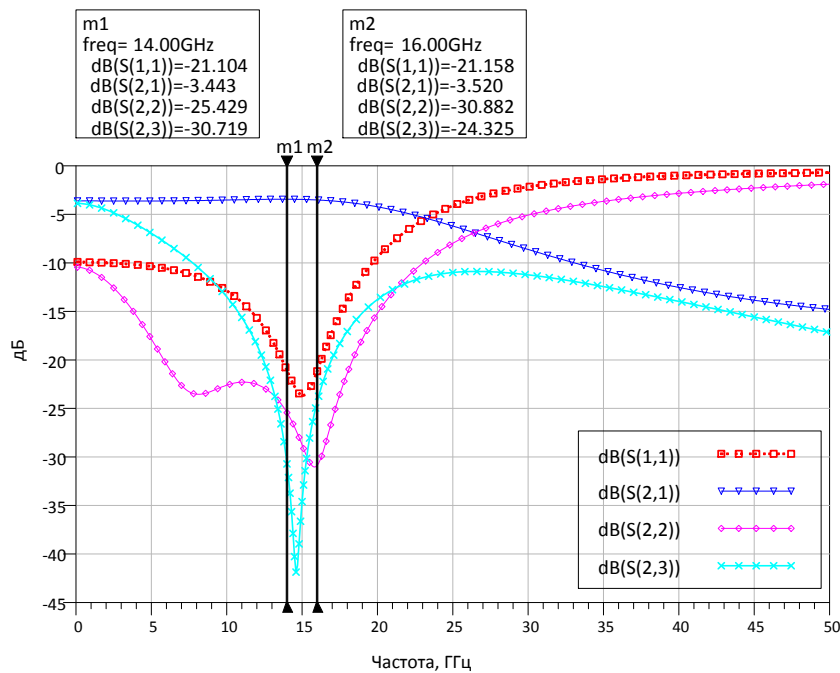


Рисунок 10.129– Результаты моделирования дифференциального 2-х канального делителя мощности

Также по аналогии с 2-х канальным делителем был промоделирован 4-х канальный дифференциальный делитель мощности, схема которого приведена на рисунке 10.130.

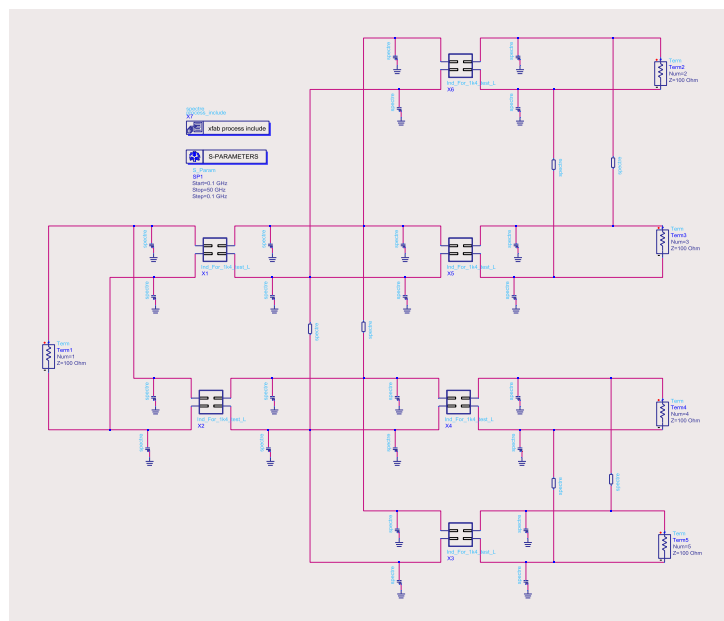


Рисунок 10.130 – Электрическая схема 4-х канального дифференциального делителя мощности Вилкинсона

На рисунке 10.131 приведены S-параметры дифференциального 4-х канального делителя мощности на реальных элементах из библиотеки XFAB XR013. Ориентировочные размеры 4-х канального дифференциального делителя мощности составили  $0,55 \times 0,75 \text{ мм}^2$ .



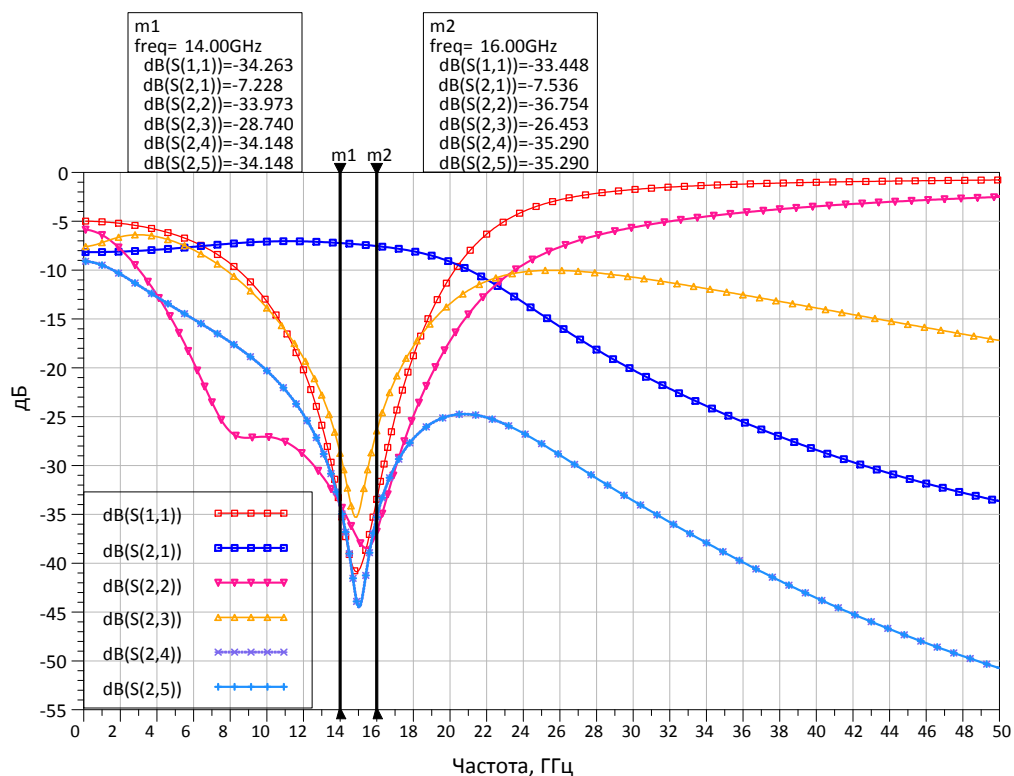


Рисунок 10.131 – Результаты моделирования дифференциального 4-х канального делителя мощности

Итоговые характеристики смоделированных делителей (вносимые потери, развязка между каналами, согласование по входу  $S_{11}$  и выходу  $S_{22}$ , а также габаритные размеры) внесены в таблице 10.42.

Таблица 10.42 – Результаты моделирования делителей мощности Вилкинсона на основе 0,13 мкм КНИ технологии (X-FAB)

Тип делителя	$S_{11}$ , дБ		$S_{22}$ , дБ		Вносимые потери, дБ		Развязка между каналами, дБ		Линейные размеры, мм
	14 ГГц	16 ГГц	14 ГГц	16 ГГц	14 ГГц	16 ГГц	14 ГГц	16 ГГц	
4-х канальный делитель	-15,6	-14,1	-29,2	-33,4	0,67	0,90	>29,1	>27	0,8×0,5
2-х канальный дифф. делитель	-21,1	-21,16	-25,4	-30,9	0,44	0,5	>30,7	>24,3	0,45×0,45
4-х канальный дифф. делитель	-34,3	-33,45	-34	-36,8	1,23	1,54	>28,7	>26,5	0,55×0,75

Из результатов моделирования характеристик делителей мощности, представленных в таблице 10.40, следует вывод о том, что недифференциальное решение обладает лучшими характеристиками по вносимым потерям в сравнении с 4-х канальным дифференциальным делителем. Большие потери связаны с использованием дифференциальной катушки, в которой возможно недостаточно точно подобраны линейные размеры, и, следовательно, коэффициент связи  $K$  и общая индуктивность  $M$ .

Однако дифференциальный делитель лучше согласован, и его будет удобнее реализовывать, так как на топологии не придется сводить резисторы в одну точку, как в случае с недифференциальным решением.

Двухканальный дифференциальный делитель при моделировании показал достаточно низкие вносимые потери в интересующем частотном диапазоне и хорошую развязку между каналами. Также для него не возникнет проблем при создании топологии, как и в случае с 4-х канальным делителем.

#### **10.4 Генераторы управляемые напряжением**

В данном подразделе приведены предварительные результаты моделирования ГУН для частотного диапазона 14-16 ГГц. На рисунках 10.132-10.134 представлены схема и предварительные результаты моделирования ГУН в САПР Keysight ADS. Исходя из проведенного анализа доступных foundry производителей для реализации ГУН в монолитно-интегральном исполнении и возможности реализации ФАПЧ и делителя частоты на одном кристалле, была выбрана 0,25 мкм SiGe БиКМОП технология компании IHP (технологический процесс SGB25V).

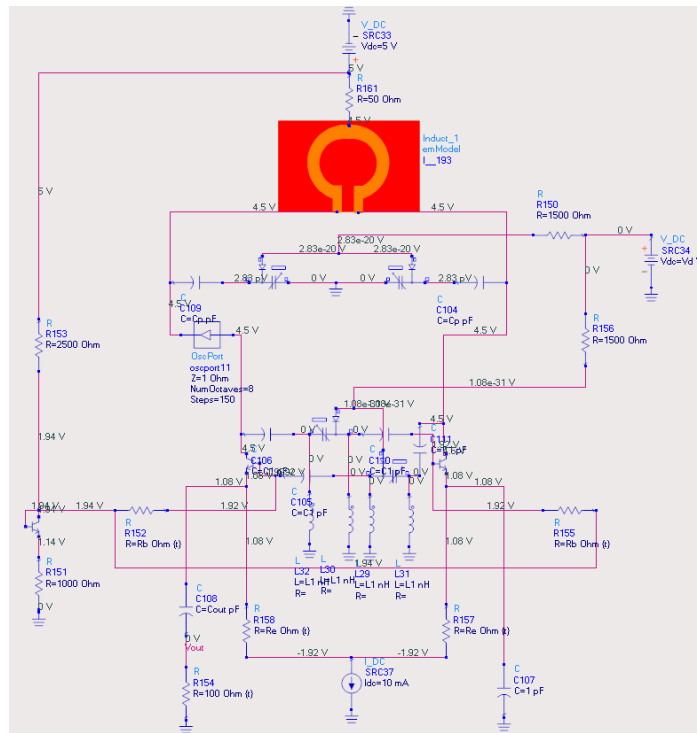


Рисунок 10.132 – Схема ГУН, смоделированная в САПР Keysight ADS

Схема перестраивается в диапазоне 14 – 16 ГГц, результат моделирования начальной и конечной частоты перестройки показан на рисунке 10.133.

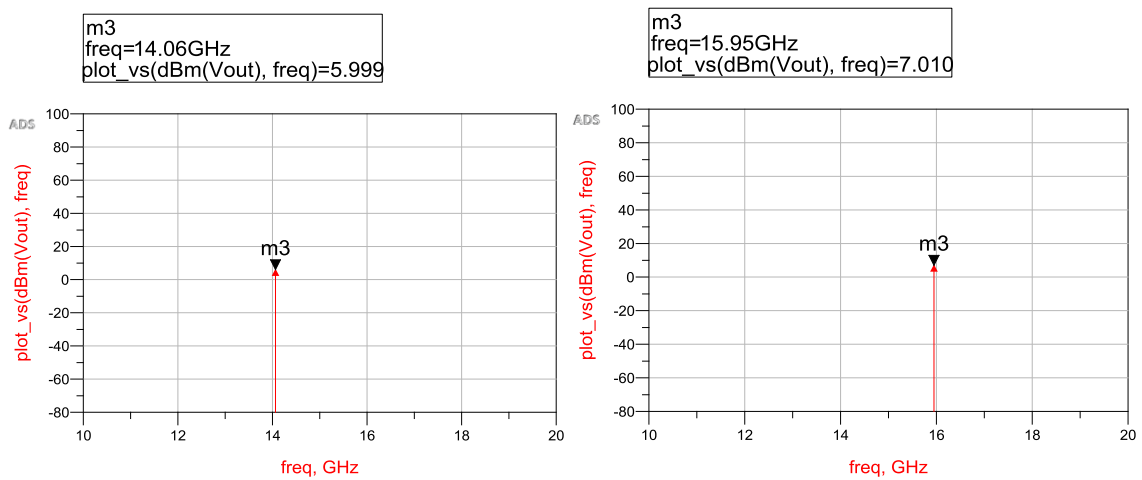


Рисунок 10.133 – Генерация сигнала на частотах 14 и 16 ГГц

Зависимости выходной мощности и частоты сигнала от величины напряжения управления представлены на рисунке 10.134.

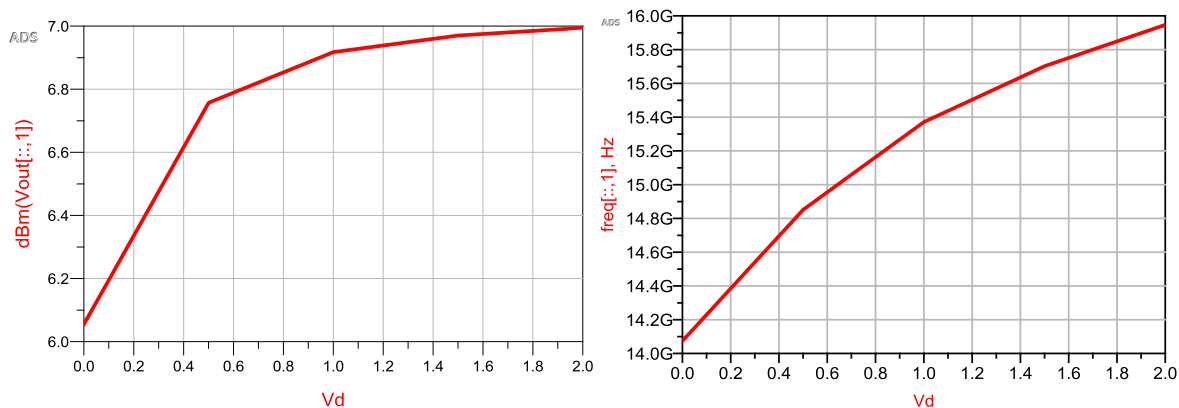


Рисунок 10.134 – Зависимость выходной мощности и частоты сигнала от величины напряжения управления

График фазовых шумов для рассчитанной схемы представлен на рисунке 10.135. Для оценки уровня фазовых шумов выставлены маркерные точки m1 и m2 для отстроек 1 МГц и 100 кГц соответственно.

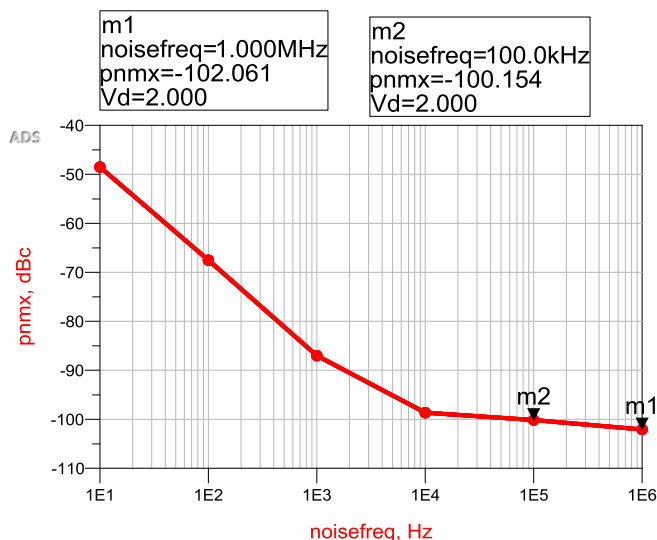


Рисунок 10.135 – Фазовый шум

Основные результаты схемотехнического моделирования ГУН представлены в таблице 10.43.

Таблица 10.42 – Характеристики смоделированной схемы ГУН

Технология	$\Delta f$ , ГГц	Выходная мощность, дБм	Полоса перестройки, ГГц	Фазовый шум, дБн/Гц @ 1 МГц	Напряжение управления, В	Напряжение питания, В
0,25 мкм SiGe БиКМОП	14 – 16	6 – 7	2	-102	0 – 2	5

## 10.5 Смесители

В данном подразделе проведено моделирование СВЧ МИС СМ на уровне принципиальных схем для выбранных технологических процессов, а также произведена оценка конечных характеристик и размеров ИС. Оценка характеристик смесителей была выполнена на примере 0,13 мкм КНИ (XFAB) и 0,18 мкм SiGe БиКМОП технологий. Для оценки параметров СМ на основе GaAs технологии была выбрана технология 0,5 мкм GaAs pHEMT.

### **Оценка характеристик интегральных смесителей на примере кремниевых технологий. Сравнение активных и пассивных СМ.**

Для сравнения достижимых характеристик разных типов смесителей (с преобразованием вниз) были разработаны следующие принципиальные схемы:

а) пассивный двойной балансный смеситель на основе n-МОП транзисторов ( $W_g = 50 \times 4,2$  мкм, 0,13 мкм КНИ технология), рисунок 10.136;

б) активный двойной балансный смеситель на основе n-МОП транзисторов (0,13 мкм КНИ технология), рисунок 10.137;

в) активный двойной балансный смеситель на основе биполярных транзисторов (0,18 мкм SiGe БиКМОП технология), рисунок 10.138.

При разработке схемы пассивного смесителя размер транзистора ( $W_g = 50 \times 4,2$  мкм) выбирался исходя из получения максимальной линейности смесителя и коэффициента преобразования. При разработке активных смесителей была использована стандартная схема ячейки Гильберта, ширина затворов транзисторов  $W_g$  (для БТ площадь эмиттера) для нижней дифференциальной пары выбиралась исходя из получения максимальной линейности СМ, ширина затворов транзисторов в верхнем квадранте выбиралась как  $W_g/2$ . В качестве источника тока для нижней дифференциальной пары используется токовое зеркало, остальные схемы подачи напряжений смещения реализованы на основе идеальных элементов. Ток потребления для активных смесителей выбран равным  $I_{dd} = 15$  мА при напряжении питания  $V_{dd} = 3$  В.

В качестве симметрирующих устройств были использованы идеальные трансформаторы, поэтому оценка развязок на данном этапе не производилась. На ВЧ входе активных смесителей была использована согласующая цепь, а также обратная связь по току для увеличения линейности и снижения КШ. Отметим, что из-за использования идеальных СТ, полученные характеристики могут измениться в худшую сторону, например, снизиться коэффициент преобразования, увеличиться коэффициент шума и требуемая мощность гетеродина (т.к. у балунов есть потери, порядка 1-1,5 дБ).

В качестве коэффициента шума смесителя принят шум в одной боковой полосе  $N_{FSSB}$ . Определение КШ в одной боковой полосе предполагает, что на зеркальной частоте отсутствует любой сигнал, кроме шума. КШ в одной боковой полосе обычно используют при ненулевом значении частоты ПЧ сигнала, когда зеркальный канал подавляется при помощи системы фильтрации, но шум с него попадает в полосу ПЧ сигнала.

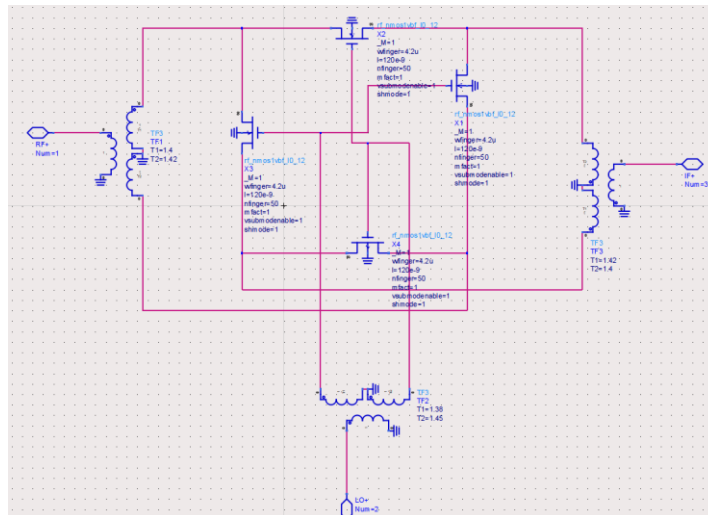


Рисунок 10.136 – Принципиальная схема пассивного двойного балансного смесителя на основе n-МОП транзисторов ( $W_g = 4,2 \times 50$  мкм, технология 0,13 мкм КНИ, XFAB)

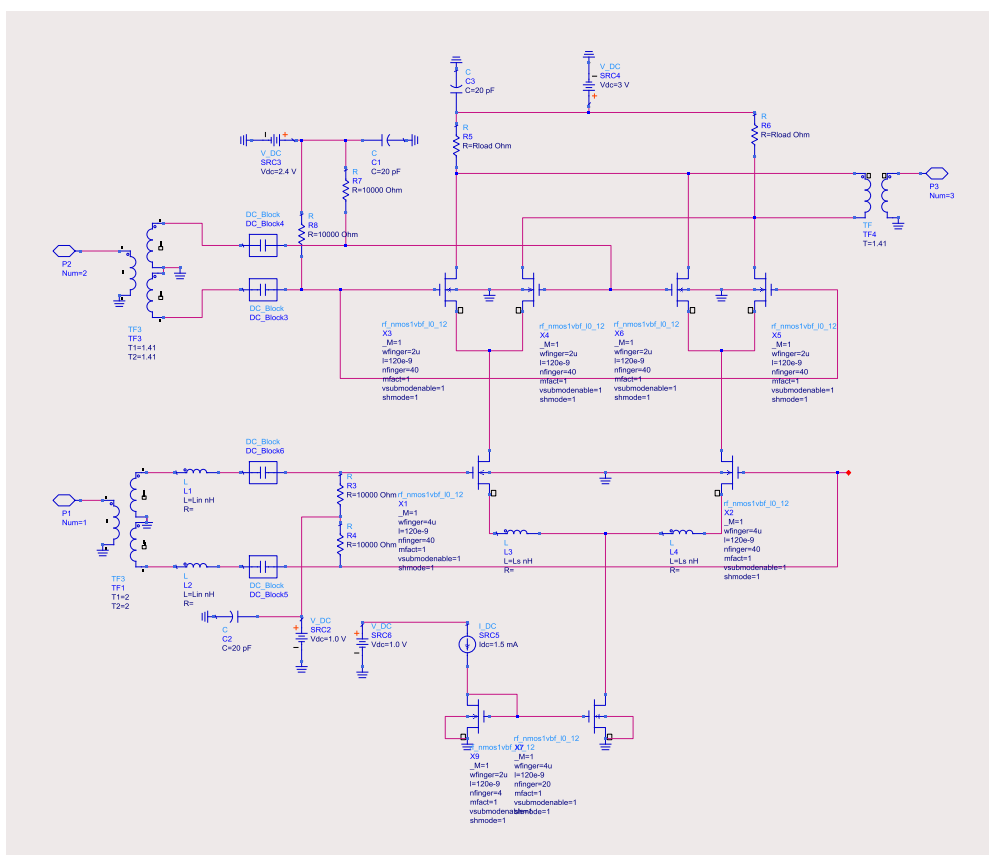


Рисунок 10.137 – Принципиальная схема активного двойного балансного смесителя на основе n-МОП транзисторов (технология 0,13 мкм КНИ, XFAB)

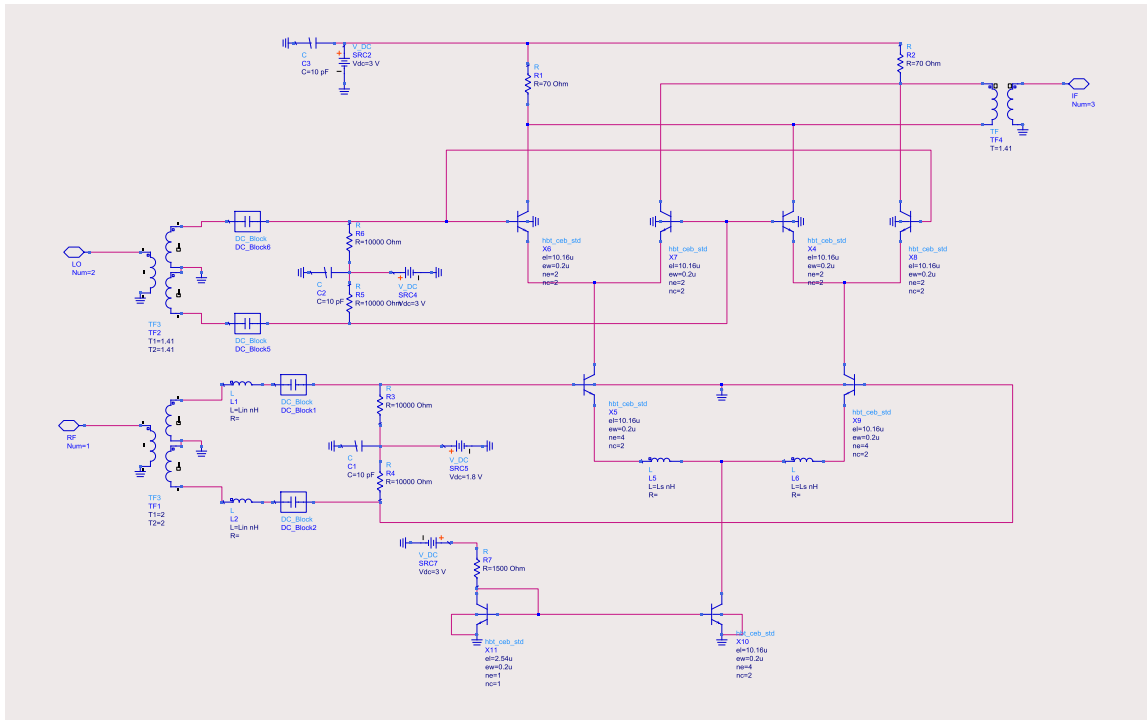


Рисунок 10.138 – Принципиальная схема активного двойного балансного смесителя на основе биполярных транзисторов (технология 0,18 мкм SiGe БикМОП, TSMC)

В таблице 10.44 приведены сравнительные характеристики пассивных и активных двойных балансных смесителей, выполненных на основе 0,13 КНИ и 0,18 SiGe БикМОП технологий.

Сравнительный анализ смесителей показывает, что пассивный смеситель требует мощности гетеродина  $P_{LO}$  более 10 дБм, при этом обладая коэффициентом преобразования  $G_C$  около -8 дБ и КШ в одной боковой полосе  $NF_{SSB}$  не более 8,8 дБ. Линейность пассивного смесителя составляет не менее +9 дБм по уровню  $IP_{1dB}$  и не менее +18 дБм по уровню  $IP_3$ . Отметим, что для пассивных смесителей уровень входной мощности связан с мощностью гетеродина и может быть увеличен за счет увеличения последнего (эмпирическое правило  $IP_{1dB} \approx P_{LO} - 3$  дБ).

С другой стороны, активные смесители обладают коэффициентом усиления более 3,5 дБ для n-МОП транзисторов и более 4,5 дБ для БТ при гораздо меньшей мощности гетеродина  $P_{LO} = 0 \dots +3$  дБм. С точки зрения КШ и коэффициента преобразования БТ выигрывают по сравнению с n-МОП транзисторами порядка 1 дБ, при этом линейность обоих смесителей при одинаковом токе потребления и напряжении питания одинакова. Линейность активных смесителей может быть повышена за счет повышения тока потребления, увеличения размаха напряжения на переключаательных транзисторах, увеличения размеров транзисторов, введения обратной связи (и снижения коэффициента преобразования), а также различными схемотехническими приемами [70, 71].

Таблица 10.44– Сравнение характеристик пассивных и активных двойных балансных смесителей, выполненных на основе 0,13 КНИ и 0,18 SiGe БиКМОП технологий, в диапазоне 14-16 ГГц при ПЧ равной 100 МГц

Характеристика	Двойной балансный пассивный смеситель (n-МОП)	Двойной балансный активный смеситель (n-МОП)	Двойной балансный активный смеситель (БТ)
Технология	0,13 мкм КНИ	0,13 мкм КНИ	0,18 мкм SiGe БиКМОП
$\Delta f_{ВЧ}$ , ГГц	14-16		
$f_{ПЧ}$ , МГц	100		
Коэффициент преобразования $G_C$ , дБ	-7...-8	3,5...4,5	+4,5...+5,5
Мощность гетеродина $P_{LO}$ , дБм	>10	0...+3	0...+3
$NF_{SSB}$ , дБ	7,8...8,8	8,5	7...7,5
Уровень $IP_{1дБ}$ , дБм	+9...10	-10...-11	-10...-11
Уровень $IP_3$ , дБм	+18...+20	-2	-2
Напряжение питания $V_{dd}$ , В	0	3	3
Ток потребления $I_{dd}$ , мА	0	15	15

Исследуем влияние частоты ПЧ сигнала на КШ ( $NF_{SSB}$ ) активных смесителей. На рисунке 10.139 и рисунке 10.140 изображены зависимости КШ от частоты ВЧ сигнала при различных значениях частоты ПЧ сигнала ( $f_{IF} = 1, 10, 100$  и  $1000$  МГц) для смесителей на основе n-МОП и биполярных транзисторов, соответственно. Для активных устройств на основе n-МОП транзисторов характерно увеличение КШ с понижением частоты ПЧ сигнала из-за фликкер-шума, граничная частота которого находится около 100 МГц. Так, например,  $NF_{SSB} = 8,5$  дБ при частоте ПЧ 100 МГц, а при частоте ПЧ 10 МГц  $NF_{SSB} = 13,5-14$  дБ. В то же время для биполярных транзисторов снижение частоты ПЧ сигнала не дает такого радикального увеличения КШ, напротив, КШ возрастает на 0,1-0,2 дБ с увеличением частоты ПЧ до 1 ГГц.



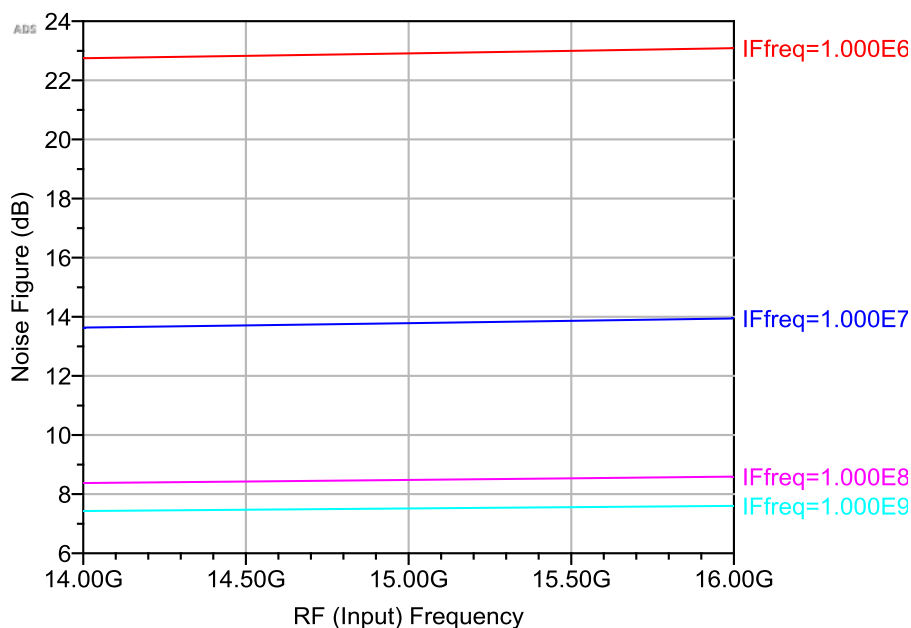


Рисунок 10.139 – Зависимость КШ от частоты ВЧ сигнала при различных значениях частоты ПЧ сигнала ( $f_{IF} = 1, 10, 100$  и  $1000$  МГц) для активного двойного балансного смесителя на основе pMOS транзисторов, 0.13 мкм КНИ технология

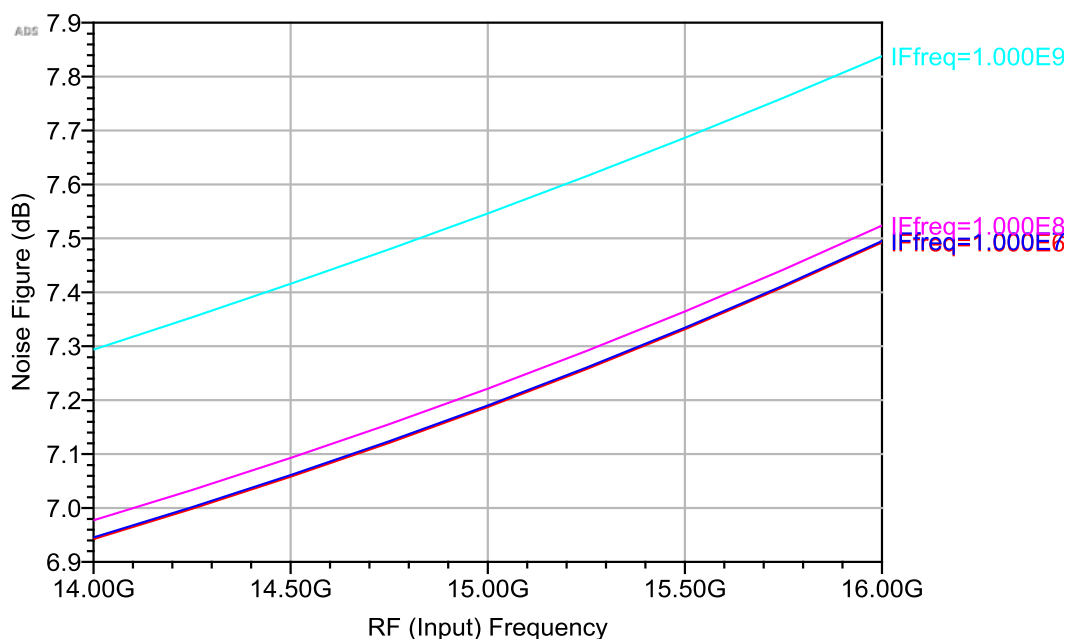


Рисунок 10.140 – Зависимость КШ от частоты ВЧ сигнала при различных значениях частоты ПЧ сигнала ( $f_{IF} = 1, 10, 100$  и  $1000$  МГц) для активного двойного балансного смесителя на основе биполярных транзисторов, 0.18 мкм SiGe БикМОП технология

**Выводы.** Активные СМ на основе КМОП и БТ обладают сравнимыми характеристиками. Наилучшими характеристиками обладает пассивный КМОП двойной балансный СМ, характеристики которого могут быть улучшены при помощи МШУ и УСГ.

## Разработка квадратурных смесителей

Ниже рассмотрены примеры разработки пассивных квадратурных СМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB) и 0,5 мкм GaAs HEMT технологии. Для кремниевого СМ была выбрана топология двойного балансного СМ на основе кольца из n-МОП транзисторов.

### Квадратурный смеситель на основе 0,13 мкм КНИ технологии

Квадратурный СМ имеет в своем составе два пассивных двойных балансных СМ на основе кольца n-МОП транзисторов с шириной  $W_g = 4,2 \times 50$  мкм. Структурная схема квадратурного СМ изображена на рисунке 10.141. Со стороны входа ВЧ используется СТ и СЦ для улучшения коэффициента отражения. Со стороны гетеродина реализован ФКС, имеющий в своем составе входной симметрирующий трансформатор, полифазный фильтр и выходные буферные усилители. ФКС должен иметь на выходе мощность, достаточную для работы СМ, т.е. порядка 10-13 дБм. Квадратурные дифференциальные выходы (I+, I-, Q+, Q-) суммируются идеальными балунами на выходе и 90° мостом, предполагается, что это внешние цепи.

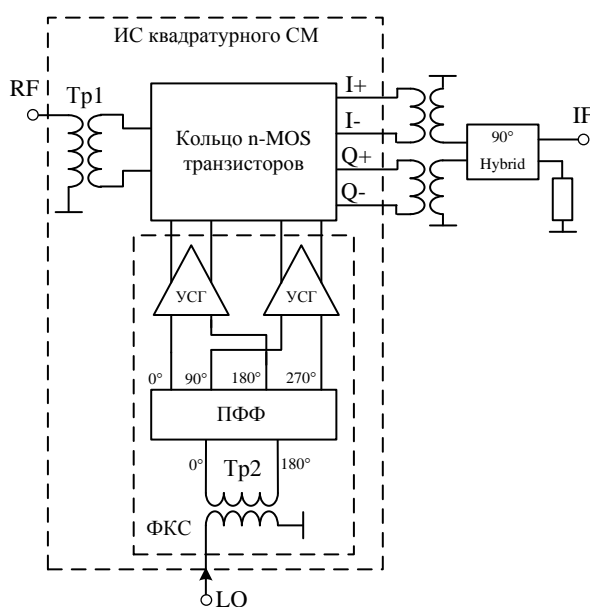
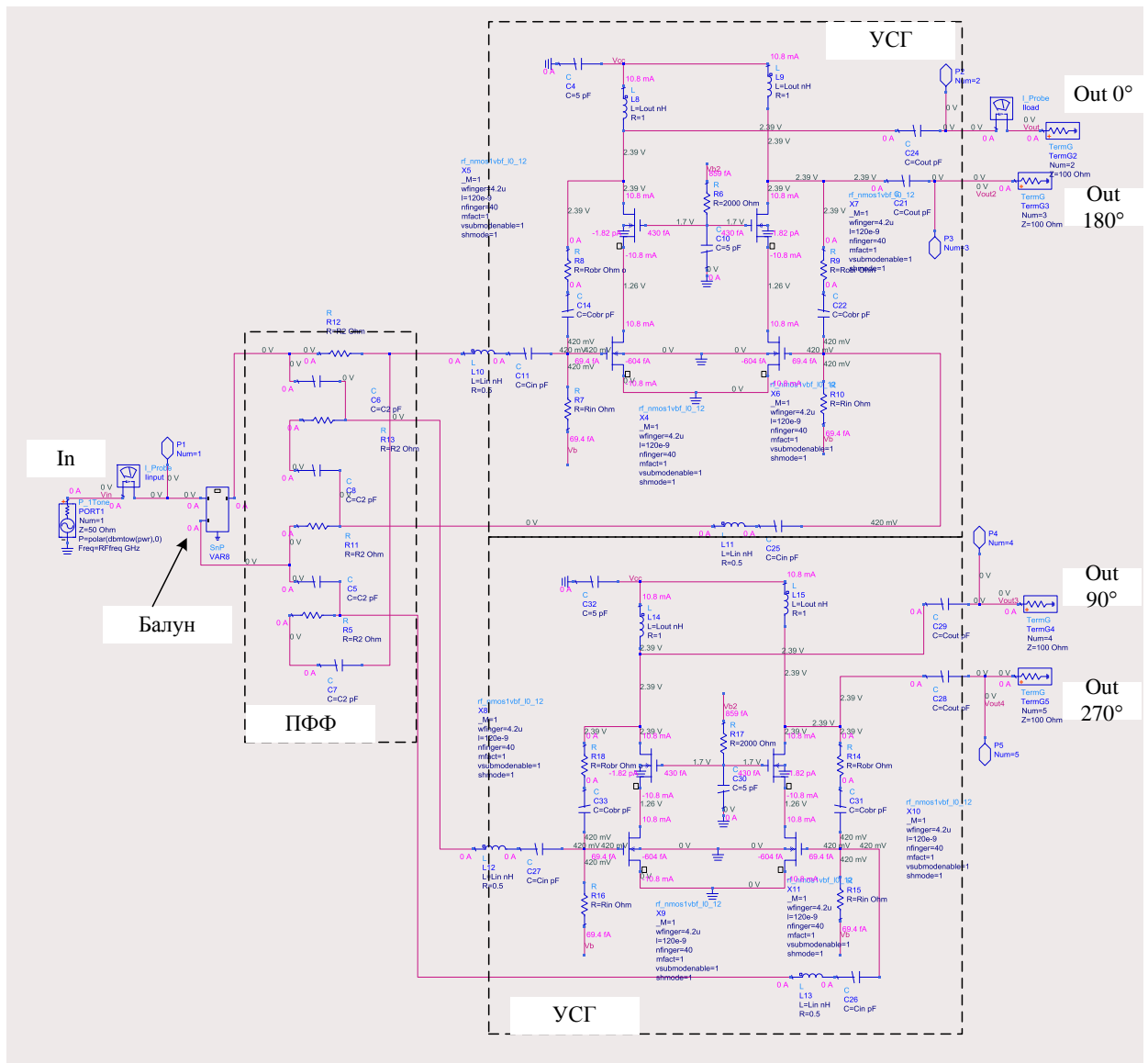


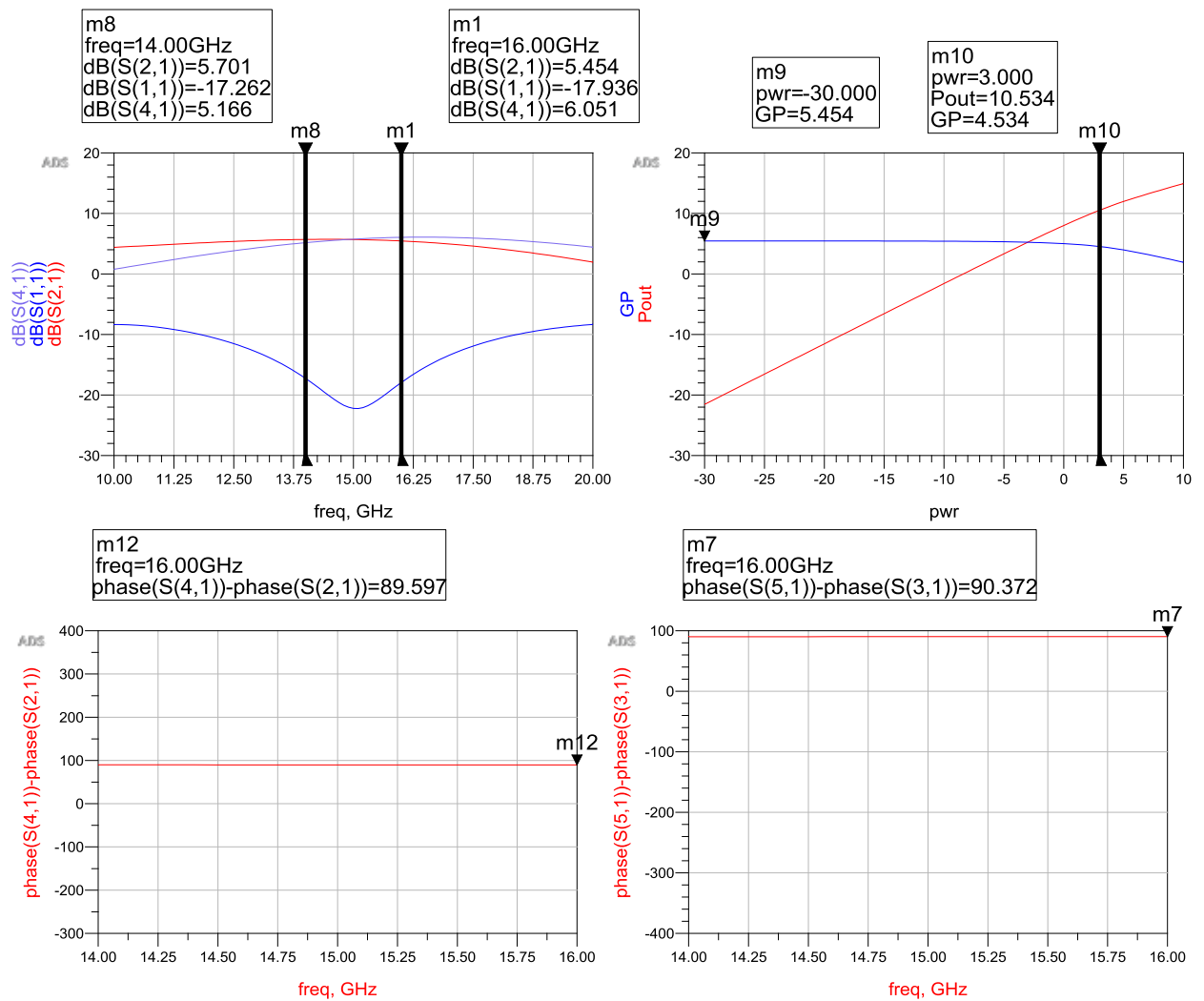
Рисунок 10.141– Структурная схема квадратурного СМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии (XFAB)

Со стороны входа ВЧ используется СТ на связанных линиях, так как обладает наименьшим значением потерь и хорошим амплитудным разбалансом. Аналогичный СТ был использован для реализации ФКС. Принципиальная схема ФКС изображена на рисунке 10.142 а. Выходная дифференциальная мощность на нагрузке 200 Ом на выходе ФКС составила более  $P_{out} > 10$  дБм (размах напряжения  $V_{pp} > 2$  В, что достаточно для работы пере-

ключательных транзисторов), при входной мощности  $P_{in} = 3$  дБм (рисунок 10.142 б). Суммарное потребление ФКС составляет  $P_{DC} \approx 110$  мВт ( $V_{dd} = 2,4$  В,  $I_{dd} = 45$  мА).



a)



б)

Рисунок 10.142 – а) Принципиальная схема активного ФКС, имеющего в своем составе балун, ПФФ, и два УСГ; б) S-параметры и разность фаз между квадратурными каналами

Далее была разработана схема квадратурного СМ, которая изображена на рисунке 10.143. На ВЧ вход поступает сигнал от общего СТ, для улучшения согласования по входу ВЧ реализована СЦ. Также дополнительно реализована цепь смещения ( $V_{gg} = 0,2$  В) на затворы переключаемых транзисторов СМ для увеличения коэффициента преобразования СМ.

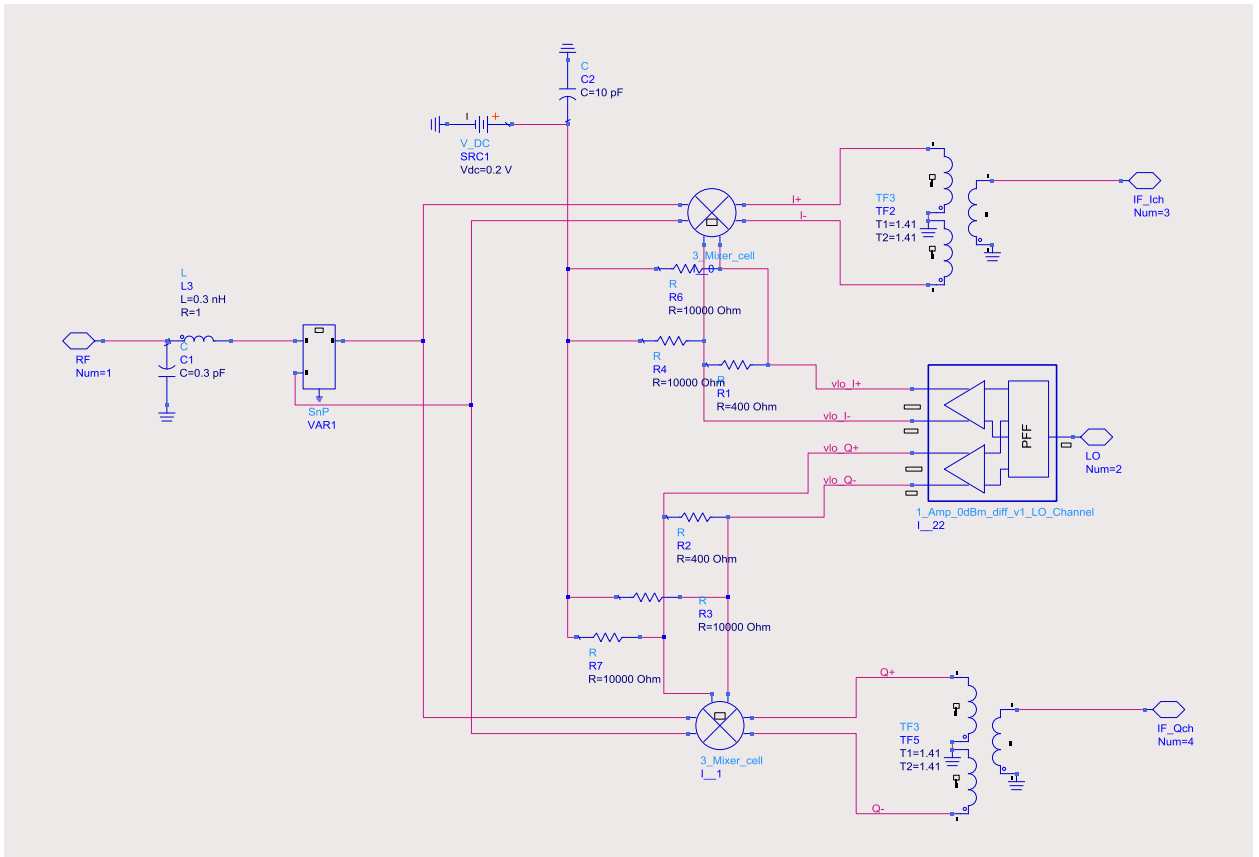
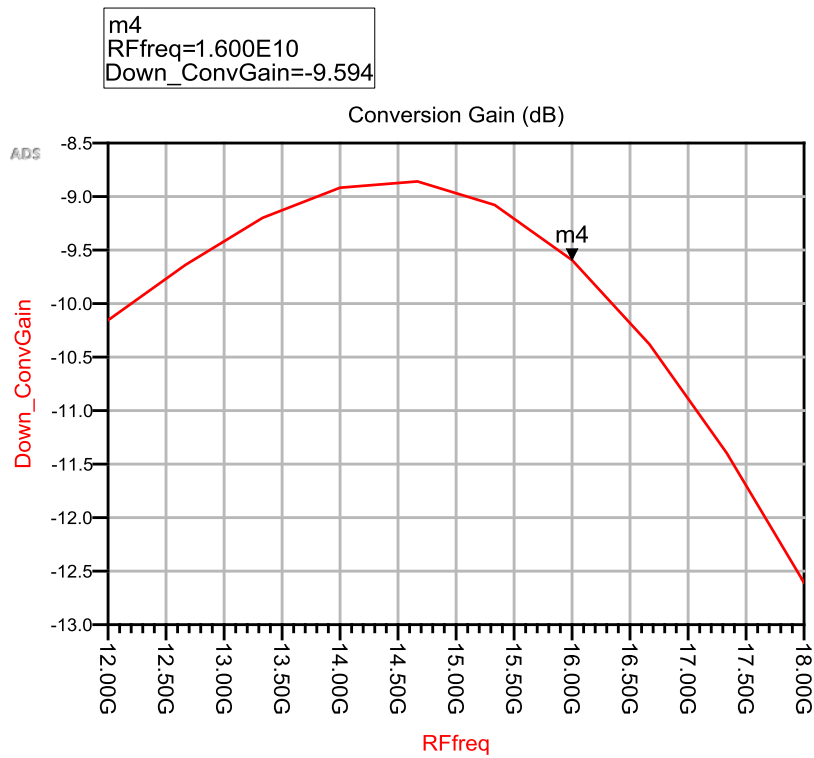


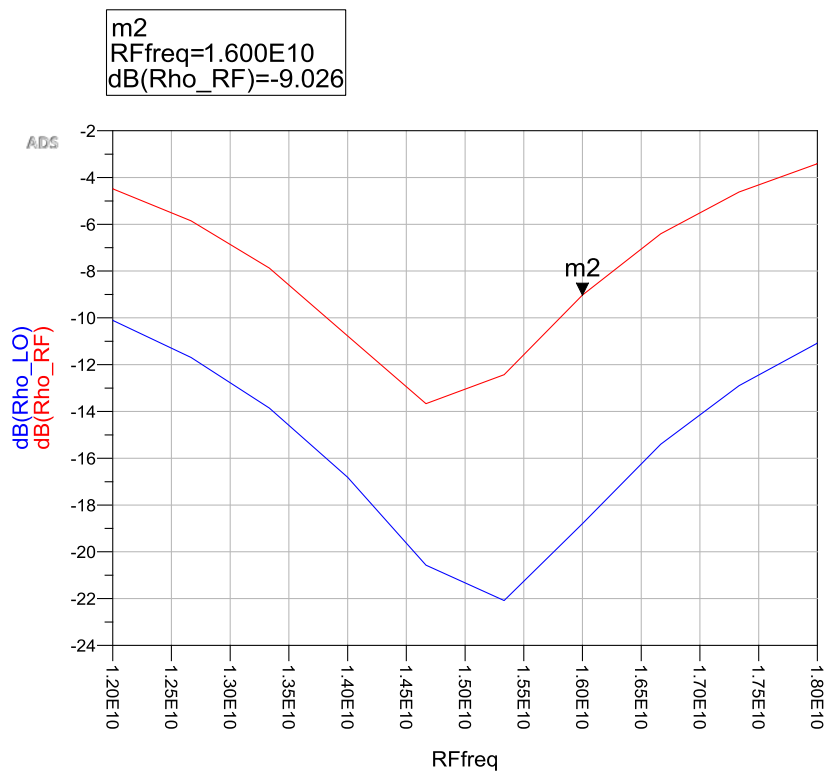
Рисунок 10.143 –Принципиальная схема квадратурного СМ с интегрированным ФКС и цепью подачи смещения на затворы переключающих транзисторов в СМ

По умолчанию при моделировании принят следующий режим работы: 1)  $P_{LO} = 3$  дБм; 2)  $LO = RF - IF = 100$  МГц (преобразование вниз); 3)  $P_{RF} = -10$  дБм; 4) идеальные внешние цепи – трансформатор и  $90^\circ$  мост.

На рисунке 10.144 а представлен график коэффициента преобразования, на рисунке 10.144 б – коэффициенты отражения по входам ВЧ и гетеродину.



a)



б)

Рисунок 10.144 – Характеристики квадратурного СМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии ( $P_{RF} = 3$  дБм,  $P_{RF} = -10$  дБм, идеальный внешний гибрид) при  $IF = LO - RF = 100$  МГц: а) коэффициент преобразования  $G_C$ ; б) коэффициенты отражения по входам RF и LO

На рисунке 10.145 а представлены развязки RF-IF и LO-RF, На рисунке 10.145 б – подавление зеркального канала IRR.

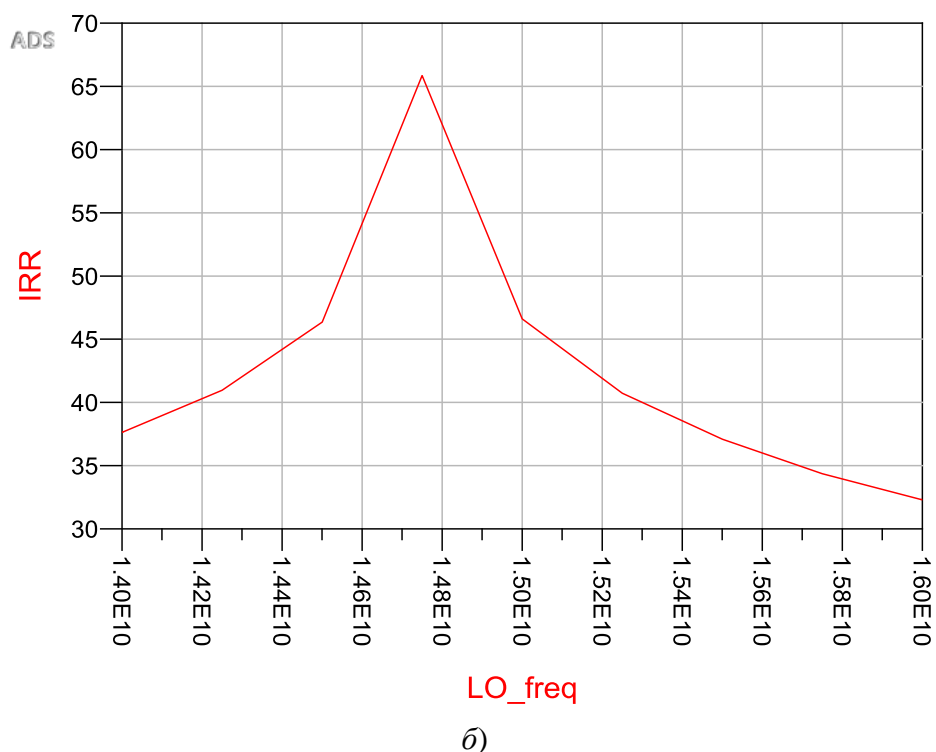
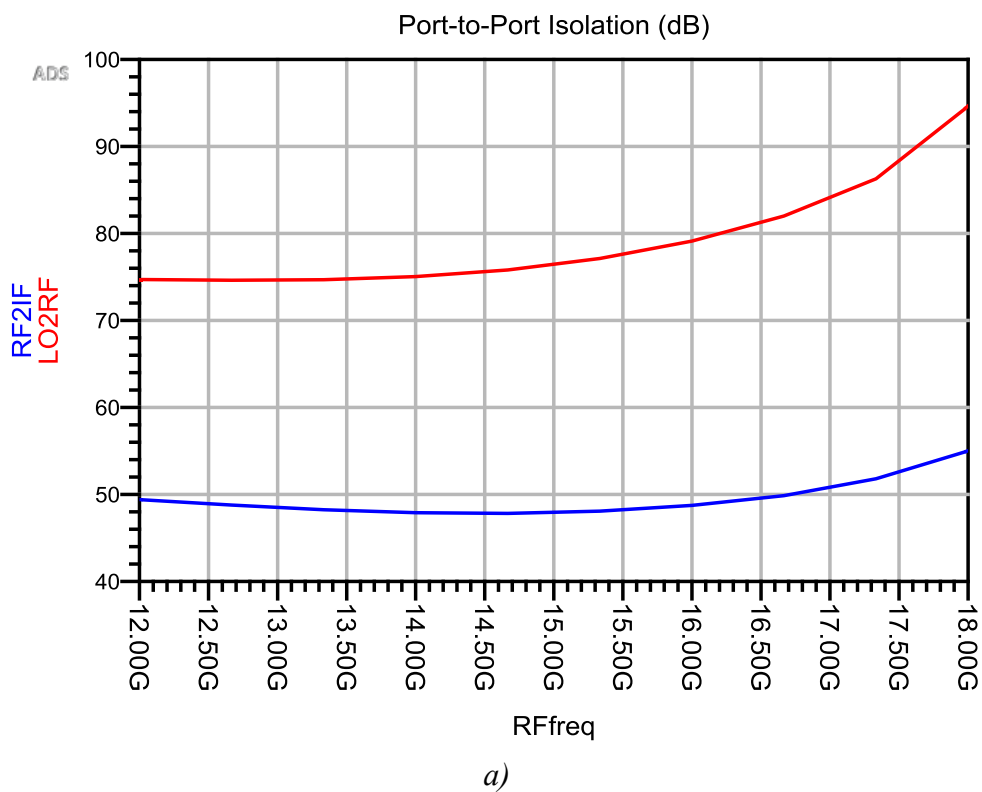
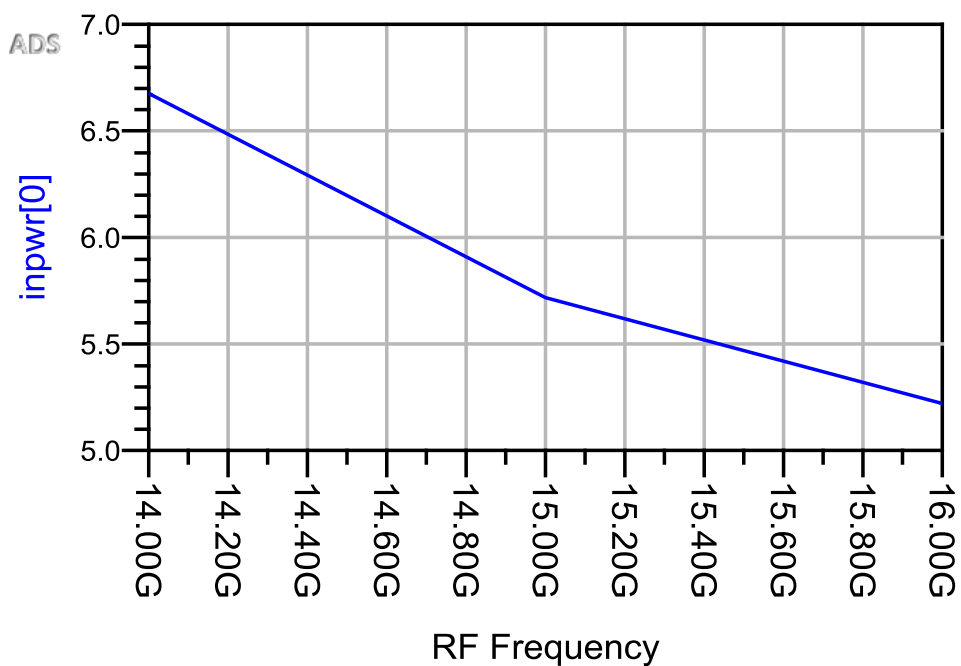
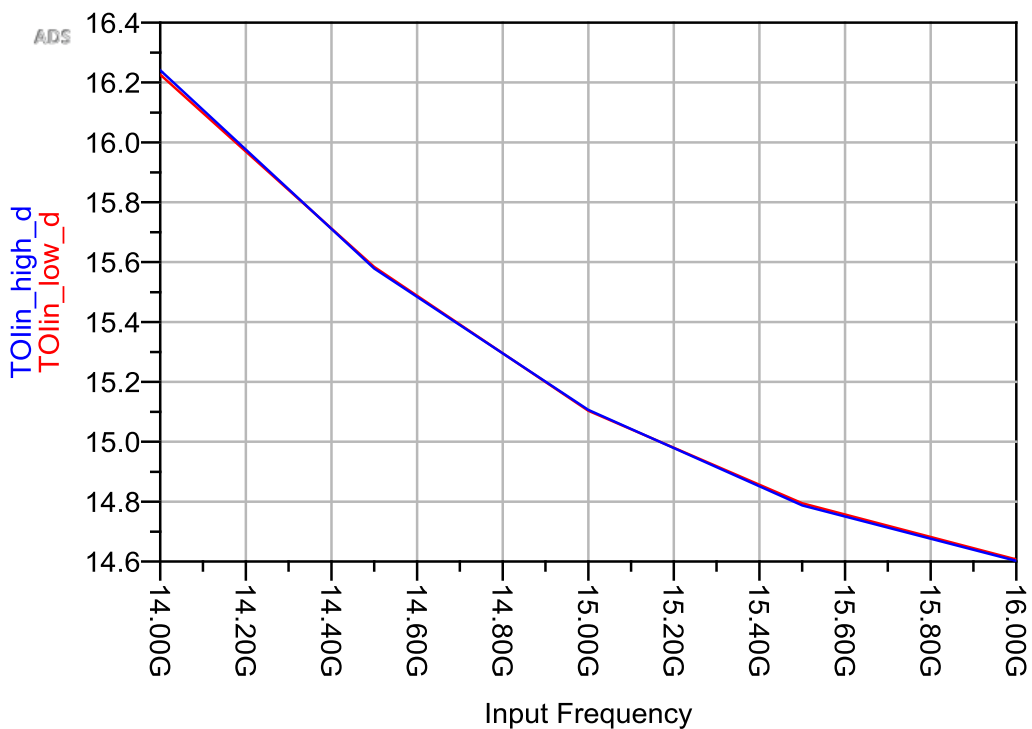


Рисунок 10.145 – Характеристики квадратурного СМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии ( $P_{LO} = 3$  дБм,  $P_{RF} = -10$  дБм, идеальный внешний гибрид) при  $IF = LO - RF = 100$  МГц: а) развязки RF-IF и LO-RF; б) подавление зеркального канала IRR

На рисунке 10.146 *a* изображен уровень  $IP_{1дБ}$ , на рисунке 10.146 *б* – подавление зеркального канала IRR. В данном случае уровень мощности гетеродина был увеличен до +6 дБм.



*a)*



*б)*

Рисунок 10.146 – Характеристики квадратурного СМ на основе 0,13 мкм КНИ технологии ( $P_{LO} = 6$  дБм,  $P_{RF} = -10$  дБм, идеальный внешний гибрид) при  $IF = LO-RF = 100$  МГц: а) уровень  $IP_{1дБ}$ ; б) уровень  $IP_3$



### Квадратурный смеситель на основе 0,5 мкм GaAs HEMT технологии

В данном подразделе приведен пример разработки микросхемы СМ с подавлением зеркального канала на основе 0,5 мкм GaAs pHEMT тех. процесса (WIN PD5010). ИС имеет в своем составе два двойных балансных смесителя. Со стороны гетеродина входная цепь построена на основе моста Ланге, со стороны ВЧ сигнала входная цепь – на основе делителя Вилкинсона. Сигнал ПЧ подается на внешний гибрид (идеальный).

По умолчанию при моделировании принят следующий режим работы: 1)  $P_{LO} = 18$  дБм; 2)  $IF = LO-RF = 100$  МГц (преобразование вниз, нижняя настройка гетеродина – LSB (Lower Side Band)); 3)  $P_{RF} = -10$  дБм; 4) идеальный внешний гибрид. Размеры кристалла смесителя  $2,2 \times 2,2$  мм<sup>2</sup> (рисунок 10.147).

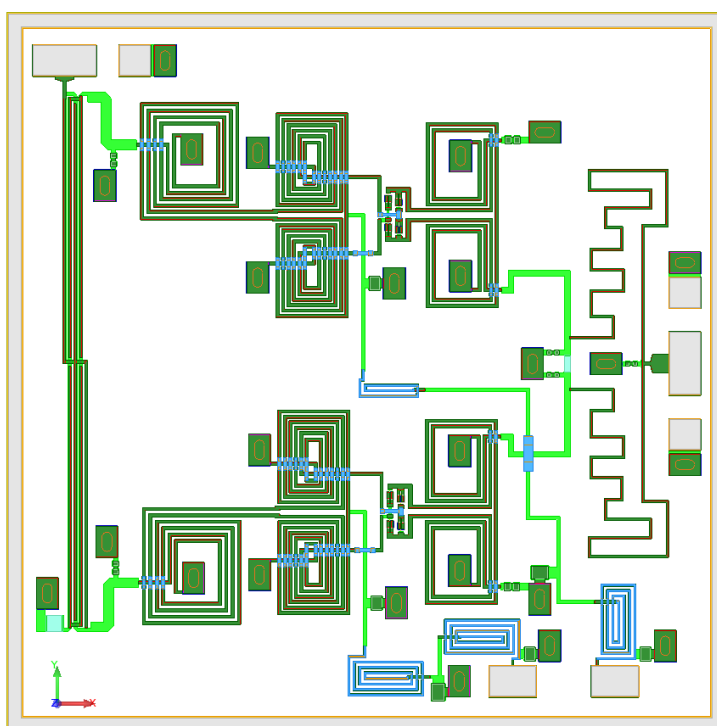
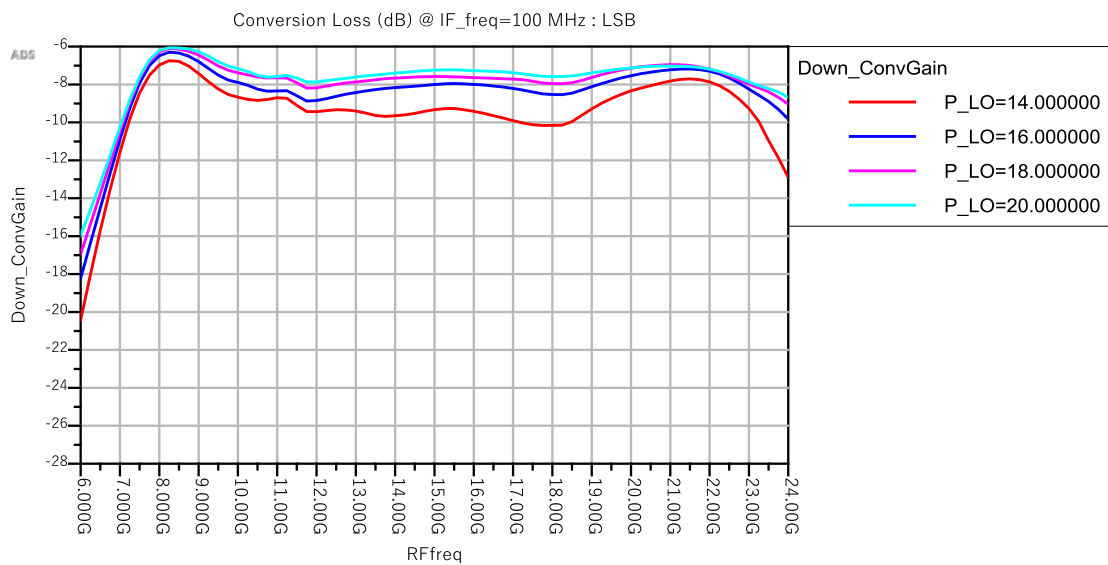
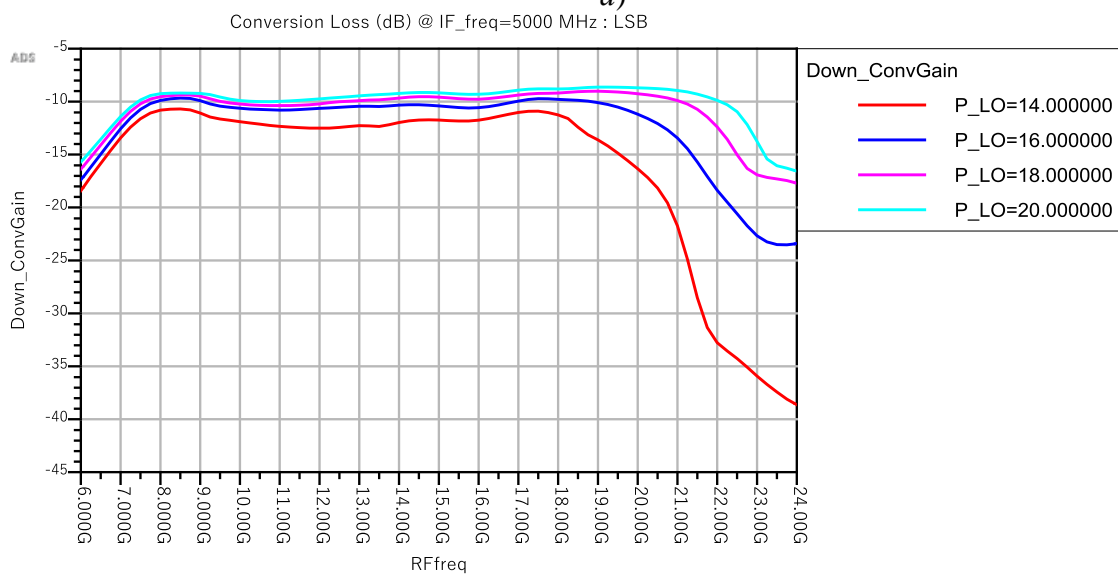


Рисунок 10.147 – Топология смесителя с подавлением зеркального канала на основе 0,5 мкм GaAs pHEMT технологии (размеры  $2,2 \times 2,2$  мм<sup>2</sup>)

На рисунке 10.148 приведен коэффициент преобразования в зависимости от РЧ сигнала при  $IF = LO-RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм.



a)



б)

Рисунок 10.148 – Коэффициент преобразования при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO}$  ( $P_{RF} = -10$  дБм, идеальный внешний гибрид): а) при  $IF = LO - RF = 100$  МГц; б) при  $IF = LO - RF = 5000$  МГц

На рисунке 10.149 приведено подавление сигнала гетеродина в тракте РЧ сигнала в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO - RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм.

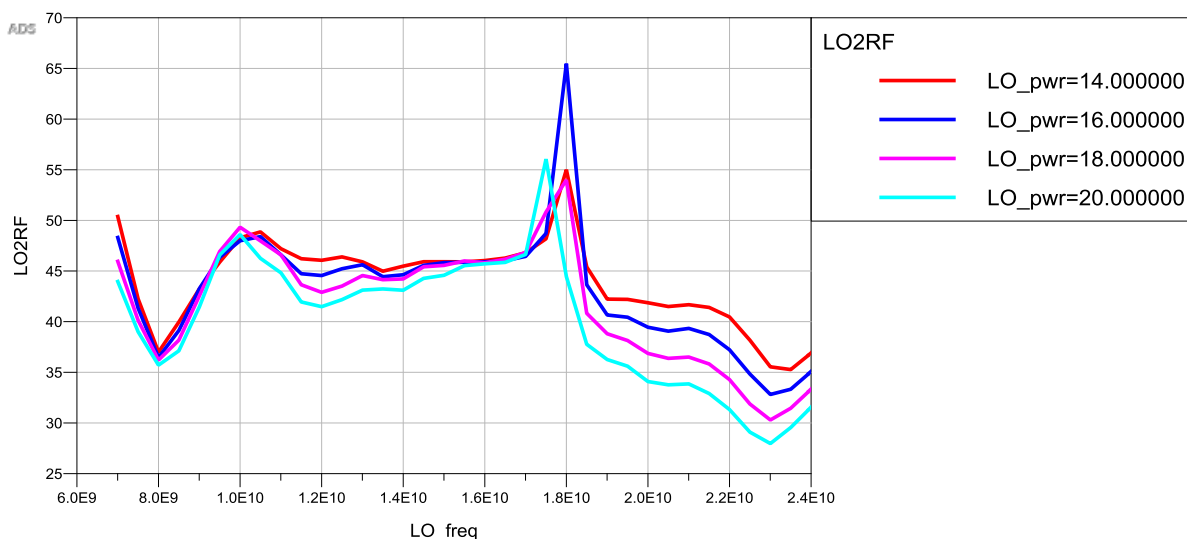


Рисунок 10.149 – Подавление сигнала гетеродина в тракте РЧ сигнала в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм (без внешнего гибрида)

На рисунке 10.150 приведено подавление сигнала РЧ в тракте ПЧ1 и ПЧ2, соответственно, в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO-RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм.

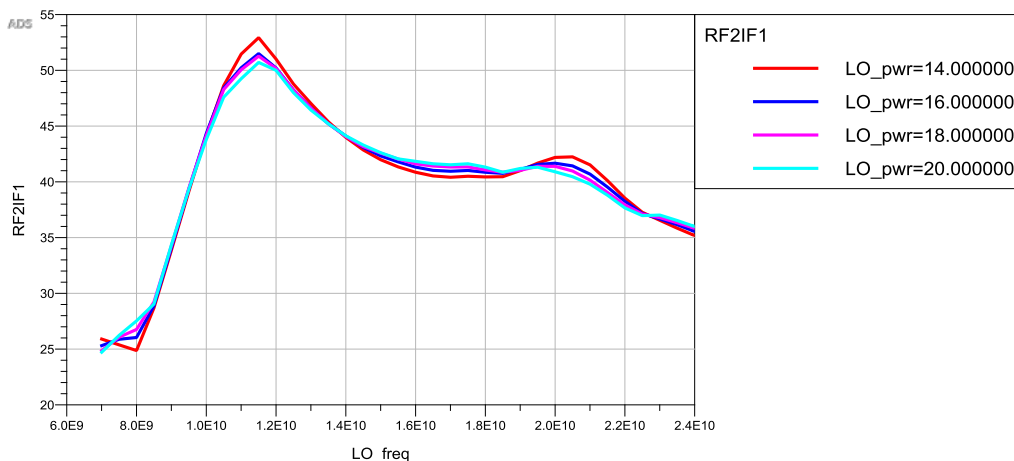


Рисунок 10.150 – Подавление сигнала РЧ в тракте ПЧ1 сигнала в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO-RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм (без внешнего гибрида)

На рисунке 10.151 приведено подавление сигнала гетеродина в тракте ПЧ1 и ПЧ2, соответственно, в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO-RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм.

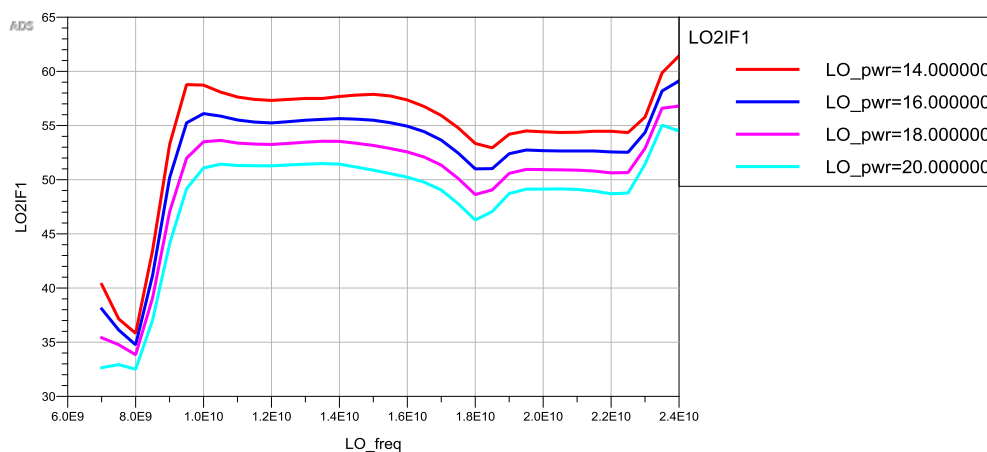


Рисунок 10.151 – Подавление сигнала LO в тракте ПЧ1 сигнала в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO - RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм (без внешнего гибрида)

На рисунке 10.152 приведено подавление зеркального канала относительно полезного сигнала в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO - RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм.

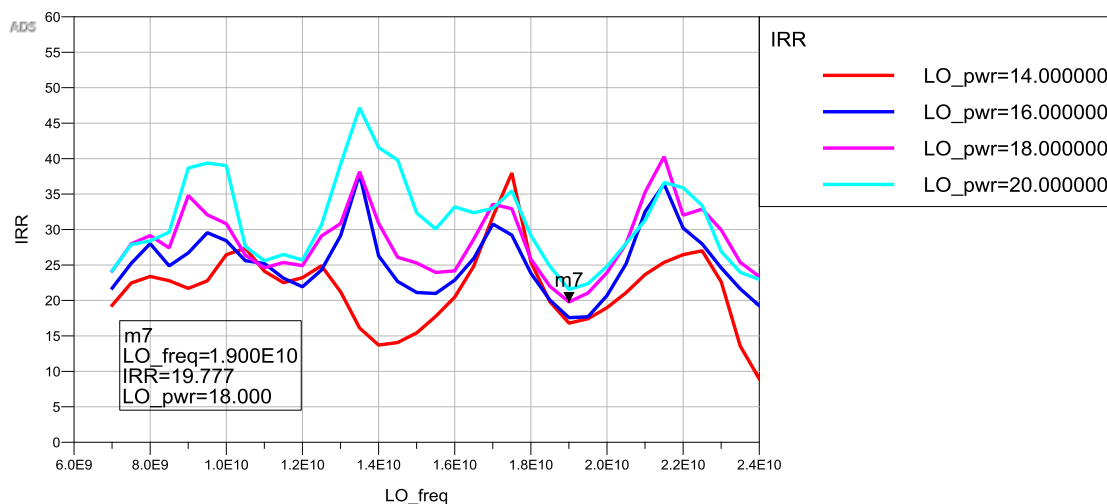


Рисунок 10.152 – Подавление зеркального канала относительно полезного сигнала в зависимости от частоты сигнала гетеродина при  $IF = LO - RF = 100$  МГц, при разных значениях мощности гетеродина  $P_{LO} = 14, 16, 18, 20$  дБм (идеальный внешний гибрида)

Выбор структуры и схемы смесителя прежде всего обусловлен системными расчетами и архитектурой приемника/передатчика. В таблице 10.45 приведены сравнительные характеристики квадратурных СМ на основе 0,5 мкм GaAs pHEMT и 0,13 мкм КНИ технологий. Смеситель на основе GaAs выигрывает по линейности (уровень IP1дБ и IP3 больше на 6-7 дБ), ширине полосы пропускания по входам ВЧ и ПЧ, а также является пассивным, т.е. не потребляет энергию постоянного тока. Смеситель на основе технологии КНИ является более комплексным устройством, имеет встроенные УСГ, за счет чего ему требуется

мощность гетеродина всего +3...+6 дБм (против +18...+20 дБм у GaAs). Но при этом размер кремниевого СМ составляет  $1,4 \times 1,8 \text{ мм}^2$  (это оценка). Большие значения развязок и подавления зеркального канала обусловлены более узким диапазоном СМ на КНИ, а также тем, что топология СМ на КНИ не проработана до конца (в отличие от СМ на GaAs). В целом значения развязок ожидаются на уровне 40-50 дБ, а подавление зеркального канала на уровне 35-40 дБ. При разработке СМ на GaAs на более узкий диапазон 14-16 ГГц ожидается уровень подавления зеркального канала порядка 35-40 дБ.

Для получения большего подавления зеркального канала (свыше 40-50 дБ) необходима настройка каналов ПЧ по амплитуде и фазе при помощи дополнительных средств контроля в цепи гетеродина или ПЧ. Линейность кремниевого СМ может быть увеличена до значений выше +10 дБм (по  $P_{1\text{дБ}}$ ) за счет увеличения потребления УСГ и увеличения мощности гетеродина.

Таблица 10.45 – Сравнение характеристик квадратурных СМ на основе 0,5 мкм GaAs рНЕМТ и 0,13 мкм КНИ технологий

Характеристика	0,5 мкм GaAs рНЕМТ технология	0,13 мкм КНИ технология	Примечания
Частотный диапазон RF и LO, ГГц	8,0-22	14-16	1
Частотный диапазон IF, ГГц	DC...5	DC-2	2
Потери преобразования $G_C$ , дБ	< 8	< 9,5	1, 3
Мощность гетеродина $P_{LO}$ , дБм	18...20	3...6	1, 3
Мощность потребления $P_{DC}$ , мВт	0	110	
Коэффициент шума $NF_{SSB}$ , дБ	-	11,5	1, 3
Развязка LO-RF, дБ	35-50	>60	1, 3
Развязка LO-IF, дБ	> 35	>60	1, 3
Развязка RF-IF	> 25	>40	1, 3
Подавление зеркального канала (относительно полезного) IRR, дБ	> 20	>30..35	1, 3
Уровень $P_{1\text{дБ}}$ , дБм	12,8	6 ( $P_{LO} = +6 \text{ дБм}$ )	1, 3
Уровень ПРЗ по входу, дБм	21	15 ( $P_{LO} = +6 \text{ дБм}$ )	1, 3
Коэффициент отражения входа LO на 50 Ом, дБ	-15	-15	1, 2, 3

Продолжение Таблицы 10.45

Коэффициент отражения входа РЧ на 50 Ом, дБ	-8	-10	1, 2, 3
Коэффициент отражения входа ПЧ на 50 Ом, дБ	-12	<-15	1, 2, 4
Размеры, мм <sup>2</sup>	2,2×2,2	1,4×1,8	4
Примечания: 1) $f = 100$ МГц 2) При снижении коэффициента преобразования на 3 дБ 3) Идеальный 90° мост 4) Без идеального 90° моста			

### Выводы по разделу 10

Таким образом, в разделе рассмотрены основные особенности технологических процессов Si/SiGe/GaAs/GaN, технологий на основе кремния (КМОП) и соединения кремний-германий (БиКМОП), кремниевых КНИ процессов на полуизолирующих подложках, технологических процессов на базе полупроводниковых соединений АЗВ5. Приведен обширный материал по моделированию, разработке топологий малошумящих усилителей, усилителей мощности, управляющих устройства (пассивных и активных 6-битных фазовращателей, формирователей квадратурных сигналов, СВЧ переключателей, пассивных устройств) на основе материалов Si КМОП, КНИ, SiGe БиКМОП и АЗВ5. Приведенные материалы позволяют сделать следующие выводы.

1) В высокой степени актуально создание на российских предприятиях изделий микроэлектроники для перспективных и новых рынков, а также "рынков будущего" (автоматизированный транспорт и движущаяся робототехника, автомобильная электроника, персональная и телемедицина, технологии беспроводной связи 5G, Интернет вещей – промышленный и для потребительского рынка. Как видно из предыдущих разделов настоящего отчета, ЦКП «Импульс» дополнен оборудованием, позволяющим расширить комплекс оказываемых услуг, обеспечить новые услуги, направленные на освоение современных технологий:

а) технологий и технологических операций изготовления и прототипирования СВЧ приборов и ИС, радиофотонных компонентов и ИС на основе материалов Si КМОП, кремний-на-изоляторе (КНИ), SiGe БиКМОП и АЗВ5 с нормами от 250-180 нм до 65-45 нм; микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе кремния, АЗВ5 (InP, GaAs);

б) моделирования, проектирования топологий и измерения СВЧ устройств, ИС, систем на кристалле и модулей, МЭМС, радиофотонных компонентов и ИС;

в) построения моделей, создание библиотек элементов для отечественных технологий изготовления СВЧ и радиофотонных ИС на основе материалов Si КМОП, КНИ, SiGe БиКМОП и АЗВ5.

Работы, проведенные в ЦКП «Импульс» в течение 2019-2020 годов, направленные



на дооснащение оборудованием, освоение ряда технологий, развитие проектных работ, закладывают основу центра микроэлектронных систем ТУСУРа, создание которого было поддержано на расширенном заседании комитета Совета Федерации по науке, образованию и культуре, которое прошло под председательством Лилии Гумеровой

(<https://tusun.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-senatskiy-komitet-podderzhal-proekt-sozdaniya-tsentra-mikroelektronnyh-sistem-na-baze-tusura>).

В обсуждении центра принял участие ректор ТУСУРа В.М. Рулевский.

## **11 Значения показателей результатов использования гранта**

### **11.1 Удельный вес лабораторного и аналитического оборудования в возрасте до 5 лет в общей стоимости лабораторного и аналитического оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием**

Плановый показатель 67%, достигнутое значение показателя по состоянию на отчетную дату 76,3%.

### **11.2 Число организаций-пользователей научным оборудованием центра коллективного пользования**

Плановый показатель 27, число организаций-пользователей составило 29. Оказанные услуги в 2020 г. подтверждены 31 двухсторонними договорами и актами сдачи-приемки работ (услуг), в их числе 3 договора и акта НИ ТГУ, поэтому фактический показатель составил 29 организаций-пользователей. Показатель выполнен в результате взаимодействия с внешними заказчиками услуг, которые в большинстве представляют малый инновационный бизнес. При этом следует отметить и нагрузку на обеспечение внутренних работ по обеспечению исследований 6 лабораторий.

В настоящее время обеспечивается выполнение НИР внутренних пользователей – шести лабораторий, в том лабораторий молодых ученых «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС)» и «Интегральной оптики и радиофотоники», т.к. исследования их руководителей и членов коллектива совпадают с направлениями НОЦ (СВЧ измерения, радиофотоника, импульсные измерения).

### **11.3 Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей, выполняющих работы с использованием оборудования ЦКП**

Плановый показатель 42% превышен, составляет 60,9%, что стало возможным в результате привлечения к работам молодых сотрудников, аспирантов и студентов, совмещающих учебу и работу в лабораториях. Этому способствует поддержка руководства ТУ-СУРа технологии группового проектного обучения, возведенной в ранг учебной дисциплины.

### **11.4 Объем привлеченных внебюджетных средств**

Плановый показатель 27 млн. руб. Фактический объем составил 33,21532057 млн. руб. что позволило выполнить работы по Плану-графику:

- 2.7. Подготовка публикаций по тематике исследований ЦКП и заявок на РИД.
- 2.8. Участие в мероприятиях по рекламе деятельности ЦКП и УНУ.
- 2.9. Составление перечня и закупка вспомогательного оборудования и ПО.



2.10. Разработка технических требований на характеристики вновь осваиваемой технологии изготовления и прототипирования СВЧ ИС, радиофотонных компонентов и ИС.

**11.5 Выполнение п.2.11 Технического задания «Увеличение доли внешних заказов услуг и работ ЦКП»**

В 2019 г. количество организаций-пользователей составило 17.

В 2020 г. количество организаций-пользователей составило 29.

Таким образом, по данному показателю рост составил 70,5%, что объясняется повышением интереса внешних пользователей, в основном малых инновационных предприятий, к предложениям на выполнение услуг и работ с использованием оборудования ЦКП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения проекта по соглашению о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г. на основании представленных отчетов и документации констатируем следующее:

- проведена глубокая модернизация научного оборудования и структуры действующего ЦКП "Импульс" исследовательско-технологического типа в направлении создания СВЧ микро - и оптоэлектронных интегральных схем, устройств и модулей для обеспечения поддержки реализации приоритетов научно-технологического развития в кооперации с ведущими производителями измерительного и технологического оборудования;

- расширен перечень и комплексность оказываемых услуг, а также круг внутренних и внешних пользователей до 35 организаций и лабораторий для обеспечения максимальной загрузки оборудования ЦКП и обеспечения эффективного участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации (направления Н1, Н2, Н6);

- обеспечено внедрения упрощенной модели доступа и использования оборудования ЦКП научными и образовательными организациями вне зависимости от их ведомственной принадлежности и формы собственности (от индивидуальных предпринимателей-изобретателей – до лабораторий академических институтов и университетов и предприятий);

- предоставлены услуги пяти новым лабораториям в период их начального развития и в последующем, а также другим внутренним и внешним пользователям в соответствии со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации;

- расширен перечень услуг по технологическим работам, быстрому прототипированию, проектированию и измерениям изделий кремниевой и АЗВ5 СВЧ микроэлектроники и радиофотоники, а также по продвижению аддитивных технологий изготовления СВЧ компонентов и узлов.

Поставленные цели и задачи решались в условиях ограничений по карантинным мероприятиям, поэтому было принято решение увеличить долю аналитических и проектных работ с целью пополнения «корзины» потенциальных заказов по формируемым проектам с потенциальными и действующими потребителями услуг и работ. За непродолжительное время были выполнены большой объем работ указанного характера, причем в режиме согласования с заказчиками ТЗ и на договорной основе, что позволило обеспечить плановый объем софинансирования.

Сотрудники ЦКП «Импульс» и сотрудничающие с ним исследователи, преподаватели, аспиранты и студенты получили уникальную возможность повысить уровень компетенций в измерениях на семинарах, которые прошли при поддержке и участии представителей производителей аппаратуры – АО «НПФ «Микран», представившего открытые све-

дения о достигнутых и развиваемых возможностях векторных анализаторов, Keysight Technologies, тема семинара измерения в радиофотонике с применением универсальных современных платформ, имеющихся в ЦКП «Импульс». Эти семинары ежегодные, поэтому все новые решения сообщаются своевременно.

Проведенные работы способствовали повышению публикационной активности. Приведенные в отчете данные публикаций авторов, взаимодействующих в той или иной форме с ЦКП «Импульс» и аффилированных с ТУСУР, показывает, что результаты исследований публикуются и представляются в мировом информационном пространстве. Это свидетельствует о достаточно высоком уровне выполняемых работ. Средний показатель роста публикаций и цитирований по информации на интервале 2011-2019 годов не менее 2 по индексам Scopus. Публикационная активность в интервале 2016-2019 годов имеет положительную динамику. Этому способствует проведенная модернизация ЦКП в более раннее время. Вовлечение в процесс подготовки новых проектов от организаций РАН, университетов, предприятий будет определять востребованность услуг центра в последующие годы.

При создании РИД наблюдается цикличность в защите топологий интегральных схем, поэтому необходима корректировка планов работы ЦКП в этом направлении.

В результате выполнения проекта в ЦКП «Импульс» произошло качественное развитие сектора аддитивных технологий, к освоению которых подключалось активно молодое поколение магистрантов и студентов. Значительно повышен метрологический уровень на участке СВЧ измерений, в частности, в направлении измерения фазовых и амплитудных шумов.

Работы, проведенные в ЦКП «Импульс» в течение 2019-2020 годов, направленные на дооснащение оборудованием, освоение ряда технологий, развитие проектных работ, закладывают основу центра микроэлектронных систем ТУСУРа, создание которого было поддержано на расширенном заседании комитета Совета Федерации по науке, образованию и культуре в конце 2020 года. В настоящее время разрабатывается проект Центра.

Таким образом, выполнение мероприятия Министерства науки и высшего образования по поддержке центра коллективного пользования «Импульс» ТУСУРа привело к повышению эффективности проводимых исследований и разработок, а также к полезным сдвигам в области образования по показателю научного содержания.

В заключение констатируем следующее:

1. В итоге проведенной глубокой модернизации ЦКП «Импульс» рекомендуется расширять образовавшиеся связи с организациями и предприятиями всех видов собственности, а также с образовательными учреждениями, уделив особое внимание развитию аддитивных технологий, измерениям на уникальных платформах СВЧ, а также освоению плазмохимических методов при прототипировании интегральных компонент.

Рекомендуется использовать возможности ЦКП «Импульс» при выполнении широкого спектра работ путем участия в выполнении фундаментальных, поисковых НИР, прикладных экспериментальных исследований, НИОКТР на основе наработанного в процессе выполнения проекта.

2. Выполнение проекта позволило достичь высокого научно-технического уровня оснащенности в направлениях деятельности ЦКП, а также при выполнении работ с применением оборудования ЦКП «Импульс», о чем свидетельствует повышение публикационной активности, выполнение за период 2019-2020 гг. 48 договоров внешних пользователей и обеспечение исследований внутренних пользователей по направлениям интегральной электроники СВЧ, аддитивных технологий, измерений в СВЧ диапазонах, проведение аналитических исследований.

3. Как было отмечено выше, все поставленные цели перед проектом достигнуты, а именно:

- проведена глубокая модернизация научного оборудования и структуры действующего ЦКП "Импульс" исследовательско-технологического типа;

- расширен перечень и комплексность оказываемых услуг, а также круг внутренних и внешних пользователей;

- обеспечено внедрения упрощенной модели доступа и использования оборудования ЦКП;

- предоставлены услуги пяти новым лабораториям;

- расширен перечень услуг по технологическим работам.

Ход выполнения проекта отражался в интернет-пространстве на сайте ТУСУРа:

<https://tusur.ru/ru/o-tusure/struktura-i-organy-upravleniya/departament-nauki-i-innovatsiy/nauchnoe-upravlenie/tsentry-kollektivnogo-polzovaniya/tsentr-kollektivnogo-polzovaniya-impuls;>

<https://tusur.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tskp-impuls-gotov-vypolnyat-zakazy-na-novom-oborudovanii;>

<https://tusur.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/jizn-v-tusure/prosmotr/-/novost-statya-uchyonyh-tusura-opublikovana-v-zhurnale-symmetry;>

[https://tusur.ru/ru/nauka-i-innovatsii.](https://tusur.ru/ru/nauka-i-innovatsii)

Авторы отчета приносят слова признательности всем пользователям, принявшим участие в проведении исследований на площадках центра в непростое время пандемии и не позволившим обстоятельствам снизить градус стремления к совершенству.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии / Сборник научных трудов. – 2020, вып. 2. Севастопольский государственный университет, 2020. – 491 с. ISSN 2619-1628.
2. Международный форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019 г. Москва: ТЕХНОСФЕРА. - 2019. – 592 с.
3. Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции, 20–22 ноября 2019 г., в 2 ч. – Томск: В-Спектр, - 2019. – 222 с.
4. The XVII International Conference on Prospects of Fundamental Sciences Development 21-24 April 2020, Tomsk, Russian Federation. Volume 1611.
5. 2019 14th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). 2019.
6. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2019.
7. Белкин М. Е. Цифровая сотовая сеть пятого поколения крупного города с распределением радиосигналов в миллиметровом диапазоне волн // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Сборник научных трудов. – 2020, вып. 2. Севастопольский государственный университет. - 2020. – С. 11- 13. ISSN 2619-1628.
8. Jiejun Zhang ; Weifeng Zhang ; Jianping Yao. A Monolithically Integrated and Widely Tunable Silicon Photonic Microwave Photonic Filter. 2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2019. **DOI:** 10.1109/MWP.2019.8892200.
9. Белкин М.Е, Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Сравнительное моделирование радиофонной диаграммообразующей схемы фазированной антенной решетки в различных САПР. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Сборник научных трудов. – 2020, вып. 2. Севастопольский государственный университет. - 2020. – С. 427- 428. ISSN 2619-1628.
10. Алыбин В.Г., Алыбин А.В. Миниатюризация СВЧ устройств бортовой аппаратуры космического применения. Сборник научных трудов. –2020, вып. 2. Севастопольский государственный университет. - 2020. – С. 19-20. ISSN 2619-1628.
11. Темнов А.М. Гибридно-монолитные интегральные схемы СВЧ. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и

нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах». Фрязино. - 2020. – 303 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.istokmw.ru/uploads/files/static/101/temnov\\_a\\_m.pdf](http://www.istokmw.ru/uploads/files/static/101/temnov_a_m.pdf) (дата обращения: 12.12.2019).

12. Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. и др. Новое поколение мощных усилительных ГМИС X-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 2 (533). - С. 54.

13. S.A. Zasev, V.N. Lebedev, A.M. Temnov «ISTOK» achievements in solid-state microwave devices // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 14-18 June 1993. Atlanta. GA. USA. - 1993. - Vol.2. - Pp. 1129

14. Отчет по теме: «Поддержка и развитие центра коллективного пользования импульс (ТУСУР) научным оборудованием по направлению "Технологии, разработка и измерения СВЧ микро- и оптоэлектронных интегральных схем, устройств и модулей" для обеспечения реализации приоритетов научно-технологического развития». Этап 1: выбор и обоснование направлений исследований. Проведение теоретических и экспериментальных исследований. Закупка оборудования (промежуточный) / рук. Малютин Н.Д. Томск - 2019. – 325 с.

15. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / под ред. проф. Н.Д Малютин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. - 2015. – 69 с.

16. Georgiy Malyutin. Quasi-static analysis of a coplanar strip line with shielding planes used as a distributed sensor / 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 21-27 Oct. 2019. **DOI:** 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8957860.

17. C.P. Wen, “Coplanar waveguide: A surface strip transmission lines suitable for nonreciprocal gyromagnetic device,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-17, pp. 1087–1090, June 1969. **DOI:** 10.1109/TMTT.1969.1127105

18. M.E. Davis, E.W Williams, and A.C. Celestini, “Finite boundary corrections of the coplanar waveguide analysis,” *ibid.*, 1973, MTT-21, - Pp. 594-596.

19. T. Hatsuda, “Computation of coplanar-type strip-line characteristics by relaxation method and its application to microwave circuits,” *ibid.*, 1975, MTT-23, - Pp. 795-802.

20. J.B. Knorr, and K.D. Kuchler, “Analysis of coupled slots and coplanar strips on dielectric substrate,” *ibid.*, 1975, MTT-23, - Pp. 541-548.

21. P.A.J. Dupuis, and C.K. Campbell, “Characteristic impedance of surface-strip coplanar waveguides,” *Electron. Lett.*, - 1973. - Vol 9. - Pp. 354-355.

22. I.Y. Sagiyeva, and T.R. Gazizov, “Modeling of microstrip line characteristics with side grounded conductors near air-substrate boundary,” *Journal of Physics: Conference*

Series Volume 1118, Issue 1, 10 December 2018 [012032 International Conference Complex Equipment of Quality Control Laboratories 2018; Saint-Petersburg; Russian Federation; 17 July 2018–19 July 2018]. **DOI:** 10.1088/1742-6596/1118/1/012032.

23. A.N. Sychev, S.M. Struchkov, N.Y. Rudyi, and A.S. Salnikov, “Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique,” 2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications, NEMO 2017 29 June 2017 Pages 106-108 [2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications, NEMO 2017; Seville; Spain; 17 May 2017]. **DOI:** 10.1109/NEMO.2017.7964202.

24. A.N. Sychev, and K.K. Zharov, “Analysis of asymmetric broad-side coupled lines by conformal mapping technique,” 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 - Proceedings April 2019 [International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) Tomsk; Russian Federation; 18 April 2019 до 20 April 2019]. **DOI:** 10.1109/SIBCON.2019.8729591.

25. S. Gevorgian, and S. Abadei, “Analytic approximations for multilayer substrate coplanar-plate capacitors,” IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. **DOI:** 10.1109/MWSYM.2005.1516957.

26. Anand K. Verma, Paramjeet Singh, and Ladislau Matekovits, “Strip-Width and Slot-Gap Dependent Equivalent Isotropic Substrate and Dispersion Characteristics of Asymmetric Coplanar Waveguide, Symmetric Coplanar Waveguide and Micro-Coplanar Strip Line on Anisotropic Substrates,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (Volume: 62, Issue: 10 , Oct. 2014 ). **DOI:** 10.1109/TMTT.2014.2351781.

27. Volkan Akan, and Erdem Yazgan, “Quasi-static solutions of multilayer elliptical, cylindrical coplanar striplines and multilayer coplanar striplines with finite dielectric dimensions—asymmetrical case,” IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 53, no. 12, december 2005 3681.

28. Paramjeet Singh, and A. K. Verma “Multilayer Coplanar Waveguide of finite conductor thickness: Quasi-Static Spectral Domain Analysis,” 2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC). **DOI:** 10.1109/AEMC.2011.6256889.

29. Hongting Jia, “An exact analysis of coplanar waveguides and strip lines with full-wave method,” 2009 Applied Electromagnetics Conference (AEMC).

30. Erli Chen, and S.Y. Chou, "Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume: 45, Issue 6, Jun 1997.
31. Payal Majumdar, and A.K. Verma, "Analytical model of losses for symmetric elliptical coplanar strip lines," 2011 International Conference on Communications and Signal Processing.
32. Vincent F. Fusco. Microwave circuits. Analysis and Computer Design. Prentice-Hall International (UK) Ltd, 1987.
33. V.I. Lavrik, V.N. Savenkov, Handbook on conformal mapping, Kiev, 1970. 251 p.
34. P.F. Filchakov Approximate methods of conformal mappings. Naukova Dumka, Kiev, 1964. 536 p.
35. V.N. Dubinin. Symmetrization, Green's function, and conformal mappings. Journal of mathematical sciences, vol 89, no. 1, 1998. P. 967-975. Doi.org/10.1007/bf02358534.
36. Светличный Ю.А. Реализация цифровых методов в многопозиционных станциях с многоканальными фазированными антенными решетками и совмещенными каналами радиолокации и связи: Автореферат диссертации на соиск. канд. техн. наук. Томск, - 2020. – 22 с.
37. Светличный Ю.А. Особенности подхода к конструированию вычислительных систем цифровых фазированных антенных решеток / Ю.А.Светличный // Успехи современной радиоэлектроники. – 2018. – №12. – С. 156-159.
38. Светличный Ю.А., Дегтярев П.А. Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами / Ю.А.Светличный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – №3. –Т. 23. – С. 5-9.
39. Светличный Ю.А. Распределение сигналов синхронизации и данных цифровой антенной решетки на базе волоконно-оптических линий / Ю.А. Светличный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – №3. –Т. 27 – С. 6-11.
40. Добуш И. М. Разработка GaAs-pHEMT-монолитного малошумящего усилителя диапазона 3–20 ГГц с использованием программ «визуального» проектирования / И. М. Добуш [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 4(30). – С. 39–44.
41. Pandey A.K. Design of a Transceiver System at C-Band based on MultiTechnology // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2013. – Vol. 3 (4). – P. 697-703.



42. Boles B.T, Carlson D., Ramnath S. Monolithic Semiconductor Technologies for Low Cost Phased Array Radar // Microwave Product Digest Magazine. – 2011 (Feb.).
43. Low noise amplifier UMS CHA3689-99F [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://module-csums.cognix-systems.com/telechargement/10-9-1.pdf> (дата обращения: 22.01.2018).
44. Low noise amplifier UMS CHA2090 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://module-csums.cognix-systems.com/telechargement/10-10-1.pdf> (дата обращения: 22.01.2018).
45. LownoiseamplifierCHA2069-99F [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://module-csums.cognix-systems.com/telechargement/10-11-1.pdf> (дата обращения: 22.01.2018).
46. LownoiseamplifierOmmicCGY2121XUH/C2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ommic.fr/file/download/CGY2121XUHC2\\_PDS\\_160210.pdf](http://www.ommic.fr/file/download/CGY2121XUHC2_PDS_160210.pdf) (дата обращения: 22.01.2018).
47. Low noise amplifier Mimix Broadband XL1001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/223760/MIMIX/XL1001-BD.html> (дата обращения: 22.01.2018).
48. КМОП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CMOS> (дата обращения: 12.12.2019).
49. Андреев, Д. Библиотека кремниевых КМОП СВЧ-элементов и Сложно-функциональных блоков для Построения приемо-передающих модулей / Андреев Д. и др. – Наноиндустрия, 2016. - 46 с.
50. Цветков, Ю.Б. Процессы и оборудование микротехнологии. Часть 1 / Ю.Б. Цветков // Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2017. - С.18-30.
51. Ytterdal, T. Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design / Ytterdal T. [et al] // Reading: John Wiley & Sons, Ltd. - 2003. - P. 47-67.
52. El-Kareh B. Silicon Analog Components. Device Design, Process Integration, Characterization, and Reliability / B. El-Kareh, N. L. Hutter // Springer. - 2015. - P. 12-20.
53. Свистова Т.В. Основы микроэлектроники: учеб. пособие [Электронный ресурс]. - Электрон. текстовые и граф. данные (2,6 Мб) / Т.В. Свистова. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. - Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. - Загл. с экрана
54. И.В. Малышев, П.Л. Ионов, В.В. Репин. Перспективы использования SiGe БиКМОП технологии для создания СВЧ микросхем

55. Белоус А., Прибыльский А. Особенности современных технологий изготовления изделий полупроводниковой силовой электроники. // Силовая электроника - №3. - 2014.
56. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Электронный ресурс]: в 2 ч. Ч. 2 / М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина, М. Г. Путря, В. И. Шевяков ; М. А. Королёв [и др.] ; под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю. А. Чаплыгина. — 2-е изд. (эл.). — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний. -2012. — 422 с.
57. Momiyama, Y. 140 GHz Ft and 60 GHz Fmax DT MOS Integrated with High Performance SOI Logic Technology / Momiyama Y. [et al.]. - Reading: IEEE Electron Device Meeting (IEDM). - 2000. - 455 p.
58. Assaderaghi, F. A. 7.9/5.5 psec Room/Low Temperature SOI CMOS / Assaderaghi F. A. [et al] // IEEE Electron Device Meeting (IEDM). - Hong Kong. - 1997. - P. 415-418.
59. Особенности технологического маршрута изготовления интегральных схем на основе GaAs и полупроводниковых гетероструктур соединений группы АЗВ5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://belkin20.narod.ru/otvety/43.htm> (дата обращения: 12.12.2019).
60. Saha P., Muralidharan S., Cao J., Gurbuz O., Nay C. X/Ku-Band Four-Channel Transmit/Receive SiGe Phased-Array IC // Электронная библиотека. 2019. № 18938263. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8701794> (дата обращения: 12.12.2019).
61. Sadhu B. et. al. A 28-GHz 32-Element TRX Phased-Array IC With Concurrent Dual-Polarized Operation and Orthogonal Phase and Gain Control for 5G Communications // Электронная библиотека. 2017. № 17390159. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8110833> (дата обращения: 12.05.2020).
62. Shaheen R. A. et. al. A 45nm CMOS SOI, four-element phased array receiver supporting two MIMO channels for 5G // Электронная библиотека. 2017. № 17413188. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8124989> (дата обращения: 12.05.2020).
63. Huang C. H., Chen C. H., Horng T. S. Design of integrated planar Marchand balun using physical transformer model // Электронная библиотека. 2010. № 11087035. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5384349> (дата обращения: 12.05.2020).
64. Dupuy V. et. al. A 2.4GHz to 6GHz active balun in GaN technology // Электронная библиотека. 2014. № 14318063. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6815495> (дата обращения: 12.05.2020).
65. Zhang T. et. al. Low-loss 24-GHz passive baluns for on-chip integration // Электронная библиотека. 2012. № 13172096. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6374323> (дата обращения: 12.05.2020).

66. Mancuso Y. Microwave Developments for New Airborne Antennas // EuMW 2019, presentation

67. Dinc T., Ozeren E., Caliskan C., Kayahan H., Gurbuz Y. X-band SiGe bi-complementary metal-oxide semiconductor transmit/receive module core chip for phased array RADAR applications // IET Microw. Antennas Propag., 2015, Vol. 9, Iss. 9, pp. 948–956.

68. Pashmineh S., Killat D. Self-Biasing High-Voltage Driver Based on Standard CMOS with an Adapted Level Shifter for a Wide Range of Supply Voltages // 2015 Nordic Circuits and Systems Conference (NORCAS): NORCHIP & International Symposium on System-on-Chip (SoC), 26-28 Oct. 2015.

69. Balducci M., etc. Ka band passive differential 4:1 power divider/combiner based on wilkinson topology // 2017 13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 12-15 June 2017.

70. Razavi B. RF Microelectronics. 2nd edition // Prentice Hall, 949 P.

71. B. Gilbert, “The MICROMIXER: A highly linear variant of the Gilbert mixer using a bisymmetric class-AB input stage,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 32, no. 9, pp. 1412–1423, 1997.

72. Konovalenko, M.O., Sokolov, V.V., Trenkal, E.I., Malyutin, N.D. The antenna system with signal polarization separation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 919, Issue 5, 25 September 2020, Номер статьи 052018 1st International Conference on Advances in Material Science and Technology, CAMSTech 2020; Krasnoyarsk Science and Technology City Hall Krasnoyarsk; Russian Federation; 31 July 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052018.

73. Коноваленко М.О. Способ калибровки конформной антенной решётки по измерениям комплексных амплитуд поля в ближней зоне / М.О. Коноваленко, А.В. Христенко, А.В. Самогугин // Материалы 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. - 2018. – Т3. – С. 533-539.

74. Сальников А.С. Автоматизация измерений, построение моделей и библиотек элементов СВЧ монолитных интегральных схем на базе отечественных GaAs и GaN технологий: диссертация ... кандидата технических наук: 05.12.07 /; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2014.

75. Калентьев А.А. Автоматизированный структурно-параметрический синтез малошумящих СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.12.07. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН. - Томск, 2015.

76. Горяинов А.Е. Автоматизированное построение моделей пассивных компонентов и их применение при структурно-параметрическом синтезе маломощных СВЧ транзисторных усилителей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии, Томск – 2016.

76. Semyonov E.V., Malakhovskij O.Y. Short pulse properties of Gunn diode // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020 – V. 67, № 5. – P. 2100-2105.

77. Семенов Э.В. Рефлектометрический метод измерения вольтамперных характеристик // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2020) : материалы 30 Международ. конф. Севастополь, Россия, 6–12 сентября 2020 г. – Москва; Минск; Севастополь, 2020.

78. Semyonov E., Malakhovskij O. Isothermal measurement of current-voltage characteristics of Gunn diodes with reflection of their discontinuities and hysteresis // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2019): proceedings of 29th International Crimean Conference. Sevastopol, Russia, 8-14 Sept. 2019. – ITM Web Conf. – 2019, V. 30. Article № 11008.

79. Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu. Influence of the output resistance of measurement system to I-V characteristics of Gunn diodes // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE): proceedings of XIV International Scientific-Technical Conference. Novosibirsk, Russia, 2-6 Oct. 2018. – Novosibirsk State Technical University, 2018. – P. 70-72.

80. Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu. Non-Quasi-Static p-n Junction Model Without User-defined Recursion // Russian Physics Journal. – 2019. – V. 62, № 6. – P. 1090-1095.

81. Семенов Э. В., Малаховский О. Ю., Божков В. Г. Неквазистатическая модель диода с учетом токов экстракции и рекомбинации неравновесных носителей заряда // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 26–32.

82. Шевченко Г.М., Семенов Э.В. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 37–41.

83. Семенов Э.В., Малаховский О.Ю. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2018): материалы 28 Междун. конф. Севастополь, Россия, 9–15 сентября 2018 г. – Москва; Минск; Севастополь. - 2018. – С. 1269-1273.

84. Eisen M.B., Brown P.O. DNA arrays for analysis of gene expression // Methods in enzymology. Academic Press. – 1999. – V. 303. – P. 179–205.