

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ

Заведующий кафедрой ФЭ

Д-р техн. наук, профессор

_____ П.Е. Троян

«___» июля 2020 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СВЧ ДЕТЕКТОРОВ И УСИЛИТЕЛЯ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ УСИЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
GAAS PHEMT ТЕХНОЛОГИЙ**

Бакалаврская работа по направлению 28.03.01

«Нанотехнологии и микросистемная техника»

Студент гр. 326

_____ А.А. Метель

«___» июля 2020 г.

Руководитель

Доцент кафедры ФЭ

Канд. техн. наук

_____ А.С. Сальников

«___» июля 2020 г.

СОГЛАСОВАНО

Консультант

Старший инженер ООО «50ом Тех.»

_____ И.М. Добуш

«___» июля 2020 г.

Томск 2020

Реферат

В рамках настоящей работы было проведено исследование используемых технологических процессов при разработке различных классов устройств, анализ используемых схемотехнических решений и разработка интегральных СВЧ детекторов проходящей мощности и усилителя с распределенным усилением на основе отечественных технологических процессов.

Выпускная квалификационная работа содержит: 55 страниц, 29 рисунков, 10 таблиц и 72 использованных источника.

Abstract

In this work author carried out the research of semiconductor processes for various devices, analyzed circuit topologies and designed the monolithic microwave integrated circuits (MMIC) of power detectors and distributed amplifier based on domestic technologies.

Bachelor thesis has 55 pages, 29 figures, 10 tables and 72 references.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ФЭ

Д-р техн. наук, профессор

_____ П.Е. Троян

«___» июнь 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

Выдано студенту гр. 326 факультета электронной техники

Метель Александру Андреевичу

1. Тема: Исследование и разработка СВЧ детекторов и усилителя с распределенным усилением на основе интегральных GaAs pHEMT технологий.

Утверждена приказом по ВУЗу №____ от «___» _____ 2020 г.

2. Исходные данные:

2.1 Детектор проходящей мощности: частотный диапазон работы детектора от 4 до 20 ГГц, динамический диапазон детектирования от минус 5 до плюс 20 дБм, разработка на основе 0,5 мкм GaAs pHEMT технологического процесса АО «Светлана-Рост»;

2.2 Усилитель с распределенным усилением: частотный диапазон работы от 1 до 20 ГГц, коэффициент усиления не менее 10 дБ, разработка на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT технологического процесса АО «НИИПП».

3. Содержание (перечень подлежащих разработке вопросов):

3.1 Изучение современных тенденций развития разработки монолитных интегральных схем;

3.2 Анализ используемых технологических процессов при разработке различных классов устройств;

3.2 Анализ используемых схмотехнических решений при разработке детекторов проходящей мощности;

3.3 Анализ используемых схмотехнических решений при разработке усилителей с распределенным усилением;

3.4 Разработка схемы пассивного детектора проходящей мощности;

3.5 Разработка схемы активного детектора проходящей мощности;

3.6 Разработка схемы усилителя с распределенным усилением.

4. Заключение по выпускной квалификационной работе.

ЗАДАНИЕ СОГЛАСОВАНО

Консультант по нормам и требованиям ЕСКД

Каранский В.В., старший преподаватель кафедры ФЭ

«___» июля 2020 г.

Подпись _____

Руководитель работы

Сальников А.С., доцент кафедры ФЭ, канд. техн. наук

«___» июля 2020 г.

Подпись _____

Консультант

Добуш И.М., старший инженер ООО «50ом Тех.»

«___» июля 2020 г.

Подпись _____

Задание принял к исполнению

Метель А.А., студент гр. 326

«___» июля 2020 г.

Подпись _____

1	ВВЕДЕНИЕ.....	7
2	ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	13
2.1	Технология изготовления СВЧ МИС на основе GaAs.....	13
2.2	Ключевые технологические и электрические характеристики используемых процессов.....	18
2.3	Детекторы проходящей мощности	19
2.4	Виды включений детектора проходящей мощности в СВЧ тракт	22
2.5	Обзор используемых схемотехнических решений и аналогов пассивных детекторов проходящей мощности	24
2.6	Обзор используемых схемотехнических решений и аналогов активных детекторов проходящей мощности	27
2.7	Усилители с распределенным усилением	30
2.8	Обзор используемых схемотехнических решений и аналогов усилителей с распределенным усилением.....	33
2.9	Выводы и основные задачи исследования	34
3	РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ.....	36
3.1	Пассивный детектор проходящей мощности.....	36
3.2	Активный детектор проходящей мощности	41
3.3	Усилитель с распределенным усилением	44
	ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	47
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	48

1 ВВЕДЕНИЕ

Устройства, работающие в СВЧ диапазоне, могут быть изготовлены по технологиям печатных плат (ПП), гибридных и монолитных интегральных схем (ГИС и МИС).

В настоящий момент развития технологий широкое распространение получили МИС, используемые не только в военных, но и в гражданских применениях. Такая тенденция обусловлена высокой скоростью развития широкополосных систем передачи данных при постоянной потребности в снижении массы и габаритных размеров устройств, улучшении основных технических характеристик, высокой надежности и возможности серийного производства, которая приводит к снижению стоимости как модуля, так и конечного устройства [1].

В качестве основных материалов, на основе которых разрабатываются и изготавливаются МИС СВЧ, можно выделить следующие технологии: Si, SiGe, SOI, SOS, InP, GaAs, GaN.

Разные функциональные блоки могут изготовлены согласно определенной технологии и интегрированы на одном кристалле. Однако каждый материал имеет свои преимущества и недостатки. В настоящее время встречаются решения, когда функциональные блоки изготавливаются по различным технологическим процессам, после чего могут быть интегрированы в один корпус или размещены на печатной плате [2-4]. Подобные решения позволяют добиться лучших предельных электрических характеристик системы в целом.

Рассмотрим различные функциональные блоки, используемые при разработке приемопередающего модуля (ППМ), на примере структурной схемы, изображенной на рисунке 1.1, где каждый класс устройств выделен соответствующим цветом.

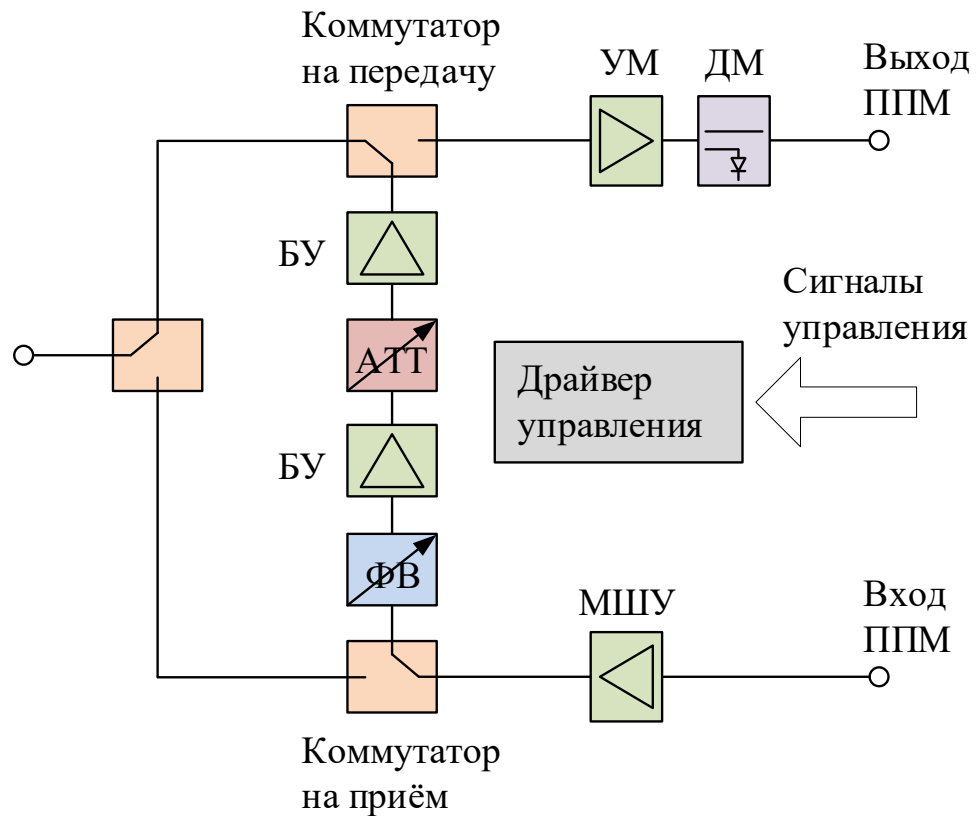


Рисунок 1.1 – Структурная схема ППМ

К управляющим устройствам относятся аттенюатор (АТТ), фазовращатель (ФВ) и коммутатор. Коммутатор предназначен для изменения направления передачи СВЧ энергии [5]. В качестве основных характеристик, стоит выделить, диапазон рабочих частот, вносимые потери, развязка, скорость переключения, уровень коммутируемой мощности.

АТТ является устройством, предназначенным для ослабления сигнала, без существенного изменения его формы или спектрального состава [6]. К основным параметрам можно отнести рабочий диапазон частот, диапазон и шаг вносимого ослабления, разрядность, уровень начальных потерь, коэффициенты отражения по входу и выходу, вносимый фазовый сдвиг, динамические характеристики и габаритные размеры.

Фазовращатель (ФВ) предназначен для изменения фазы, проходящего через него, СВЧ сигнала, посредством внешнего управляемого воздействия [7]. К основным параметрам можно отнести рабочий диапазон частот, диапазон и шаг вносимого фазового сдвига, неравномерность вносимого фазового сдвига,

уровень начальных потерь, коэффициенты отражения по входу и выходу, амплитудная конверсия, габаритные размеры.

Детектор мощности (ДМ) – это устройство, служащее для преобразования мощности СВЧ сигнала в постоянное выходное напряжение, которое может быть обработано дальнейшим измерителем [8]. В качестве основных параметров, стоит выделить, диапазон рабочих частот, динамический диапазон, уровень вносимых потерь, температурный диапазон работы, ошибка детектирования, габаритные размеры.

Усилители, в свою очередь, необходимы для усиления входной амплитуды сигнала для его последующей обработки [9]. В зависимости от функционального назначения могут разрабатываться как узкополосные, так и широкополосные усилители. К наиболее распространенным типам усилителей можно отнести маломощные (МШУ), буферные (БУ) и усилители мощности (УМ) [10].

Каждый тип усилителей может быть разработан с использованием различных схемных решений, выбор которых основывается на требованиях, предъявляемых к устройству. В качестве основных характеристик усилителей можно выделить рабочий диапазон частот, коэффициент усиления и его неравномерность, коэффициенты отражения по входу и выходу, коэффициент шума, точка однодецибельной компрессии коэффициента усиления, точка интермодуляции третьего порядка [10]. Таким образом, в зависимости от типа разрабатываемого усилителя основной упор делается на обеспечение различных характеристик. Например, при разработке МШУ приоритетной задачей проектировщика является обеспечение минимум коэффициента шума, при разработке БУ – поиск компромиссного решения между динамическими и шумовыми характеристиками, при разработке УМ основной акцент делается на обеспечении высоких динамических характеристик. Стоит отметить, что требования по коэффициентам усиления и отражения предъявляются к каждому из рассматриваемых видов усилителей.

В таблице 1.1 приведено сравнение основных электрических и физических параметров подложек, используемых при разработке усилительных и управляющих блоков [10-12].

Таблица 1.1 – Основные параметры подложек при комнатной температуре

Параметр	Si	SiC	GaAs	GaN	InP
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	2,86	1,43	3,39	1,35
Диэлектрическая постоянная	11,7	9,7	12,9	8,9	14
Подвижность электронов, см ² /(В·с)	1450	500	8500	800	4000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, ×10 ⁷ см/с	0,9	2	1,3	2,3	1,9
Критическая напряженность электрического поля, МВ/см	0,3	2,0	0,4	3,3	0,5
Теплопроводность, Вт/см·град	1,45	3,5	0,45	1,3	0,68
Радиационная стойкость	Неуд.	Отл.	Хор.	Удовл.	Отл.
Стоимость подложки	Низ.	-	Ср.	-	-

Недостатком Si, в отличие от других рассматриваемых материалов, является невозможность реализации эпитаксиальных слоев полуизолирующими. Технология формирования полуизолирующих областей широко используется для интеграции активных и пассивных компонентов, а также формирования микрополосковых линий с малыми потерями [10, 11].

В коммутирующих и управляющих устройствах основными электрическими параметрами, определяемыми технологией изготовления, и вносящими ключевой вклад в характеристики устройств, являются сопротивление транзистора в открытом состоянии (R_{on}) и его емкость в закрытом состоянии (C_{off}). Значения параметров транзистора для различных технологий изготовления представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры транзистора для различных технологий изготовления

Технология	$R_{on} \times C_{off}$, фс
0,25 мкм GaAs pHEMT [13]	300
65 нм CMOS [14]	250
0,18 мкм CMOS SOI [15]	300

Продолжение таблицы 1.2

Технология	$R_{on} \times C_{off}$, фс
0,5 мкм GaN [16]	690
SOS [17]	450
SOI [17]	150
SOI [17]	250
GaAs [17]	350

Из представленных данных видно, что управляющие устройства, с хорошими электрическими характеристиками, можно получать на технологии SOI и SOS, что демонстрирует производитель Peregrine Semiconductor [18]. Разработанная технология UltraCMOS (SOS), позволяет разрабатывать и изготавливать АТТ и ФВ превосходящие аналоги в рабочей полосе частот по основным электрическим характеристикам.

Технология GaN, среди рассматриваемых, является самой молодой и как следствие, не у всех фабрик уже имеется стабильный техпроцесс. Однако материал имеет наибольшую ширину запрещенной зоны, что обуславливает возможность работы транзистора при высоких уровнях активирующих воздействий (температуры, радиации). Также, материал имеет высокие пробивные напряжения, что в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает высокую удельную мощность транзисторов. Преимуществами материала пользуются такие производители, как Analog Devices, Qorvo, Macom, Wolfspeed (Cree) при разработке устройств, работающих с высокими уровнями мощностями, например, усилителей мощности (УМ) [19-22]. Технология GaN является достаточно перспективной, так как позволяет изготавливать в интегральном исполнении ППМ и их составляющие, способные демонстрировать высокие динамические характеристики [16].

Si технологии также получили широкое распространение на СВЧ, благодаря низкой стоимости, высокой степени интеграции, хорошим производственным возможностям [23-25].

Компромиссом, с точки зрения стоимости изготовления, электрических характеристик устройства и стабильности технологии является GaAs технология, получившая широкое применение в разработке МШУ и БУ, управляющих устройств, коммутаторов, а также ППМ на одном кристалле. Разработкой отдельных устройств и сложных систем на основе GaAs занимаются такие производители, как Analog Devices, Qorvo, United Monolithic Semiconductors, Mini Circuits и др. [19, 20, 26, 27].

Целью выпускной квалификационной работы является разработка детекторов проходящей мощности диапазона частот 4-20 ГГц с возможностью интеграции на одной полупроводниковой пластине совместно с различными функциональными блоками на основе отечественного технологического процесса 0,5 мкм GaAs рHEMT АО «Светлана-Рост». Разработка усилителя с распределенным усилением диапазона частот 1-20 ГГц на основе отечественного технологического процесса 0,15 мкм GaAs рHEMT АО «НИИПП».

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящем разделе будет рассмотрен типовой GaAs технологический маршрут изготовления СВЧ МИС [10]. Рассмотрены основные материалы, используемые при изготовлении МИС. Приведены ключевые технологические характеристики процессов, разработанных АО «НИИПП» (г. Томск) и АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург) с различными топологическими нормами [28, 29], на основе которых проведено проектирование МИС. Проведены исследование используемых схемных решений и анализ рынка разрабатываемых устройств.

2.1 Технология изготовления СВЧ МИС на основе GaAs

Рассмотрим на примере фрагмента МИС, изображенного на рисунке 2.1, основные технологические операции, необходимые для его формирования.

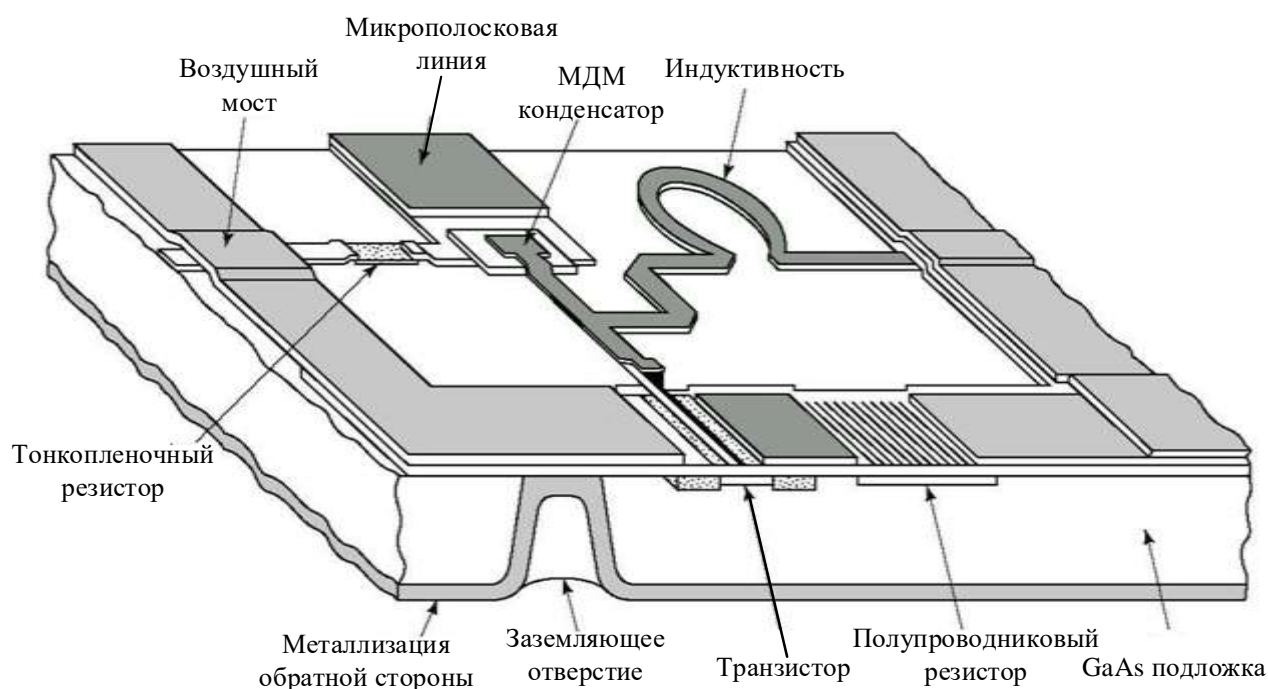


Рисунок 2.1 – Фрагмент полупроводниковой МИС на основе GaAs

При изготовлении МИС все активные и пассивные элементы, а также их соединения формируются в различных технологических циклах на поверхности подложки (GaAs). Как правило, в качестве межэлементных соединений используются микрополосковые линии. При формировании конденсаторов –

наиболее распространенная структура металл-диэлектрик-металл (МДМ), однако, технология позволяет формировать и встречно-штыревые конденсаторы. Посредством формирования сквозных металлизированных отверстий осуществляется заземление, в роли которого выступает обратная сторона подложки. Типовой технологический процесс изготовления МИС на основе GaAs представлен в виде блок-схемы на рисунке 2.2.

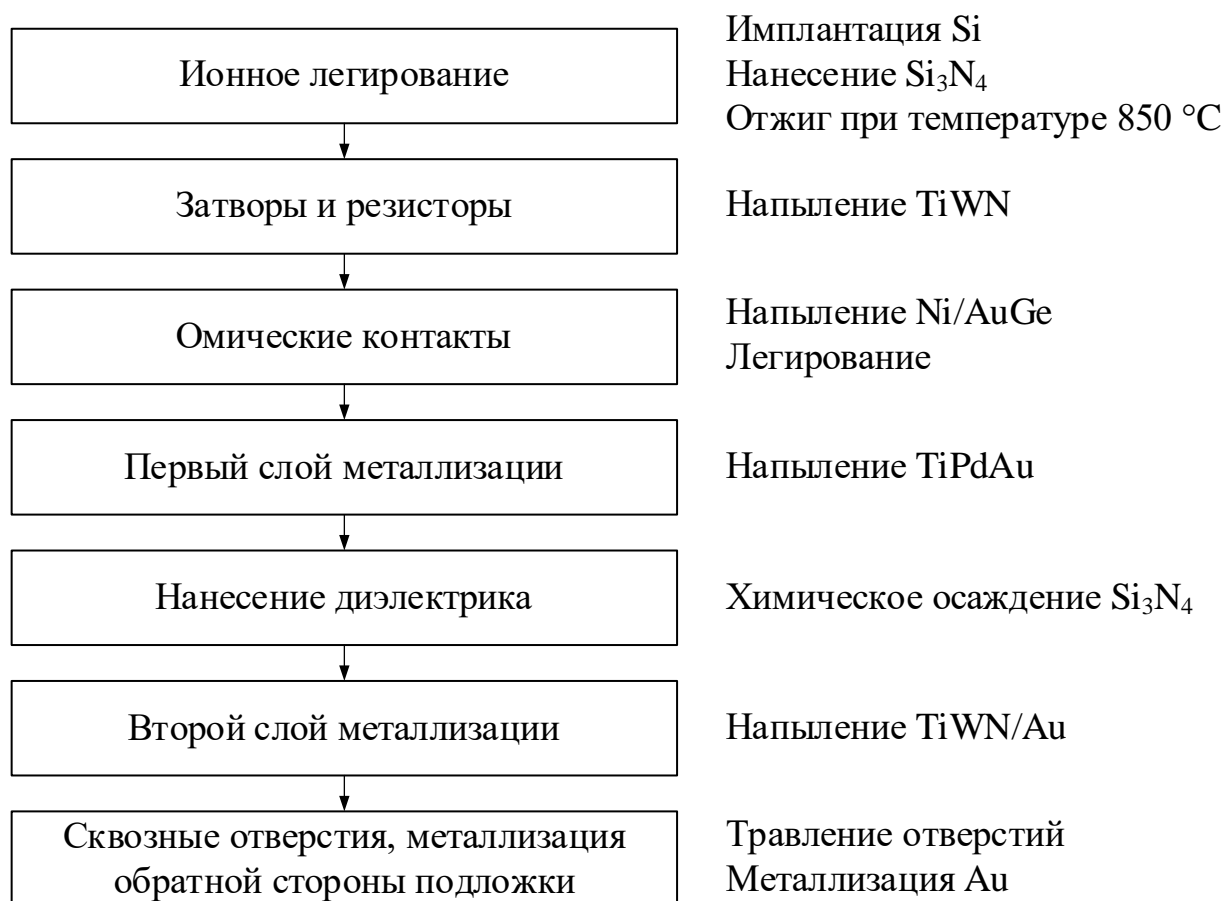


Рисунок 2.2 – Блок-схема типового технологического процесса изготовления МИС на основе GaAs

Стоит отметить, что технологический процесс на основе GaAs менее сложен, по сравнению с Si и обладает лучшими электрическими характеристиками в СВЧ диапазоне [10, 30, 31].

Остановимся более подробно на ключевых материалах, используемых при изготовлении МИС. Проводящие материалы предназначены для формирования соединений между пассивными и активными компонентами схемы, а также для формирования контактных площадок. В качестве основных требований,

предъявляемых к проводящему материалу, стоит выделить высокую проводимость, низкое сопротивление в СВЧ диапазоне, высокую адгезию к подложке, низкий температурный коэффициент расширения (ТКР), высокую степень и легкость травления, легкость пайки и разварки [32, 33]. Сопротивление определяется поверхностным сопротивлением и глубиной скин слоя, что в свою очередь определяет толщину слоя металлизации [10]. В таблице 2.1 приведены свойства основных материалов, применяемых для формирования слоев металлизации.

Таблица 2.1 – Свойства материалов для формирования слоев металлизации

Материал	Поверхностное сопротивление, $(\text{Ом}/\square)\times 10^{-7}$	Глубина скин слоя δ на 2 ГГц, мкм	ТКР, $(\alpha/\text{°C})\times 10^6$	Адгезия	Метод формирования
Ag	2,5	1,4	21	Неуд.	Напыление
Cu	2,6	1,5	18	Неуд.	Напыление
Au	3,0	1,7	15	Неуд.	Напыление
Al	3,3	1,9	26	Хор.	Напыление
Cr	4,7	2,7	9	Хор.	Напыление
Ta	7,2	4,0	6,6	Хор.	Электронно-лучевое напыление, ионное распыление
Ti	-	-	-	Хор.	Напыление, Магнетронное распыление
Mo	4,7	2,7	6	Уд.	Электронно-лучевое распыление, магнетронное распыление

Продолжение таблицы 2.1

Материал	Поверхностное сопротивление, (Ом/□)×10 ⁻⁷	Глубина скин слоя δ на 2 ГГц, мкм	ТКР, (αт/°С)×10 ⁶	Адгезия	Метод формирования
W	4,7	2,6	4,6	Уд.	Магнетронное распыление, электронно-лучевое распыление
Pt	-	3,6	9	-	Магнетронное распыление, электронно-лучевое распыление
Pd	-	3,6	11	-	Напыление, магнетронное распыление

Диэлектрические пленки при изготовлении МИС используются в качестве изоляционного материала в конденсаторах, защитных слоев для активных устройств, межслоевой изоляции. В качестве желаемых характеристик стоит выделить высокую воспроизводимость, высокая относительная диэлектрическая постоянная, высокие напряжения пробоя, низкий тангенс угла потерь [33]. Свойства основных материалов, применяемых при формировании диэлектрических слоев представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Свойства диэлектрических материалов

Материал	Метод формирования	Относительная диэлектрическая постоянная, ϵ_r	Диэлектрическая прочность, В/см	Добротность, Q
SiO	Напыление	6÷8	4×10^5	30
SiO ₂	Выращивание	4	10^7	100÷1000
Si ₃ N ₄	Осаждение из газовой фазы	7,6	10^7	-
Al ₂ O ₅	Анодирование	7÷10	4×10^6	-
Ta ₂ O ₅	Анодирование	22÷25	6×10^6	100

Резистивные пленки при изготовлении МИС находят применение в цепях питания, цепях параллельной обратной связи по напряжению в усилителях, а также при разработке различных секций АТТ [33, 34]. Основные материалы, применяемые при формировании резистивных тонких пленок представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Свойства резистивных материалов

Материал	Метод формирования	Удельное сопротивление, Ом/□	ТКС, %/°С	Стабильность
Cr	Напыление	10÷1000	-0,100 до +0,10	Неуд.
NiCr	Напыление	40÷400	+0,001 до +0,10	Хор.
Ta	Ионное распыление	5÷100	-0,010 до +0,01	Отл.
Cr-SiO	Напыление	Более 600	-0,005 до -0,02	Удовл.
Ti	Напыление	5÷2000	-0,100 до +0,10	Удовл.

В качестве основных свойств резистивной пленки можно выделить широкий диапазон удельных сопротивлений, низкий температурный коэффициент сопротивления (ТКС), высокая стабильность при внешних воздействиях, таких как прикладываемое напряжение и температурное воздействие.

2.2 Ключевые технологические и электрические характеристики используемых процессов

При дальнейшей разработке устройств использовались GaAs pHEMT технологические процессы с топологическими нормами 0,5 мкм (АО «Светлана-Рост») и 0,15 мкм (АО «НИИПП»). В таблице 2.4 приведены технологические и электрические характеристики каждого из рассматриваемых технологических процессов.

Таблица 2.4 – Ключевые технологические и электрические характеристики технологических процессов

Параметр	АО «Светлана-Рост» 0,5 мкм GaAs pHEMT	АО «НИИПП» 0,15 мкм GaAs pHEMT
Диаметр пластин, мм	до 100	до 100
Материал первого слоя металлизации	Au	Ti/Au
Материал второго слоя металлизации	Au	Au
Толщина первого слоя металлизации, мкм	1	1
Толщина второго слоя металлизации, мкм	5	2
Толщина диэлектрика в МДМ-конденсаторе, мкм	0,2	0,15
Материал диэлектрика в МДМ-конденсаторе	SiN	SiN
Удельная емкость МДМ-конденсатора, пФ/мм ²	310	420
Удельное сопротивление тонкопленочных резисторов, Ом/□	50/600	20/50
Удельное сопротивление объемного резистора (Mesa), Ом/□	150	230

Рассмотренные технологии могут быть использованы в различных частотных диапазонах при разработке как отдельных функциональных блоков, так и сложных систем.

2.3 Детекторы проходящей мощности

Для области низких частот (НЧ) характерно измерение напряжений и токов, при увеличении частоты работы данная задача существенно усложняется, поэтому производят измерение мгновенных значений токов и напряжений. В области СВЧ одним из главных параметров является мощность сигнала, в связи с этим важной задачей является измерение проходящей или отраженной мощности [8].

Характеристика ДМ по виду используемых преобразователей представлена в таблице 2.5. В настоящий момент широкое распространение получили тепловые (калориметрические, термоэлектрические, термисторные и болометрические), пьезоэлектрические, электронные (диодные, на эффекте Холла), ферритовые и другие преобразователи [35].

Таблица 2.5 – Сравнение преобразователей мощности

Параметр	Вид преобразователя		
	Диоды и транзисторы	Термопары	Термисторы
Динамический диапазон	Большой	Средний	Малый
Чувствительность	Высокая	Средняя	Низкая
Скорость	Высокая	Средняя	Низкая
Линейность	Недостаточная	Высокая	Высокая

В дальнейшем, преимущественно будут рассматриваться электронные преобразователи, на основе диодов и транзисторов, так как одной из главных задач в настоящей работе является интеграция детекторов проходящей мощности (ДПМ) совместно с другими функциональными модулями на полупроводниковой пластине.

Только для постоянных сигналов можно дать четкое определение термину мощность. Мощность – это произведение тока и напряжения. В остальных случаях мощность, в зависимости от временной структуры сигнала и опорного масштаба времени, разделяют на среднюю, импульсную, пиковую [35]. Для модулированных сигналов используют термины импульсной и пиковой мощностей, графически представленных на рисунке 2.3 [8].

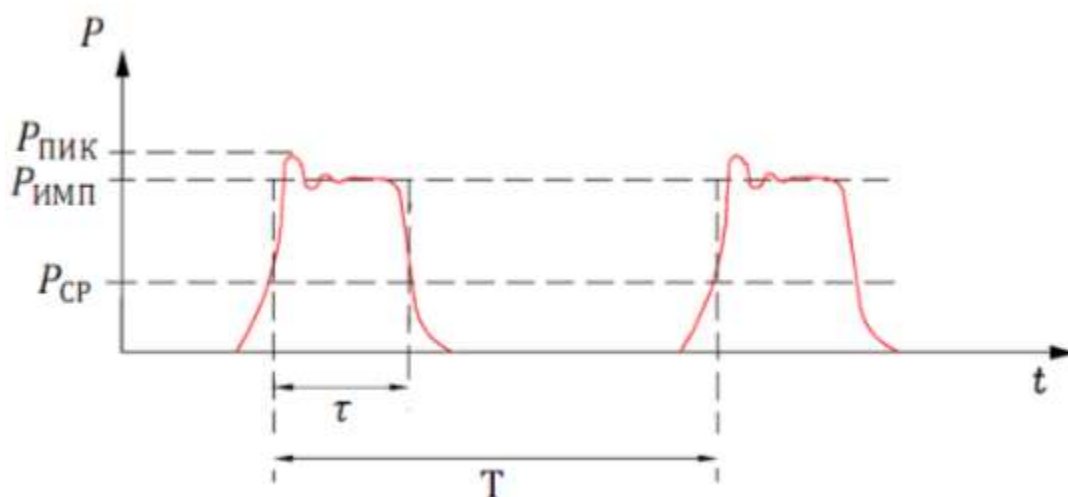


Рисунок 2.3 – Средняя, импульсная и пиковая мощности

Ширина импульса τ – это время между точками 50% возрастания и спада амплитуды импульса. Под импульсной мощностью понимают усредненное значение мощности за все время импульса τ . Пиковая мощность – это усредненное значение СВЧ мощности за период несущей частоты, приходящейся на максимум огибающей импульса мощности [36].

Средняя мощность описывается следующим уравнением, описанным в [37]:

$$P_{\text{СР}} = \frac{1}{n \cdot T} \cdot \int_0^{n \cdot T} e_{\text{П}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_0} \cdot t\right) \cdot i_{\text{П}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_0} \cdot t + \varphi\right) dt,$$

где $e_{\text{П}}, i_{\text{П}}$ – пиковые значения напряжения и тока;

φ – фазовый угол между напряжением и током.

Соответственно, по характеру преобразуемой мощности, ДМ подразделяются на детекторы средней мощности, детекторы импульсной мощности и детекторы пиковой мощности [8].

Для детектирования и преобразования сигналов переменного тока в сигналы постоянного тока используются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), такие как диоды и транзисторы. В зависимости от технологий изготовления диоды могут изготавливаться как с нулевым смещением, так и с большой шириной запрещенной зоны. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем меньше чувствительность детектора. Как в случае диодов, так и в случае транзисторов данная проблема решается добавлением цепей питания, обеспечивающих смещение положения рабочей точки, которые в то же время могут вносить лишние шумы, уменьшать динамический диапазон детектора, приводить к увеличению габаритов устройства и усложнению схемы [8].

Рассмотрим основные технические характеристики СВЧ ДМ. Рабочий диапазон частот определяет полосу частот, в пределах которой выполняются заявленные технические требования. Параметр ограничивается типом применяемого преобразователя и схемотехническим решением выполнения ДМ. Основные схемотехнические ограничения на рабочий диапазон частот вносят разделительные конденсаторы, и вариативно применяемые цепи согласования, для уменьшения коэффициентов отражения и увеличения коэффициента передачи ДМ, принцип работы которых аналогичен фильтрам. Зачастую проектировщику приходится искать компромисс между рабочей полосой частот и уровнем детектируемого сигнала (ошибкой измерения детектора) [35].

Рабочий динамический диапазон ДМ определяет допустимые уровни мощности входного и выходного сигнала. Параметр ограничивается типом преобразователя. В ДПМ нижняя граница ограничивается шумом, а верхняя – наступлением линейного закона детектирования. Для увеличения диапазона измерений используются включения нескольких каскадов детектирования, включения корректирующих цепей, усилителей и делителей мощности [38-40].

Согласование импеданса в рабочей полосе частот. ДМ включаемые в СВЧ тракт должны обладать минимумом коэффициента отражения и максимумом

коэффициента передачи. На рисунке 2.4 представлено распределение составляющих общей погрешности измерений.



Рисунок 2.4 – Распределение составляющих общей погрешности измерений

Уровень выходного напряжения. Это уровень напряжения на выходе ДМ соответствующий определенному уровню мощности на входе ДМ. Данный параметр является важным при дальнейших измерениях преобразованного сигнала, для уменьшения ошибки измерителя.

Температурный рабочий диапазон определяет минимальную и максимальную температуры.

2.4 Виды включений детектора проходящей мощности в СВЧ тракт

Основными вариантами включения ДМ в сигнальный тракт являются: резистивный мост, ответвитель, непосредственно через конденсатор [41].

На рисунке 2.5 представлены варианты включения ДПМ.

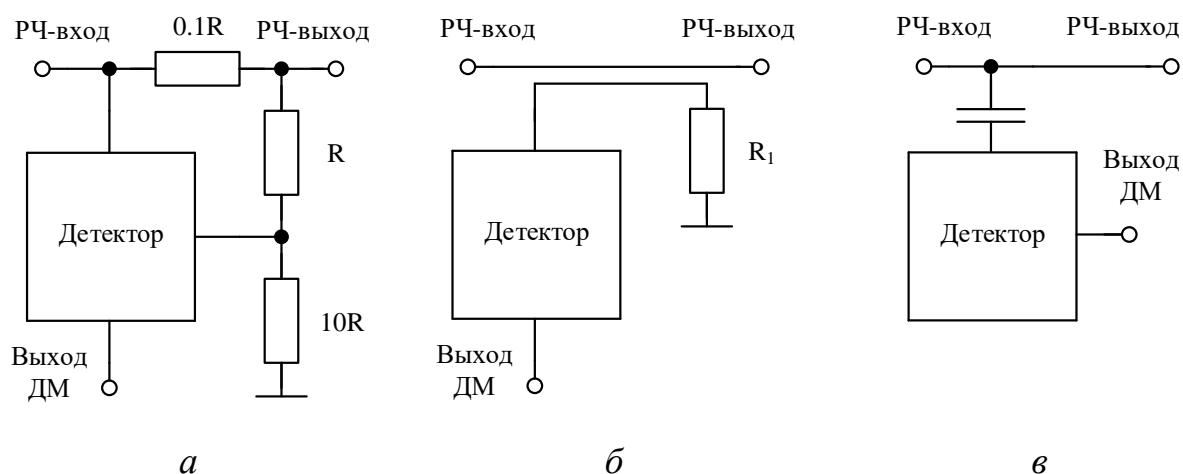


Рисунок 2.5 – Варианты включения ДПМ:

a – резистивный мост; *б* – ответвитель; *в* – непосредственно через конденсатор

Резистивный мост обеспечивает направленность ДМ [42-46]. Данное схемотехническое решение не предусматривает цепей питания, в связи с чем возникает необходимость использования диодов с нулевым смещением.

Схемотехническое решение включения ДПМ через направленный ответвитель аналогично подключению непосредственно к тракту. Оба варианта позволяют подавать питание на преобразователь, однако, особенностью включения ДМ через ответвитель является наличие направленности, что уменьшает ошибку измерений. Основным критерием выбора между данными схемотехническими решениями является полоса частот, в которой необходимо обеспечить детектирование. В широкой полосе частот наиболее выгодным с точки зрения места, занимаемого на кристалле, является вариант включения непосредственно через конденсатор.

На рисунке 2.6 представлены варианты применения ДПМ [44].

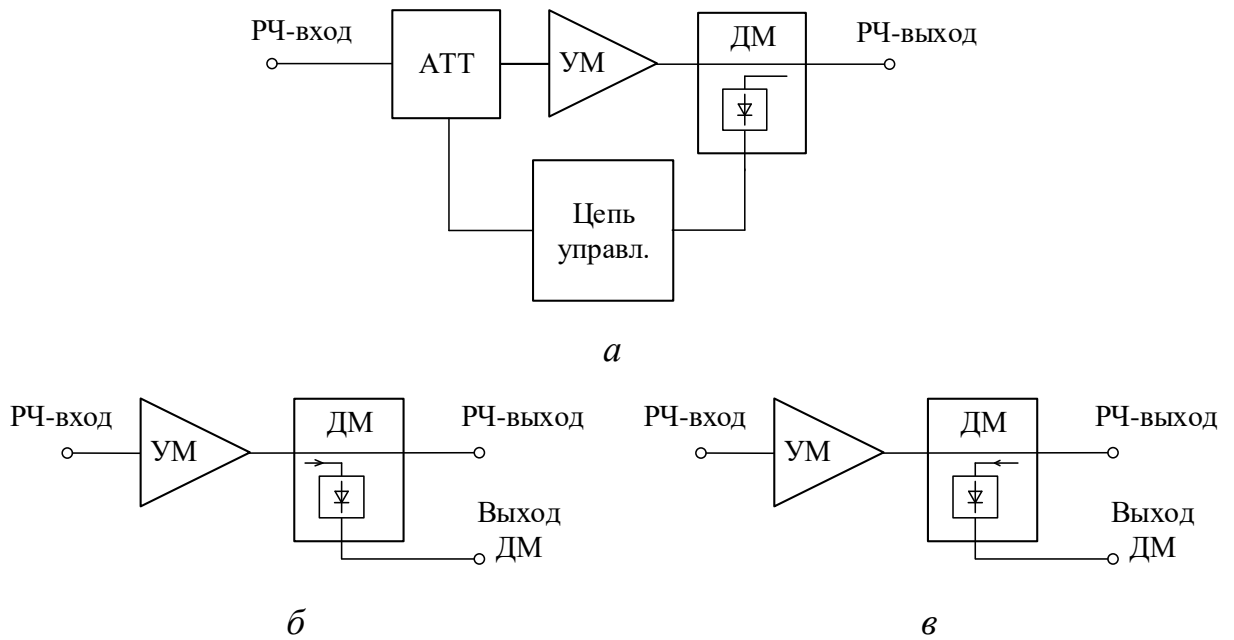


Рисунок 2.6 – Варианты применения ДПМ:

а - измерение проходящей мощности с системой авторегулировки; *б* - измерение проходящей мощности; *в* - измерение отраженной мощности

Стоит отметить, что для реализации каждого из вариантов применений, направленность ДМ будет иметь достаточно важное значение для уменьшения ошибки детектирования.

2.5 Обзор используемых схемотехнических решений и аналогов пассивных детекторов проходящей мощности

В таблице 2.6 представлено сравнение основных характеристик пассивных детекторов проходящей мощности [47].

Таблица 2.6 – Сравнение основных характеристик пассивных детекторов
проходящей мощности

Наименование		[46]	[48]	[49]
Частотный диапазон, ГГц		0,01÷50	26÷31	6÷14
Динамический диапазон, дБм		-40÷20	-	0÷25
$V_{\text{дет}}, \text{В}$	$P_{\text{вх}} = -40 \text{ дБм}$	10^{-6}	-	-
	$P_{\text{вх}} = -20 \text{ дБм}$	10^{-4}	-	-
	$P_{\text{вх}} = 0 \text{ дБм}$	10^{-2}	-	0,4
	$P_{\text{вх}} = 20 \text{ дБм}$	0,8	0,3	5
Направленность, дБ		10	-	-
$V_{\text{пит}}, \text{В}$		-	1	-
Тех. процесс		Низкобарьерный диод, GaAs	GaAs pHEMT	MSAG FET
Топологические размеры, мм ²		1,73×0,69	0,6×1,1	0,4×0,5

Схемные решения, использованные в рассмотренных выше источниках, представлены на рисунке 2.7.

Схемное решение [44-46, 50], изображено на рисунке 2.7, перечисление а, основано на применении направленного моста, для включения ДПМ в СВЧ тракт [42, 43]. Рабочий диапазон частот 0,01÷50 ГГц, в качестве преобразовательного элемента использовался детекторный диод с нулевым смещением, на технологии GaAs.

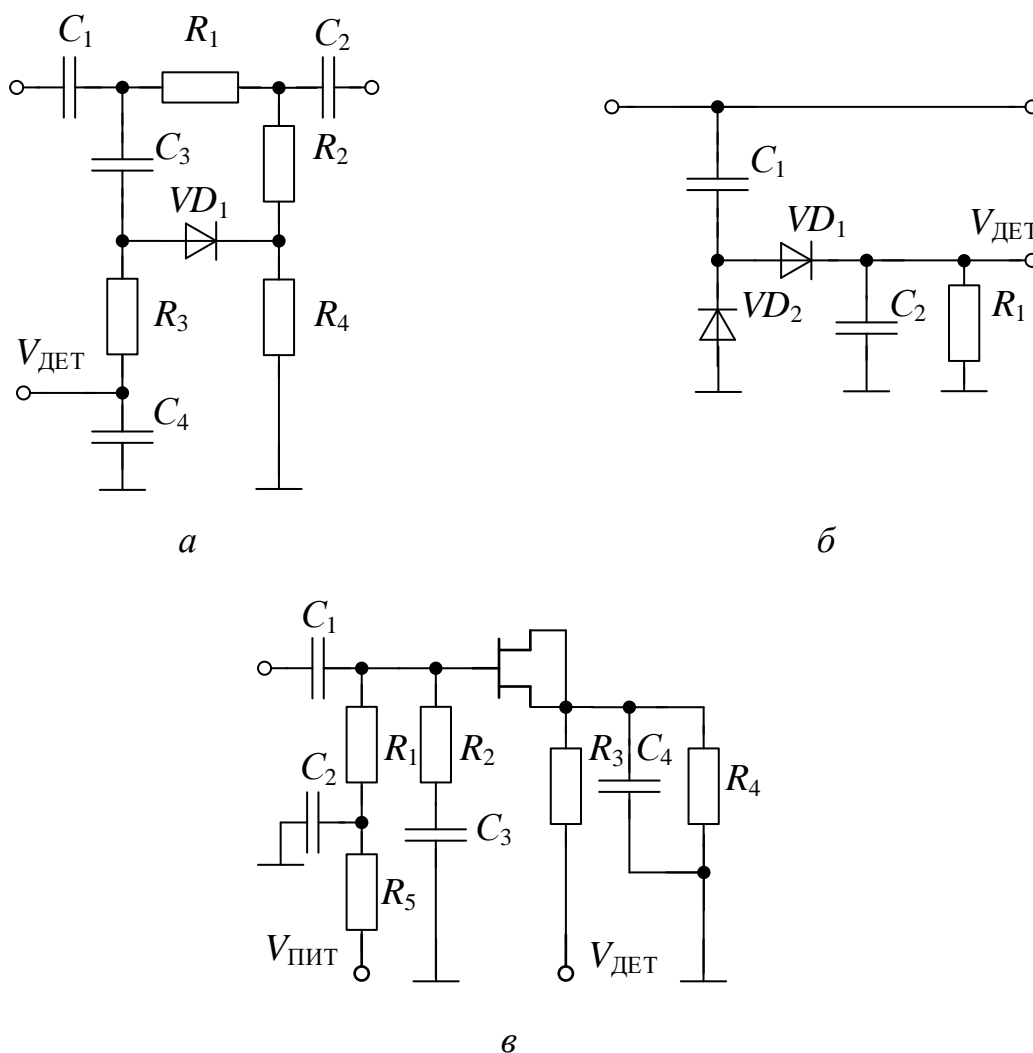


Рисунок 2.7 – Схемы пассивных ДПМ: а – схемное решение [44]; б – схемное решение [49]; в – схемное решение [48]

Рассмотрено схемное решение [49], изображенное на рисунке 2.7, перечисление б. В данном решении, в качестве преобразовательного элемента, используется диод Шоттки с нулевым смещением, технологический процесс MSAG FET. Данное решение позволяет использовать детекторные диоды, соответственно, имеется возможность подключения цепей питания. Так же в зависимости от требуемой полосы частот возможно включение данного детектора как через ответвитель, так и непосредственно через емкость. Рассматриваемый ДПМ имеет высокий уровень детектируемых напряжений в широкой полосе частот, однако, в схемном решении отсутствует термостабилизация.

Рассмотрено схемное решение [48], изображенное на рисунке 2.7, перечисление в. Используется детекторный диод, технологический процесс GaAs pHEMT. Особенностью данного схемного решения является интеграция на одной полупроводниковой пластине с УМ и схема температурной компенсации, реализованная наличием опорного детектора. Рабочий диапазон частот от 26 до 31 ГГц. Типичное значение детектируемого напряжения при мощности на входе детектора 20 дБм составляет 0,3 В. Напряжение питания 1 В.

Для детектора [46], схемное решение аналогично изображенному на рисунке 2.7, перечисление а, технология изготовления не позволяет интегрировать детектор на одной полупроводниковой пластине с различными функциональными блоками. Используемый метод обеспечивает направленность детектора и включение непосредственно в СВЧ тракт.

Пассивные ДПМ могут использоваться в широком диапазоне частот, так как не требуют сложных согласующих цепей, тем самым занимая меньше места на полупроводниковой подложке. Динамический диапазон ограничен шумами и максимально допустимым напряжением. Также высокие уровни направленности детектора обеспечивают меньшую ошибку детектирования [8].

Основными недостатками являются малые уровни детектируемых напряжений, температурная нестабильность, возможная необходимость в добавлении цепей питания, что способствует усложнению схемы прибора и увеличению занимаемого на пластине места [47].

2.6 Обзор используемых схемотехнических решений и аналогов активных детекторов проходящей мощности

Рассмотрим имеющиеся разработки активных ДПМ на основе различных технологических процессов. В таблице 2.7 представлено сравнение основных характеристик активных ДПМ [51].

Таблица 2.7 – Сравнение основных характеристик активных ДПМ

Наименование		[38]	[39]	[40]
Частотный диапазон, ГГц		7÷20	90÷140	75÷90
Динамический диапазон, дБм		-45÷7	-50÷-2	0÷20
$ S_{11} $, дБ		-8	-4,5	-2,5
$V_{дет}$, В	$P_{вх} = -40$ дБм	-	0,002	-
	$P_{вх} = -20$ дБм	-	0,178	-
	$P_{вх} = 0$ дБм	-	3	1,9
	$P_{вх} = 20$ дБм	-	-	0,6
Тех. процесс		0,25 мкм SiGe BiCMOS	0,13 мкм SiGe BiCMOS	0,1 мкм GaAs pHEMT
Топологические размеры, мм ²		0,42	0,6×0,8	2,5×0,85

Рассмотренные схемотехнические решения могут быть интегрированы с другими функциональными модулями на полупроводниковой пластине и имеют детектируемые напряжения выше, чем у пассивных ДПМ [47]. Главными недостатками являются меньший динамический диапазон, наличие цепей питания, приводящих к увеличению размеров и усложнению схемы активного ДПМ [51].

Схемы рассмотренных выше активных ДПМ представлены на рисунке 2.8.

В схемном решении [38], представленном на рисунке 2.8, перечисление а, в качестве преобразовательного элемента используется биполярный транзистор. Подключение к СВЧ тракту выполнено непосредственно через емкость. Технология изготовления – 0,25 мкм SiGe BiCMOS. Частотный диапазон работы детектора составляет от 7 до 20 ГГц, динамический диапазон работы от минус 45 до 7 дБм, коэффициент отражения по входу составил менее минус 8 дБ.

В схемном решении [39], представленном на рисунке 2.8, перечисление б, также в качестве преобразовательного элемента используется биполярный транзистор, однако, стоит отметить, что схема подразумевает наличие опорного детектора, ключевой функцией которого является термокомпенсация. Технология изготовления 130 нм SiGe BiCMOS. Частотный диапазон работы

составил от 90 до 140 ГГц, динамический диапазон работы детектора от минус 50 до минус 2 дБм.

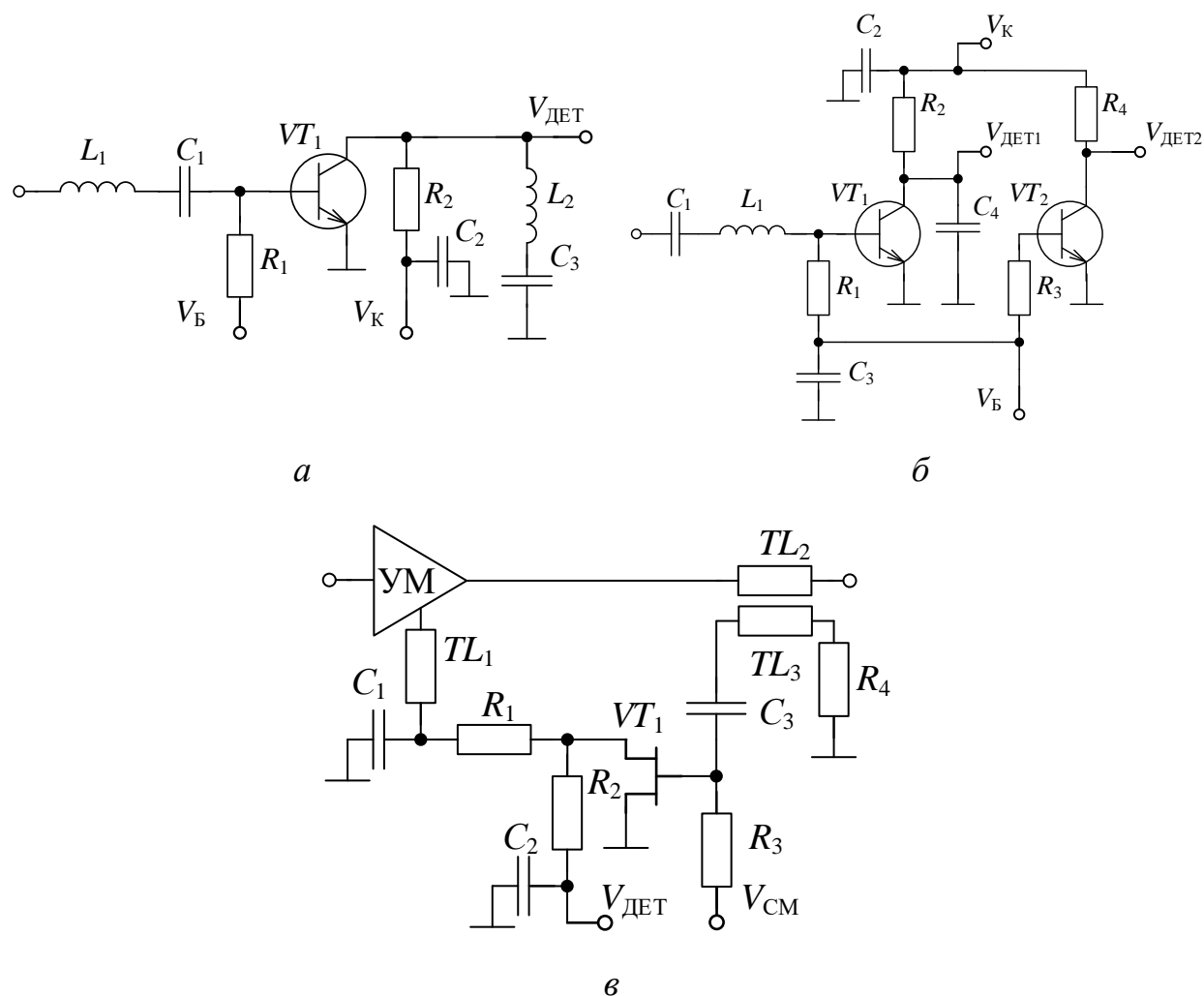


Рисунок 2.8 – Схемы активных ДПМ: а – схемное решение [38]; б – схемное решение [39]; в – схемное решение [40]

Схмотехническое решение [40], представленное на рисунке 2.8, перечисление в, выполнено на технологическом процессе 0,1 мкм GaAs рНЕМТ. В качестве соединения с СВЧ трактом использовался ответвитель, данный детектор интегрирован на одной полупроводниковой пластине с УМ, что позволило исключить один источник питания за счет непосредственного соединения стока полевого транзистора с цепью питания УМ. Данный детектор также примечателен обратной детекторной характеристикой, обусловленной использованием полевого транзистора.

2.7 Усилители с распределенным усилением

Широкополосные усилители необходимы в системах высокоскоростной передачи данных и формирования изображений с высоким разрешением, оптоэлектронных и измерительных системах. Широкополосность усилителя определяет способность всей системы передавать информацию с высокой скоростью.

Разработка широкополосных усилителей всегда являлась сложной задачей, а постоянно возрастающие требования к усилителям лишь усложняют процесс проектирования. Усилители с распределенным усилением (УРУ), иначе известные как усилители бегущей волны, являются одними из наиболее популярных типов широкополосных усилителей.

В качестве основных характеристик УРУ можно выделить: рабочую полосу частот (Δf), коэффициент усиления (G) и его неравномерность (ΔG), коэффициент шума (NF), энергетические показатели ($U_{\text{пит}}$, $I_{\text{потр}}$). В качестве одной из основных динамических характеристик можно выделить параметр, определяющий мощность, при которой происходит однодецибелная компрессии коэффициента усиления ($P_{\text{вых 1дБ}}$). Перечисленные показатели УРУ определяют область и возможность его применения.

В процессе анализа используемых схемных решений, разработанных на основе различных технологических процессов, было рассмотрено более ста пятидесяти источников информации по СВЧ УРУ. Стоит отметить, что наиболее встречаемые схемные решения включают в себя от трех до десяти секций. Архитектура УРУ позволяет разрабатывать сверхширокополосные как МШУ и БУ, так и УМ. В качестве дополнительных функциональных блоков, интегрированных с УРУ, могут использоваться схемы ESD-защиты, активного питания и ДПМ [52]. Обобщенная структурная схема УРУ представлена на Рисунок 2.9.

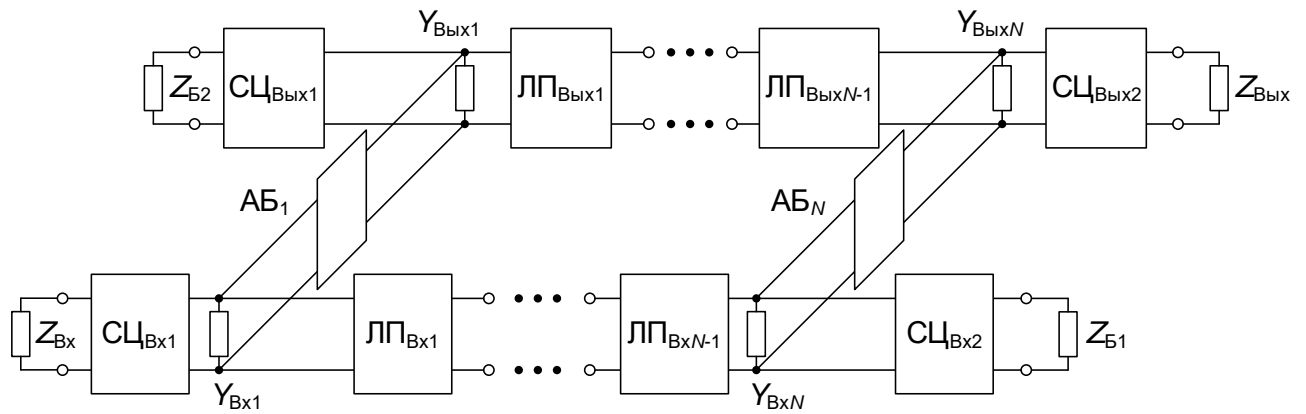


Рисунок 2.9 – Обобщенная структурная схема интегрального СВЧ УРУ

Из рисунка 2.9 видно, что усилитель включает в себя входную и выходную линии передачи (ЛП), активные блоки (АБ). Широкополосность УРУ достигается за счет того, что паразитные емкости транзистора образуют искусственную линию передачи, тем самым обеспечивая сложение коэффициентов усиления активных элементов [53].

Рассмотрим более подробно используемые структуры при разработке УРУ. На рисунке 2.10 представлены используемые структуры при построении входной и выходной ЛП и АБ на основе одного или двух активных элементов (АЭ) [52].

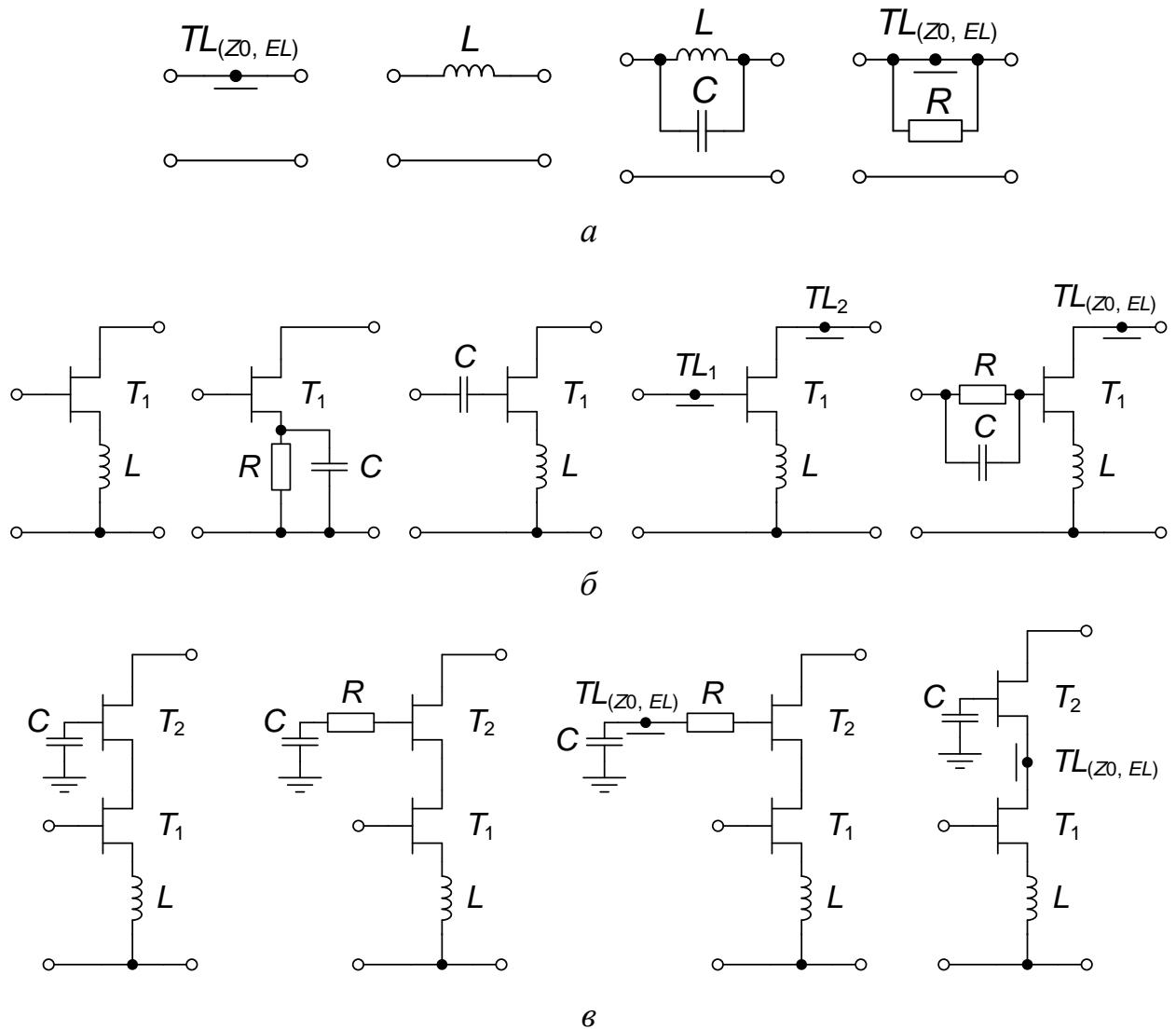


Рисунок 2.10 – Используемые структуры при разработке УРУ: *а* – входная и выходная ЛП; *б* – АБ на основе единичного АЭ; *в* – АБ на основе каскодного включения АЭ

Наиболее распространенным является использование АБ на основе единичного АЭ за счет простоты схемной реализации и уменьшения габаритов кристалла [54-58]. Использование АБ на основе каскодного включения АЭ позволяет уменьшить коэффициенты отражения и расширить частотную полосу УРУ за счет уменьшения паразитной емкости затвор-сток [59-61].

2.8 Обзор используемых схемотехнических решений и аналогов усилителей с распределенным усилением

В таблице 2.8 представлен фрагмент обзора из существующих на данный момент УРУ, реализованных на различных технологических процессах [62].

Таблица 2.8 – Характеристики имеющихся УРУ

Источник	Δf , ГГц	$G \pm \Delta G$, дБ	NF , дБ	$P_{\text{вых}}$ 1дБ, дБм	$U_{\text{пит}}$, В $I_{\text{потр}}$, мА	Технология
[63]	DC÷135	7±2	5..7	3	3.3 30	SiGe BiCMOS
[61]	5÷45	16±1	2..2,7	9,5	2 55	GaAs pHEMT
[64]	8÷42	6±1	–	23	15 300	GaN HEMT
[65]	0,1÷45	14±5	1,6...8	27	20 260	GaN HEMT
[66]	75÷100	16±0,5	–	30	13 1550	GaN HEMT
[67]	16÷40	24±1	–	38,5...42	10 -	GaN HEMT
[68]	0,5÷80	9±1	5	29,5	15 500	GaAs pHEMT
[69]	DC÷54	14±1	2..5	–	5 100	GaAs pHEMT

Анализируя используемые схемотехнические решения в коммерческих разработках, стоит отметить, что в преобладающем большинстве используется каскод, преимущества которого были рассмотрены ранее. По уровню выходной мощности, при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ, достаточно сильное преимущество у GaN технологии, за счет гораздо больших пробивных напряжений, по сравнению с GaAs и Si. Однако не у всех фабрик уже имеется стабильная GaN технология и, в связи с этим, подавляющее большинство коммерческих разработок УРУ изготавливается на GaAs. Необходимо отметить,

что коммерческие УРУ имеют менее широкую полосу, в отличии от результатов, представленных в публикациях [62].

2.9 Выводы и основные задачи исследования

Целью выпускной квалификационной работы является разработка детекторов проходящей мощности диапазона частот 4-20 ГГц с возможностью интеграции на одной полупроводниковой пластине совместно с различными функциональными блоками на основе отечественного технологического процесса 0,5 мкм GaAs рНЕМТ АО «Светлана-Рост». Разработка усилителя с распределенным усилением диапазона частот 1-20 ГГц на основе отечественного технологического процесса 0,15 мкм GaAs рНЕМТ АО «НИИПП».

В литературном обзоре были рассмотрены ключевые преимущества МИС, а также достоинства и недостатки основных материалов, на основе которых изготавливаются СВЧ МИС.

Проведено исследования и анализ используемых в настоящее время технологических процессов для изготовления различных типов устройств.

Рассмотрен типовой технологический маршрут изготовления МИС на основе GaAs. Представлены ключевые характеристики технологических процессов, на основе которых произведена разработка СВЧ МИС.

Приведены основные используемые схемотехнические решения интегральных СВЧ МИС ДПМ, позволяющие интегрировать ДПМ на полупроводниковой пластине с различными функциональными блоками (усилителями, генераторами, АТТ, ФВ и др.). Выполнен обзор аналогов СВЧ МИС ДПМ. Выполнен анализ используемых схемотехнических решений и аналогов СВЧ МИС УРУ.

Сформулируем основные задачи исследования:

1. Анализ и выбор оптимального схемного решения для включения ДПМ в приемопередающий тракт и последующей интеграции с различными функциональными блоками.

2. Разработка сверхширокополосной СВЧ МИС ДПМ, обеспечивающей детектирование в динамическом диапазоне от минус 5 до 20 дБм, на основе отечественного технологического процесса.

3. Построение модели транзистора для отечественной GaAs технологии изготовления СВЧ МИС.

4. Разработка сверхширокополосной СВЧ МИС УРУ, на основе отечественного технологического процесса.

3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ

В настоящей главе будет рассмотрена разработка СВЧ МИС пассивного и активного ДПМ, а также УРУ на основе рассмотренных ранее GaAs технологий.

3.1 Пассивный детектор проходящей мощности

Задачей проектировщика является выбор наиболее подходящего решения, с точки зрения лучших электрических параметров, минимизации габаритных размеров и простоты проектирования, с учетом особенностей технологического процесса [70].

В качестве включения в СВЧ тракт был выбран вариант включения непосредственно через емкость, так как при использовании имеющегося диода необходимо использовать цепи питания, что не позволяет реализовать схема включения через резистивный мост, также исходя из того, что детектор разрабатывался для сверхширокой полосы частот от 4 до 20 ГГц, вариант включения через ответвитель занимал бы существенно больше места на кристалле [47].

На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема разрабатываемого пассивного ДПМ.

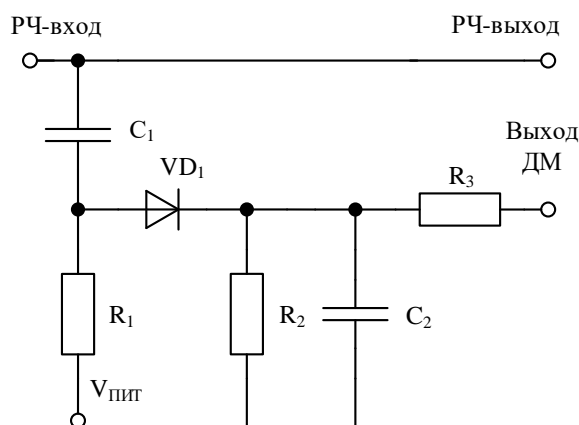


Рисунок 3.1 – Схема пассивного ДПМ

СВЧ сигнал подается на диод через разделительный конденсатор C_1 . Диод VD_1 обеспечивает выпрямление сигнала. Напряжение питания подается через резистор R_1 . Параллельное включение резистора R_2 и конденсатора C_2 образуют

сглаживающий фильтр, за счет увеличения постоянной времени. Резистор R_3 уменьшает ошибку измерений, уменьшая колебания напряжения. Диод Шоттки имеет топологические размеры 2×20 мкм, технологический процесс 0,5 мкм GaAs pHEMT АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург) [47].

На рисунке 3.2 изображены результаты моделирования ВАХ используемого диода.

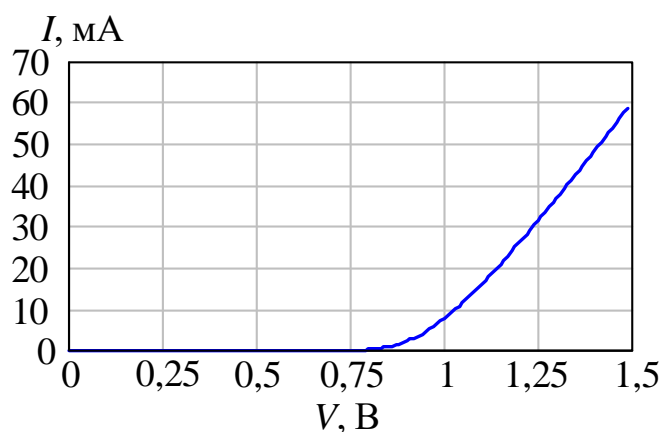


Рисунок 3.2 – Результаты моделирования ВАХ диода

Исходя из результатов, представленных на рисунке 3.2, был выбран режим оптимальной чувствительности диода. Моделирование детекторной характеристики и коэффициентов отражения и передачи выполнено для диапазона частот 4 – 20 ГГц, при различных напряжениях питания. На рисунке 3.3 изображены детекторные характеристики пассивного ДПМ при различных напряжениях питания.

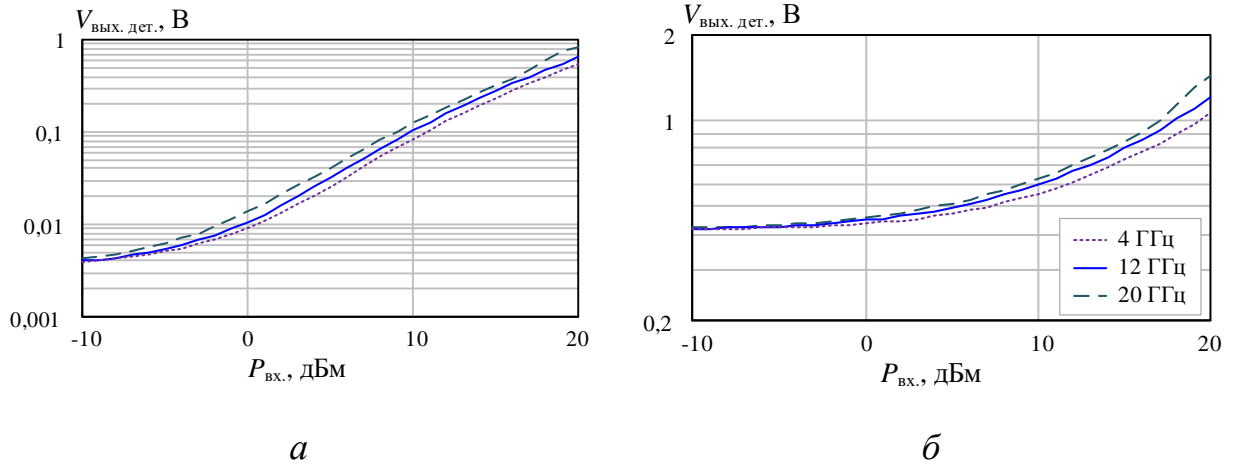


Рисунок 3.3 – Детекторная характеристика:

$$a - V_{\text{ПИТ}} = 0,55 \text{ В}; \quad б - V_{\text{ПИТ}} = 1,2 \text{ В}$$

Анализируя результаты моделирования выявлено, что полученные результаты соответствуют имеющимся аналогам, а также что начало квадратичного диапазона детектирования располагается при уровне входной мощности минус 5 дБм.

На рисунке 3.4 изображены результаты моделирования основных СВЧ характеристик.

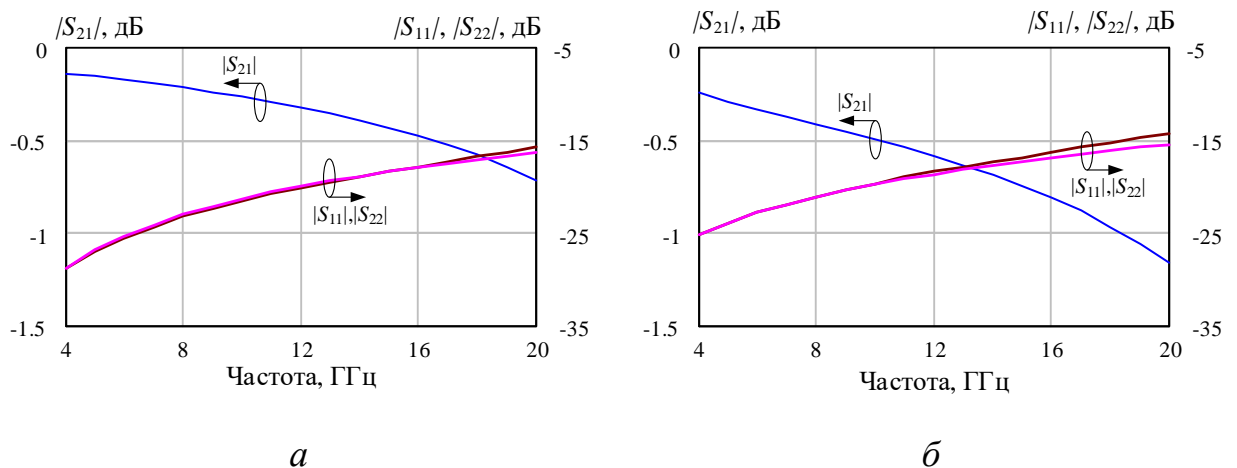


Рисунок 3.4 – Результаты моделирования основных СВЧ характеристик:

$$a - V_{\text{ПИТ}} = 0,55 \text{ В}; \quad б - V_{\text{ПИТ}} = 1,2 \text{ В}$$

Влияние на коэффициенты отражения и передачи основного СВЧ тракта минимально, а уровни превосходят некоторые аналоги.

На рисунке 3.5 изображена топология разрабатываемого пассивного ДПМ. Габариты кристалла составили $0,6 \times 0,8 \text{ мм}^2$.

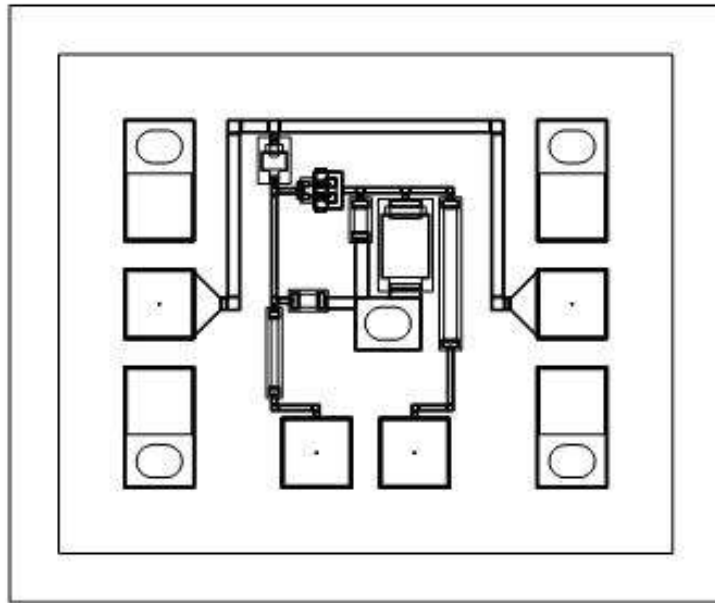


Рисунок 3.5 – Топология пассивного ДПМ

В дальнейшем спроектированное устройство было интегрировано на одной полупроводниковой пластине совместно с БУ и изготовлено, после чего произведена серия измерений.

На рисунке 3.6 представлена измерительная система, входная мощность на входе детектора варьировалась в диапазоне от 5 до 20 дБм, измерения проводились на частоте 11 ГГц.

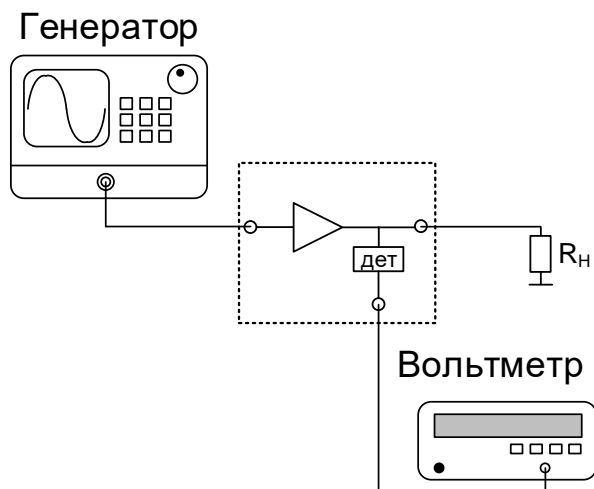


Рисунок 3.6 – Измерительная система

Результаты измерений представлены на рисунке 3.7.

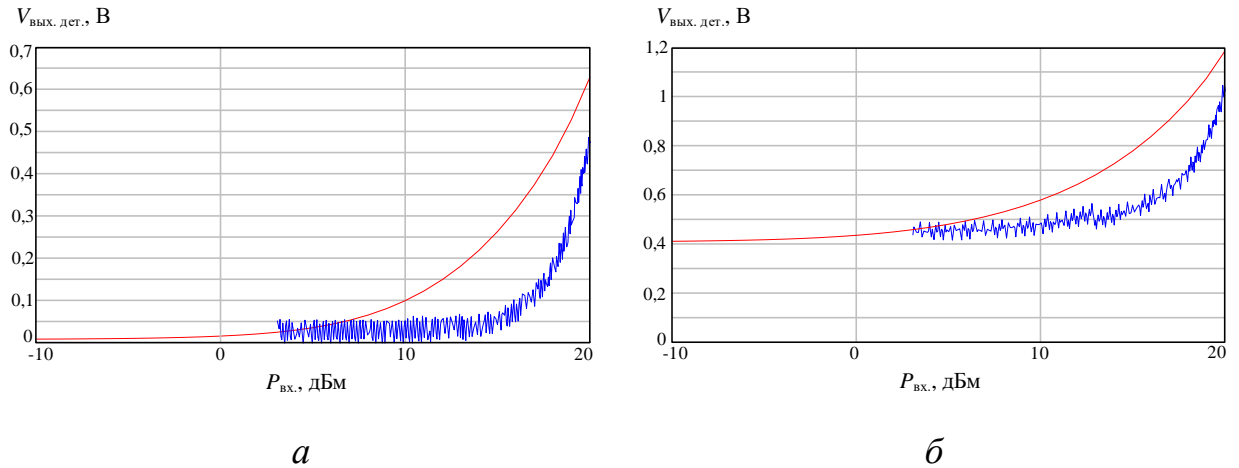


Рисунок 3.7 – Результаты моделирования и измерений детекторной характеристики: *a* – $V_{\text{пит}} = 0,55 \text{ В}$; *б* – $V_{\text{пит}} = 1,2 \text{ В}$

Анализируя результаты измерений и моделирования видно, что характер зависимости схож, однако, абсолютные значения имеют отличие. Это может являться следствием неточности работы используемой модели диода при пороговых напряжениях. Основным требованием для детекторной характеристики являлось обеспечение детектирования мощности в динамическом диапазоне от 5 до 20 дБм, что полностью реализовано в разработанном пассивном ДПМ. Стоит отметить, что результаты измерений основных СВЧ характеристик БУ достаточно хорошо совпали с результатами моделирования, что свидетельствует не только о точности моделирования, но и о корректной работе данных функциональных блоков на одном кристалле.

На рисунке 3.8 представлена фотография изготовленного пассивного ДПМ.



Рисунок 3.8 – Фотография пассивного ДПМ

3.2 Активный детектор проходящей мощности

Частотный диапазон работы детектора от 4 до 20 ГГц, динамический диапазон детектирования от минус 5 дБм до 20 дБм. Разработка активного ДПМ обусловлена необходимостью обеспечения высокого уровня детектируемых напряжения при слабых уровнях мощности в СВЧ тракте.

На основе данных, представленных в разделе 2, выбран тип включения активного ДПМ в СВЧ тракт непосредственно через емкость, аналогично пассивному ДПМ.

На рисунке 3.9 изображена принципиальная схема разрабатываемого активного ДПМ.

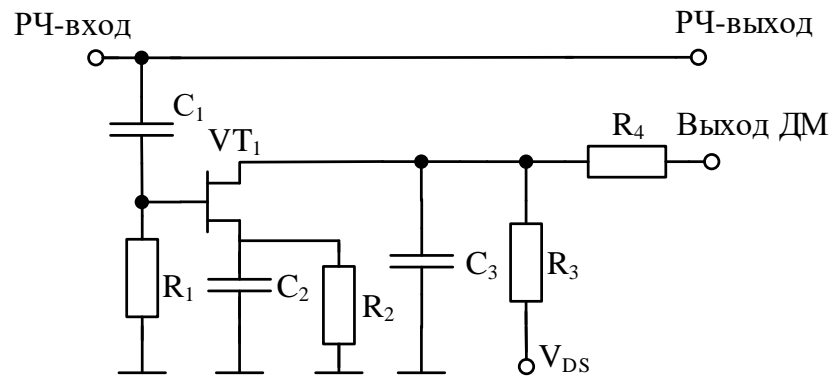


Рисунок 3.9 – Схема активного ДПМ

СВЧ сигнал подается на затвор транзистора через разделительный конденсатор C_1 . Транзистор VT_1 обеспечивает выпрямление сигнала. Напряжения смещения и питания подаются через резисторы R_1 и R_3 , соответственно. Параллельное включение емкости C_3 образует сглаживающий фильтр, путем увеличения постоянной времени. Резистор R_4 уменьшает пульсации напряжения на выходе детектора. Периферия затвора транзистора выбирается исходя из обеспечения оптимального потребления тока, а также требуемой детекторной характеристики [51].

На рисунке 3.10 изображена топология разрабатываемого активного ДПМ. Габариты кристалла составили $0,45 \times 0,70$ мм².

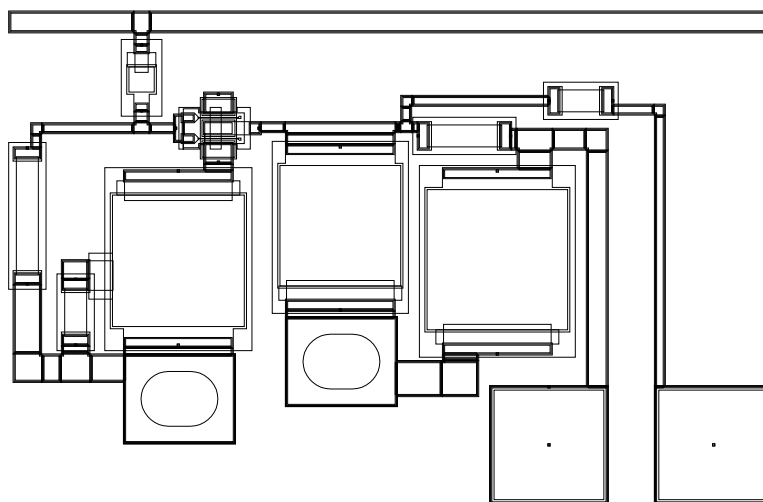


Рисунок 3.10 – Топология активного ДПМ

Тестовая МИС активного ДПМ была спроектирована на технологическом процессе 0,5 мкм GaAs pHEMT АО «Светлана-Рост», периферия затвора транзистора составила 2×30 мкм. В настоящем схемном решении, представленном на Рисунок 3.9, используется цепь автосмещения транзистора, состоящая из конденсатора C_2 и резистора R_2 , что позволило исключить необходимость использования отрицательного источника питания, а также уменьшить габаритные размеры функционального блока [51].

Результаты моделирования проходной ВАХ используемого режима, при $V_{си}=1,6$ В, представлены на рисунке 3.11.

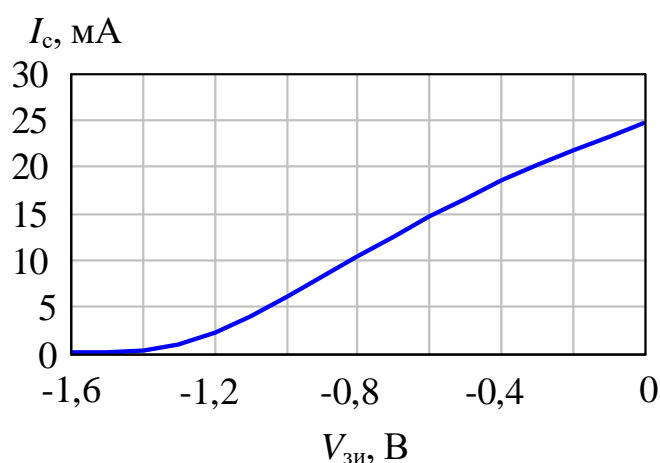


Рисунок 3.11 – Результаты проходной ВАХ транзистора

Исходя из результатов, представленных на рисунке 3.11, был выбран режим оптимальной чувствительности транзистора. Результаты моделирования детекторной характеристики и коэффициентов отражения и передачи для диапазона частот 4 – 20 ГГц представлено на рисунке 3.12.

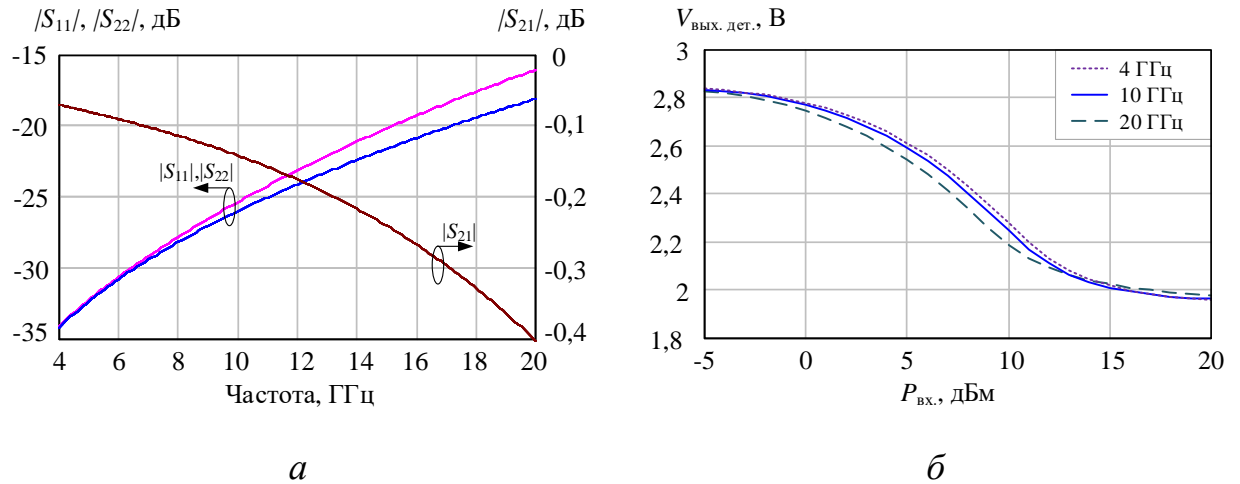


Рисунок 3.12 – Результаты моделирования активного ДПМ:

а – основные СВЧ характеристики; б – детекторная характеристика

В дальнейшем, разработанный активный ДПМ был интегрирован на одной пластине различными функциональными блоками. Фотография изготовленного активного ДПМ представлена на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Фотография активного ДПМ

В настоящий момент разработанное устройство находится на стадии измерений.

3.3 Усилитель с распределенным усилением

Разработана тестовая МИС четырех секционного УРУ для диапазона частот

1–20 ГГц. Вычислительный эксперимент показал, что схемотехническое решение с использованием четырех секций является оптимальным, с точки зрения меньшей неравномерности коэффициента усиления, уменьшения коэффициентов отражения, шума и обеспечения устойчивости усилителя. В качестве активного элемента использовался 0,15 мкм GaAs pHEMT транзистор, изображенный на рисунке 3.14, с периферией затвора 4×40 мкм, изготовленный в АО «НИИПП».

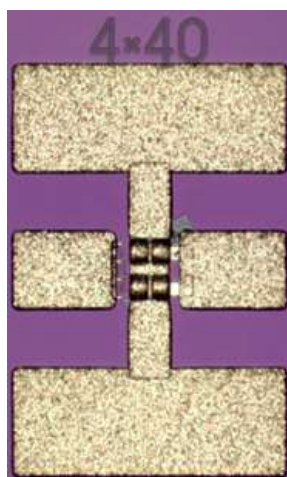
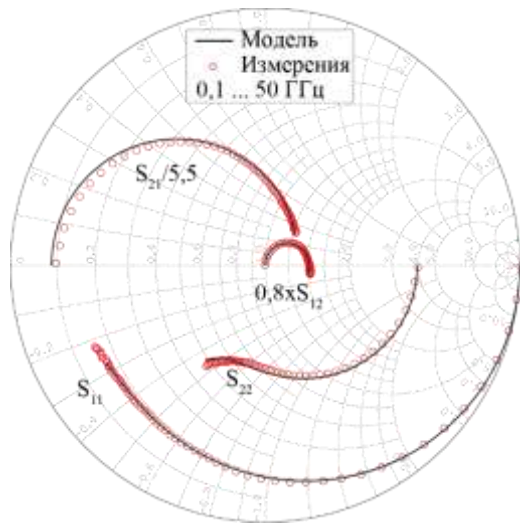
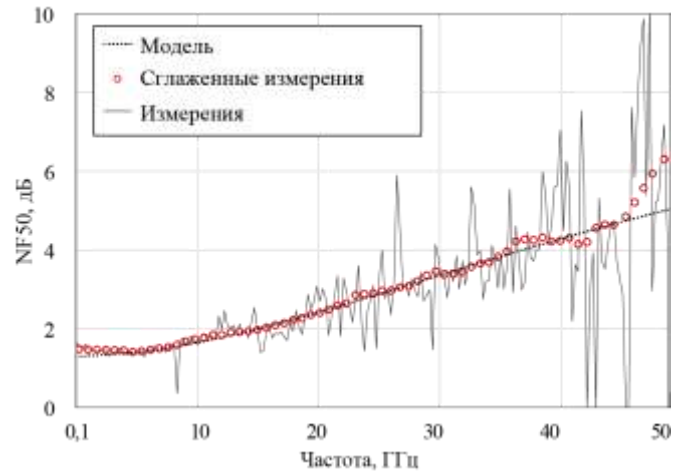


Рисунок 3.14 – Фотография используемого GaAs pHEMT транзистора

С помощью визарда «50ohm Tech Smart HEMT Modeling» [71], предназначенного для автоматического построения малосигнальных моделей GaAs pHEMT транзисторов непосредственно в САПР Cadence AWR Design Environment, была построена малосигнальная шумовая модель используемого транзистора в рабочей точке $V_{си}=3$ В, $I_c=20$ мА. В плагине реализована методика построения моделей описанная в [72]. На рисунке 3.15 приведено сравнение S -параметров построенной модели и результатов измерений, а также представлено сравнение коэффициента шума в тракте 50 Ом шумовой модели с исходными и обработанными данными измерений [63].



а

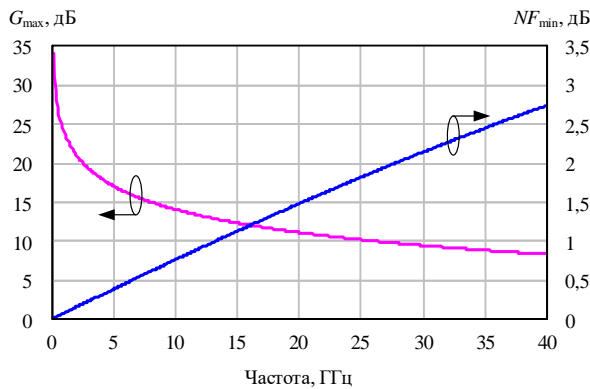


б

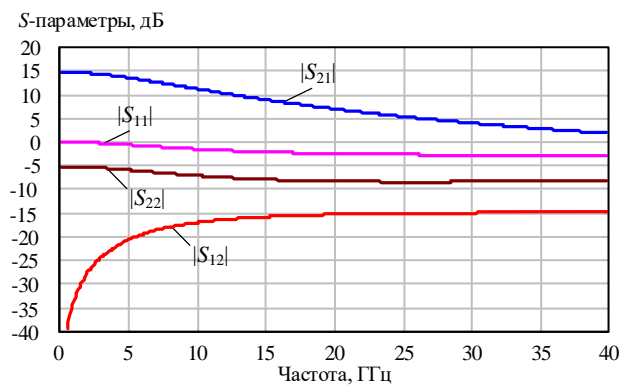
Рисунок 3.15 – Сравнение результатов измерений и моделирования в рабочей точке $V_{си}=3$ В, $I_c=20$ мА: а – S -параметры; б – коэффициент шума

Из полученных результатов видно, что модель достаточно точно описывает результаты измерений в диапазоне 0,1–50 ГГц.

На рисунке 3.16 представлены результаты моделирования частотных зависимостей основных малосигнальных параметров транзистора, в рабочей точке $V_{си}=3$ В, $I_{потр}=20$ мА.



а



б

Рисунок 3.16 – Частотные зависимости малосигнальных параметров:
а – Максимальный коэффициент усиления (G_{max}) и минимальный коэффициент шума (NF_{min}); б – частотная зависимость S -параметров

Ток потребления четырех секционного УРУ составил 80 мА, при напряжении питания 3 В. Результаты моделирования СВЧ характеристик представлены на рисунке 3.17.

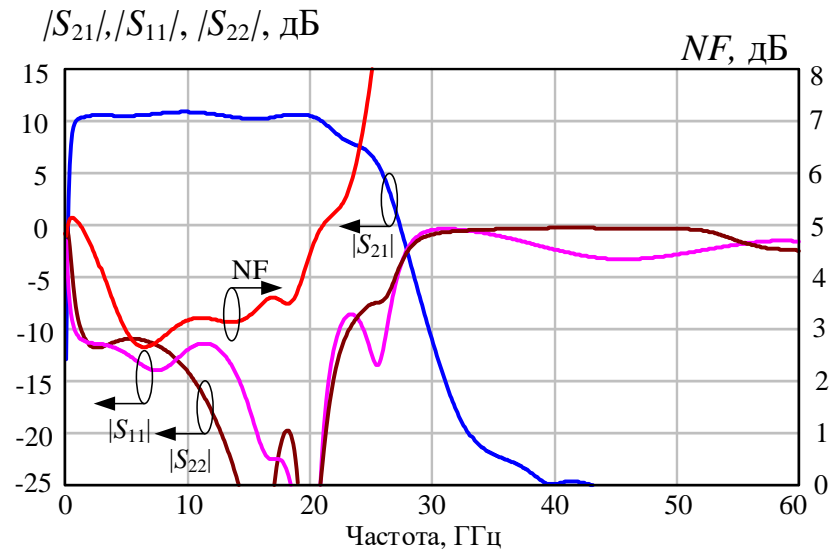


Рисунок 3.17 – Результаты моделирования СВЧ характеристик УРУ диапазона частот 1-20 ГГц

Топология разработанной МИС УРУ изображена на рисунке 3.18. Габариты кристалла составили $1,4 \times 2,3 \text{ мм}^2$.

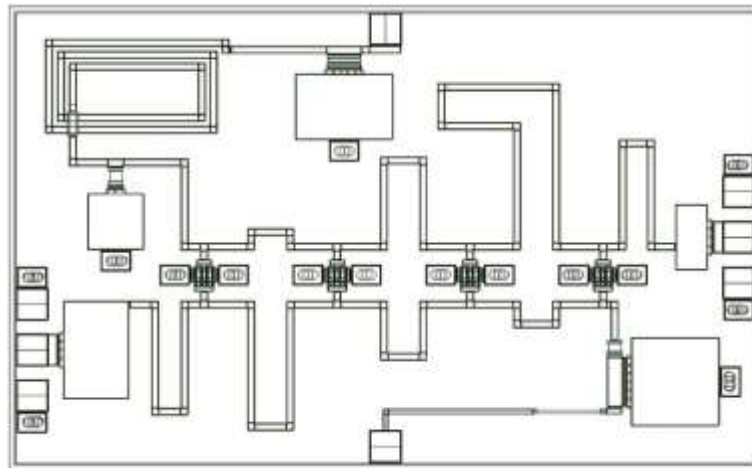


Рисунок 3.18 – Топология разработанной МИС УРУ

В настоящий момент, разработанная МИС УРУ находится на стадии утверждения проекта для изготовления.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был выполнен анализ и систематизация схемных решений интегральных СВЧ ДПМ и УРУ. Основываясь на проведенном анализе разработан пассивный ДПМ на основе отечественного технологического процесса 0,5 мкм GaAs рНЕМТ АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург). Динамический диапазон детектора составил от минус 10 дБм до 20 дБм, полоса рабочих частот от 4 ГГц до 20 ГГц, коэффициенты отражения по входу $|S_{11}|$ и выходу $|S_{22}|$ не более минус 14 дБ, коэффициент передачи $|S_{21}|$ не менее минус 1,2 дБ. При напряжениях питания 0,5 В и 1,2 В ток потребления составил 3 мкА и 400 мкА, соответственно. Габариты кристалла $0,6 \times 0,8$ мм². Тенденция детекторной характеристики, полученной при моделировании и измерениях, сохраняется.

На основе проведенного анализа схемных решений разработана СВЧ МИС активного ДПМ на базе технологии 0,5 мкм GaAs рНЕМТ АО «Светлана-Рост». Динамический диапазон детектора составляет от минус 5 дБм до 20 дБм, полоса рабочих частот от 4 ГГц до 20 ГГц, коэффициенты отражения по входу $|S_{11}|$ и выходу $|S_{22}|$ не более минус 16 дБ, коэффициент передачи $|S_{21}|$ не менее минус 0,4 дБ, ток потребления 1,2 мА. Габариты кристалла $0,45 \times 0,7$ мм². Использование активных ДПМ уменьшает ошибку детектирования при малых уровнях мощности, по СВЧ характеристикам данный тип детекторов не уступает пассивным ДПМ.

На основе выполненного анализа, разработана тестовая МИС четырех секционного УРУ, на основе отечественного технологического процесса 0,15 мкм GaAs рНЕМТ АО «НИИПП» (г. Томск), полоса рабочих частот от 1 до 20 ГГц. Напряжение питания схемы 3 В, ток потребления 80 мА. Коэффициент усиления составил $10,5 \pm 0,5$ дБ, коэффициенты отражения не более минус 10 дБ, коэффициент шума не более 5 дБ. Усилитель является абсолютно устойчивым во всей полосе частот. Габариты кристалла $1,4 \times 2,3$ мм².

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александров, Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: взгляд изнутри / Р. Александров // Компоненты и Технологии (53). – 2005. – С. 174–182.
2. Schuh, P. T/R-Module technologies today and future Trends / P. Schuh, H. Sledzik, R. Reber, K. Widmer, A. Fleckenstein, B. Schweizer, M. Oppermann // 2010 European Microwave Conference. – Paris, 2010. pp. 1540–1543.
3. Ayad, M. Packaged High Power Frond-End Module for Broadband 24GHz & 28GHz 5G solutions / M. Ayad, A. Couturier, P. Poilvert, L. Marechal, P. Auxemery // 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF). – Silicon Valley, 2018. pp. 299–303.
4. Van Heijningen, M. X-band GaAs Phase Driver MMIC optimized for GaN-based Phased-Array Radar Transmit Chain / M. Van Heijningen, J. Essing, F. E. Van Vliet // 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – Madrid, 2018. pp. 118–121.
5. Кочемасов, В. Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности. Часть 1 / В. Кочемасов, С. Дингес, В. Шадский // СВЧ-электроника (8). – 2019. – С. 108–112.
6. Кочемасов, В. Атенюаторы с электронным управлением – производители и характеристики / В. Кочемасов, Л. Белов // СВЧ-электроника (4). – 2017. – С. 82–95.
7. Кочемасов, В. Твердотельные СВЧ-фазовращатели / В. Кочемасов, В. Шадский // СВЧ-электроника (1). – 2017. – С.86–100.
8. Загородний, А.С. Измерители мощности сигналов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе диодных детекторов: диссертация кандидата технических наук: 05.12.07; [Место защиты: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники]. – Томск, 2014. – 120 с.
9. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк // 12 е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК. Пресс, 2008. – 942 с.
10. Bahl, I. J. Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers / I.J. Bahl // Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2009. – 671 p.

11. Hek, A.P. de. Design, Realization and Test of GaAs-based Monolithic Integrated X-band High Power Amplifiers / A.P. de Hek // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. – 322 p.
12. Булоус, А.И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. / А.И. Белоус, М.К. Мерданов, С.В. Шведов // Техническая энциклопедия. В 2-х книгах. Книга 2. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 728 с.
13. Yore, M. D. High-isolation low-loss SP7T pHEMT switch suitable for antenna switch modules / M. D. Yore, C. A. Nevers, P. Cortese // The 5th European Microwave Integrated Circuits Conference. – Paris, 2010. pp. 69–72.
14. Tomkins, A. A 94 GHz SPST switch in 65 nm bulk CMOS / A. Tomkins, P. Garcia, S. P. Voinigescu // 2008 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium. – Monterey, CA, 2008. pp. 1–4.
15. Botula, A. A thin-film SOI 180 nm CMOS RF switch technology / A. Botula, A. Joseph, J. Slinkman, R. Wolf, Z.-X. He, D. Ioannou, L. Wagner, M. Gordon, M. Abou-Khalil, R. Phelps, M. Gautsch, W. Abadeer, D. Harmon, M. Levy, J. Benoit, J. Dunn // 2009 IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. – San Diego, CA, 2009. pp. 1–4.
16. Ross, T. N. Design of X-Band GaN Phase Shifters / T. N. Ross, K. Hettak, G. Cormier, J. S. Wight // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 63, No. 1. – 2015. pp. 244–255.
17. Raynaud, C. Technology pathfinders for low cost and highly integrated RF Front End modules / C. Raynaud // 2014 IEEE International Electron Devices Meeting. – San Francisco, CA, 2014. pp. 1–4.
18. Peregrine Semiconductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.psemi.com> (дата обращения: 01.06.2020).
19. Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com> (дата обращения: 01.06.2020).
20. Qorvo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qorvo.com> (дата обращения: 02.06.2020).

21. Macom [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.macom.com> (дата обращения: 02.06.2020).
22. Wolfspeed [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wolfspeed.com> (дата обращения: 02.06.2020).
23. Ding, B. A Ka Band FMCW Transceiver Front-End With 2-GHz Bandwidth in 65-nm CMOS / B. Ding, S. Yuan, C. Zhao, L. Tao, T. Tian // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Vol. 66, No. 2. – 2019. pp. 212–216.
24. Sadhu, B. A 28GHz 32-Element Phased-Array Transceiver IC with Concurrent Dual Polarized Beams and 1.4 Degree Beam-Steering Resolution for 5G Communication / B. Sadhu, Y. Tousi, J. Hallin, S. Sahl, S. Reynolds, O. Renstrom, K. Sjogren, O. Haapalahti, N. Mazor, B. Bokinge, G. Weibull, H. Bengtsson, A. Carlinger, E. Westesson, J.-E. Thillberg, L. Rexberg, M. Yeck, X. Gu, D. Friedman, A. Valdes-Garcia // 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). – San Francisco, CA, 2017. pp. 128–129.
25. Kim, H. A 28-GHz CMOS Direct Conversion Transceiver With Packaged 2×4 Antenna Array for 5G Cellular System / H.-T. Kim, B.-S. Park, S.-M. Oh, S.-S. Song, J.-M. Kim, S.-H. Kim, T.-S. Moon, S.-Y. Kim, J.-Y. Chang, S.-W. Kim, W.-S. Kang, S.-Y. Jung, G.-Y. Tak, J.-K. Du, Y.-S. Suh, Y.-C. Ho // 2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). – Honolulu, HI, 2017. pp. 69–72.
26. United Monolithic Semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ums-gaas.com> (дата обращения: 02.06.2020).
27. Mini-Circuits [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.minicircuits.com> (дата обращения: 02.06.2020).
28. АО «НИИПП» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.niipp.ru> (дата обращения: 04.06.2020).
29. АО «Светлана-Рост» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.svetlana-rost.ru> (дата обращения: 04.06.2020).
30. Ali, F. HEMTs and HBTs: Devices, Fabrication and Circuits / F. Ali, A. Gupta // Artech House, Norwood, MA, 1991. – 392 p.

31. Ali, F. Microwave and Millimeter-Wave Heterostructure Transistors and Their Applications / F. Ali, I. Bahl, A. Gupta // Artech House, Norwood, MA, 1989. – 479 p.

32. Kesiter, F. Z. An evaluation of materials and processes for integrated microwave circuits / F. Z. Kesiter // IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 15, No. 7. – 1968. pp. 531–537.

33. Sobol, H. Applications of integrated circuit technology to microwave frequencies / H. Sobol // Proceedings of the IEEE, Vol. 59, No. 8. – 1971. pp. 1200–1211.

34. Sobol, H. Technology and design of hybrid integrated circuits / H. Sobol // Solid State Technology, Vol. 13. – 1970. pp. 49–57.

35. Андронов, Е.В. Теоретический аппарат измерений на СВЧ / Е.В. Андронов, Г.Н. Глазов // Т. 1. Методы измерений на СВЧ. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – 804 с.

36. Билько, М.И. Измерение мощности на СВЧ / М.И. Билько, А.К. Томашевский, П.П. Шаров, Е.А. Баимуратов // М.: Советское радио, 1976. – 168 с.

37. Agilent Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements. Application Note 1449-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.home.agilent.com> (дата обращения: 05.06.2020).

38. Zhang, J. A compact V-band active SiGe power detector / J. Zhang, V. Fusco, Y. Zhang // 2012 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. – Amsterdam, 2012. pp. 528–531.

39. Jonsson, R. SiGe wideband power detector and IF amplifier RFICs for Wband passive imaging systems / R. Jonsson, C. Samuelsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, A. Gustafsson, M. Kaynak, A. Rydberg // CAS 2013 (International Semiconductor Conference). – Sinaia, 2013. pp. 225–228.

40. Canales, F.D. A 75-90 GHz High Linearity MMIC Power Amplifier with Integrated Output Detector / F.D. Canales, M. Abbasi // 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). – Seattle, WA, 2013. pp. 1–4.

41. Метель, А.А. Анализ схемных решений СВЧ интегральных детекторов проходящей мощности / А.А. Метель // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: Матер. рег. научно-практической конф., 2018. – С. 419–423.
42. Ehlers, E. Low-loss directional bridge. Patent US 20060197627 A1; Sep. 7, 2006.
43. Ehlers, E. Integrated directional bridge / E. Ehlers, C. Hutchinson, R. Rhymes, T. Shirley, B. Wong // Patent US 20060197626 A1; Sep. 7, 2006.
44. 83036C Coaxial GaAs Directional Detector. Keysight Technologies. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/> (дата обращения 05.06.2020).
45. Zagorodny, A. Ultrawideband Power Detector With 70 dB Dynamic range / A. Zagorodny, N. Voronin, G. Goshin // 2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. – Sevastipol, 2014. pp. 77–78.
46. Zagorodny, A. 0.01-50 GHz Power Detector MMICs / A. Zagorodny, I. Yunusov, N. Drobotun, N. Drozdov, N. Voronin // 2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). – Lecce, 2015. pp. 1–4.
47. Метель, А.А. Анализ схемных решений и разработка СВЧ интегрального детектора проходящей мощности / А.А. Метель // Сборник избранных статей Научной сессии ТУСУР: В 2 т. – Т. 1. – Томск: Изд-во В-Спектр, 2019. – С. 69-72.
48. PI024-BD:26.0-31.0 GHz GaAs MMIC Power Amplifier. Mimix broadband. Datasheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.macom.com/> (дата обращения 06.06.2020).
49. Bahl, I.J. Broadband Power Detectors / I.J. Bahl // IEEE Microwave Magazine, Vol.8, No.3. – 2007. pp.82–86.
50. Qiliang, L. New method of designing 0.01GHz-40GHz wideband directional detector / L. Qiliang, F. Guoqing, Z. Weifeng, X. Yanfeng // 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). – Qingdao, 2015. pp. 916–920.

51. Метель, А. А. Проектирование широкополосного СВЧ интегрального активного детектора проходящей мощности: [Электронный ресурс] / А. А. Метель // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: Материалы VIII региональной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2019. – Ч. 2. – С. 558-561.

52. Добуш, И.М. Морфологический анализ интегральных СВЧ усилителей с распределенным усилением / И.М. Добуш, А.А. Калентьев, А.А. Метель, А.Е. Горяинов / Вопросы радиоэлектроники – 2020. На рецензии.

53. Хан, З. Синтез и оптимизация передающих линий для усилителя мощности с распределенным усилением / З. Хан, И. Ю. Малевич // Доклады БГУИР. – 2009. – № 7 (45). – С. 12–18.

54. Campbell, C.F. Evolution of the Nonuniform Distributed Power Amplifier: A Distinguished Microwave Lecture / C.F. Campbell // IEEE Microwave Magazine, Vol. 20, No. 1. – 2019. pp. 18–27.

55. Hamidi, E. Improvements in the Noise Theory of the MMIC Distributed Amplifiers / E. Hamidi, M. Mohammad-Taheri, G. Moradi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 56, No. 8. – 2008. pp. 1797–1806.

56. Duperrier, C. New design method of uniform and nonuniform distributed power amplifiers / C. Duperrier, M. Campovecchio, L. Roussel, M. Lajugie, R. Quere // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, No. 12. – 2001. pp. 2494–2500.

57. Nikandish, G. The (R)evolution of Distributed Amplifiers: From Vacuum Tubes to Modern CMOS and GaN ICs / G. Nikandish, R. B. Staszewski, A. Zhu // IEEE Microwave Magazine, Vol. 19, No. 4. – 2018. pp. 66–83.

58. Green, B.M, High efficiency monolithic gallium nitride distributed amplifier / B. M. Green, Sungjae Lee, K. Chu, K. J. Webb, L. F. Eastman // IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No. 7. – 2000. pp. 270–272.

59. Lin Y.-S. Bandwidth enhancement of cascode distributed amplifiers using inductive peaking technique and modified m-derived network / Y.-B.I. Liu, S.-H.

Weng, H.-Y. Chang // Asia-Pacific Microwave Conference 2011. – Melbourne, VIC, 2011. pp. 13–16.

60. Shivan, T. An Ultra-broadband Low-Noise Distributed Amplifier in InP DHBT Technology / T. Shivan, M. Hossain, D. Stoppel, N. Weimann, S. Schulz, R. Doerner, V. Krozer, W. Heinrich // 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – Madrid, 2018. pp. 241–244.

61. Nikandish, G. A 40-GHz Bandwidth Tapered Distributed LNA / G. Nikandish, A. Medi // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Vol. 65, No. 11. – 2018. pp. 1614–1618.

62. Метель, А.А. Анализ схемных решений и разработка СВЧ-интегрального усилителя с распределённым усилением на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии [Электронный ресурс] / А. А. Метель [и др.] // Электронные средства и системы управления: Материалы XV международной научно-практической конференции: В 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 42-45.

63. Hoffman, J. 55-nm SiGe BiCMOS distributed amplifier topologies for time-interleaved 120-Gb/s fiber-optic receivers and transmitters / J. Hoffman, S. Shopov, P. Chevalier, A. Cathelin, P. Schvan, S. P. Voinigescu // IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 51, No. 9. – 2016. pp. 2040–2053.

64. Dennler, P. 8–42 GHz GaN non-uniform distributed power amplifier MMICs in microstrip technology / P. Dennler, D. Schwantuschke, R. Quay, O. Ambacher // 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. – Montreal, QC, 2012, pp. 1–3.

65. Kobayashi, K.W. A novel 100 MHz-45 GHz input-termination-less distributed amplifier design with low-frequency low-noise and high linearity implemented with A 6 inch 0.15 um GaN-SiC wafer process technology / K. W. Kobayashi, D. Denninghoff, D. Miller // IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 51, No. 9. – 2016. pp. 2017–2026.

66. Schellenberg, J.M. A 2-W W-band GaN traveling-wave amplifier with 25-GHz bandwidth / J. M. Schellenberg // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 63, No. 9. – 2015. pp. 2833–2840.

67. Campbell, C.F. Design and performance of 16–40GHz GaN distributed power amplifier MMICs utilizing an advanced 0.15 um GaN process / C.F. Campbell, S. Nayak, M.-Y. Kao, S. Chem // 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). – San Francisco, CA, 2016. pp. 1–4.

68. Analog devices HMC-AUH312 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/hmc-auh312.pdf> свободный (дата обращения 05.06.2020).

69. OMMIC CGY2144UH/C2 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ommic.fr/download/CGY2144UH_C2_190410.pdf свободный (дата обращения 05.06.2020).

70. Метель, А. А. Анализ схемных решений СВЧ интегральных детекторов проходящей мощности: [Электронный ресурс] / А. А. Метель // *Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения*. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – С. 438-442.

71. 50ohm Technologies Smart HEMT Modeling [Электронный ресурс]. – Режим доступа свободный: <https://50ohm.tech/smarthemtmodeling> (дата обращения 08.06.2020).

72. Popov A.A. Small-signal and noise GaAs pHEMT modeling for low noise amplifier design / A. A. Popov, D.V. Bilevich, A.A. Metel, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.E. Goryainov, A.A. Kalentyev // *Актуальные проблемы радиофизики (АПР 2019): Сборник трудов VIII международной научно-практической конференции (01–04 октября 2019 г.)*. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2019. – С. 233–236.