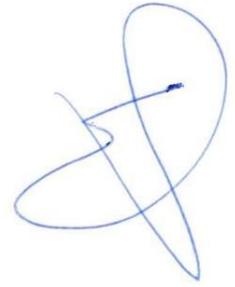


На правах рукописи



Ефимов Александр Сергеевич

**ИНТЕГРАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
СВЧ ПРИБОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА
ПЕРЕВЕРНУТОГО МОНТАЖА НА ОСНОВЕ
ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛОВ Au-Sn**

*Специальность 2.2.2 – Электронная компонентная база микро-
и нанoeлектроники, квантовых устройств*

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Фрязино – 2024

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»

Научный руководитель: **Лапин Владимир Григорьевич**,
доктор технических наук, эксперт АО «НПП
«Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Официальные
оппоненты: **Панасенко Петр Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, заместитель
ген. директора по разработке комплексированной
СВЧ ЭКБ АО «НИИМЭ», г. Зеленоград

Миннебаев Вадим Минхатович,
кандидат технических наук, доцент, заместитель
ген. директора по развитию ЭКБ
АО «Микроволновые системы», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
научное учреждение **Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой
электроники имени В.Г. Мокерова Российской
академии наук (ИСВЧПЭ РАН)**, г. Москва

Защита состоится 3 октября 2024 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета 74.1.008.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина»
по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д. 2а.
Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток»
им. Шокина» и на сайте <https://istokmw.ru/dissertation-council/dissertants/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
организации, отправлять по адресу: 141190, Московская обл., г. Фрязино,
Вокзальная ул., д. 2а, на имя учёного секретаря Куликовой Ирины
Владимировны (dissovet@istokmw.ru).

Автореферат разослан 29 июля 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Куликова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Полупроводниковая электронная компонентная база (ЭКБ) СВЧ является основой для построения радиоэлектронной аппаратуры для систем связи, радиолокации и других областей науки и техники. Развитие ЭКБ СВЧ усиливается в направлениях повышения уровней мощности, рабочих частот, расширения рабочей полосы частот, степени функциональности и миниатюризации. Гибридно-монокристалльные интегральные схемы (ГМИС) СВЧ являются важной частью современной отечественной ЭКБ СВЧ. Концепция ГМИС – интеграция отдельных кристаллов активных элементов (транзисторов и монокристалльных интегральных схем (МИС) СВЧ) с кристаллами и платами пассивных элементов.

Развитие гибридно-монокристалльных интегральных схем СВЧ в отечественной микроэлектронике СВЧ за период с 80-х годов по настоящее время представлено в работах А.М. Темнова, А.А. Кищинского, Ю.М. Богданова, К.В. Дудинова, С.В. Гармаша. Описаны как теоретические основы ГМИС СВЧ, так и практические результаты реализации преобразовательных, маломощных и мощных усилительных схем в диапазоне частот от 0,1 до 20 ГГц.

Традиционный способ гибридно-монокристалльной интеграции кристаллов СВЧ подразумевает монтаж отдельных кристаллов активных элементов и пассивных элементов, электрическое соединение между кристаллами с помощью проволочек. Проволочные соединения на данный момент является основным способом интеграции в микроэлектронике СВЧ. Главными достоинствами проволочного соединения являются его простота, зрелость технологии, совместимость с большинством кристаллов СВЧ. Проволочное электрическое соединение кристаллов ограничивает частотные характеристики ГМИС СВЧ из-за высоких значений реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений, препятствуя реализации максимальных характеристик транзисторов, диодов и МИС СВЧ и систем на их основе. Плотность интеграции ограничена планарностью конструкции и необходимым технологическим зазором между кристаллами. Отвод тепла осуществляется через подложку кристалла и соединяющий слой. Основными элементами, влияющими на общее тепловое сопротивление ГМИС СВЧ, в данном случае, являются толщина и теплопроводность подложки кристалла и соединяющего слоя.

В то время как рабочие частоты МИС СВЧ заметно продвигаются вверх по частотному диапазону, их электрический контакт друг с другом остается ограничивающим фактором применения широкополосной ЭКБ СВЧ

миллиметрового диапазона длин волн. Электрическое соединение отдельных кристаллов в единый модуль является важным переходом от параметров отдельных кристаллов к параметрам функциональной системы. Снижение массогабаритных характеристик СВЧ модулей, а также переход от однофункциональных схем к многофункциональным, ведёт к необходимости интеграции отдельных транзисторов и МИС СВЧ с минимальным влиянием межсоединений на электрические и эксплуатационные параметры модуля.

Актуальность исследования беспроводной интеграции в ГМИС СВЧ обусловлена необходимостью расширения диапазона частот, снижения потерь СВЧ и значений реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений, а также снижения массогабаритных характеристик.

Известны работы Ю.Б. Мякишева и К.В. Дудинова по беспроводному монтажу для построения отечественной твердотельной ЭКБ СВЧ. На основе представленных конструкций были реализованы схемы усилителей мощности, где дискретные кристаллы полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) на GaAs или GaN интегрированы на общую диэлектрическую подложку GaAs либо сапфира методом перевернутого монтажа (flip-chip) с применением термокомпрессии или термосварки. Достоинствами представленных решений является повышение степени интеграции, снижение реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений активных элементов с пассивной частью. Однако, данные способы не нашли широкого применения в производстве отечественной ЭКБ СВЧ, в том числе из-за ряда конструктивно-технологических ограничений.

Несмотря на достаточно большое количество теоретических и экспериментальных результатов по реализации конструкций беспроводных ГМИС СВЧ, на текущий момент отсутствует решение, в условиях существующих технологических ограничений, обеспечивающее реализацию конструкции ГМИС СВЧ с улучшенными электрическими характеристиками, улучшенным тепловым режимом, уменьшенными массогабаритными характеристиками. Таким образом, развитие способов интеграции, обеспечивающих улучшенные электрические характеристики, тепловые режимы, снижение массогабаритных характеристик современной ЭКБ СВЧ является актуальной задачей.

Цель работы – исследование и разработка конструктивно-технологических способов интеграции кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа с применением системы металлов Au-Sn

для улучшения характеристик гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ, в том числе расширения частотного диапазона.

Объект исследования – гибридно-монокристаллические интегральные схемы СВЧ.

Предмет исследования – новые конструктивные способы интеграции кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа для построения гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ, отдельные технологические аспекты изготовления.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих конструктивных и технологических решений интеграции полупроводниковых приборов в микроэлектронике СВЧ;
2. Исследование и разработка технических решений интеграции полупроводниковых приборов СВЧ методом перевернутого монтажа, обеспечивающих расширенный диапазон частот;
3. Исследование электрических и тепловых характеристик предложенных конструкций

Научная новизна диссертационной работы.

1. Предложен и реализован метод формирования соединяющего слоя на основе тонкоплёночной системы Au-Sn для монтажа методом взаимной переходной диффузии для применения в микроэлектронике СВЧ с минимальным топологическим размером до 10 мкм. Средняя прочность соединения на сдвиг составила 32,2 МПа.

2. Предложена оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя из тонкоплёночной системы Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии. Вносимые потери одного переходного соединения составляют менее 0,1 дБ на частотах до 50 ГГц. Максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 5 – 40 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

3. Предложена оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ лицевой стороной интегрируются на диэлектрическую подложку посредством соединяющего слоя Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии, а выводы ГМИС СВЧ расположены на обратной стороне диэлектрической подложки, соединённые с лицевой стороной сквозными металлизированными отверстиями. Вносимые потери одного переходного соединения составляют менее 0,5 дБ на частотах до 60 ГГц. Максимальная разность температур схемы

с толщиной подложки 100 мкм снижена на 10–45 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

Научная новизна работы подтверждена тем, что на предложенные конструкции ГМИС СВЧ получены два патента РФ на изобретение.

Положения, выносимые на защиту:

1. Соединяющий слой из тонкоплёночной системы металлов Au-Sn, сформированный с применением фотолитографических процессов, обеспечивает локальное соединение кристаллов транзисторов и МИС СВЧ с подложкой методом взаимной переходной диффузии, с минимальным топологическим размером до 10 мкм при прочности соединения на сдвиг свыше 32 МПа.

2. Конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ, в которой кристаллы транзисторов и МИС СВЧ соединяются с подложкой лицевой стороной с применением тонкоплёночной системы металлов Au-Sn методом взаимной переходной диффузии, обеспечивает вносимые потери межсоединения не более 0,1 дБ на частотах до 50 ГГц.

3. Конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, в которой контактные площадки на обратной стороне подложки связаны с элементами электрической схемы на лицевой стороне подложки сквозными металлизированными отверстиями, а кристаллы транзисторов и МИС СВЧ соединяются с подложкой лицевой стороной с применением тонкоплёночной системы металлов Au-Sn методом взаимной переходной диффузии, обеспечивает вносимые потери межсоединения менее 0,5 дБ на частотах до 60 ГГц.

Достоверность научных результатов. Степень достоверности научных результатов подтверждается: применением современных методов математического моделирования; использованием поверенного и аттестованного современного оборудования для получения экспериментальных данных; соответствием полученных расчётных результатов с экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты работы, полученные в ходе аналитических и численных исследований конструктивных и технологических способов интеграции кристаллов полупроводниковых приборов СВЧ, являются теоретической и практической базой разработки методов построения устройств микроэлектроники СВЧ на основе гетерогенной интеграции. Предложенный метод формирования соединяющего слоя на основе системы Au-Sn для монтажа методом взаимной переходной диффузией реализован в опытно-конструкторской работе по разработке гибридно-монолитных интегральных

схем СВЧ усилителей мощности X-диапазона частот, проводимой АО «НПП «Исток» им. Шокина». Разработаны конструкции гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ, позволяющие существенно расширить диапазон рабочих частот, снизить габаритные размеры и улучшить тепловые характеристики схем.

Предложенные и реализованные конструктивно-технологические решения интеграции кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа открывают перспективы создания отечественных ГМИС СВЧ миллиметрового диапазона длин волн. Результаты работы могут быть использованы при создании как однофункциональных, так и многофункциональных модулей СВЧ, в том числе в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Реализация и внедрение.

Результаты диссертационного исследования использованы при проведении опытно-конструкторских работ по созданию гибридно-монокристаллических интегральных схем СВЧ усилителей мощности X- и Ku-диапазонов частот, проводимых в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 30 и 31 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2020 и 2021 гг; X и XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, 2021 и 2023 гг; VIII Всероссийская микроволновая конференция, г. Москва, 2022 г; Всероссийская научно-техническая конференция «СВЧ-электроника», г. Фрязино, 2023 г; IX Российский форум «Микроэлектроника 2023», Федеральная территория «Сириус», 2023 г; XVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», г. Новосибирск, 2023 г.

Публикации. По результатам проведённых исследований опубликованы 18 научных работ, в том числе 6 в журналах, рекомендованных ВАК (1 без соавторов), 9 тезисов докладов в сборниках международных и всероссийских конференций, 2 из которых проиндексированы в Scopus, 3 патента РФ на изобретение.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников, двух

приложений. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 13 таблиц. Список использованных источников включает 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отмечены современные тенденции и проблемы развития твердотельной электронной компонентной базы СВЧ. Определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приведён обзор существующих конструктивных способов интеграции полупроводниковых приборов в микроэлектронике СВЧ; рассмотрены ключевые методы реализации метода перевернутого монтажа, сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Проведён анализ современных и перспективных конструктивных решений интеграции приборов на основе разных полупроводниковых технологий в микроэлектронике СВЧ. Снижение длины межсоединений, уменьшения габаритов, повышения тепловых характеристик, повышения вариативности, снижения себестоимости являются основными задачами развития конструктивных решений. В таблице 1 представлено краткое сравнение исследованных методов интеграции.

Таблица 1. Характеристики методов интеграции

	Минимальная длина межсоединений	Интеграция отдельных годных приборов	Интегрирующая подложка	Требования для реализации
Монолитная гетерогенная интеграция	~5 мкм	-	Si	Совместимость технологических циклов минимум двух полупроводниковых технологий
Монтаж пластина-к-пластине	~5 мкм	-	Si	Совместимость технологических циклов минимум двух полупроводниковых технологий
Интеграция переносом слоёв	~5 мкм	+	Любая	Совместимость технологических циклов минимум двух полупроводниковых технологий
Интеграция проволочными соединениями	~300 мкм	+	Любая	Нет
Интеграция в единую подложку	~70 мкм	+	Si/SiC/GaAs/C	Применение полупроводниковых технологических этапов изготовления. Повышенная точность размеров интегрируемых кристаллов
Интеграция методом печати	~100 мкм	+	Любая	Автоматизированная платформа для интеграции
Перевернутый монтаж	~5 мкм	+	Любая	Локальный соединяющий слой
Not-via	~75 мкм	+	Любая	Локальный соединяющий слой

Традиционный способ интеграции, проволочный, имеет ограничения по рабочим частотам и относительно высоким габаритным характеристикам. Развитие способов интеграции, обеспечивающих функциональности и улучшенные рабочие характеристики, является актуальной проблемой современной ЭКБ СВЧ. Развитие способов интеграции идёт как в монолитном направлении – монолитная гетерогенная интеграция и монтаж пластина-к-пластине, так и гибридно-монолитном – метод переноса слоёв, интеграция в единую подложку, применение аддитивных технологий, перевёрнутый монтаж и hot-via.

Монолитная гетерогенная интеграция и монтаж пластина-к-пластине не реализует концепцию ГМИС, в которой интегрируются заведомо годные приборы. Современные технологические ограничения и стоимость получаемого изделия являются ограничивающими факторами развития данных направлений. Метод переноса слоёв также требует больших технологических возможностей, что сдерживает его развитие и применение.

Интеграция методом печати обеспечивает промежуточные электрические характеристики и габаритные размеры между методом проволочной интеграции и остальными методами, что делает применение способа переходным этапом. Необходимость специализированного дорогостоящего оборудования и технологические ограничения оставляют крайне ограниченную область для применения.

Интеграция в единую подложку из-за разных вариантов реализации позволяет обеспечить уникальные характеристики, например, благодаря интеграции магнитных материалов. Данный метод подразумевает применение ряда технологических этапов полупроводникового производства, что ведёт к повышенной сложности технологических процессов интеграции.

Метод перевернутого монтажа обеспечивает минимальные потери и минимальные паразитные составляющие эквивалентной схемы переходных межсоединений в СВЧ диапазоне благодаря миниатюризации переходных межсоединений. Hot-via, как модификация метода перевернутого монтажа, обеспечивает лучшую совместимость со схемами на основе микрополосковых линий. Дальнейшее совершенствование и массовое применение метода перевернутого монтажа и hot-via во многом зависит от развития технологии формирования локальных переходных межсоединений.

Выполненный анализ показал, что вопросы способов интеграции микроэлектроники СВЧ широко освещены в современной литературе и имеют высокую актуальность в связи с неуклонным повышением требований к характеристикам СВЧ-устройств.

Интеграция методом перевернутого монтажа на сегодняшний день является интенсивно развивающимся способом в области построения СВЧ модулей на основе гибридно-монокристаллической концепции. Такие достоинства метода, как минимальные потери и минимальные значения реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений в СВЧ диапазоне, возможность использования кристаллов, реализованных по разным полупроводниковым технологиям и с разными размерами, одновременное соединение большого количества контактных площадок кристалла с подложкой, возможность монтажа на уровне пластины, плотность интеграции, близкую к монокристаллической, позволяют реализовывать компактные радиоэлектронные модули миллиметрового диапазона длин волн. Актуальными проблемами данной конструкции остаются улучшение отвода тепла от активной области и технология реализации электрических переходных межсоединений с шагом в единицы микрометров.

Основные задачи настоящего диссертационного исследования:

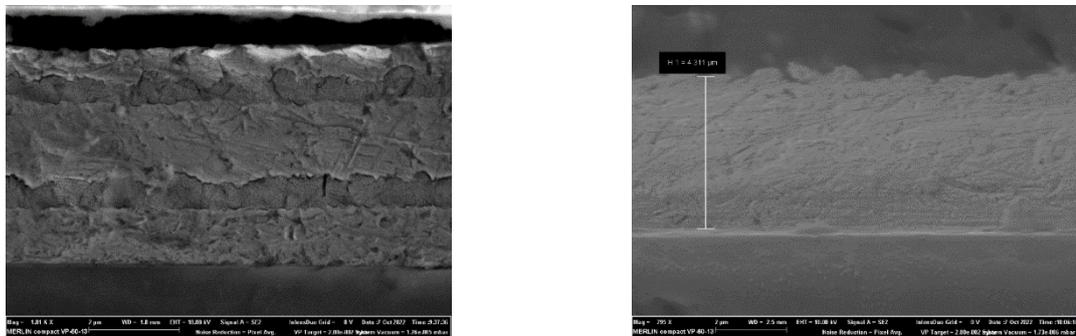
1. Исследование и разработка технических решений, обеспечивающих реализацию локального соединения кристаллов $A^{III}B^V$ с топологическим размером до 10 мкм;
2. Исследование физических свойств локального соединения;
3. Разработка конструкции беспроводной ГМИС СВЧ с локальными межсоединениями;
4. Исследование частотных характеристик конструкции с локальными межсоединениями;
5. Исследование тепловых характеристик конструкции с локальными межсоединениями.

Во втором разделе представлены результаты исследования и разработки технологии формирования соединительного слоя для МИС СВЧ с применением системы слоёв Au-Sn, сформированных с применением фотолитографических процессов, соединения кристаллов методом взаимной переходной диффузии на основе системы слоёв Au-Sn.

Соединение с возможностью локального контакта и улучшенными характеристиками с точки зрения теплового сопротивления в современной микроэлектронике СВЧ может быть реализовано либо с помощью метода термокомпрессии, либо методом взаимной переходной диффузии (англ. – Solid-Liquid Interdiffusion, букв. взаимодиффузия твёрдой и жидкой фаз). Метод взаимной переходной диффузии реализует соединение двух поверхностей путем реакции изотермического затвердевания между металлами с высокой и низкой температурами плавления. Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии имеет такие преимущества

по сравнению с термокомпрессией, как пониженная температура, меньшая требовательность к качеству поверхности. Несмотря на достаточно большое количество теоретических и экспериментальных результатов по реализации соединительного слоя на основе метода взаимной переходной диффузии, на текущий момент отсутствует решение, в условиях существующих технологических ограничений, обеспечивающее реализацию локального соединения кристаллов СВЧ с минимальным топологическим размером до 10 мкм.

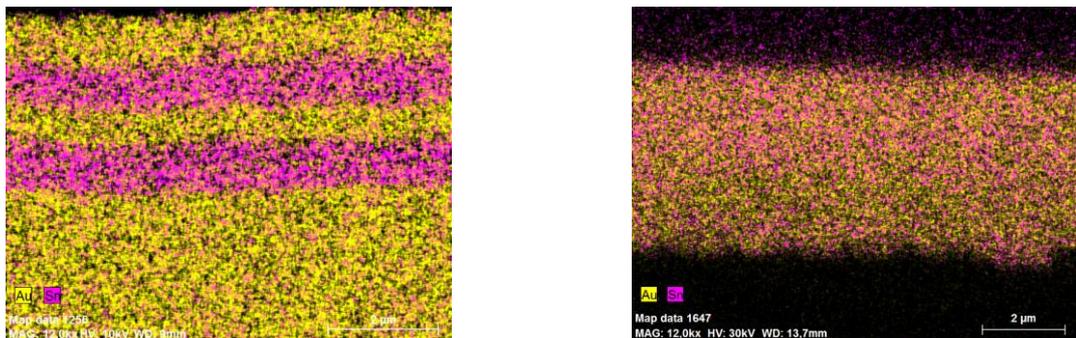
Предложена и реализована последовательная система чередующихся металлов золота и олова из пяти слоев металлических пленок с общей концепцией Au-Sn-Au-Sn-Au толщиной 1,0-1,0-1,0-1,0-0,3 мкм соответственно.



а)

б)

Рисунок 1. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au-Sn: до (а) и после термообработки (б)



а)

б)

Рисунок 2. Картирование элементного состава сечения образца с системой слоев Au-Sn до (а) и после термообработки (б)

Исследованы морфологические и фазовые характеристики сформированной системы. Проведён анализ поперечного сечения сформированной системы. Фотографии типичных образцов представлены на рисунках 1а и 2а. Фактическая толщина исследуемой системы составила около 4,5 мкм. Выявлено, что сформированная система слоёв состоит из чистого Au, Au_{0,853}Sn_{0,147} и AuSn. Примечательно, что отсутствует фаза

чистого Sn, что связано с взаимодействием в процессе напыления Au и Sn, их взаимной диффузией с образованием интерметаллических соединений.

Исследованы морфологические и фазовые характеристики сформированной системы после тепловой обработки. Фотографии типичных образцов представлены на рисунках 1б и 2б. В результате термообработки системы металлов Au-Sn на подложке при температуре 320 °С при выдержке 10 мин образуется единый однородный слой, состоящий из одной фазы ζ $Au_{0,853}Sn_{0,147}$. Имеет место уменьшение общей толщины системы слоев из-за уменьшения объема при образовании интерметаллических соединений. Результаты анализа показали, что в исследуемой системе Au-Sn из пяти последовательных слоёв процесс гомогенизации завершается за 10 минут. Фаза ζ , из которой состоит система после термообработки, имеет температуру плавления 522 °С, что обеспечивает высокую температурную стабильность соединяющего слоя.

Исследованы микроструктура, элементный состав и начальные механические свойства соединения. Монтаж проводился по трехступенчатому температурному профилю с максимальной температурой 320 °С и выдержкой 10 мин, давление 5 МПа. Результаты энергодисперсионного анализа поперечного сечения соединения двух кристаллов показывают, что среднее соотношение олова к золоту по поперечному сечению соединения составляет 10.7 ат.%.

Проведены эксперименты по определению значений прочности соединения. Средняя прочность соединения на сдвиг составила 32,2 МПа. Прочность соединения кристаллов, а также стойкость к внешним воздействующим факторам демонстрируют результаты, доказывающие перспективность использования данной технологии для приборов специального назначения, в том числе космического применения.

Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии с применением тонкоплёночной системы металлов Au-Sn обеспечивает:

- формирование соединяющего слоя на этапе изготовления пластины;
- локальность соединения с минимальным топологическим размером до 10 мкм;
- приемлемую температуру при монтаже (260 – 320 °С);
- высокотемпературную стабильность (свыше 500 °С);
- толщины соединения до единиц микрометров;
- прочное соединение, стойкое к внешним воздействующим факторам.

Монтаж методом взаимной переходной диффузии на основе системы Au-Sn обеспечивает интеграцию кристалла к кристаллу, близкую к монолитной, одновременно обеспечивая преимущества гибридно-

монолитной конструкции, в том числе возможность применения разных полупроводниковых технологий – гетерогенной интеграции.

В третьем разделе исследованы частотные и тепловые характеристики конструкций интеграции кристаллов СВЧ с межсоединениями, сформированными из преложной системы металлов Au-Sn; описана оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn; представлены экспериментальные результаты тестовых конструкций с копланарной линией и активным элементом.

Проведена оценка электрических составляющих межсоединений трёх типов – проволочный, метод перевернутого монтажа, hot-via. Результаты трёхмерного электродинамического расчёта электрических характеристик тестовых конструкций в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом представлены на рисунке 3. Вносимые потери переходного межсоединения при перевернутом монтаже составили менее 0,25 дБ до 100 ГГц, при методе hot-via – менее 1 дБ до 100 ГГц, при проволочном монтаже превысили 1 дБ на частотах свыше 48 ГГц, увеличиваясь до 8 дБ к частоте 100 ГГц. Определены параметры эквивалентных схем межсоединений. Значения параметров эквивалентной схемы при межсоединении методом перевернутого монтажа в 5 раз меньше, чем при проволочной интеграции, существенно снижая влияние на рассогласование в волновом тракте.

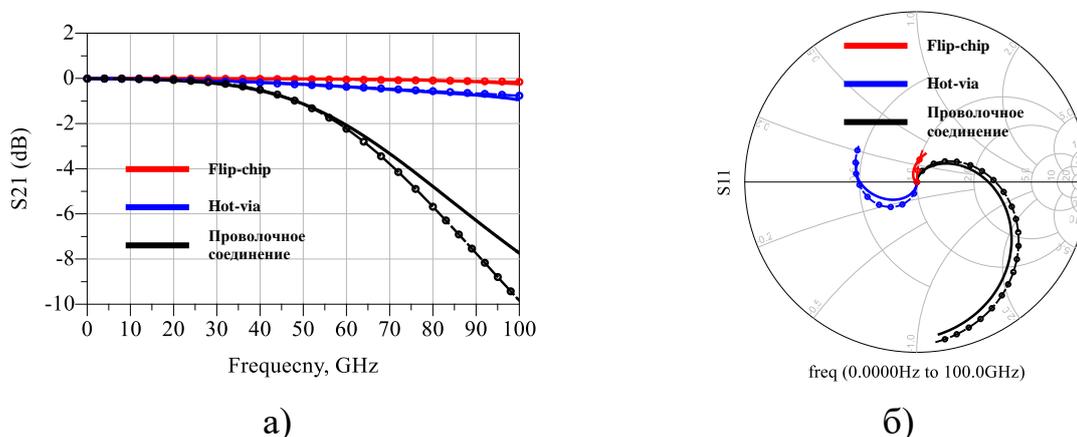


Рисунок 3. S-параметры межсоединений трёх типов: (а) – потери на проход в дБ, (б) – возвратные потери на диаграмме Смита. Непрерывные линии – электромагнитный расчёт, пунктирные линии – эквивалентная схема

Проведены исследования зависимостей электрических параметров микрополосковой и копланарной линий передач с волновым сопротивлением 50 Ом от расстояния до дополнительной диэлектрической подложки GaAs в диапазоне от 200 до 5 мкм. Эффект рассогласования не вносит критического влияния при отсутствии металлизации под линией передачи

на дополнительной диэлектрической подложке. В микрополосковой линии максимальное увеличение потерь при ближайшем расположении дополнительной диэлектрической подложки 5 мкм составило 0,4 дБ/мм на частоте 100 ГГц, в копланарной линии – 0,15 дБ/мм на частоте 100 ГГц.

Проведена оценка тепловых режимов конструкции, где кристалл активного элемента смонтирован на диэлектрическую подложку методом перевернутого монтажа через соединяющий слой на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn, в сравнении с традиционным методом интеграции. Для анализа конструкций использованы два типа активного элемента – GaN НЕМТ на подложке SiC и GaAs рНЕМТ. Проведён анализ стационарного теплового распределения. Задаваемая рассеиваемая мощность P_{diss} для расчётов с GaN НЕМТ составила 5 Вт/мм, для GaAs рНЕМТ – 1,67 Вт/мм.

Расчёт для традиционного метода интеграции, где кристалл транзистора монтировался на теплоотводящее основание Cu-Mo толщиной 250 мкм с помощью припоя 80AuSn толщиной 20 мкм, показал максимальную разность температур равной 99 °С для GaN НЕМТ и 143 °С для GaAs рНЕМТ соответственно.

Исследованы зависимости максимальной разности температур от толщины соединяющего слоя в пределах от 2 до 20 мкм при разных материалах диэлектрической подложки – Si либо SiC при интеграции кристалла активного элемента на диэлектрическую подложку методом перевернутого монтажа. Топология соединяющего слоя на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn реализована как зеркальное дублирование контактных площадок и металлизации истока транзистора с уменьшенными на 5 мкм. Толщина соединяющего слоя 5 мкм выбрана базовой как с точки зрения тепловых параметров, так и технологических возможностей. Исследование тепловых режимов конструкции ГМИС СВЧ, где кристаллы соединяются методом перевернутого монтажа с диэлектрической подложкой SiC и соединяющим слоем Au-Sn толщиной 5 мкм, продемонстрировало максимальную разность температур 92 °С для GaN НЕМТ и 102 °С для GaAs рНЕМТ соответственно, обеспечив снижение максимальной разности температур ГМИС СВЧ схемы на 7 °С для GaN НЕМТ и на 41 °С для GaAs рНЕМТ в сравнении с традиционным методом интеграции.

Описана оригинальная конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn. Схематичное представление конструкции проиллюстрировано на рисунке 4. ГМИС СВЧ содержит диэлектрическую подложку, где на лицевой стороне формируются

пассивные элементы. Кристалл активного элемента соединяется с контактными площадками диэлектрической подложки лицевой стороной методом взаимной переходной диффузии на основе системы металлов Au-Sn.

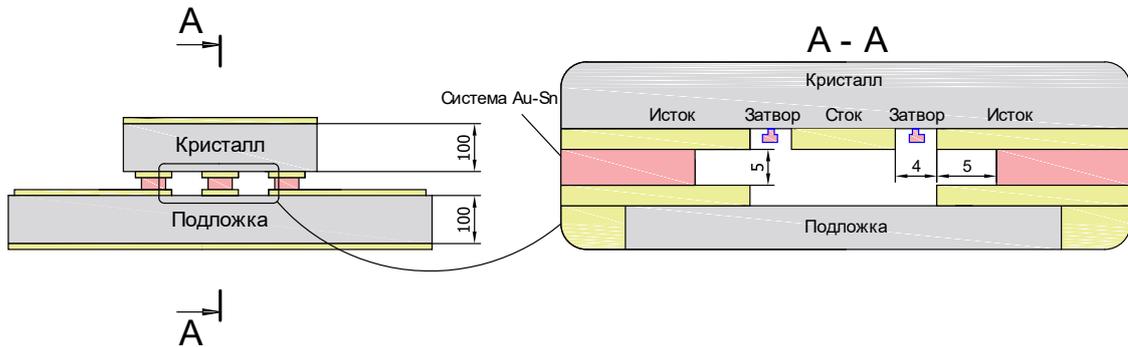


Рисунок 4. Схематичное представление конструкции ГМИС СВЧ с применением метода перевернутого монтажа

Для экспериментального подтверждения и проверки исследуемого метода, была разработана и изготовлена тестовая конструкция с копланарной структурой. Фотография тестовой конструкции интегрированного GaAs кристалла на сапфировый кристалл и результаты измерений S -параметров представлены на рисунке 5.

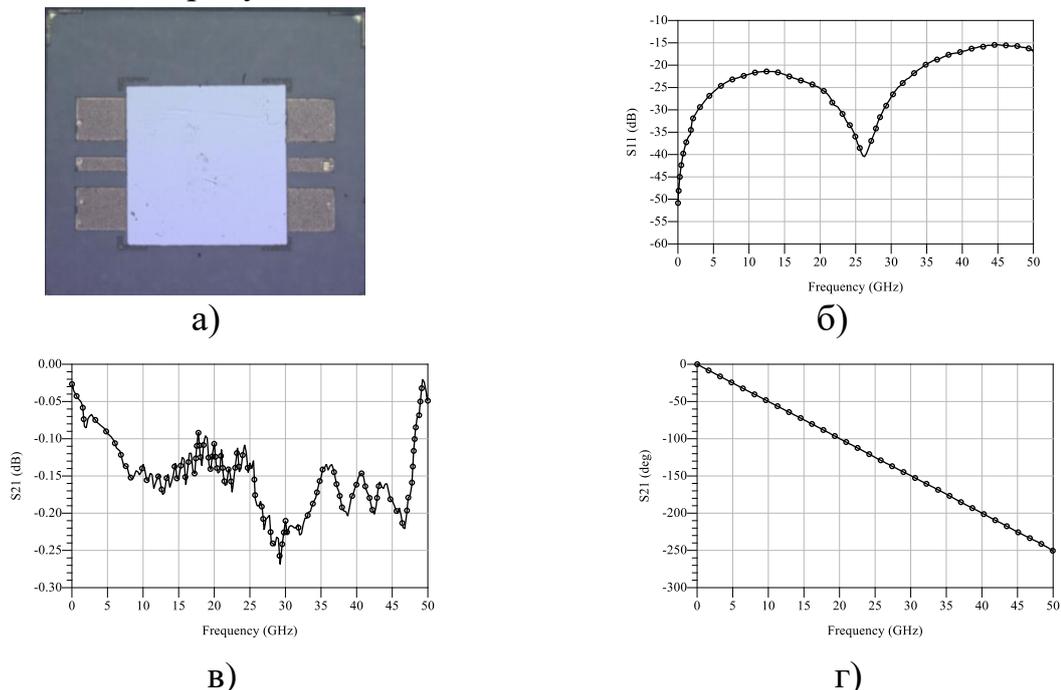


Рисунок 5. Фотография интегрированного GaAs кристалла на сапфировый кристалл (а) и S -параметры измерений тестовой конструкции: (б) – S_{11} (дБ), (в) – S_{21} (дБ), (г) – S_{21} ($^{\circ}$ эл.)

Результаты измерений показывают, что возвратные потери полученной системы не превышают -15 дБ в диапазоне частот до 50 ГГц, а потери на проход не более 0,3 дБ, указывая что потери в интегрированной копланарной линии составили менее 0,4 дБ/мм, включая два переходных

соединения. Прочность соединения была испытана проведением испытаний на механическую стойкость и термоциклы. Прочность соединения на сдвиг превышает 44 МПа, что показывает надёжность полученного монтажа.

Проведены эксперименты по интеграции активного элемента СВЧ методом перевернутого монтажа с применением системы металлов Au-Sn. Изготовлены экспериментальные образцы кристаллов на подложке сапфира для монтажа кристалла малошумящего GaAs pHEMT транзистора 3П3107АН5. Топология расположения соединяющего слоя зеркальна топологии контактных площадок транзистора 3П3107АН5. Монтаж кристаллов осуществлён по трёхступенчатому температурному профилю при максимальной температуре 270 °С, время воздействия – 5 мин, давление 5 МПа. Результаты измерения электрических параметров интегрированного транзистора совпали с расчётными электрическими характеристиками модели сборочной конструкции. На рисунке 6 представлены графики зависимостей электрических характеристик транзистора от частоты в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом, с учётом реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений в виде как проволочных соединений, так и переходного межсоединения из системы металлов Au-Sn.

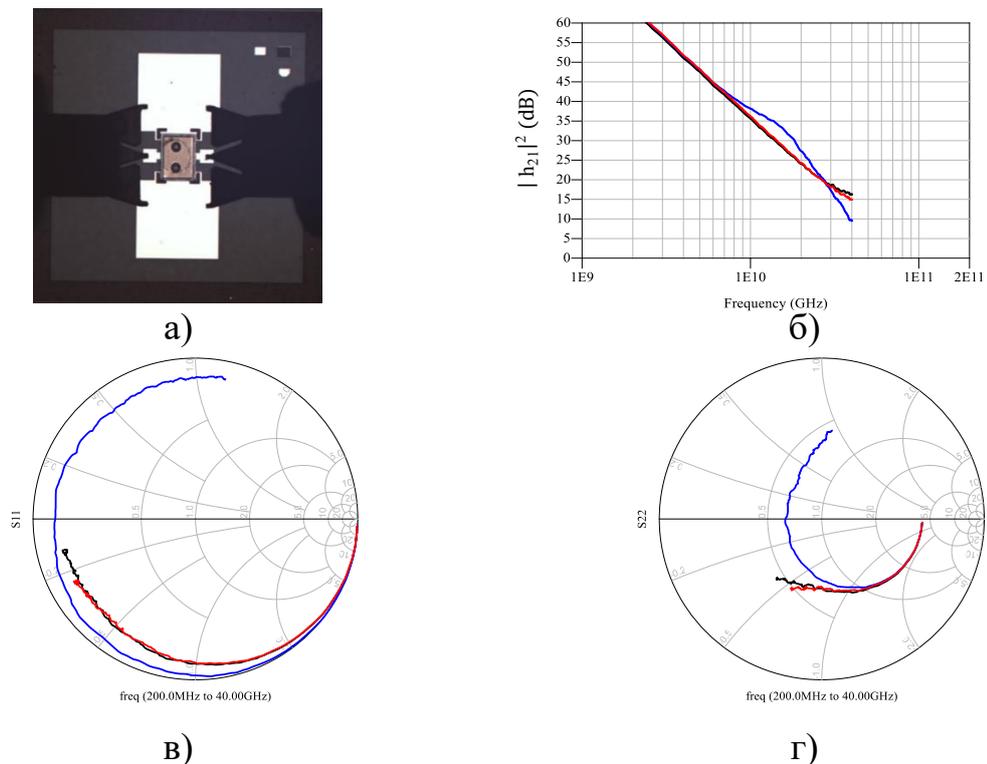


Рисунок 6. Фотография интегрированного кристалла транзистора при измерениях (а), (б) – $|h_{21}|^2$, (в) – коэффициент отражения по входу, (г) – коэффициент отражения по выходу. Чёрная линия – транзистор с межсоединениями для поверхностного монтажа, синяя линия – транзистор с проволочными соединениями, красная линия – измерения транзистора на пластине.

Результаты расчёта показали, что применение проволочных соединений вносит критичное влияние на импеданс транзистора по входу и выходу начиная с 10 ГГц, что ограничивает возможность его согласования в широкой полосе частот. Значения $|h_{21}|^2$ свидетельствуют о том, что использование проволочных соединений снижает предельную частоту усиления по току транзистора. Транзистор, интегрированный методом перевернутого монтажа, имеет почти идентичные электрические характеристики во всём диапазоне частот с транзистором, измеренным на пластине, что свидетельствует о минимальном внесении паразитных составляющих.

В четвертом разделе представлен анализ зарубежных и отечественных конструктивных способов реализации интегральных схем СВЧ для поверхностного монтажа; исследованы зависимости частотных характеристик схем от параметров отдельных элементов конструкции; описана оригинальная конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа; исследованы частотные и тепловые характеристики предложенной конструкции.

Предложена конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, включающая диэлектрическую подложку, кристалл активного элемента (транзисторы и МИС СВЧ) и крышку, выполненную из высоколегированного кремния (рисунок 7). На лицевой стороне диэлектрической подложки реализованы все пассивные элементы схемы и контактные площадки, на обратной – сигнальные выводы. Электрическое соединение лицевой и обратной сторон обеспечено сквозными металлизированными отверстиями. Кристалл активного элемента лицевой стороной интегрирован к контактным площадкам на лицевой стороне диэлектрической подложки, на которых реализован соединяющий слой – система металлических слоёв Au-Sn. Обратная сторона активного элемента соединена с углублением крышки. Крышка соединена с периферией диэлектрической подложки, обеспечивая защиту от внешних воздействующих факторов пассивных и активных элементов ГМИС СВЧ и, как следствие, расширение области применения.

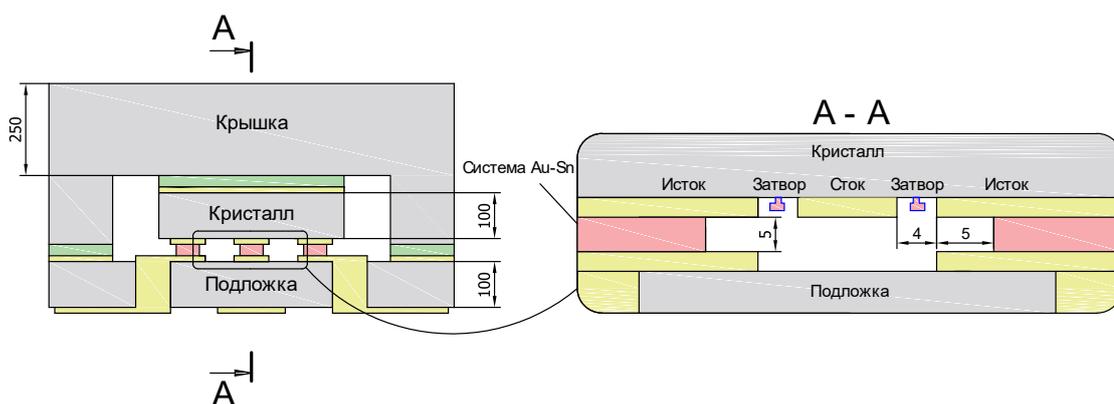


Рисунок 7. Схематическое представление конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа

Оценены электрические параметры конструкций путем проведения трехмерного электродинамического расчёта. Результаты расчёта S-параметров конструкции представлены на рисунке 8. Исследуемая конструкция обеспечивает вносимые потери в межсоединении с кристаллом активного элемента не превышающие 0,5 дБ в диапазоне частот до 60 ГГц.

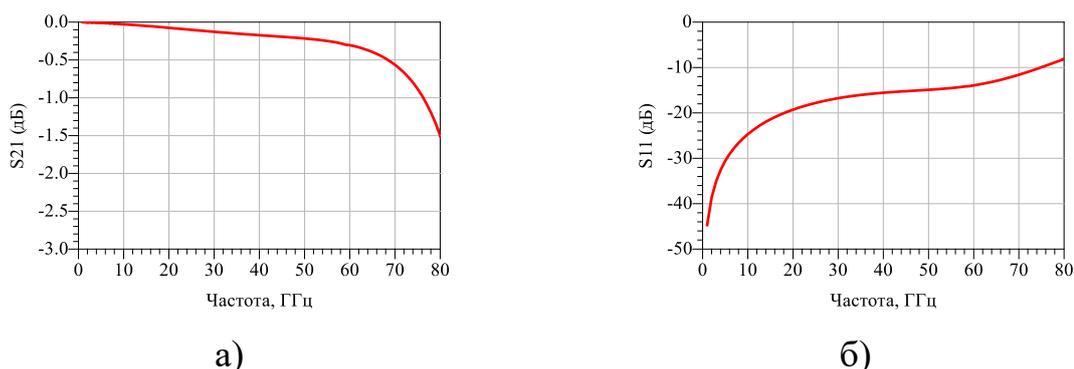


Рисунок 8. Частотные характеристики ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа: (а) – потери на проход, (б) – возвратные потери

Проведена оценка тепловых режимов предложенной оригинальной конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа. Исследование тепловых режимов ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа показало, что максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 10 – 45 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

В заключении представлены основные результаты работы:

1. Предложен и реализован метод формирования соединяющего слоя на основе системы Au-Sn для монтажа методом взаимной переходной диффузией для применения в микроэлектронике СВЧ, обеспечивающий локальность электрического и механического соединения $A^{III}B^V$ кристаллов СВЧ с минимальным топологическим размером до 10 мкм. Проведённые исследования системы слоёв Au-Sn показали, что соединение с применением системы состоит из фазы ζ , что обеспечит наилучшие характеристики

по механической прочности среди фаз с высоким содержанием золота. Средняя прочность соединения на сдвиг составила 32,2 МПа.

2. Исследованы переходные межсоединения с разработанной системой слоёв Au-Sn. Применение метода перевернутого монтажа обеспечило потери в межсоединении менее 0,1 дБ в диапазоне частот до 50 ГГц. Максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 5 – 40 °С по сравнению с традиционным методом интеграции. Предложена конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ, в которой $A^{III}B^V$ кристаллы СВЧ лицевой стороной интегрированы на диэлектрическую подложку кремния (либо карбида кремния) посредством соединяющего слоя Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии. Представленные на основе тестовой конструкции ГМИС СВЧ экспериментальные данные электрических характеристик подтвердили работу конструкции в диапазоне до 50 ГГц, с прочностью соединения более 32 МПа.

3. Предложена конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, включающая диэлектрическую подложку, кристалл активного элемента (транзисторы и МИС СВЧ) и крышку, выполненную из высоколегированного кремния. Кристалл активного элемента лицевой стороной интегрирован к контактными площадками на лицевой стороне диэлектрической подложки, на которых реализован соединяющий слой – система металлических слоёв Au-Sn, сформированный на этапе производства пластины. Обратная сторона активного элемента соединена с углублением крышки. Расчёт электрических характеристик продемонстрировал, что вносимые потери в межсоединении с кристаллом активного элемента не превышают 0,5 дБ в диапазоне частот до 60 ГГц. Расчёт тепловых режимов конструкции показал, что максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 10 – 45 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

Дальнейшие перспективные направления работы могут быть связаны с исследованием и созданием электронной компонентной базы СВЧ на предлагаемых конструкциях, исследованием возможностей последующего снижения теплового сопротивления конструкций.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Ефимов А. С., Темнов А.М., Дудинов К.В. и др. Гибридно-монокристаллическая интегральная схема усилителя Ки-диапазона с выходной мощностью 1 Вт // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2019. – №. 3. – С. 105-111. – EDN UNAMNV.

2. Ефимов А. С., Темнов А.М., Дудинов К.В. и др. Разработка гибридно-монокристаллической интегральной схемы усилителя диапазона 8... 12 ГГц с выходной мощностью 2,5 Вт // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2020. – №. 3. – С. 34-39. – EDN SDMCEL.

3. Ефимов А. С., Темнов А.М., Дудинов К.В. и др. Гибридно-монокристаллические схемы усилителей с выходной мощностью 10 и 20 Вт в X-диапазоне // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2021. – №. 2. – С. 32-37. – EDN XMFRUN.

4. Ефимов А. С., Темнов А. М., Зайцев А. А. и др. Система Au-Sn для монтажа кристаллов на пластине в микроэлектронике СВЧ методом взаимной переходной диффузии // Нано- и микросистемная техника. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 171-180. doi: 10.17587/nmst.25.171-180. – EDN ULVCXM.

5. Ефимов А.С., Груша А.В., Чибирев Р.А. Исследование тепловых характеристик беспроводной интеграции мощных СВЧ кристаллов // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.3>.

6. Ефимов А. С. Конструктивные подходы к интеграции приборов на основе разных полупроводниковых технологий в микроэлектронике СВЧ // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26. – №. 4. – С. 33-55. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-4-33-55>.

Публикации, индексируемые в международных базах данных:

7. A. S. Efimov et al., "Flip-Chip Integration of III-V Chips on Wafer for mmW Applications," 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 220-222, doi: 10.1109/RMC55984.2022.10079408.

8. A. S. Efimov and A. V. Grusha, "Thermal Analysis of 3D Heterogeneous Integration for Microwave HEMTs," 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 120-123, doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347800.

Патенты и свидетельства:

9. Патент № 2776861 С1 РФ, МПК H01P 1/15. Самоуправляемый переключатель СВЧ: № 2021122983: заявл. 29.07.2021: опубл. 28.07.2022 / К. В. Дудинов, А. М. Темнов, Ю. М. Богданов, А.С. Ефимов, Е.Ю. Днестранская.

10. Патент №2782184 С1 РФ, МПК H01L 27/12. Интегральная схема СВЧ: №2021135646: заявл. 03.12.2021: опубл. 21.10.2022 / А.С. Ефимов, А. М. Темнов, К.В. Дудинов.

11. Патент №2782187 С1 РФ, МПК H01L 27/12. Интегральная схема СВЧ: №2021139182: заявл. 28.12.2021: опубл. 21.10.2022 / А.С. Ефимов, А. М. Темнов, К.В. Дудинов.

Другие публикации по теме диссертации:

12. Дудинов К. В., Темнов А.М., Ефимов А.С. и др. Широкополосные малошумящие усилители VHF-С диапазона частот //СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – №. 1-2. – С. 25-26. – EDN ACQСМО.

13. Дудинов К. В., Темнов А.М., Ефимов А.С. и др. Малошумящий усилитель С-Ки диапазона частот //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – С. 79-83. – EDN MQZIXM.

14. Ефимов А. С., Темнов А. М., Дудинов К. В. Сверхширокополосный малошумящий усилитель 0.1-18 ГГц с каскодным включением //СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – №. 3. – С. 25-26. – EDN JZPDHA.

15. Полевич С. А., Дудинов К. В., Ефимов А. С. Стойкость СВЧ интегральных схем к воздействию одиночных импульсов напряжения // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – №. 3. – С. 321-322. – EDN MUBBAR.

16. Ефимов А.С., Темнов А.М., Рудина А.Д. и др. ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа // Сборник тезисов научно-технической конференции «СВЧ-электроника-2023», Фрязино, 2023 г, стр. 32-33.

17. Ефимов А. С., Чибирев Р. А., Темнов А. М. Конструктивные подходы интеграции беспроводных ГМИС СВЧ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т. 1. – С. 170-174. – EDN TZSFOF.

18. Ефимов А.С., Рудина А.Д., Воронин А.А. и др. Интеграция А³В⁵ кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа // Сборник тезисов Российского форума «Микроэлектроника 2023», Сириус, 2023, С. 855-857.