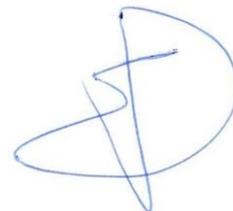


АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ «ИСТОК» ИМЕНИ А.И. ШОКИНА»

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*

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Лапин Владимир Григорьевич

Фрязино – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Современное состояние способов интеграции полупроводниковых СВЧ приборов.....	12
1.1. Анализ конструктивных способов интеграции полупроводниковых СВЧ приборов.....	12
1.1.1. Актуальность развития интеграции .....	12
1.1.2. Монолитная гетерогенная интеграция.....	15
1.1.3. Монтаж пластина-к-пластине .....	19
1.1.4. Интеграция переносом слоёв .....	21
1.1.5. Интеграция проволочными соединениями.....	24
1.1.6. Интеграция в единую подложку.....	26
1.1.7. Интеграция методом печати.....	31
1.1.8. Метод перевернутого монтажа .....	32
1.1.9. Интеграция методом «hot-via».....	39
1.1.10. Выводы.....	41
1.2. Анализ конструктивных вариантов перевернутого монтажа .....	43
1.3. Заключение по главе 1 и постановка задачи.....	50
ГЛАВА 2. Взаимная переходная диффузия Au-Sn .....	52
2.1. Современные способы соединения кристаллов $A^{III}B^V$ .....	52
2.2. Система Au-Sn .....	58
2.3. Исследование многослойной системы Au-Sn.....	60
2.3.1. Предлагаемая структура соединяющего слоя из системы Au-Sn	60
2.3.2. Исследования сформированной структуры Au-Sn.....	61
2.3.3. Исследования сформированной структуры Au-Sn после термообработки.....	66

2.3.4. Исследования соединения кристаллов взаимной переходной диффузией Au-Sn .....	70
2.4. Заключение по главе 2 .....	72
ГЛАВА 3. Беспроволочная гибридно-монокристаллическая интегральная схема СВЧ с применением межсоединений на основе системы Au-Sn .....	76
3.1. Исследование частотных характеристик межсоединений для интеграции методом перевернутого монтажа.....	76
3.1.1. Влияние электрических характеристик межсоединений .....	76
3.1.2. Влияние эффекта рассогласования.....	79
3.1.3. Выводы .....	83
3.2. Исследование тепловых характеристик конструкции с применением интеграции методом перевернутого монтажа.....	84
3.2.1. Тестовый активный элемент .....	85
3.2.2. Тепловой расчёт конструкции с применением традиционного метода интеграции .....	87
3.2.3. Тепловой расчёт конструкции с применением интеграции методом перевернутого монтажа.....	90
3.2.4. Выводы .....	96
3.3. Конструкция беспроводной гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ.....	97
3.3.1. Тестовая конструкция и технология .....	98
3.3.2. Экспериментальные результаты тестовой конструкции ГМИС СВЧ с копланарной линией .....	99
3.3.3. Экспериментальные результаты тестовой конструкции ГМИС СВЧ с транзистором .....	102
3.3.4. Выводы .....	108

3.4. Заключение по 3 главе .....	108
ГЛАВА 4. Гибридно-монокристаллическая интегральная схема СВЧ для поверхностного монтажа .....	110
4.1. Анализ современных конструкций СВЧ схем для поверхностного монтажа .....	110
4.2. Исследование влияния электрических характеристик длины сквозных металлизированных отверстий .....	117
4.3. Конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа .....	121
4.3.1. Частотные характеристики ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа .....	122
4.3.2. Исследование тепловых режимов ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа .....	123
4.4. Заключение по главе 4 .....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	132
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	152
СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....	153
ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА .....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	158

## ВВЕДЕНИЕ

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 [1-8].

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 получению 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 [9-11]. 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-монолитной 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-монолитной 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.

**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-монокристаллической 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-монокристаллической 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-монокристаллических 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.

## ГЛАВА 1. Современное состояние способов интеграции полупроводниковых СВЧ приборов

### 1.1. Анализ конструктивных способов интеграции полупроводниковых СВЧ приборов

#### 1.1.1. Актуальность развития интеграции

Гибридно-монолитные интегральные схемы (ГМИС) СВЧ являются важной частью современной отечественной ЭКБ СВЧ. Концепция ГМИС – интеграция отдельных кристаллов активных элементов (транзисторов и МИС) с кристаллами и платами пассивных элементов (рис. 1).

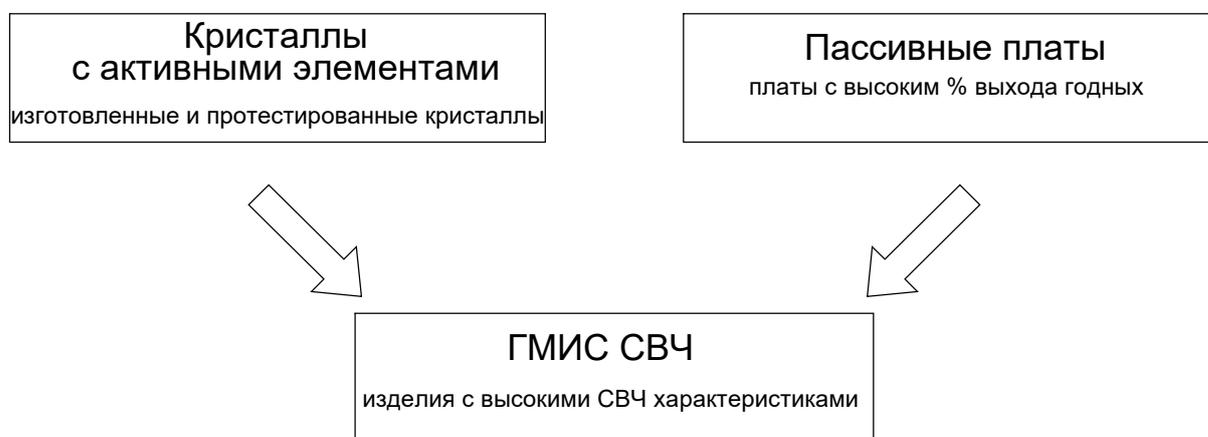


Рис. 1. Концепция ГМИС СВЧ

Концепция ГМИС имеет три стимула к применению. Первый – преодоление ограничения монолитных схем по площади и функциональности. На практике, типовые габаритные размеры МИС СВЧ составляют  $5 \times 5$  мм<sup>2</sup>, что связано с технологическими ограничениями. Предел по габаритам препятствует реализации многофункциональных схем. Второй стимул – возможность интеграции кристаллов разных полупроводниковых технологий. Кремний является главным материалом современной полупроводниковой электроники, позволяющий реализовывать схемы с высокой степенью интеграции, сложности и наименьшей стоимостью. Актуальная кремниевая КМОП технология обеспечивает реализацию приёмопередающих МИС СВЧ, объединяя на одном кристалле цифровую и аналоговую части малой мощности. Повышение характеристик приёмопередатчиков с точки зрения

выходной мощности, рабочих частот и шумовых параметров требует использования приборов на основе широкозонных полупроводников. Современные GaAs и GaN технологии обеспечивают беспрецедентный уровень выходной мощности в диапазоне до 100 ГГц. InP технология обеспечивает наилучшие частотные и шумовые характеристики. Приборы на широкозонных полупроводниках являются незаменимыми элементами для развития систем связи пятого и шестого поколений [12]. Третий стимул – стоимость. Современные МИС СВЧ изготавливаются на подложках с эпитаксиально выращенными гетероструктурами. Гетероструктуры необходимы для формирования активных элементов – транзисторов и диодов. Однако активные элементы занимают менее 20% площади МИС СВЧ [13]. Остальную площадь занимает пассивная часть, не требующая наличия гетероструктуры. Формирование гетероструктуры на полуизолирующей подложке повышает стоимость пластины в 3-5 раз. Таким образом, эффективное использование площади кристаллов является необходимым условием снижения себестоимости модулей. Более того, миниатюризация кристаллов ведёт к увеличению процента выхода годных. Экономическая актуальность применения концепции ГМИС СВЧ увеличивается при снижении процента выхода годных кристаллов МИС СВЧ. Применение уже готовых и отбракованных кристаллов активных элементов снижает время изготовления схем в 2-3 раза по сравнению с монолитной конструкцией [14, 15]. В таблице 1 представлены базовые характеристики транзисторов основных полупроводниковых технологий со сравнимыми топологическими нормами, а в таблице 2 – параметры диэлектрических подложек, применяемых в микроэлектронике СВЧ.

Таблица 1. Параметры транзисторов на различных полупроводниковых технологиях

Технология	Длина затвора (ширина эмиттера), нм	$F_T$ , ГГц	$F_{MAX}$ , ГГц	Рабочее напряжение с-и (к-э), В	$NF_{min}$ , дБ	Ссылка/Компания
GaAs pHEMT	135	100	180	4,5	1.1 @ 30 ГГц	[16]/OMMIC
InP HEMT	100	180	350	1,2	<1 @ 40 ГГц	[17]/Northrop Grumman
GaN/Si (SiC) HEMT	100	100	180	12	1,8 @ 40 ГГц	[18]/OMMIC
SiGe БикМОП	(120)	240	280	(0,6)	2 @ 30 ГГц	[19, 20]/STMicroelectronics
SOI КМОП	130	140	100	1,2	2 @ 15 ГГц	[21]/IBM

Таблица 2. Характеристики диэлектрических и полупроводниковых подложек, применяемых в микроэлектронике СВЧ

Параметр	Символ	Сапфир	GaAs	InP	Si	SiC (4H)	C (алмаз)	GaN
Ширина запрещённой зоны, эВ	$E_g$	9,5	1,42	1,34	1,12	3,25	5,46	3,44
Пробивное напряжение, В/мкм	$E_{br}$	48	40	50	30	400	1000	500
Подвижность электронов, $cm^2/(V \cdot s)$	$\mu_n$		8500	5370	1450	700	2200	1000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, $\times 10^7$ см/с	$v_{sat}$		2,1	2,5	1	2	2,7	2,2
Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_r$	9,4	12,9	12,5	11,7	9,66	5,7	8,9
Тангенс угла диэлектрических потерь		0,0001	0,006	0,008	0,015	0,003	0,0003	
Теплопроводность, Вт/(м $\times$ °С)	$\Theta$	46	52	68	130	450	1800	130
Коэффициент термического расширения, $\times 10^{-6}/^\circ C$		4,5	5,73	4,75	2,6	5,12	1	5,59 (a) 3,17 (c)
Постоянная кристаллической решётки, Å			5,65	5,87	5,43	a=3,1, b=10	3,57	a, b=3,2, c=5,2

Таким образом, достижение высоких характеристик системы требует применения не одной полупроводниковой технологии, а комбинации ряда полупроводниковых технологий – гетерогенной интеграции. Интеграция двух или более различных полупроводниковых технологий, обеспечивающей расширение функциональности и улучшенные рабочие характеристики является актуальной проблемой современной ЭКБ СВЧ. Современный уровень и тенденции развития конструктивных способов интеграции микроэлектроники СВЧ требует детального анализа. На текущий момент можно выделить восемь различных методов интеграции: монолитная гетерогенная интеграция, монтаж пластина-к-пластине, метод переноса слоёв, интеграция в единую подложку, интеграция методом печати, интеграция проволоками, перевернутый монтаж, hot-via. Основные результаты исследования конструктивных способов представлены в работе [22].

### **1.1.2. Монолитная гетерогенная интеграция**

Монолитная гетерогенная интеграция – интеграция приборов на разных полупроводниковых материалах, электрически соединенных между собой, сформированных в едином технологическом цикле на одной подложке. Этот термин фактически применяется при интеграции различных  $A^{III}B^V$  приборов с Si КМОП в одной плоскости. Применение монолитной интеграции для объединения  $A^{III}B^V$  полупроводниковых приборов с кремниевой КМОП технологией может обеспечить уменьшение массогабаритных характеристик, сокращение электромагнитных помех, повышение эффективности, производительности и надёжности.

Возможность монолитной интеграции  $A^{III}B^V$  приборов на кремний активно исследуется с 1980 годов. Исторически, широкозонные полупроводники не изготавливались на кремниевых производственных линиях из-за меньшего диаметра пластин и отличия по ряду технологических процессов. Дополнительными сдерживающими факторами являются разница параметров постоянных кристаллических решёток и КТР. Рассогласование по параметрам постоянных решеток приводит к большому

количеству дефектов в растущем слое материала, а также возникновению напряжений вследствие значительного различия коэффициентов линейного расширения. Для минимизации кристаллических дефектов, современные кремниевые КМОП-структуры и широкозонные полупроводники  $A^{III}As$  и  $A^{III}P$  преимущественно формируются на подложке с кристаллографической ориентацией  $\langle 100 \rangle$ , когда  $A^{III}N$  формируется на  $\langle 111 \rangle$ . Постоянные кристаллических решёток GaAs и InP по сравнению с Si  $\langle 100 \rangle$  различаются на 4 и 8 % соответственно. GaN имеет 17% разницу в кристаллической решётке с Si  $\langle 111 \rangle$ .

На практике возможны два основных метода к интеграции. Первый – интеграция «островков»  $A^{III}B^V$  в проводящую кремниевую подложку  $\langle 100 \rangle$  [23, 24]. Второй — на подложке кремния на изоляторе (КНИ) формирование Si КМОП с  $A^{III}B^V$ , выращенными на основной подложке Si  $\langle 111 \rangle$  [25, 26]. Первый метод минимизирует достоинства близкой интеграции  $A^{III}B^V$  приборов с Si КМОП для применения в СВЧ диапазоне, так как основная неизолирующая кремниевая подложка оказывает сильный негативный эффект на общие параметры изделия в виде увеличения потерь в линиях передачи и индуктивностях. Необходимость обеспечения дополнительной изоляции  $A^{III}B^V$  приборов и Si КМОП вносит дополнительные технологические трудности. В связи с этим, первый метод применим только для низкочастотных схем.

Обобщенный процесс формирования Si КМОП и  $A^{III}B^V$ -приборов на единой подложке можно разделить на 6 этапов. 1 – изготовление требуемой начальной подложки. 2 – формирование Si КМОП приборов. 3 – формирование окон для  $A^{III}B^V$ -приборов. 4 – эпитаксиальный рост структур. 5 – формирование  $A^{III}B^V$ -приборов. 6 – формирование металлических межсоединений. Обычно КМОП приборы формируются в первую очередь, так как этот процесс является более высокотемпературным, а материалы  $A^{III}B^V$  сильнее восприимчивы к высоким температурам. Рост эпитаксиальных структур на GaAs и InP проходит при температурах более 500 °С, когда рост

GaN при 750 °С. Данные температуры оказывают серьезное влияние и на характеристики КМОП транзисторов. Таким образом, взаимное влияние технологического процесса изготовления приборов Si КМОП и A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> является важной проблемой, ограничивающей применение данного метода интеграции.

Формирование структур на GaAs и InP на единой Si подложке было продемонстрировано с применением пластины SOLES (Soitec's Silicon On Lattice Engineered Substrate). Типичная структура приведена на рис. 2а. Формирование структуры на GaAs требует применения подслоя германия (Ge) для минимизации рассогласованности кристаллических решёток. Формирование структур на InP, помимо подслоя Ge, требует применения буферного слоя GaAs. Ge, как подслой, получил наибольшее распространение, поскольку имеет зрелую технологию выращивания Ge на Si и обладает близкими значениями постоянной кристаллической решетки с GaAs. Буферный слой Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> обеспечивает эффективную релаксацию. Верхний слой Ge служит как виртуальная подложка для дальнейшего роста GaAs.

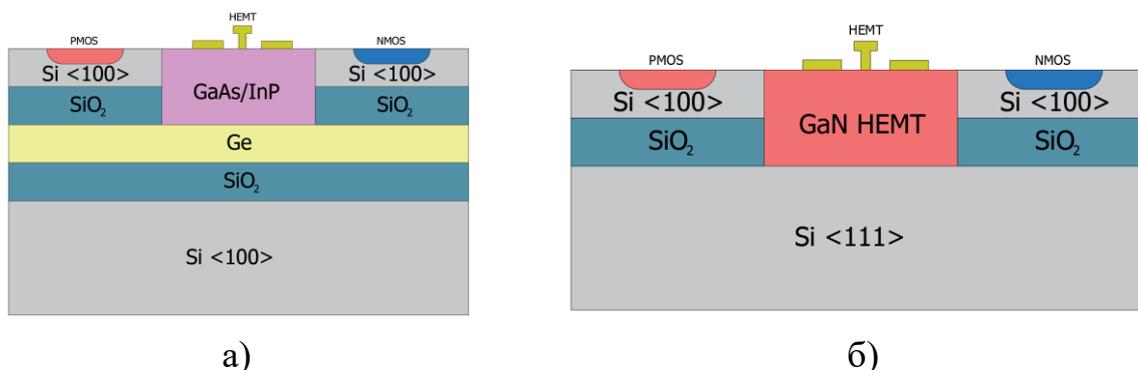


Рис. 2. Схематичное представление монолитной гетерогенной интеграции: (а) – Si КМОП и GaAs/InP HEMT (либо ГБТ) на SOLES; (б) – Si КМОП и GaN HEMT на SOI

Реализация данного метода не нашла широкого применения, ввиду ряда технологических ограничений. Так, промежуточный слой Ge, имеет температуру плавления 938 °С, что ограничивает диапазон температур при изготовлении КМОП на кремнии. Также, Ge вызывает перекрёстное легирование с GaAs, что ухудшает характеристики GaAs pHEMT [27, 28]. Буферные слои большой толщины являются ограничением для планаризации

конструкции. Начальная подложка, необходимая для формирования требуемой полупроводниковой структуры на сегодняшнее время является предметом ограниченного распространения с крайне высокой стоимостью [29].

Интеграция структур на GaN имеет предпосылки к внедрению в цепочку производства кремниевых схем. GaN является химически стабильным во всём температурном диапазоне, применяемом в производстве кремниевых КМОП. Возможное совмещение процессов на 200 мм кремниевых пластинах, где технология GaN на кремнии интегрирована со стандартной технологией изготовления КМОП может быть применена как для области высоких частот, так и для силовой электроники [30]. Типичная структура интеграции приборов на GaN и Si КМОП представлена на рис. 2б. GaN и кремниевые транзисторы интегрированы не вертикально, а в единой плоскости. Одним из первых данный метод был реализован группой из Raytheon [31]. Немаловажным недостатком данного способа является стоимость, которая в данном методе высока ввиду селективного роста эпитаксиальных слоев, реализуемого методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Несмотря на то, что в типичной интегральной схеме всего 10% площади занимает GaN НЕМТ, цена процесса эпитаксии идентична со всей пластиной. Таким образом, при таком методе стоимость площади GaN-структуры в десять раз больше.

За последние 30 лет был сделан значительный прогресс в интеграции  $A^{III}B^V$  приборов и Si КМОП на единой кремниевой подложке. Данный способ гетерогенной интеграции, обладающий минимальными длинами межсоединений и массогабаритными характеристиками, обеспечит новый класс схем с высокими характеристиками, объединяя цифровую обработку аналоговое преобразование. Это расширяет возможности существующих систем и делает возможным новые архитектуры для широкого перечня применений. Отдельной перспективной областью для приборов с повышенными характеристиками для радиоэлектронной аппаратуры нового поколения является применение алмазной диэлектрической подложки

и интеграция на ней разных полупроводниковых структур: Si КМОП и GaN НЕМТ [32, 33].

Однако, несмотря на заметное технологические продвижение в монолитной интеграции  $A^{III}B^V$  приборов на кремниевую подложку и конструктивные преимущества, данный подход остаётся лишь одним из потенциальных направлений развития будущей микроэлектроники СВЧ. Важными предпосылками, требуемыми для практического применения данного способа, станет решение ряда фундаментальных проблем, связанных с разницей в значениях постоянных кристаллических решёток, коэффициентов температурного расширения [34, 35]. Требуется уменьшение взаимного влияния технологического процесса изготовления схемы на КМОП и  $A^{III}B^V$  приборы. Помимо этого, метод должен быть экономически конкурентным с аналогичными подходами гетерогенной интеграции.

### **1.1.3. Монтаж пластина-к-пластине**

Монтаж пластина-к-пластине (wafer bonding) – способ интеграции изделий посредством соединения разных пластин со сформированными активными элементами. Данный способ является альтернативным монолитной интеграции.

Обобщённый процесс объединения состоит из двух основных этапов. На первом этапе соединяются две пластины, со сформированными активными элементами, друг с другом. Соединение двух пластин обеспечивается за счёт металлических или диэлектрических слоёв, либо их совокупности – гибридного монтажа (hybrid bonding) [36, 37]. На втором этапе формируются отверстия как в одной, так и в другой пластинах, финальная металлизация, объединяющая элементы.

Важными условиями интеграции данным методом являются одинаковые размеры соединяемых пластин, применение соединяющих металлических либо диэлектрических слоёв, совместимых с двумя интегрируемыми полупроводниковыми технологиями и обеспечение шероховатости поверхностей менее 1 нанометра [38, 39]. Для планаризации соединяемых

поверхностей, требуется применение процесса химико-механической полировки. Совместимость технологических процессов соединяемых пластин составляет одну из основных задач, решение которой необходимо для реализации данного способа. Совместимость с технологическим процессом Si КМОП подразумевает отсутствие использования Au и процессов взрывной литографии – укоренившиеся составляющие технологического процесса производства  $A^{III}B^V$  приборов.

Структуры на основе GaN имеет наибольшие предпосылки интеграции методом монтажа пластина-к-пластине благодаря высокотемпературной стабильности приборов на их основе. Также, появилась возможность реализации GaN гетероструктур на пластинах высокоомного кремния диаметром 200 мм [38]. Группа из Raytheon ведёт работы по реализации пластины GaN на Si, изготовленной в кремниевой технологической цепочке и последующую интеграцию с пластиной Si КМОП [40]. Схематичное представление реализуемой концепции представлено на рис. 3.

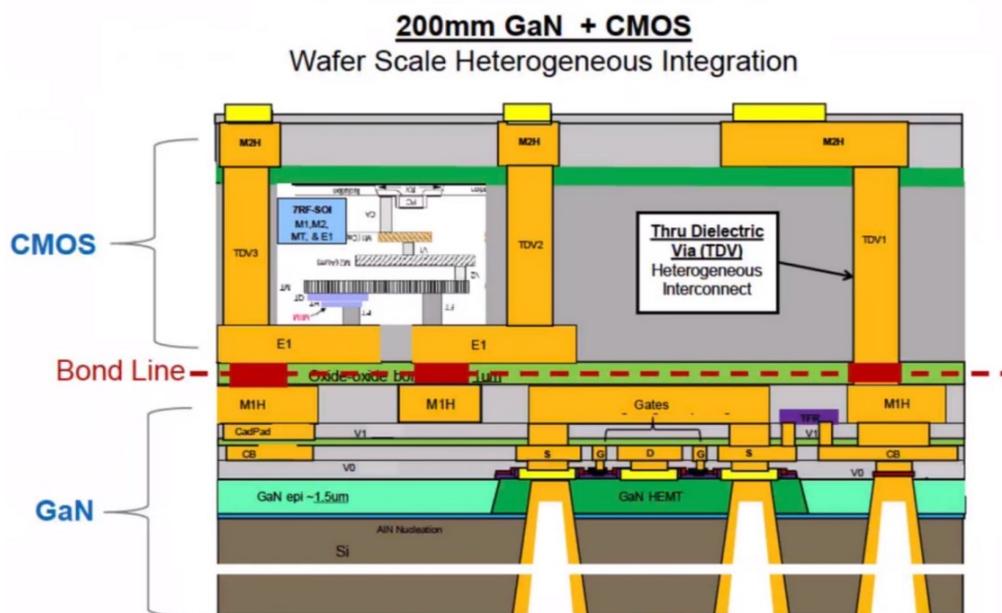


Рис. 3. Схематичное представление интеграции пластины GaN HEMT на кремнии с пластиной Si КМОП [40]

Выходные характеристики экспериментальных образцов GaN HEMT на кремниевой подложке, изготовленных по технологической цепочке без процессов взрывной литографии и использования Au, показывают

сопоставимые значения со стандартными приборами. Выходная мощность тестовых транзисторов  $2 \times 100$  мкм, с длиной затвора 0,15 мкм, превышает 4,5 Вт/мм при КПД 50% на частоте 10 ГГц. Электрическое соединение между GaN HEMT и Si КМОП обеспечивается сквозными металлизированными отверстиями в кремнии. Металлизация выполнена из меди.

Также, имеются экспериментальные результаты по интеграции пластина-к-пластине приборов на InP с Si КМОП. В работах [39, 41] представлены результаты интеграции InP ГБТ с Si КМОП или БиКМОП. Благодаря плотной интеграции разных полупроводниковых приборов, реализованы приемопередатчики Ka- и W- диапазонов частот в виде единого кристалла, где реализованы как цифровая, так и аналоговая части.

Монтаж пластина-к-пластине обеспечивает высокую плотность интеграции и минимальные габариты благодаря вертикальной интеграции приборов. Недостатками данного способа являются как снижение процента выхода годных из-за концепции монтажа пластина-к-пластине, так и ограничение в диаметре пластин (до 100 или 150 мм) при интеграции с большинством пластин с  $A^{III}B^V$  приборами. Совместимость технологических процессов также является важным фактором, сдерживающим массовое внедрение данного способа. Кроме того, при гетерогенной интеграции имеет место неэкономичное использование пластины с  $A^{III}B^V$  приборами. Данный способ экономически целесообразен при высокой доле  $A^{III}B^V$  приборов в финальном изделии. Поэтому данный метод наиболее применим при интеграции пластин, реализованных по единой технологии. Гетероинтеграция в данном способе требует совместимости ряда этапов производства соединяемых пластин, что зачастую требует корректировки части технологических процессов.

#### **1.1.4. Интеграция переносом слоёв**

Метод переноса слоёв (micro-transfer printing) – технология локального переноса определённых полупроводниковых слоёв с одной подложки (донорной) на финальную пластину. Данная технология позволяет

интегрировать приборы, реализованные на материалах с несовпадающими показателями кристаллических решёток, расширяя функциональность и повышая характеристики, компактно объединяя разные полупроводниковые материалы.

Гетероструктуры  $A^{III}B^V$  содержат весь необходимый функционал, требуемый для работы активного прибора СВЧ. Отделение структуры от подложки и её перенос является стремлением к увеличению плотности интеграции разных полупроводниковых приборов, минимизации лишних элементов. Метод переноса слоёв активно применяется в полупроводниковой фотонике [42].

Обобщённый принцип реализации метода переноса слоёв можно разделить на 6 основных этапов. Схематичное представление процессов представлено на рис. 4. Изготавливается донорная пластина с требуемыми элементами. Первым этапом является формирование локальных областей структур на донорной пластине. Далее локально наносится защитный слой, который в дальнейшем будет обеспечивать контакт с трафаретом и остаточный контакт с донорной пластиной. Защитным слоем может служить либо фоторезист, либо диэлектрик. Третий этап – отсоединение структур от подложки. Существует ряд способов отсоединения – селективным травлением, лазерным, ионным, либо механическим воздействием [43, 44]. Четвертый и пятый – перенос элементов с донорной пластины на финальную с помощью трафарета. Разработан целый ряд методов переноса элементов, наиболее применяемым из которых является использование эластомера из полидиметилсилоксана [45]. По причине высокой адгезии трафарета и переносимого прибора, при резком движении трафарета с места контактирования с прибором, соединения с донорной пластиной рвутся, позволяя поднять прибор с донорной пластины. Противоположный метод используется для интеграции прибора на финальную пластину, трафарет плавно отодвигается от соединенной поверхности, обеспечивая меньшую адгезию между трафаретом и прибором, чем силы сцепления с финальной

подложкой. Шестой этап – удаление защитного слоя. После процесса переноса, электрические соединения добавляются стандартными технологическими процессами с применением тонкопленочного напыления и фотолитографии.

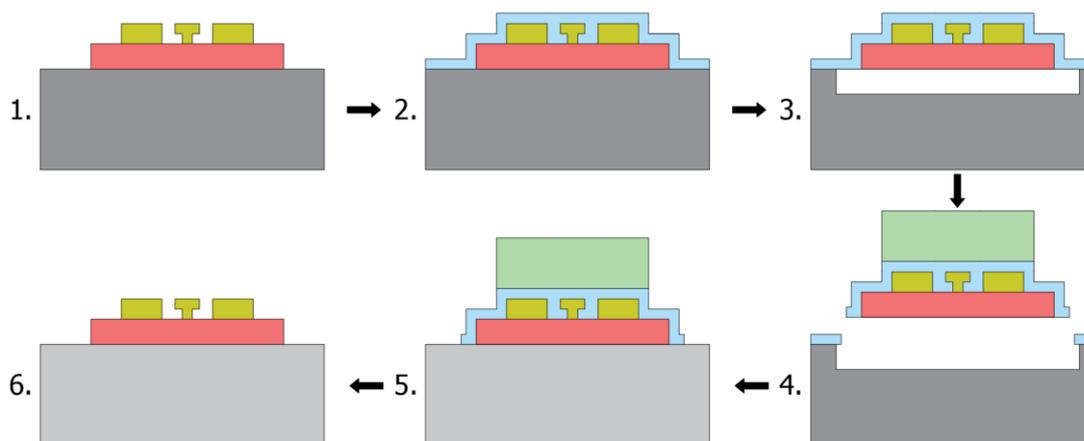


Рис. 4. Схематичное представление процесса микро-переноса слоёв

Структуры на GaN имеют предпосылки для интеграции методом переноса слоёв – изменение в составе материалов от кремния до последовательности гетероструктур на GaN позволяет легко убирать лежащий внизу кремний анизотропным травлением. Текущие экспериментальные результаты по интеграции GaN НЕМТ на кремниевую пластину с реализованной КМОП пока применимы больше для силовой электроники [46-49]. Метод переноса слоёв является привлекательным способом в том случае, когда монолитная интеграция либо затруднительна, либо невозможна. Так, в работе [50] приведены экспериментальные результаты интеграции GaN НЕМТ на алмазную подложку. Также, имеются экспериментальные данные по применению данного подхода для интеграции InP ГБТ на кремниевую пластину [39].

Интеграция методом переноса слоёв является потенциальным подходом к интеграции приборов, выполненных по разным полупроводниковым технологиям. Метод переноса слоёв выступает в качестве конкурирующего подхода с монолитной гетероинтеграцией. Достоинствами данного способа являются минимальные длины межсоединений между приборами на разных

материалах и массогабаритные характеристики, эффективное использование донорной пластины. Подобный метод может найти широкое применение, где необходим перенос большого массива элементов для быстрого монтажа миниатюрных элементов. Недостатки данного способа включают необходимость связи минимум двух разных полупроводниковых процессов, ограниченная площадь переносимого объекта – около  $0,6 \times 0,6 \text{ мм}^2$ , а также проблемы с планарностью при больших толщинах гетероструктур.

### 1.1.5. Интеграция проволочными соединениями

Проволочный метод интеграции кристаллов – механическое соединение кристаллов с основанием с помощью вспомогательного соединяющего слоя, и электрическое соединением проволоками. Концепция интеграции кристалла на подложку проволочным методом представлена на рис. 5. Электрическое соединение кристалла с подложкой проволочными соединениями является зрелым технологическим процессом и превалирует в современном процессе сборки кристаллов СВЧ. Обычно, тонкие металлические проволоки диаметром 15-25 мкм соединяют контактные площадки кристалла и основания. Обратная сторона кристалла монтируется к основанию с помощью соединяющего слоя.

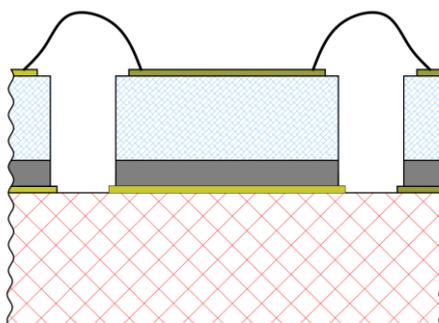


Рис. 5. Проволочный метод интеграции кристаллов

Главным достоинствами данного способа являются его простота, зрелость и распространённость технологии, небольшие требования к плоскопараллельности и шероховатости кристалла и основания и невысокая стоимость. Интеграция проволоками применяется при построении как

однофункциональных схем [51, 6], их корпусировании [7, 8], так и их интеграции МИС в многофункциональную систему [52].

В работе [51] показан пример реализации усилителя мощности X-диапазона частот, где интегрированы кристалл GaN-on-Si с предусилителем и выходными транзисторами золотыми проволоками с кристаллом выходной согласующей цепочкой на полуизолирующем арсениде галлия. Фотография усилителя представлена на рис. 6. Разработанный усилитель имеет выходную мощность 18,4-30 Вт при коэффициенте усиления более 27 дБ в диапазоне частот 9,5 – 11,5 ГГц. Полученный усилитель мощности имеет габаритные размеры  $5,5 \times 3,8$  мм<sup>2</sup>, и согласно подсчётам, уменьшенную стоимость в 2 раза по сравнению с усилителем, реализованным на едином кристалле на GaN-on-SiC.

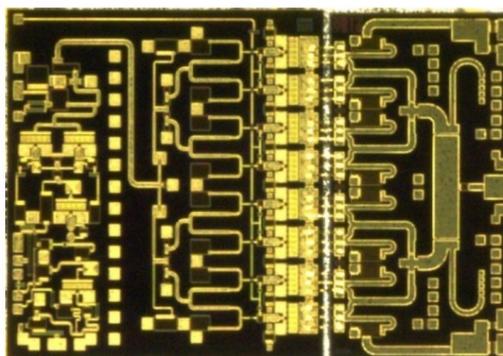


Рис. 6. УМ X-диапазона частот с GaAs платой выходной согласующей цепи [51]

Подобная технология монтажа является трудоёмкой, так как соединение между кристаллом и подложкой делается последовательно. Для кристаллов с большим количеством выводов, процесс может занимать достаточно длительный период времени. Плотность выводов кристалла также ограничена, так как они в данном случае являются периферийными элементами схемы. Контактные площадки для интеграции проволоками занимают большую площадь на кристалле, а последовательный планарный контакт монокристаллических схем ограничивает минимальные габаритные характеристики модуля СВЧ.

Современные методы механического контакта обратной стороны кристаллов с основанием вносят существенный вклад в тепловое сопротивление сборки, ухудшая тепловые режимы работы схемы, что снижает надёжность, так как подразумевают применение клея либо припоя с толщиной порядка 20 мкм с невысокой теплопроводностью (50-60 Вт/м×К).

Ещё один важный недостаток проволочных соединений – увеличение их влияния на электрические характеристики на высоких частотах ввиду значительных реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений. Это является ключевой проблемой для интеграции схем, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн. Главная паразитная составляющая эквивалентной схемы проволок – индуктивность, которая увеличивается пропорционально длине межсоединения. Частотные характеристики проволочных соединений ограничены, так как их реактивные паразитные составляющие эквивалентной схемы переходных межсоединений невозможно компенсировать идеальными сосредоточенными элементами уже на 40 ГГц, что является худшим результатом среди способов интеграции [53]. Длинные проволочные соединения являются источниками излучения, повышающими электромагнитные связи, что ухудшает изоляцию между элементами и может стать причиной нестабильности схемы.

Несмотря на то, что на данный момент проволочный метод является основой современной интеграции в микроэлектронике СВЧ, его пределы по частотным характеристикам и плотности интеграции ограничивают получение максимальных электрических характеристик МИС в модулях СВЧ.

#### **1.1.6. Интеграция в единую подложку**

Метод интеграции в подложку – способ, где на основную полупроводниковую пластину, в местах углублений, интегрируются готовые кристаллы элементов, с дальнейшим соединением друг с другом с применением методов фотолитографии. Схематичное представление метода продемонстрировано на рис. 7. Данный метод в разных источниках имеет

различные названия: interposer-based monolithic microwave integrated circuit (iMMIC) [54, 55], quasi-monolithic integration technology (QMIT) [56], metal embedded chip assembly for microwave integrated circuits (MECAMIC) [13, 57, 58], embedded-IC package [59].

Данный метод является развитием традиционной концепции ГМИС с проволочными соединениями – использование готовых кристаллов активных элементов (транзисторов и МИС), их интеграция с кристаллами пассивных элементов проволочными соединениями. Интеграция в подложку обеспечивает избавление от проволочных соединений, тем самым уменьшая электрические паразитные характеристики межсоединений и снижение габаритных характеристик. Применение готовых кристаллов активных элементов и их интеграция с пассивными частями обеспечивает уменьшение стоимости однофункциональных схем, например, усилителей мощности на GaN HEMT, в связи с тем, что дорогостоящий кристалл со структурами GaN на подложке SiC ограничен активным прибором, а пассивная часть реализуется монолитно на более дешёвых подложках полуизолирующих GaAs или Si.

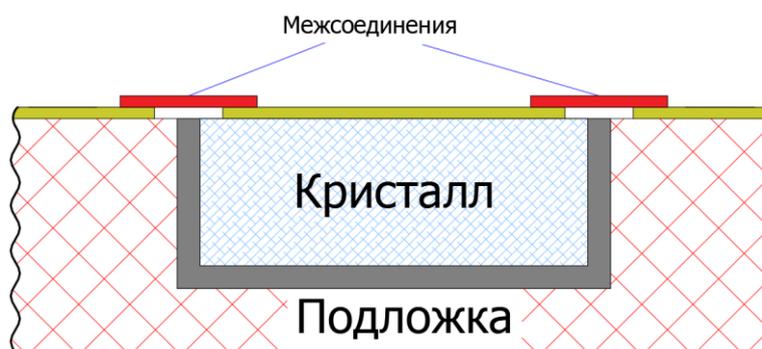


Рис. 7. Схематичное представление интеграции в подложку

Процесс интеграции в подложку обеспечивается на этапе производства объединяющей пластины. В обобщающей подложке формируется полость, для размещения готового кристалла. Соединение кристалла с обобщающей подложкой обеспечивается стандартными технологическими процессами

изготовления объединяющей подложки с применением тонкопленочного напыления и фотолитографии.

В работах [54, 57, 59] представлены результаты реализации усилителей мощности S-, X- и W- диапазонов частот, где в кремниевую полуизолирующую подложку с пассивными элементами интегрирован кристалл GaN транзистора. Представленные усилители имеют повышенный уровень интеграции в совокупности с эффективным использованием дорогостоящих кристаллов активных элементов на гетероструктурах в сочетании с пассивными платами на полуизолирующих подложках, объединённых на уровне изготовления пластины с пассивными платами. Типичный процесс интеграции и фотографии усилителей представлены на рис. 8.

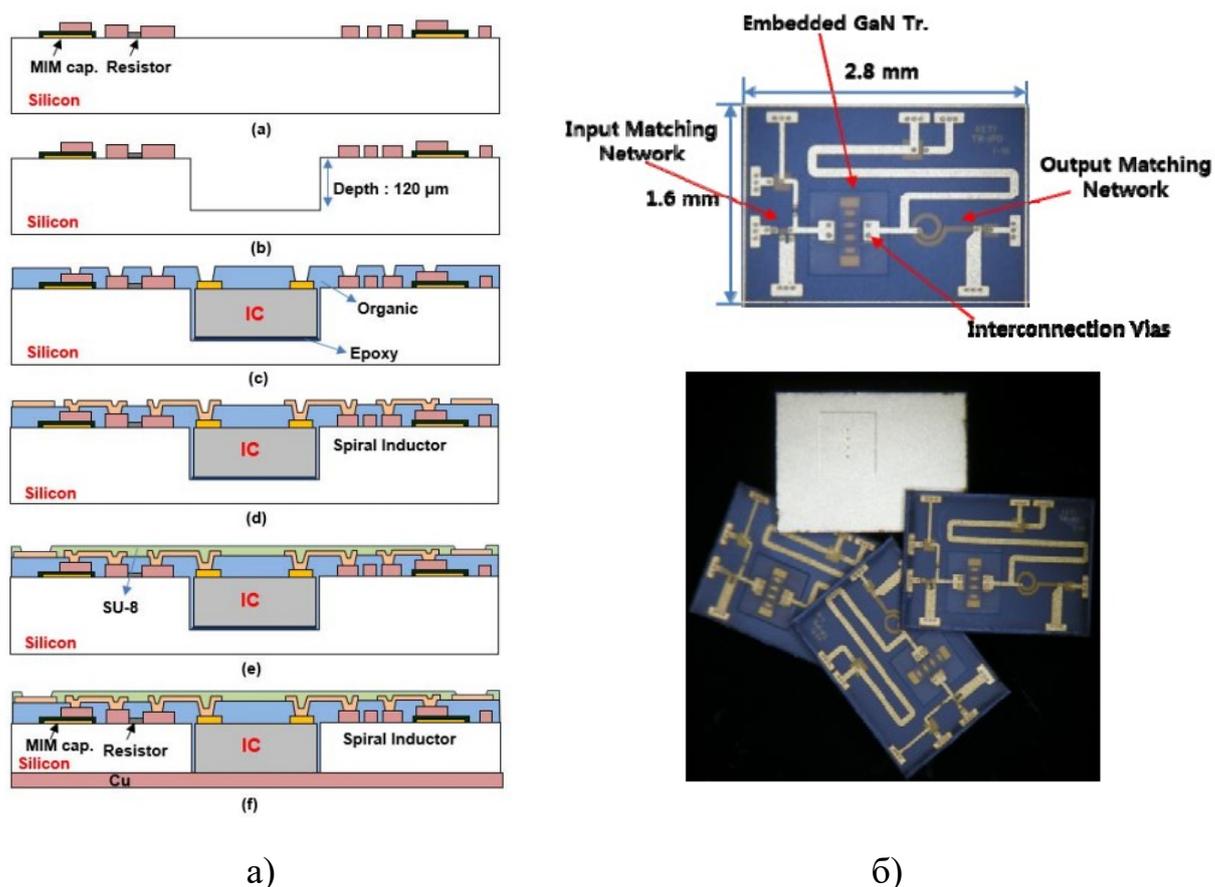


Рис. 8. Типичный процесс интеграции в подложку (а) и фотографии изготовленных усилителей мощности X-диапазона частот (б) [54]

Отдельно стоит выделить частный случай интеграции в подложку – metal-embedded chip assembly (MECA) (бывш. Integrated thermal array plate

(ИТАР)) – метод интеграции в подложку, обеспечивающий повышенные тепловые характеристики. Данный метод подразумевает интеграцию кристаллов в медный теплоотвод, который имеет одинаковую толщину с кремниевой распределительной платой. Контакт между обратной стороной кристаллов и теплоотводом без соединяющего слоя, улучшает тепловые характеристики по сравнению с традиционными методами. Межсоединения, реализованные воздушными мостами между кристаллами и платами, заменяют проволочные соединения и обеспечивают минимальное расстояние между кристаллами 70 мкм с возможностью уменьшить до 30 мкм при дальнейшей оптимизации процесса [58]. Данный метод подразумевает использование кремниевых пластин большого диаметра. Схематичная конструкция данного метода проиллюстрирована на рис. 9.

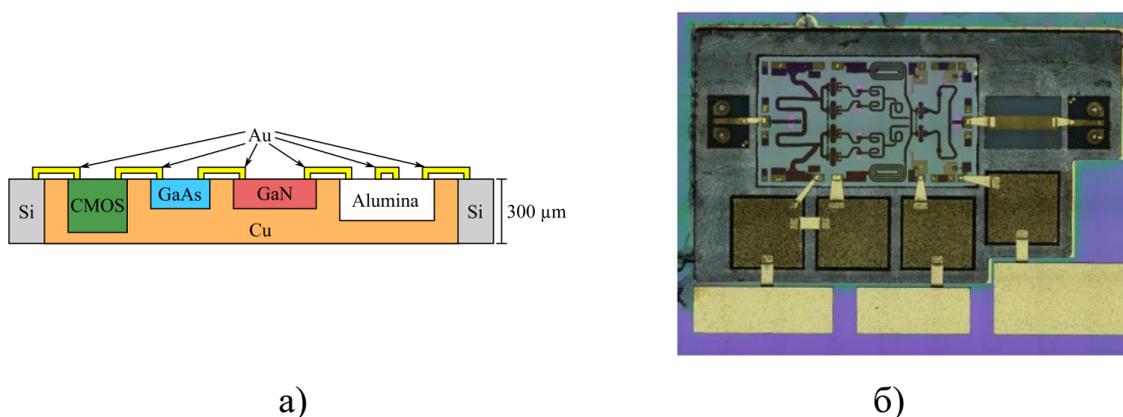


Рис. 9. Частный случай интеграции в подложку процессом МЕСА: (а) – концепция, (б) – фотография реализованной схемы интеграции [58]

Метод интеграции в подложку позволяет объединять не только полупроводниковые кристаллы, но и другие приборы, применяемые в микроэлектронике СВЧ. Одним из перспективных направлений применения данного метода является близкая интеграция ферритовых изделий с МИС СВЧ [60]. В работе [61] представлены результаты интеграции циркулятора из поликристаллического гексаферритного магнитного материала с приёмопередающим модулем СВЧ, состоящим из МШУ и УМ на GaN/SiC на уровне пластины, фотография которого представлена на рис. 10. Результатом является ГМИС приёмопередатчика Ка-диапазона частот,

в которой интегрирован циркулятор. Это обеспечивает снижение габаритов более чем в 100 раз в сравнении с традиционным способом.

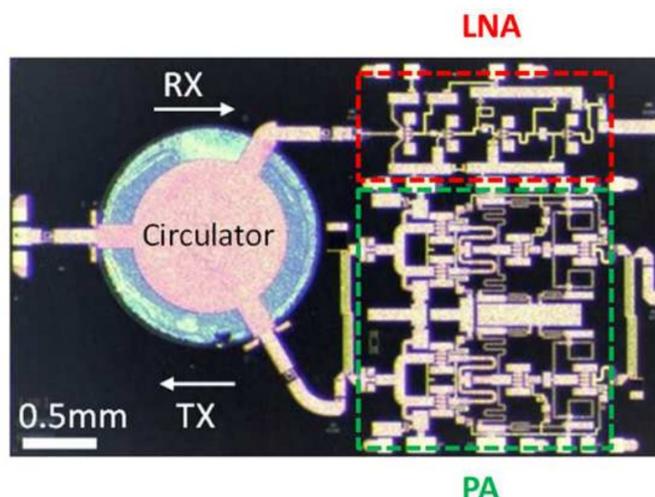


Рис. 10. МИС приёмопередатчика размером  $4,7 \times 2,87$  мм<sup>2</sup> [61]

Метод интеграции в подложку находит всё более широкое применение при построении как однофункциональных, так и многофункциональных схем СВЧ с малыми габаритными характеристиками. Реализация концепции ГМИС – использование годных кристаллов и пассивных плат на полуизолирующих подложках, способствует снижению стоимости конечных изделий и обеспечивает повышение процента выхода годных. Достоинствами данного способа являются планарность полученной интеграции, экономичное использование площади кристаллов с гетероструктурами и небольшие реактивные паразитные составляющие эквивалентной схемы переходных межсоединений в СВЧ диапазоне. Различные варианты реализации данного способа могут обеспечить повышенные тепловые характеристики, интеграцию не полупроводниковых материалов. Недостатки – необходимость применения полупроводниковых технологических этапов, что ведёт к повышенной сложности технологических процессов интеграции. Рассматриваемый способ предъявляет повышенные требования к повторяемости габаритных размеров кристаллов, точности их позиционирования.

### 1.1.7. Интеграция методом печати

Интеграция методом печати – электрическое соединение отдельных кристаллов с подложкой с применением аддитивных технологий. Аддитивные технологии могут быть использованы для создания линий передачи, антенн, кристалльных межсоединений, соединительных и изолирующих слоёв, и 3D конструкций [62]. Одним из основных стимулов развития данного способа является снижение паразитных характеристик межсоединений с целью повышения характеристик модулей в миллиметровом диапазоне длин волн. Развитие методов аддитивных технологий, основанных на микродозировании с возможной последующей обработкой позволило достичь возможности формирования линий шириной от 10 мкм с точностью  $\pm 6$  мкм [63, 64, 65].

Интеграция методом печати позволяет изготавливать многокристалльные модули с быстрым этапом макетирования возможностью оптимизации конструкции. На рис. 11 представлен результат реализации приёмопередатчика W-диапазона с применением аддитивных технологий [64]. Перспективным направлением применения аддитивных технологий является формирование 3D антенн для миллиметрового диапазона длин волн [66].

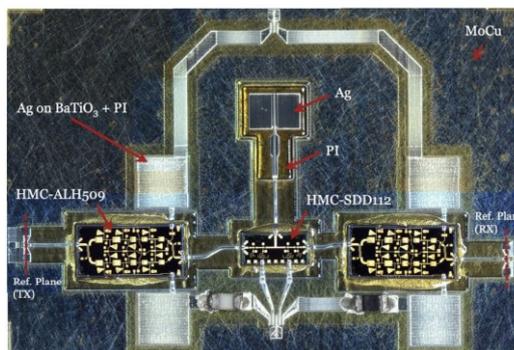


Рис. 11. Приёмопередатчик W-диапазона, реализованный с применением аддитивных технологий [64]

Достоинством данного способа является скорость разработки модулей, возможность автоматизации процессов интеграции и их упрощение, так как не требуется использования полупроводниковых технологических процессов. Однако, данный способ не может похвастаться большими производственными мощностями, как и исключительными электрическими параметрами, так как

имеет ограниченные технологические возможности формирования межсоединений. Так же, требуется использование отдельной дорогостоящей автоматизированной платформы для интеграции.

Метод интеграции с применением аддитивных технологий является способом, на данный момент не имеющим очевидных преимуществ по сравнению с конкурентными методами интеграции. Однако имеет большие перспективы с точки зрения автоматизированной интеграции мелкосерийного производства.

### **1.1.8. Метод перевернутого монтажа**

Интеграция кристаллов методом перевернутого монтажа (flip-chip) – соединение кристалла активной лицевой стороной с подложкой механически и электрически, используя проводящие межсоединения – «бампы». Концепция интеграции кристалла на подложку методом перевернутого монтажа представлена на рис. 12. Актуальность данного способа определяется развитием широкополосной радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, концепции ГМИС в области миниатюризации и гетероинтеграции, и технологии формирования переходных межсоединений, обеспечивающий миниатюризацию и совместимость с технологиями изготовления  $A^{III}B^V$  кристаллов. Интеграция методом перевернутого монтажа обеспечивает одновременное соединение между большим количеством контактных площадок основания и кристалла, минимальные потери и паразитные составляющие переходных межсоединений в СВЧ диапазоне, а в перспективе и улучшенный теплоотвод от активной области прибора.

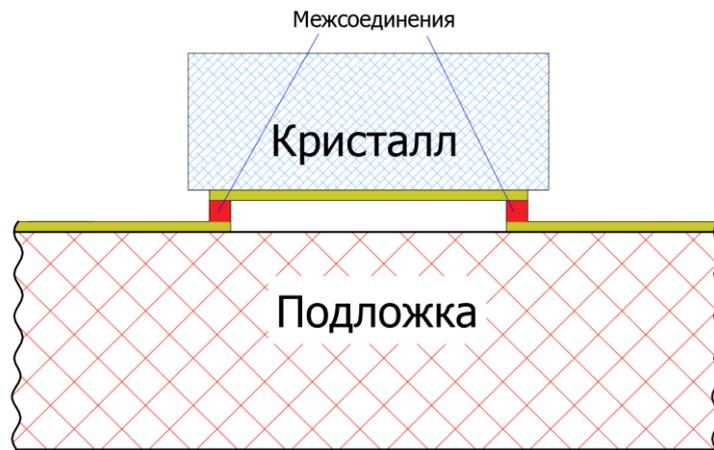


Рис. 12. Концепция интеграции кристалла методом перевернутого монтажа

Начало развития технологии flip-chip относится к 1964 году, когда компания IBM разработала технологию С4 (Controlled Collapse Chip Connection) для сборки интегральных схем [67]. Технология flip-chip стала важной частью в цифровой микроэлектронике, тогда как в СВЧ области не нашла широкого распространения. Одна из причин состоит в том, что типичная технология flip-chip не может быть перенесена для применения в СВЧ области. Способ формирования переходных межсоединений – «бампов», их высота, диаметр и применяемые материалы требуют изменения, для стыковки с технологией МИС СВЧ, выполненных на широкозонных полупроводниках, миниатюризации и обеспечения низких паразитных электрических составляющих в СВЧ диапазоне [68].

Обобщённый процесс монтажа методом перевернутого монтажа состоит из 3 основных этапов:

1. формирование проводящих межсоединений – «бампов», на контактных площадках кристалла или подложки;
2. монтаж, совмещение кристалла с подложкой и соединение первого лицом вниз при заданных внешних условиях (температура, время и давление);
3. заполнение вспомогательным материалом пустот между кристаллом и подложкой – инкапсуляция.

Инкапсуляция обеспечивает улучшение термомеханических свойств, вызванных несоответствием КТР кристалла и подложки, а также защищает кристалл от влаги, загрязнений и механических повреждений при различных внешних факторах. Однако, присутствие вспомогательного материала влияет на электрические характеристики системы, особенно на высоких частотах, в связи с его более высокими диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь в сравнении с воздухом. Третий этап в отдельных случаях может быть опущен, особенно в схемах миллиметрового диапазона длин волн.

Бурное развитие способов формирования «бампов», способствующее миниатюризации, повышению рабочего диапазона температур и надежности переходных межсоединений и сборок на их основе, открывает новые возможности применения метода перевернутого монтажа. Схематичное представление эволюции переходных межсоединений проиллюстрировано на рис. 13.

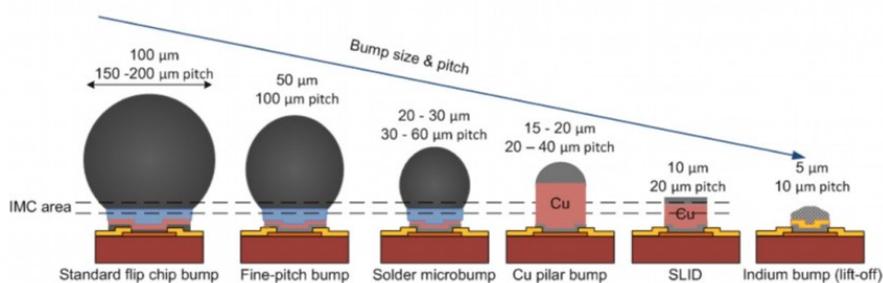


Рис. 13. Схематичное представление эволюции переходных межсоединений [69]

Технология формирования проводящих межсоединений развивается более 60 лет. В общем, данный процесс можно разделить на 3 поколения. Первое поколение подразумевает использование шариков припоя и флюса. Типичный размер межсоединений первого поколения обеспечивает шаг между выводами более 100 мкм. Второе поколение, часто именуемое как micro-bump или C2 (chip connection), реализуется как контактная площадка из меди, покрытая припоем. Обеспечивает шаг между выводами от 40 до 130 мкм. Первые два поколения имеют значительный объем

легкосплавных припоев в межсоединении. Их присутствие ограничивает область применения радиоэлектронной аппаратуры из-за уменьшения рабочего температурного диапазона [70].

Третье поколение межсоединений обеспечивает шаг между выводами 30 мкм и менее. Существующие процессы с использованием припоев не могут обеспечить масштабирование межсоединений до указанных размеров. Поэтому для реализации межсоединений с отмеченными размерами применяются методы термокомпрессии Cu-Cu [71, 72], Au-Au [73], либо метод монтажа взаимной переходной диффузией (англ. сокр. SLID – Solid-Liquid Interdiffusion) с разными составляющими материалами [74, 75]. Ведутся работы по разработке переходных межсоединений, обеспечивающих широкополосное соединение с рабочей полосой свыше 150 ГГц и интеграцию, близкую к монолитной [68, 76, 77]. Технология реализации переходных межсоединений с возможностью локального контакта кристаллов с шагом в единицы микрометров до сих пор является актуальной задачей в микроэлектронике СВЧ.

Интеграция методом перевернутого монтажа всё шире применяется в маломощных системах миллиметрового диапазона длин волн благодаря таким преимуществам, как минимальные потери и реактивные паразитные составляющие эквивалентной схемы переходных межсоединений (не требуется компенсирующих согласующих элементов) и относительная простота технологии [78, 79], а в X диапазоне демонстрирует улучшенные характеристики по сравнению с распространённым методом монтажа с помощью проволочных соединений [80].

Достоинством способа интеграции методом перевернутого монтажа является возможность использования кристаллов, выполненных по разным технологическим процессам. В работе [81] представлены результаты успешной гетерогенной интеграции методом перевернутого монтажа. Кристалл смесителя, реализованного по технологии InP ГБТ, интегрирован с кристаллом малошумящего усилителя, выполненным по технологии 0,1 мкм

InP НЕМТ, объединяя достоинства двух технологий. Кристалл с МШУ имеет заранее изготовленные площадки с межсоединениями размером  $11 \times 11$  мкм<sup>2</sup> и компенсирующую схему для согласования двух кристаллов. Высота межсоединительного слоя составила 10 мкм. Толщины подложек составляют 75 мкм. Полученная система имеет габаритные размеры  $3,7 \times 1,5$  мм<sup>2</sup>, фотография представлена на рис. 14. Электрические характеристики полученной системы в диапазоне частот 80-100 ГГц обеспечивают совокупность параметров, недостижимую при применении одной полупроводниковой технологии.

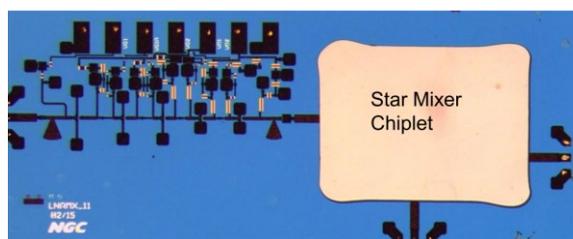


Рис. 14. Фотография конструкции интегрированного МШУ и смесителя [81]

На текущий момент метод перевернутого монтажа имеет ряд ограничений. Монтаж методом flip-chip приводит к близкому расположению активной поверхности кристалла с подложкой, которые разделены воздушным зазором в высоту переходного межсоединения. Подобная близость оказывает значительное воздействие на электрические характеристики схемы. Данное явление называется эффектом рассогласования. Элементы схемы на кристалле могут изменить свои электрические характеристики в связи с присутствием подложки в непосредственной близости. Величина рассогласования зависит от типа элемента и размера зазора между кристаллом и подложкой, который контролируется высотой бампа. Присутствие металлизации под кристаллом значительно увеличивает эффект [82]. Большая высота бампа минимизирует рассогласование, однако увеличивает паразитные характеристики переходного соединения. На практике, чувствительны к эффекту рассогласования линии передачи и спиральные индуктивности, в то время как транзисторы и компоненты малых размеров не показывают значительной

восприимчивости. В связи с этим, интеграция кристаллов с реализованной микрополосковой конструкцией требует детального расчёта и учёта данного эффекта.

Ещё одной актуальной проблемой при интеграции методом перевернутого монтажа является отвод тепла. Концепция контакта кристалла лицевой стороной при методе flip-chip обеспечивает кратчайший электрический путь соединения с основанием, однако ограниченная площадь контакта, обычно менее 10% от площади кристалла, и его удалённость от области тепловыделения увеличивает тепловое сопротивление схемы, что ведёт к повышенным температурным режимам работы, а как следствие, снижению электрических характеристик и надёжности схемы.

Один из способов улучшения отвода тепла – использование обратной стороны кристалла, её контакт с высокотеплопроводным материалом. В работе [83] представлены экспериментальные данные применения данного способа, где в предложенной конструкции корпусирования, кристалл усилителя мощности, реализованного на 0.25 мкм GaN HEMT технологии, монтируется лицевой стороной на подложку, а обратная сторона контактирует с медным теплоотводом. Схематичное представление конструкции и электрические параметры схемы представлены на рис. 15. Рассеиваемая мощность в эксперименте от МИС СВЧ усилителя, размером  $5,0 \times 2,5$  мм<sup>2</sup>, составила от 6 до 20 Вт. Интеграция кристалла внесла минимальные искажения в частотные характеристики схемы в диапазоне 0-14 ГГц, однако несмотря на присутствие дополнительного отвода тепла от обратной стороны кристалла, наблюдается повышение рабочего температурного режима, что говорит о необходимости дальнейшего совершенствования конструкции.

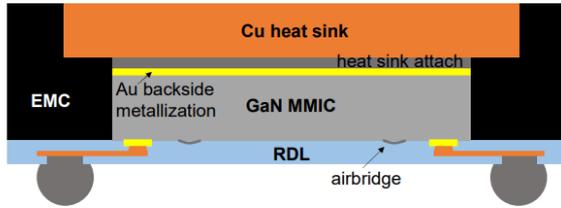
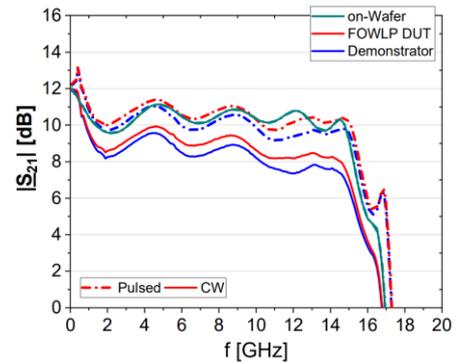


Figure 1: GaN FOWLP package concept.



a)

б)

Рис. 15. Схематичное представление конструкции (а) и зависимость коэффициента усиления от частоты при разных условиях (б) [83]

Другой способ повышения отвода тепла – увеличение площади контакта лицевой стороны кристалла с подложкой в области, близкой с областью тепловыделения. Результаты расчёта показывают, что возможно даже улучшение температурных режимов, по сравнению с традиционным методом интеграции кристалла обратной стороной на теплоотводящее основание [84–87]. Данный способ требователен к точности формирования соединяющих слоёв, их размеров и точности совмещения, что ещё раз подчёркивает актуальность технологии реализации переходных межсоединений с возможностью локального контакта кристаллов с шагом в единицы микрометров.

Интеграция методом перевернутого монтажа на сегодняшний день является интенсивно развивающимся способом в области построения СВЧ модулей на основе гибридно-монолитной концепции. Такие достоинства способа, как минимальные потери и паразитные составляющие эквивалентной схемы переходных межсоединений в СВЧ диапазоне [88], возможность использования готовых и отбракованных кристаллов, реализованных по разным полупроводниковым технологиям и с разными габаритами, одновременное соединение большого количества контактных площадок кристалла с основанием, возможность монтажа на уровне пластины и плотность интеграции, близкая к монолитной, позволяют реализовывать компактные радиоэлектронные модули миллиметрового диапазона длин волн

[89, 90]. Недостатки данного способа – эффект рассогласования, существующие ограничения по тепловому режиму и повышение требований к плоскопараллельности и шероховатости поверхностей кристаллов и оснований при переходе к размерам межсоединений менее 20 мкм, остаются теми факторами, которые замедляют масштабное применение метода перевернутого монтажа в микроэлектронике СВЧ. Актуальными проблемами данной конструкции остаются улучшение отвода тепла от активной области и технология реализации переходных межсоединений с возможностью локального контакта кристаллов с шагом в единицы микрометров.

### 1.1.9. Интеграция методом «hot-via»

Интеграция кристаллов методом перевернутого монтажа наиболее применима для схем с копланарными линиями, чем с микрополосковыми, в связи с появлением эффекта рассогласования из-за близости кристалла с подложкой. Однако, большинство современных ИС применяет именно микрополосковые линии, как наиболее подходящие для мощных схем. Модифицированная конструкция flip-chip - «hot-via» или «direct backside interconnect technology» (DBIT) – технология прямого соединения обратной стороной, была предложена в конце 20 века как альтернатива технологии перевернутого монтажа, совместимая с конструкцией микрополосковых линий [91, 92]. Концепция данного способа представлена на рис.16.



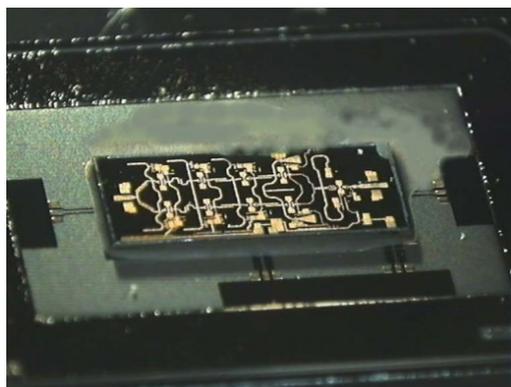
Рис. 16. Концепция интеграции кристалла методом hot-via

Электрические выводы кристалла выведены на обратную сторону через сквозные металлизированные отверстия (т.н. “hot-via”). Металлизация

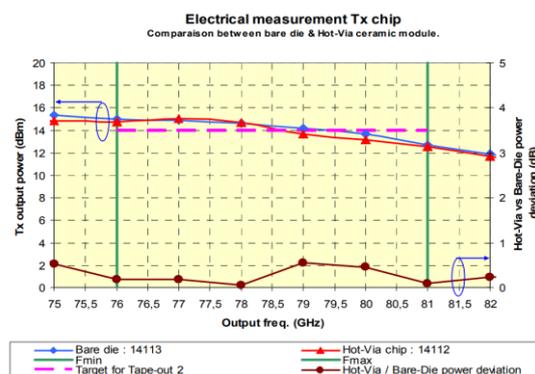
обратной стороны должна иметь требуемую топологию, что повышает сложность изготовления схемы. Кристалл схемы соединяется обратной стороной с основанием с помощью бампов либо соединяющего слоя, например, фольги припоя. Метод монтажа hot-via обеспечивает одновременно электрическое, тепловое и механическое повторяемое соединение. Процесс интеграции имеет идентичные этапы с методом перевернутого монтажа. Возможность реализации подобной конструкции в СВЧ диапазоне является следствием развития технологии формирования локальных проводящих межсоединений.

В миллиметровом диапазоне длин волн форма сигнального сквозного отверстия сильно влияет на характеристики электрического соединения. Например, сигнальное сквозное отверстие в виде квадрата со стороной 35 мкм в подложке толщиной 100 мкм имеет индуктивность около 40 пГн до частот 100 ГГц с тенденцией дальнейшего увеличения [93]. Практическое ограничение применения данного способа на данный момент по частотному диапазону составляет порядка 90 ГГц.

В работе [94] продемонстрирована интеграция ряда кристаллов для приёмно-передающего модуля W диапазона частот. Фотография результатов интеграции и частотные характеристики представлены на рис.17. Кристалл усилителя мощности, реализованного по технологии GaAs 0,15 мкм рНЕМТ, интегрирован на кремниевую подложку. Соединяющие бампы из золота высотой около 45 мкм формируются на уровне пластины до резки на кристаллы, пустоты заполняются проводящим адгезивом. В диапазоне частот 76-81 ГГц усилитель имеет почти идентичную выходную мощность более 12 дБм как отдельного кристалла, так и интегрированного на подложку. Отсутствие сильных различий определяется применением компенсирующих цепочек согласования на кристалле для применения интеграции методом hot-via.



а)



б)

Рис. 17. Фотография интегрированной МИС УМ W-диапазона частот (а) и частотные характеристики (б) [94]

Метод интеграции hot-via, как модификация метода перевернутого монтажа, имеет ряд достоинств по сравнению с flip-chip: лучшая совместимость с микрополосковым построением схем; возможность визуального контроля после монтажа; отсутствие эффекта рассогласования. Однако, метод hot-via не лишён недостатков: требуется формирование сигнальных сквозных отверстий, а обратная сторона должна иметь локальную металлизацию, для разделения заземления и сигнальных контактных площадок; паразитные параметры межсоединения выше, чем у интеграции перевернутым монтажом, так как сквозное отверстие является частью пути сигнала.

Из-за специфических дополнительных технологических требований к кристаллам и повышенных паразитных составляющих переходных межсоединений, данный способ имеет ограниченную область применения. Его дальнейшее совершенствование так же, как и метода перевернутого монтажа, во многом зависит от развития технологии формирования локальных переходных межсоединений.

### 1.1.10. Выводы

Проведён анализ современных и перспективных конструктивных решений интеграции приборов микроэлектроники СВЧ на основе разных полупроводниковых технологий. Развитие конструкций идёт в области снижения межсоединений, уменьшения габаритов, повышения тепловых

характеристик, повышения гетероинтеграции, снижения себестоимости. В таблице 3 представлены результаты сравнения исследованных методов интеграции.

Таблица 3. Результаты сравнения характеристик 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
Hot-via	~75 мкм	+	Любая	Локальный соединяющий слой

Традиционный способ интеграции – проволочный – имеет ограничения по рабочим частотам и приводит к относительно большим габаритам. Развитие способов интеграции, обеспечивающих повышение функциональности и улучшенные электрические 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 реализуют 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 специальных 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.

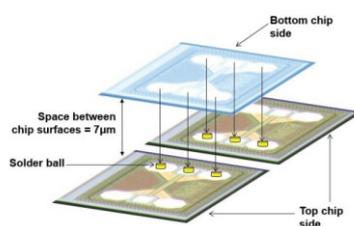
Метод перевернутого монтажа обеспечивает минимальные потери и минимальные паразитные составляющие эквивалентной схемы переходных межсоединений в СВЧ диапазоне благодаря миниатюризации переходных межсоединений. Hot-via, как модификация метода перевернутого монтажа, обеспечивает лучшую совместимость со 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.

## **1.2. Анализ конструктивных вариантов перевернутого монтажа**

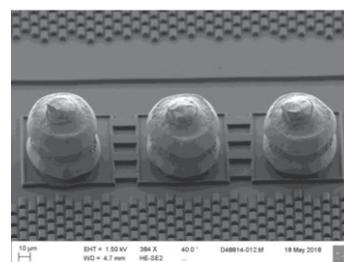
В работе [68] представлены результаты интеграции кремниевых кристаллов методом перевернутого монтажа с применением термокомпрессии

Au-Au. Тестовая конструкция, схематичное представление которой показано на рис. 18а, обеспечивает электрическое соединение трёх Si кристаллов, с одинаковым размером  $0,48 \times 0,36 \text{ мм}^2$ , где один из них монтируется лицевой стороной, объединяя два других. Топология трёх кристаллов идентична, сформированы линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом с заземляющими площадками для измерения параметров конструкции на зондовой станции с конфигурацией G-S-G.

Сигнальная площадка имеет размер  $60 \times 60 \text{ мкм}^2$ . На сигнальных площадках двух кристаллов, сформированы золотые межсоединения. Диаметр межсоединения равен 60 мкм, высота – 10 мкм. Межсоединения сформированы из золотой проволоки путем её расплавления, благодаря поверхностному натяжению образуется форма шарика в виде полусферы. С применением температуры и давления, обеспечивается сварное соединение с кристаллом. Дальнейшее одновременное давление на сформированные межсоединения обеспечивает их планаризацию и параллельность с поверхностью кристалла. Каждое межсоединение состоит из двух шариков. Фотография межсоединений представлена на рис. 18б.



а)



б)

Рис. 18. Эскиз тестовой конструкции (а) и фотография золотых межсоединений, применяемых в конструкции (б) [68]

Монтаж производился методом термокомпрессии при температуре  $360 \text{ °C}$  в течение 3 секунд и давлении с расчётом 2,5 грамма на каждое межсоединение. Результаты измерений и расчёта указывают, что представленная конструкция обеспечивает потери в межсоединении 1,5 дБ на частоте 200 ГГц, 1 дБ на 150 ГГц, 0,2 дБ на 100 ГГц и 0,1 дБ на 50 ГГц.

Однако, высокая температура монтажа в совокупности с необходимостью высокого давления на единицу межсоединения сильно ограничивает область применения данного метода.

В работе [95] описан метод интеграции методом перевернутого монтажа на примере интеграции кристалла с микрополосковой линией на подложке InP с основанием, выполненным также из подложки InP. Металлизация на InP подложках выполнена из Au. Кристалл с микрополосковой линией размером  $0,75 \times 1$  мм<sup>2</sup> лицевой стороной соединяется с подложкой, на которой сформированы локальные межсоединения в виде металлических столбиков из Au, размером  $7 \times 7$  мкм<sup>2</sup>. Высота межсоединений составляет 10 мкм. Монтаж обеспечивается методом термокомпрессии. Фотография тестовой конструкции и её частотные характеристики представлены на рис. 19.

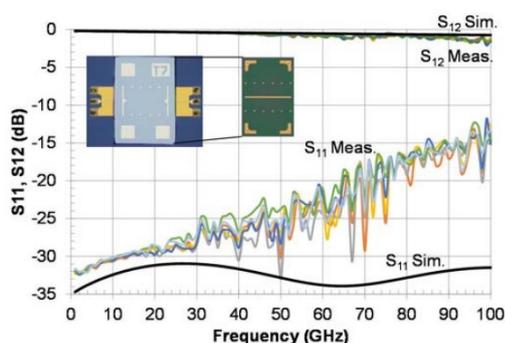


Рис. 19. Фотография тестовой конструкции и её расчётные и измеренные частотные характеристики [95]

Из результатов измерений конструкции с микрополосковой линией на проход, оценочные характеристики потерь на одно межсоединение составляют менее 0,1 дБ на частотах до 30 ГГц и приблизительно 0,4 дБ на 90 ГГц. Несмотря на возможность формирования миниатюрных межсоединений, соединение кристаллов с помощью Au-Au термокомпрессии требует высокой температуры монтажа, давления и высокой плоскопараллельности межсоединений.

В работах [76, 96] описан метод интеграции Si кристаллов методом перевернутого монтажа с применением низкотемпературного слоя индия (In). Тестовая конструкция с копланарной линией имеет основание размером

$2 \times 2 \text{ мм}^2$  с идентичной топологией по входу и выходу и кристалл  $\sim 1 \times 1 \text{ мм}^2$ . Схематическое представление тестовой конструкции и применяемых межсоединений с фотографиями представлено на рис. 20.

Между металлизацией и подложкой кристалла и основания расположен пассивирующий слой SiN толщиной 0,16 мкм. Металлизация на основании – слой Au с барьерным слоем Ni. Металлизация на кристалле представляет собой слой гальванически осаждённого Au толщиной 4 мкм. Межсоединения реализованы на Si кристалле, где гальваническим осаждением сформирован выступ Au высотой 4 мкм, который покрыт слоем Ti/Pt для предотвращения диффузии Au. Сверху тонкий слой In, температура плавления которого  $156 \text{ }^\circ\text{C}$ . Диаметр межсоединения составляет 30 мкм.

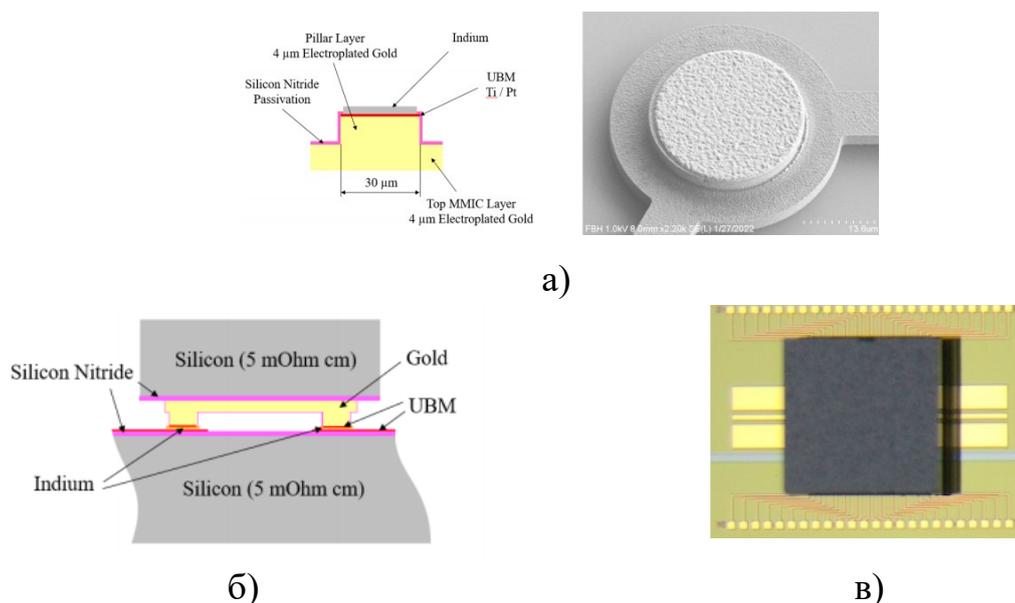


Рис. 20. Тестовая конструкция интеграции Si кристаллов [76]:  
(а) – межсоединение, (б) – Схематическое представление, (в) – фотография интегрированного кристалла

Монтаж проводился при температуре менее  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Результаты зондовых измерений частотных характеристик тестовой конструкции показывают согласование по входу и выходу, обеспечивающее возвратные потери менее -10 дБ в диапазоне частот до 300 ГГц, что косвенно указывает на низкие паразитные характеристики межсоединения. Потери в межсоединении не превышают 0,75 дБ в указанном диапазоне частот согласно последующим измерениям оценкам. Невысокая температурная

стабильность из-за применения низкотемпературного металла как соединяющего слоя ограничивает применение данного метода для интеграции высоконадёжных  $A^3B^5$  кристаллов.

В работе [97] представлены результаты интеграции InP кристалла с SiC основанием методом перевернутого монтажа. На InP кристалле сформированы отрезки копланарной линии, а на основании SiC – отрезки копланарной линии с локальными межсоединениями.

Металлизация, как на InP кристалле, так и на SiC основании, представляет собой напыленные Au с подслоем Ti общей толщиной 0,84 мкм, на слое  $SiO_2$  2 мкм. На SiC основании межсоединения формируются на металлизации последовательным гальваническим осаждением Cu, Ni и SnAg с общей толщиной 20 мкм или более. Толщина Ni и SnAg выбрана больше 2 и 6 мкм соответственно. Габаритные размеры отдельного межсоединения  $\sim 60 \times 40$  мкм. Фотографии SiC основания с копланарными линиями и межсоединениями представлены на рис. 21.

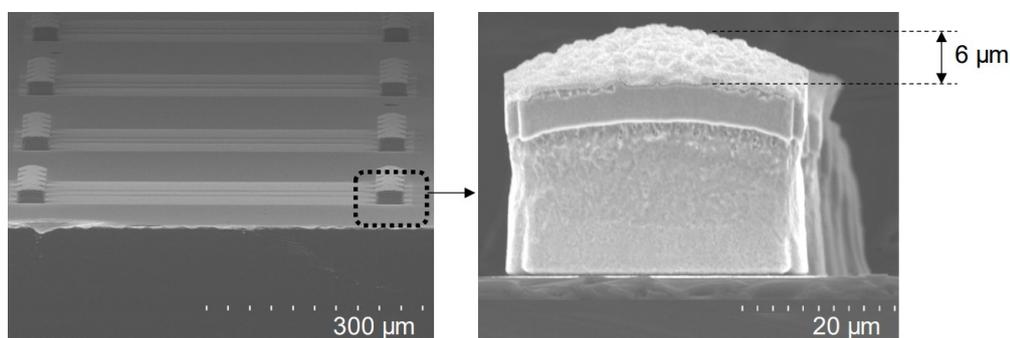


Рис. 21. Фотографии SiC подложки с копланарными линиями и межсоединениями и увеличенного межсоединения [97]

Тестовые кристаллы с массивом копланарных линий были смонтированы друг с другом. Кристалл InP размером  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>, SiC -  $11 \times 11$  мм<sup>2</sup>. Режимы монтажа: давление 10 Н, время монтажа 16 с при температуре 300 °С. При температуре свыше 350 °С наблюдается растекание SnAg, что говорит о невысокой температурной стабильности.

Результаты измерения тестовой конструкции копланарной линии с 20 переходными межсоединениями показывают, что вносимые потери составляют 0,25 дБ/мм на частоте 30 ГГц, а вспомогательные расчёты

демонстрируют, что вносимые потери одного межсоединения 0,07 дБ на частоте 30 ГГц.

В работе [98] представлены результаты реализации интеграции AlN кристалла на Si основание методом перевернутого монтажа, объединяя отрезки полосковых линий. В представленной конструкции экранированная симметричная полосковая линия формируется благодаря сплошной металлизации снизу и сверху, а по бокам – массив из сквозных металлизированных отверстий. Схематичное представление и фотографии конструкции проиллюстрированы на рис. 22. Для формирования трёхуровневой металлизации использованы два слоя диэлектрика бензоциклобутена (BCB) общей толщиной 20 мкм на AlN кристалле и 15 мкм на Si основании. Все металлические слои были выполнены из Au гальваническим осаждением. Толщина варьируется от 2 до 3,5 мкм.

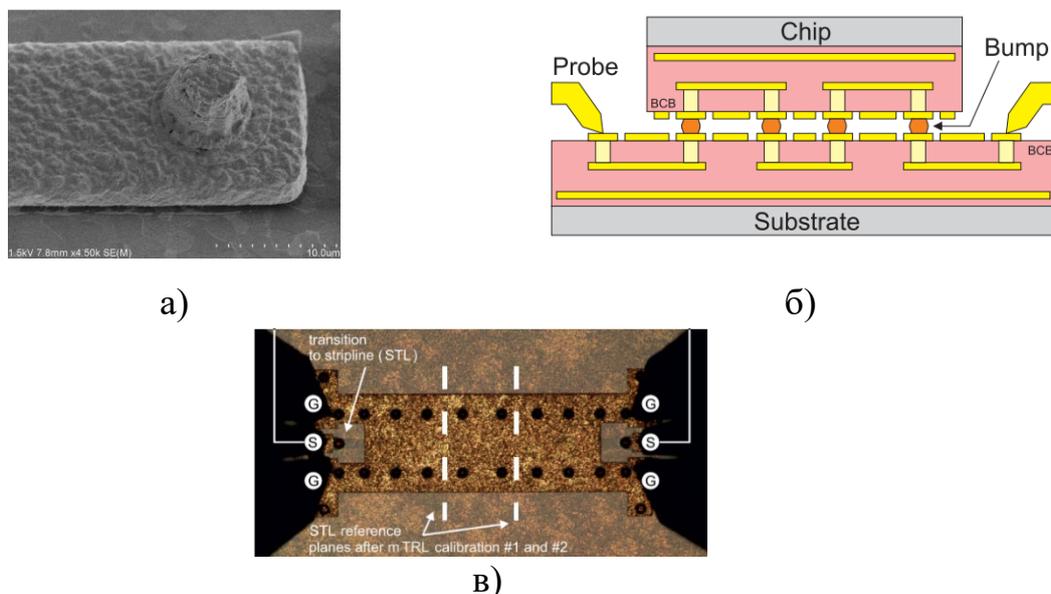


Рис. 22. Тестовая конструкция интеграции кристаллов с полосковыми линиями [98]: (а) – фотография межсоединения на линии передачи, (б) – схематичное представление поперечного сечения тестовой конструкции, (в) – фотография тестовой конструкции с подключенными измерительными зондами

Межсоединения, располагаемые на верхней металлизации Si основания, состоят из системы Au-Sn общей толщиной 6 мкм. Система Au-Sn

формируется вакуумным напылением как несколько последовательных слоёв Au и Sn с применением взрывной литографии. Между металлизацией и межсоединением имеется барьерный слой Pt. Диаметр межсоединений – 10 мкм. Температура при монтаже устанавливалась в диапазоне между 320 °С и 350 °С, время воздействия температуры при монтаже составило 100 секунд. Применение давления необходимо для обеспечения должного контакта, ввиду присутствия разницы высот сформированных межсоединений. В процессе монтажа высота межсоединений уменьшается с 6 мкм до 2 мкм. По результатам измерений тестовых конструкций с разной общей длиной полосковых линий, вносимые потери межсоединения при контакте полосковых линий не превышают 1 дБ до 500 ГГц. Подобный метод интеграции методом перевернутого монтажа с применением напылённой системы Au-Sn позволяет снизить требования к несоответствию высот и плоскостности при монтаже и обеспечить совместимость технологического процесса с производством  $A^{III}B^V$  кристаллов.

Обобщённые данные по представленным способам интеграции кристаллов методом перевернутого монтажа для работы в СВЧ диапазоне представлены в таблице 4.

Таблица 4. Способы интеграции кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа

Организация, ссылка	Интегрируемые подложки	Материал межсоединений	Толщина межсоединений	Шаг между выводами	Потери в межсоединении
ИНР (Германия) [68]	Si на Si	Au-Au	10 мкм	20 мкм	0,2 дБ @ 100 ГГц
Northrop Grumman (США) [95]	InP на InP	Au-Au	~10 мкм	<10 мкм	0,4 дБ @ 90 ГГц
FBH (Германия) [76, 96]	InP на Si	Au-In	~ 4 мкм	< 10 мкм	0,75 дБ @ 300 ГГц
NNC (Ю. Корея) [97]	InP на SiC	Au-Cu-Ni-SnAg-Au	20 мкм	~ 10 мкм	0,07 дБ @ 30 ГГц
FBH (Германия) [98]	AlN на Si	Au-Sn	6 мкм	< 10 мкм	1 дБ @ 500 ГГц

Методы интеграции  $A^{III}B^V$  кристаллов с помощью термокомпрессии, что подразумевает монтаж Au-Au, требует применения высокого давления и температуры порядка 350 °С, либо обеспечения плоскопараллельности соединяемых кристаллов и шероховатости поверхностей на уровне десятка и единиц нанометров. Данные условия не позволяют широко применять подобный способ из-за существующих технологических ограничений. Применение низкотемпературных материалов, как In, и сплавов, таких как SnAg, несмотря на приемлемую температуру при монтаже и невысокую требовательность к шероховатости, обладает невысокой температурной стабильностью, менее 300 °С, что ограничивает область применения интегрированных кристаллов. Многообещающим решением является применение высокотемпературных сплавов, таких как на основе системы Au-Sn, что не требует высокого качества поверхности, и имеет высокую температурную стабильность и совместимость с технологическими процессами изготовления  $A^{III}B^V$  приборов.

### **1.3. Заключение по главе 1 и постановка задачи**

Выполненный анализ показал, что вопросы гетерогенной интеграции 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-монолитной 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 габаритам, одновременное соединение большого количества контактных площадок кристалла с подложкой, возможность монтажа на уровне пластины, плотность интеграции, близкую к монолитной, позволяют реализовывать компактные

радиоэлектронные модули миллиметрового диапазона длин волн. Актуальными проблемами данной конструкции остаются улучшение отвода тепла от активной области и технология реализации переходных электрических межсоединений с шагом в единицы микрометров.

Далее представлены 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.

## ГЛАВА 2. Взаимная переходная диффузия Au-Sn

### 2.1. Современные способы соединения кристаллов $A^{III}B^V$

Современный уровень механического монтажа кристаллов в СВЧ микроэлектронике имеет несколько вариантов соединения кристаллов с подложкой или друг другом. Наиболее распространённые являются адгезионный монтаж, пайка эвтектическими сплавами, термокомпрессионный монтаж или монтаж методом взаимной переходной диффузии (англ. сокр. SLID – Solid-Liquid Interdiffusion).

Адгезионный (клеевой) монтаж является одним из базовых способов к механическому монтажу кристаллов в микроэлектронике СВЧ. Адгезив определяется как материал, способный соединить две поверхности. Адгезивы включают натуральные и синтетические органические материалы, которые обычно состоят из полимеров, то есть, макромолекул, сформированных путем соединения множества более простых молекул – мономеров [99]. Процесс соединения поверхностей требует нанесения адгезионного слоя на одну или две поверхности. Далее, проведение процесса соединения поверхностей проходит при определённом давлении. Следующий этап – переход вязкотекучего или жидкого адгезива в твердое состояние, путем либо нагрева, либо воздействия ультрафиолетового света. Главными достоинствами клеевого соединения является низкие температуры при монтаже, низкая чувствительность к поверхностям соединения, совместимость со всеми стандартными технологиями и возможность соединять любые материалы. Данный способ не предъявляет особых требований к планаризации поверхностей. По сравнению с альтернативными вариантами монтажа, данный метод прост, имеет низкую стоимость и невысокие требования к условиям монтажа [100]. Однако, клеевое соединение не обеспечивает герметичное соединение. Клеевое соединение также имеет ограниченный рабочий температурный диапазон, отсутствуют данные о долговечности и надёжности в рабочей среде эксплуатации. Более того, клей –

нежелательный элемент в космической аппаратуре, ведущий к уменьшению срока службы изделия.

Растекание клея и технологический разброс при адгезионном монтаже не позволяет применять данный метод для точного локального соединения. Большие толщины получаемых соединяемых слоёв и невысокая теплопроводность адгезионных материалов является следствием значительного теплового сопротивления, влияющего на отвод тепла. В связи с этим, ведутся исследования по формированию адгезионных соединений с тонкими слоями [101] и повышенной теплопроводностью [102]. Однако их масштабное практическое применение далеко от реализации.

Пайка – самая распространённая технология монтажа в микроэлектронике СВЧ. Её основной компонент – припой, обычно двухсоставной материал, проходящий 3 этапа при монтаже. Припой располагается между двумя поверхностями для их соединения. Припой и соединяемые поверхности подвергаются нагреву выше температуры плавления припоя. В результате припой переходит в жидкое состояние, смачивает металлизацию поверхностей. При последующем охлаждении до комнатной температуры, припой затвердевает, с образование прочного контакта между поверхностями.

Припой в расплавленном состоянии смачивает металлизацию поверхностей, начиная процесс взаимной диффузии, в случае, когда элементы припоя и металлизация обладают ярко выраженной смешиваемостью. В противном случае, интерметаллические составляющие (ИМС) формируются на границе припой-металлизация. По определению, ИМС является соединением, состоящим из двух или более металлов (или неметаллов) с определенной стехиометрией и комбинацией металлических и ковалентных соединений, которые в большинстве случаев образуют более жесткие и хрупкие области соединения.

Припой может быть реализован как непрерывный слой, или плотная сетка из отдельных шариков припоя. Во всех случаях, требуется хорошая

смачиваемость, чтобы расплавленный припой мог однородно распределиться по площади поверхности.

Наиболее распространённый материал припоя в микроэлектронике СВЧ является эвтектический сплав  $80\text{AuSn}$ , с весовым процентным содержанием золота 80%. Он применяется в аппаратуре с высокими требованиями по стойкости к внешним воздействующим факторам и надёжности, при относительно низкой температуре монтажа. В сравнении с другими припоями,  $80\text{AuSn}$  имеет высокую прочность соединения и отсутствие усталости от термоциклов. Использование золотосодержащих припоев обуславливается за счёт высокой тепло- и электропроводности, высокой стойкости к коррозии и окислению при повышенных температурах и хорошими механическими свойствами. Среди золотосодержащих припоев ( $\text{Au-Si}$ ,  $\text{Au-Ge}$ ,  $\text{Au-Sn}$ ), эвтектический сплав  $80\text{AuSn}$  имеет наименьшую температуру плавления.

Достоинства монтажа с помощью пайки является толерантность к плоскопараллельности и шероховатости поверхностей, гибкость и универсальность процесса. К недостаткам данного метода относятся: низкая температурная стабильность, смачивание и растекание материала припоя. Последующая чрезмерная эрозия может быть проблемой, а рост толщины интерметаллических слоёв может вызвать повышенную хрупкость.

Термокомпрессионный монтаж – активно набирающий популярность метод в СВЧ микроэлектронике [71]. Термокомпрессионный монтаж является способом, с помощью которого достигается прочный контакт соединяемых поверхностей при воздействии давления и температуры. Температура разогреваемых материалов контролируется и не допускается переход их в расплавленное состояние. Воздействие тепла и давления позволяет достичь пластического течения материалов, что определяет приближение на расстояние межатомного взаимодействия. Это катализирует процесс взаимной диффузии между соединяемыми поверхностями, образуя твёрдое

соединение при температуре, существенно ниже точки плавления применяемых материалов.

Наиболее распространёнными материалами для термокомпрессионного монтажа являются медь (Cu) [72] или золото (Au) [73]. Данный процесс в последнее время всё шире применяется в микроэлектронике СВЧ для монтажа кристаллов на уровне пластины и 3D монтажа.

Достоинствами термокомпрессионного монтажа металл-металл являются высокая температурная стабильность, возможность реализации локального соединения, гомогенное соединение, точный контроль толщины соединения. К недостаткам данного метода относятся необходимость предельно чистых и плоских поверхностей, уровни значений температуры и давления при монтаже. Уменьшение температуры монтажа требует повышение плоскостности и чистоты соединяемых поверхностей.

Альтернативным способом соединения кристаллов является технология монтажа методом взаимной переходной диффузии (англ. – Solid-Liquid Interdiffusion, букв. взаимодиффузия твёрдой и жидкой фаз). Термин Solid-Liquid Interdiffusion (SLID) был введен в 1966 году Л. Берштейном [103]. Он определил этот процесс как формирование стабильных высокотемпературных интерметаллических соединений путем диффузии между твердой и жидкой фазами. Применение подобных реакций описываются и другими терминами: Transient Liquid Phase (TLP), введенный Д. Пауонисом, Д. Дуаваллом и У. Овцарски в 1972 году [104, 105], off-eutectic [106, 107] или isothermal solidification [108]. Все они реализуют соединение двух поверхностей путем реакции изотермического затвердевания между металлами с разной температурой плавления [109].

Монтаж методом взаимной переходной диффузии – технология, основанная на интерметаллических соединениях как связующей среде, стабильной при температурах, сильно превышающих температуру монтажа. Процесс взаимной переходной диффузии основан на системе двух металлов, металла с высокой температурой плавления (как Cu, Au, Ag, Ni) и металла

с низкой температурой плавления (как Sn, In). Самыми исследованными системами слоёв монтажа методом взаимной переходной диффузии являются Cu-Sn [110] (применяется в цифровой микроэлектронике, МЭМС) и Au-Sn (больше подходит для оптоэлектроники и СВЧ электроники). В общем случае, между двумя металлами с высокой температурой плавления помещён тонкий слой металла с низкой температурой плавления для формирования соединения методом взаимной переходной диффузии. При температуре монтажа, которая выше температуры плавления последнего, металлы диффундируют друг в друга и создают интерметаллические соединения с высокой температурой плавления. Необходим полный переход металла с низкой температурой плавления в интерметаллические соединения, чтобы получить высокотемпературную стабильность. Получаемое соединение состоит из оставшихся слоёв металла с высокой температурой плавления и интерметаллических соединений, образованных после оплавления и взаимной диффузии. Достоинства технологии взаимной переходной диффузии – относительно низкая температура монтажа и одновременно высокая температурная стабильность ввиду высокой температуры плавления полученных интерметаллических соединений, возможность точного локального соединения, контроля толщины. Формирование соединительного слоя тонкоплёночными методами позволяет точно задавать его размеры. Наличие в процессе монтажа переходной жидкостной фазы позволяет сглаживать небольшие неровности поверхностей. Из недостатков данного метода можно выделить неремонтопригодность, так как процесс необратимый, требуются достаточно плоскопараллельные сопрягаемые поверхности. В последнее время данный процесс всё чаще внедряют в технологию микроэлектроники для 3D монтажа кристаллов на пластину [111]. К настоящему времени, методы монтажа для 3D интеграции в основном включали прямой монтаж, адгезивный монтаж и термокомпрессионный монтаж металл-металл. Однако вышеперечисленные методы имеют свои недостатки. Монтаж методом взаимной переходной диффузии становится всё

более привлекательным, так как процесс проходит на низких температурах, а полученное соединение выдерживает более высокие температуры. Краткое обобщение основных параметров методов монтажа представлено в таблице 5.

Таблица 5. Сравнение основных типов монтажа в микроэлектронике СВЧ

Технология монтажа	Условия монтажа	Требование к поверхности	Требование к среде монтажа	Рабочий диапазон температур	Теплопроводность, Вт/(м×К)	Толщина соединений, мкм	Шаг, мкм
Клей	150 – 250 °С	Низкая	нет	до 150 °С	~ 50	~20	>100
Пайка преформ 80AuSn	280 °С	Низкая	Вакуум, инертная среда	до 280 °С	57	~20	>100
Термокомпрессия Au-Au	350 °С	Высокая	Желателен вакуум, инертная среда	свыше 400 °С	301	единицы мкм	<10
SLID Au-Sn	250 – 320 °С	Средняя	Вакуум, инертная среда	свыше 400 °С	>57	единицы мкм	<10

Таким образом, соединение с возможностью локального контакта и улучшенными характеристиками с точки зрения теплового сопротивления в современной микроэлектронике СВЧ может быть реализовано либо с помощью термокомпрессии, либо технологией взаимной переходной диффузии. Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии, имеет такие преимущества по сравнению с традиционной термокомпрессией, как: пониженная температура монтажа, пониженная требовательность к качеству поверхности. Данная технология монтажа становится всё более привлекательной для соединения металлов, керамики и композитов [112]. 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.

## 2.2. Система Au-Sn

Система Au-Sn имеет сложную фазовую диаграмму [113]. Система обладает двумя эвтектическими точками и шестью интерметаллическими соединениями, стабильными при комнатной температуре. Бинарная система фазовых состояний золота-олова представлена на рис. 23. Основные характеристики фазовых состояний золота-олова представлены в таблице 6.

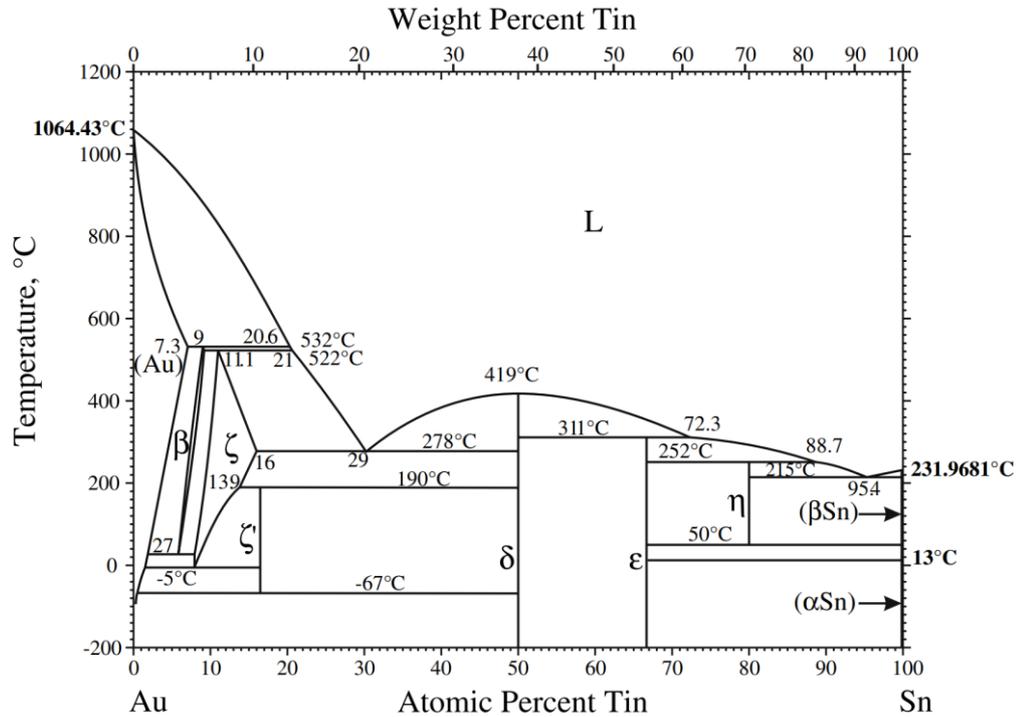


Рис.23. Фазовая диаграмма Au-Sn [113]

Таблица 6. Фазовые состояния системы Au-Sn [114, 115, 116].

Фаза	Содержание олова, ат. %	Температура плавления, °C	Теплопроводность, Вт×м <sup>-1</sup> ×К <sup>-1</sup>	Электрическое сопротивление, Ом×см	Е, ГПа	КТЛР, ppm×м <sup>-1</sup>
α (Au)	0	1064	301	2,35×10 <sup>-6</sup>	77,2	14.4
β (Au <sub>10</sub> Sn)	8	532			88	-
ζ (Au <sub>0.84-0.92</sub> Sn <sub>0.16-0.08</sub> )	10,9 – 16	522			58	20
ζ' (Au <sub>5</sub> Sn)	16,7	190			76	18
80Au20Sn (ζ + δ)	29	278	57.3	2,23×10 <sup>-5</sup>	69-74	16
δ (AuSn)	50-50,5	419	57		70-87	14
ε (AuSn <sub>2</sub> )	66,7	311			103	
η (AuSn <sub>4</sub> )	80	252			39	
Sn	100	232	63	1,5×10 <sup>-5</sup>	41	24

В данной работе особое внимание уделено фазам с высоким содержанием золота, т.е. β, ζ, ζ' и δ. Фаза β (Au<sub>10</sub>Sn) имеет самые высокие показатели модуля Юнга (88 ГПа) и температуры плавления (532 °C). Фаза ζ

( $\text{Au}_{0.84-0.92}\text{Sn}_{0.16-0.08}$ ) имеет температуру плавления  $522\text{ }^{\circ}\text{C}$  и обладает наименьшим показателем модуля Юнга (58 ГПа) среди фаз с высоким содержанием золота, что означает наилучшую способность выдерживать термомеханические напряжения. Фаза  $\zeta'$  ( $\text{Au}_5\text{Sn}$ ) при температуре  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  преобразуется в фазу  $\zeta$ . Модуль Юнга 76 ГПа фазы  $\zeta'$  свидетельствует о ограниченных возможностях поглощать механическое напряжение. Фаза  $\delta$  ( $\text{AuSn}$ ), температура плавления которой составляет  $419\text{ }^{\circ}\text{C}$ , является достаточно хрупкой с показателем модуля Юнга 70-87 ГПа.

Монтаж взаимной переходной диффузией определяется как формирование твердых соединений путем реакции изотермического затвердевания. Традиционно в подобном процессе выделяют четыре основных этапа [117, 118, 119]. Схематичное представление проиллюстрировано на рис. Рис. 24 на примере простой системы Au-Sn. Первый этап – соединение поверхностей и их предварительный нагрев. Давление при контакте варьируется от 1 МПа до 10 МПа. Второй этап – разогрев до температуры, превышающей температуру плавления Sn. Превышение температуры плавления Sn сопровождается поверхностными (граничными) реакциями и симметричным ростом интерметаллических составляющих в низкотемпературном слое. Третий этап – изотермическое затвердевание. Постепенный рост твердой фазы в виде интерметаллических соединений, при котором уменьшается слой расплавленного низкотемпературного материала. Процесс завершается после полного поглощения расплавленного слоя твердой фазой. Четвертый этап – гомогенизация, предназначен для снятия остаточного напряжения, вызванного термическим воздействием и изменением микроструктуры соединения с обеспечением однородности соединения. Представляет собой диффузию в твердом теле. Процесс диффузии присутствует во всех четырех этапах, но в последнем этапе после завершения процесса изотермического затвердевания, он становится единственным механизмом реакции.

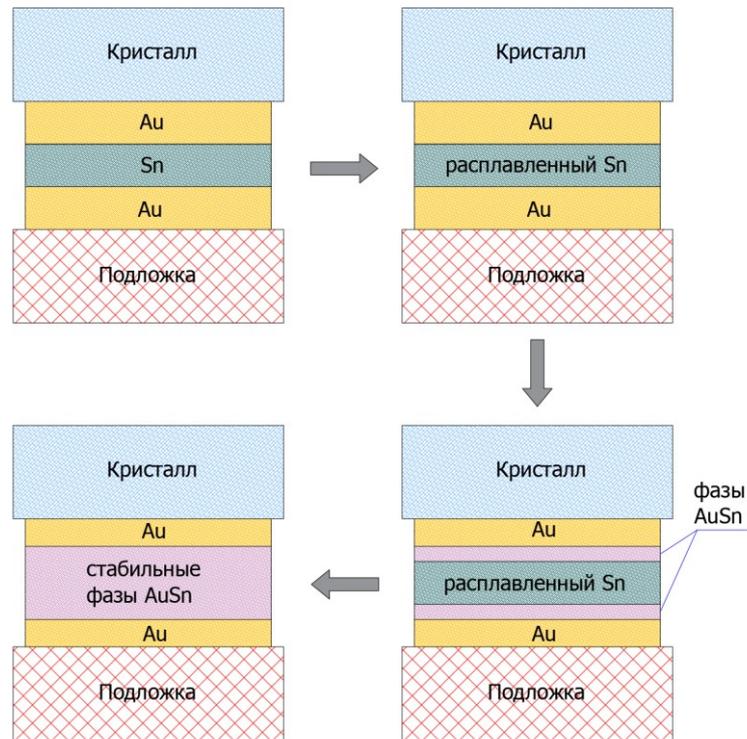


Рис. 24. Схематичное представление процессов взаимной переходной диффузии

## 2.3. Исследование многослойной системы Au-Sn

### 2.3.1. Предлагаемая структура соединяющего слоя из системы Au-Sn

С целью определения возможности применения технологии монтажа взаимной переходной диффузией для кристалльного производства проведены эксперименты по нанесению многослойного покрытия Au-Sn-Au-Sn-Au, анализ полученной структуры, монтажу кристаллов с применением исследуемой структуры. Основные результаты исследования представлены в работе [120]. Проведение эксперимента состояло из трех этапов: этап 1 – исследование нанесенного многослойного покрытия Au-Sn на подложке сапфира; этап 2 – исследование нанесенного многослойного покрытия Au-Sn на подложке сапфира после термообработки; этап 3 – исследование результатов монтажа с помощью нанесенного многослойного покрытия Au-Sn.

Тестовая конструкция соединяющего слоя состоит из пяти последовательно напылённых слоёв Au-Sn-Au-Sn-Au толщиной 1,0-1,0-1,0-1,0-0,3 мкм соответственно. В рамках данного исследования многослойное покрытие наносилось как на подложку с адгезионным слоем титана (Ti) 0.15 мкм, так и на слой золота 3.0 мкм. Тестовая конструкция реализована на подложке сапфира толщиной 450 мкм. Схематичное представление тестовых конструкций изображено на рис. 25. Важным аспектом является напыление вышеуказанных пленок в одном процессе, исключая контакт с воздухом, тем самым избегая образование оксида олова, присутствие которого сильно влияло бы на процесс плавления и последующего взаимодействия с золотом [121]. Отношение толщин золота и олова для получения соотношения по весу 80 на 20 требует соотношения по толщине 3:2. Избыток металла с высокой температурой плавления обычно необходим, чтобы обеспечить вариации процесса и придать пластичность финальному соединению (чистый металл обычно более пластичный чем интерметаллические соединения) [122].

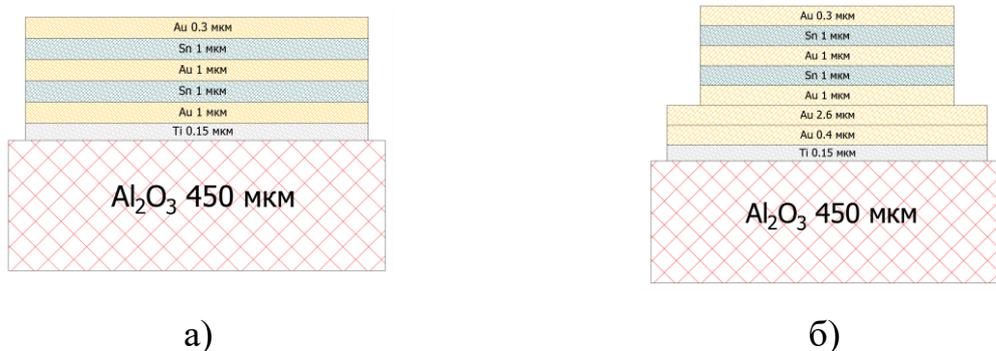


Рис. 25. Схематичное представление тестовых конструкций

### 2.3.2. Исследования сформированной структуры Au-Sn

#### *Электронная микроскопия сформированной системы слоёв.*

Анализ поперечного сечения является общепринятым методом исследования микроструктуры системы слоёв и соединенных образцов. В данном исследовании проводился анализ поперечного сечения как отдельных тестовых конструкций, так и смонтированных образцов. Было изготовлено более 10 пластин с тестовыми конструкциями. Подготовка

образцов для анализа включала резку пластины на отдельные кристаллы размером  $4 \times 5,5$  мм, шлифовку, полировку кристаллов и последующее травление. Исследование морфологии структур экспериментальных образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе Zeiss Merlin compact VP-60-13. Фотография типичного поперечного сечения образца с нанесенной системой слоев представлена на рис. 26.

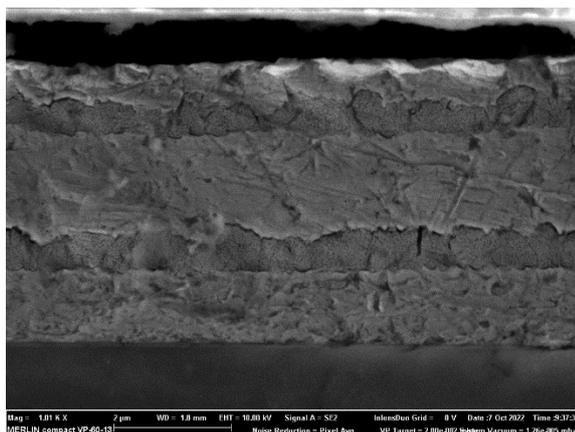


Рис. 26. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au-Sn

Электронная микроскопия позволила определить фактические значения толщин наносимых многослойных покрытий и их морфологии. На фотографии явно выражены пять последовательных слоёв, в которых три слоя отличны от двух других. На фотографии представленного образца общая толщина структуры составила 4,7 мкм, а отдельных слоёв – 1,2, 0,72, 1,6, 0,68, 0,6 мкм. Морфология всех слоёв Au, как и Sn схожа друг с другом.

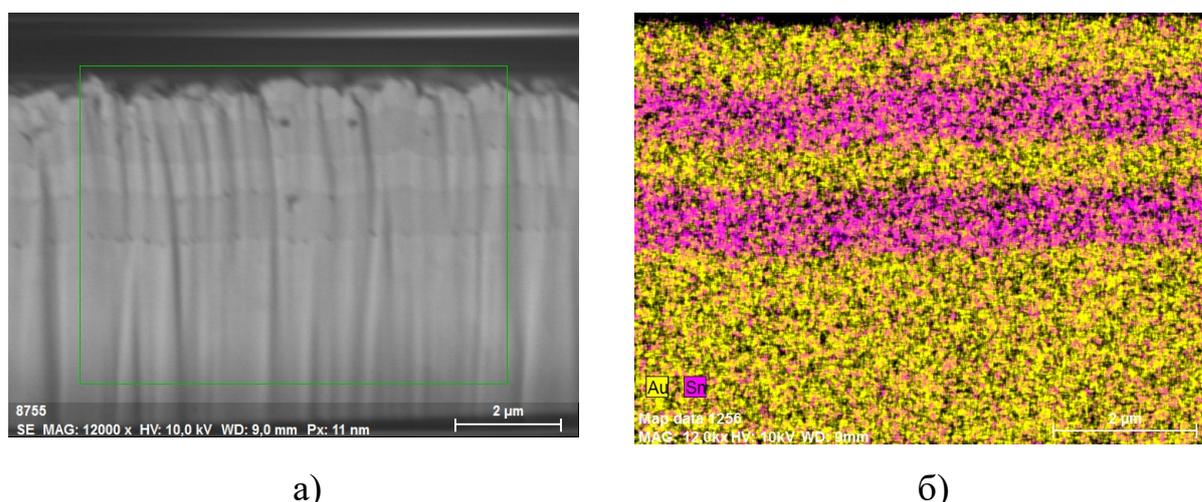
***Картирование по элементам методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии сформированной системы слоёв.***

Исследование элементного состава образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV, оснащенного приставкой для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCA Energy X-MAX20. Метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии основан на эффекте испускания атомами образца характерного рентгеновского излучения при их возбуждении за счет внешнего воздействия. В нашем случае возбуждение атомов осуществлялось ускоренным пучком электронов в сканирующем электронном микроскопе.

Сочетание методов электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа позволяет осуществлять картирование элементного состава многослойных покрытий с высоким пространственным разрешением. Область возбуждения атомов зависит от многих факторов: от энергии электронного пучка, атомного номера элемента, сфокусированности пучка. Поглощение рентгеновского излучения также зависит от материала образца. Из-за сложности анализа всех факторов данный метод применяется для анализа относительного содержания элементов и не подходит для измерения количественных величин.

Применяемое оборудование позволяет осуществлять также точечный анализ состава образца. При этом положение электронного луча фиксируется в выбранной точке изображения, а растровое сканирование не производится. Диаметр точки зависит от степени фокусировки пучка и, как правило, составляет единицы нанометров. При этом рентгеновский спектр излучается из некоторого объёма материала, который зависит от глубины проникновения электронов и области их рассеяния. Траектории движения электронов при их взаимодействии с твердыми телами образуют грушевидный профиль, параметры которого определяются энергией электронов и атомным номером материала. Возбуждение рентгеновского спектра, однако, может происходить не в любой точке траектории, а только там, где энергия электрона достаточна для этого. Моделирование всех описанных факторов является сложной задачей, и в данной работе не проводилось.

Рентгенофлуоресцентное энергодисперсионное картирование сечения покрытия (рис. 27) позволило визуализировать распределение элементов Au (желтый маркер) и Sn (розовый маркер). Из рис.27а видно, что нанесенная система, состоит из пяти слоев, в которых три слоя - напыление Au, а два – напыление Sn. Точечный анализ указывает на присутствие в слоях олова доли золота около 50 ат.%. Диффузия золота в олово при формировании системы слоёв связана с температурными режимами при напылении.



а)

б)

Рис. 27. Фотография шлифа образца с системой слоев Au-Sn (а) и картирование по элементам системы по сечению (б)

### ***Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ сформированной системы слоёв.***

Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы образцов проводились с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-8 (Дифрактометр рентгеновский общего назначения, АО «ИЦ «Буревестник») с кобальтовым анодом (CoK $\alpha$ ).

Метод рентгеновской дифрактометрии основан на способности рентгеновских лучей отражаться от плоских сеток, образованных атомами в кристаллической решетке материала, что приводит к возникновению дифракционных отражений, каждое из которых характеризуется определенным межплоскостным расстоянием и интенсивностью. Основной задачей рентгенофазового анализа является идентификация различных фаз в их смеси на основе анализа межплоскостных расстояний в кристаллической структуре материала. Использовался « $\theta$ - $\theta$ » способ сканирования, по рентгенооптической схеме Брэгга-Брентано с горизонтальным расположением предметного столика, на котором фиксируется исследуемый образец, радиус гониометра составлял 200 мм. Для регистрации дифрагированного рентгеновского пучка использовался сцинтилляционный детектор. Съёмка дифрактограммы производилась с шагом сканирования  $2\theta$   $0,05^\circ$  и скоростью  $2^\circ\text{C}/\text{мин}$  в непрерывном режиме.

На рис. 28 представлена дифрактограмма образца с нанесенной системой слоев Ti-Au-Sn-Au-Sn-Au на подложке сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Черным маркером обозначена подложка из сапфира, с характерной ориентацией по плоскости (012) и параллельной ей плоскости (024). Фиолетовым маркером обозначены идентифицированные слои Au (PDF № 03-065-8601) с кубической решеткой. Также в образце были обнаружены интерметаллические соединения  $\text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$  (PDF № 01-077-7004) и AuSn (PDF № 01-071-5019) – темно-оранжевый и зеленый маркеры соответственно. В круглых скобках на дифрактограмме обозначены плоскости кристаллических решеток, рефлексы которых были зарегистрированы детектором.

В ходе проведенного исследования чистой фазы Sn на дифрактограмме образца не было обнаружено. Что может быть связано с взаимодействием в процессе нанесения металлизации Au с Sn, их взаимной диффузией друг в друга с образованием интерметаллических соединений с гексагональными решетками  $\text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$  и AuSn структуры юаньдзиангита. Чистую фазу Ti не удалось идентифицировать в связи с малой толщиной покрытия (100 нм) для регистрации данным методом, которую проблематично выделить из фона.

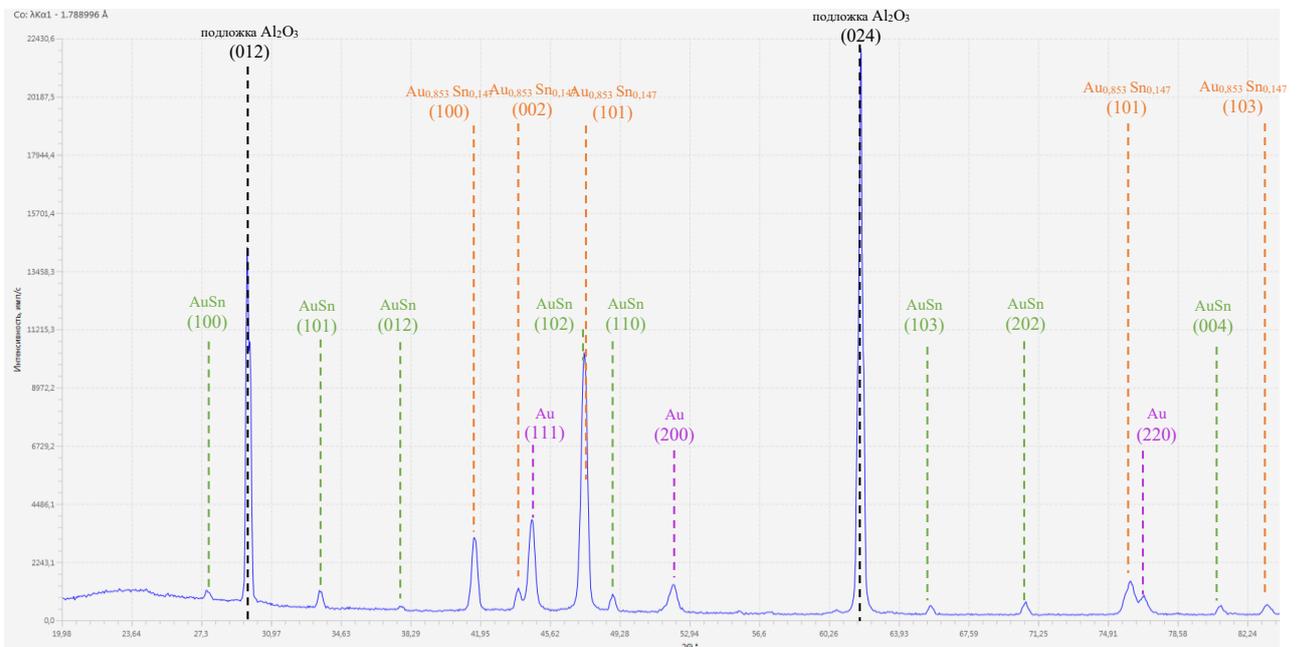


Рис. 28. Дифрактограмма образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti-Au-Sn-Au-Sn-Au

Результаты анализа с идентифицированными фазами, структурой, кристаллографической группой симметрии (сингонией), и соответствующими основными межплоскостными расстояниями также приведены в таблице 7.

Таблица 7. Обнаруженные фазы образца с нанесенной системой металлизации

№	№ Карточки	Химическая формула	Название	Сингония	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>
1	01-073-6190	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (подложка)	Corundum	Rhombohedral	2.5528	2.0871	1.6027
2	01-071-5019	AuSn	Yuanjiangite	Hexagonal	2.2221	2.1609	3.7428
3	01-077-7004	Au <sub>0,853</sub> Sn <sub>0,147</sub>	Gold Tin	Hexagonal	2.2287	2.393	2.5185
4	03-065-8601	Au	Gold	Cubic	2.3510	2.0360	1.2278

### 2.3.3. Исследования сформированной структуры Au-Sn после термообработки

С целью имитации процесса монтажа по технологии взаимной переходной диффузии была произведена термообработка полученной многослойной структуры на подложке с нагревом от комнатной температуры до 320 °С в течение 300 секунд. Далее – выдержка 600 секунд, с последующим охлаждением до комнатной температуры в течение 600 секунд. Термообработка проводилась в защитной среде N<sub>2</sub>.

*Электронная микроскопия сформированной системы слоёв после термообработки.*

После имитации процесса монтажа был повторно проведена электронная микроскопия образца с покрытием. На рис. 29 представлена фотография шлифа образца, на которой визуальнo наблюдается однослойное, однофазное и однородное покрытие общей толщиной 4,3 мкм. Результаты электронной микроскопии позволяют сделать вывод об образовании единого интерметаллического соединения между Au и Sn. Имеет место уменьшение общей толщины из-за уменьшения объема при образовании интерметаллических соединений.

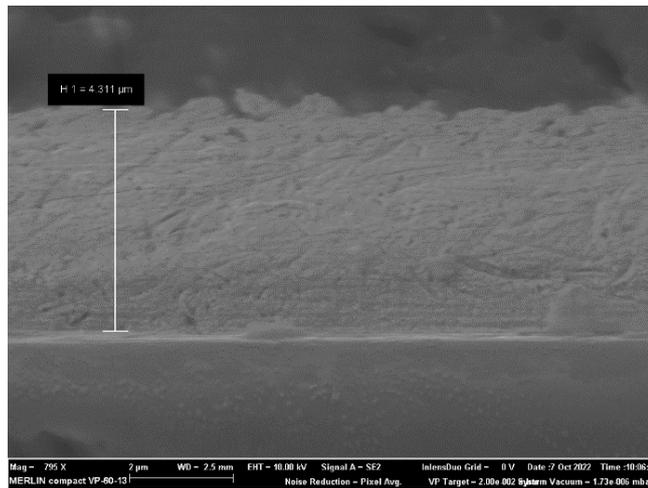
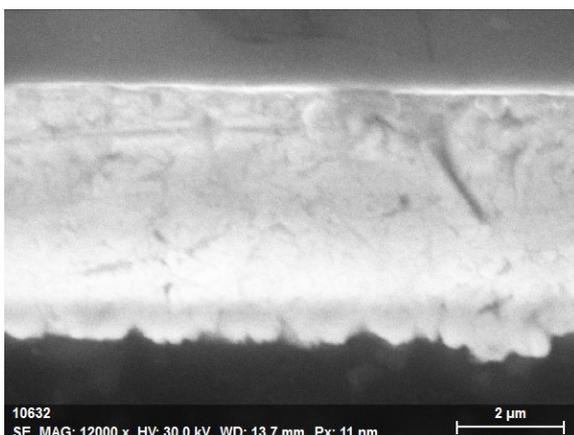


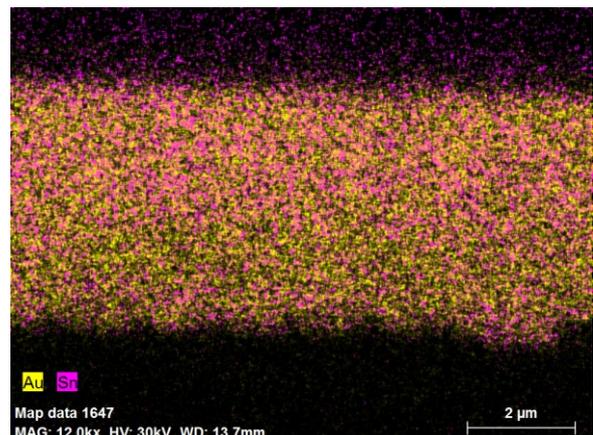
Рис. 29. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au-Sn после термообработки

*Картирование по элементам методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии сформированной системы слоёв после термообработки.*

Картирование элементного состава сечения системы металлов после термообработки (рис. 30) позволило визуализировать распределение элементов Au (желтый маркер) и Sn (розовый маркер). Из рис. 30 видно равномерное распределение элементов по всему сечению покрытия. Точечный анализ свидетельствует о разбросе концентрации олова в пределах от 14,5 до 15,9 ат.% по площади сечения. Средняя концентрация олова по сечению составила 15 ат.%.



а)



б)

Рис. 30. Фотография поперечного сечения образца с системой слоев Au-Sn после термообработки(а) и картирование системы по сечению (б)

### *Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ сформированной системы слоёв после термообработки.*

Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti-Au-Sn-Au-Sn-Au после термообработки также проводились по аналогичной схеме, как приведено ранее.

Полученная дифрактограмма образца представлена на рис. 31, из которой видно, что после проведения термообработки (320 °С, выдержка 10 минут), на подложке монокристаллического  $\text{Al}_2\text{O}_3$  образуется единая фаза  $\text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$  из системы нанесенных покрытий. Что подтверждается проведенными исследованиями энергодисперсионным методом с однородным распределением в сплаве элементов Au и Sn по всей толщине покрытия.

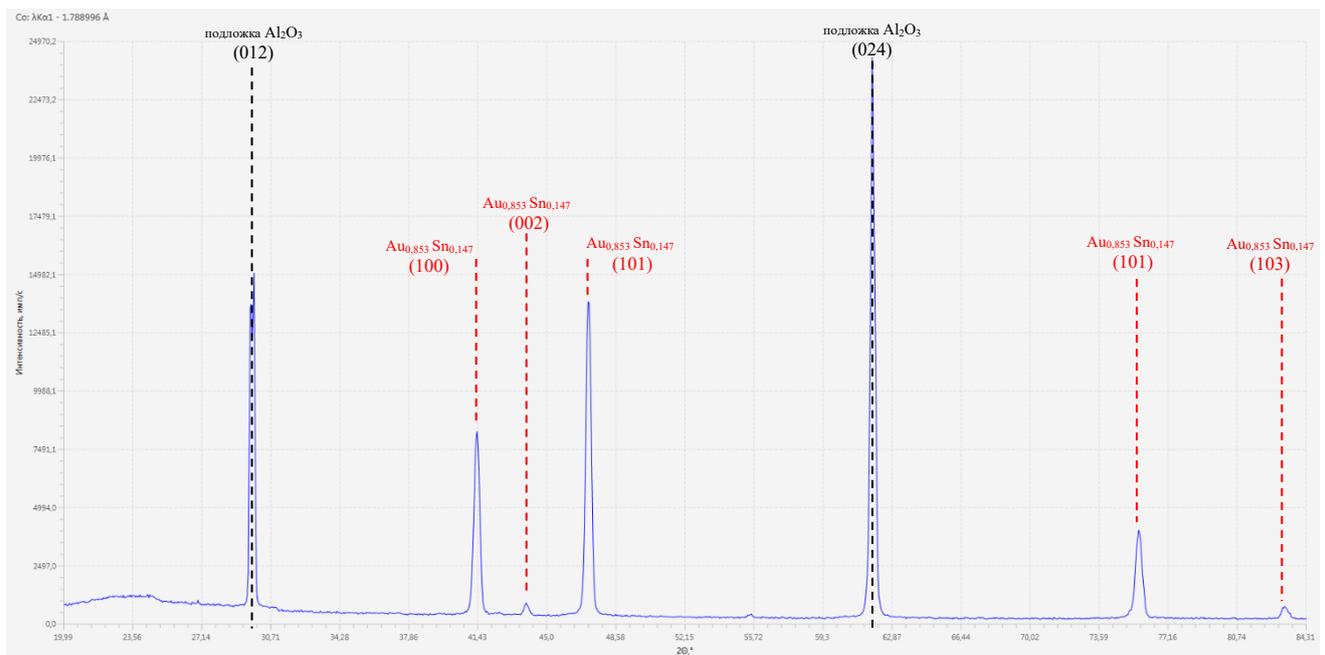


Рис. 31. Дифрактограмма образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti-Au-Sn-Au-Sn-Au после термообработки

Результаты анализа с идентифицированными фазами, структурой, кристаллографической группой симметрии (сингонией), и соответствующими основными межплоскостными расстояниями также приведены в таблице 8.

Таблица 8. Обнаруженные фазы образца сапфира с нанесенной системой металлизации после термообработки.

№	№ Карточки	Химическая формула	Название	Сингония	d1	d2	d3
1	01-073-6190	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Corundum	Rhombohedral	2.5528	2.0871	1.6027
2	01-074-6471	$\text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$	Gold Tin	Hexagonal	2.2394	2.3898	2.5348

Сравнительный анализ дифрактограмм (рис. 32) наглядно показывает отличие фаз в образце до и после термообработки.  $\text{AuSn}$ ,  $\text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$  и  $\text{Au}$  претерпевают диффузионное превращение с образованием отдельной  $\zeta$  фазы  $\text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$ , что подтверждается изменением межплоскостных расстояний по основным плоскостям фазы (100) и (101) на 0,0107 Å и 0,0163 Å.

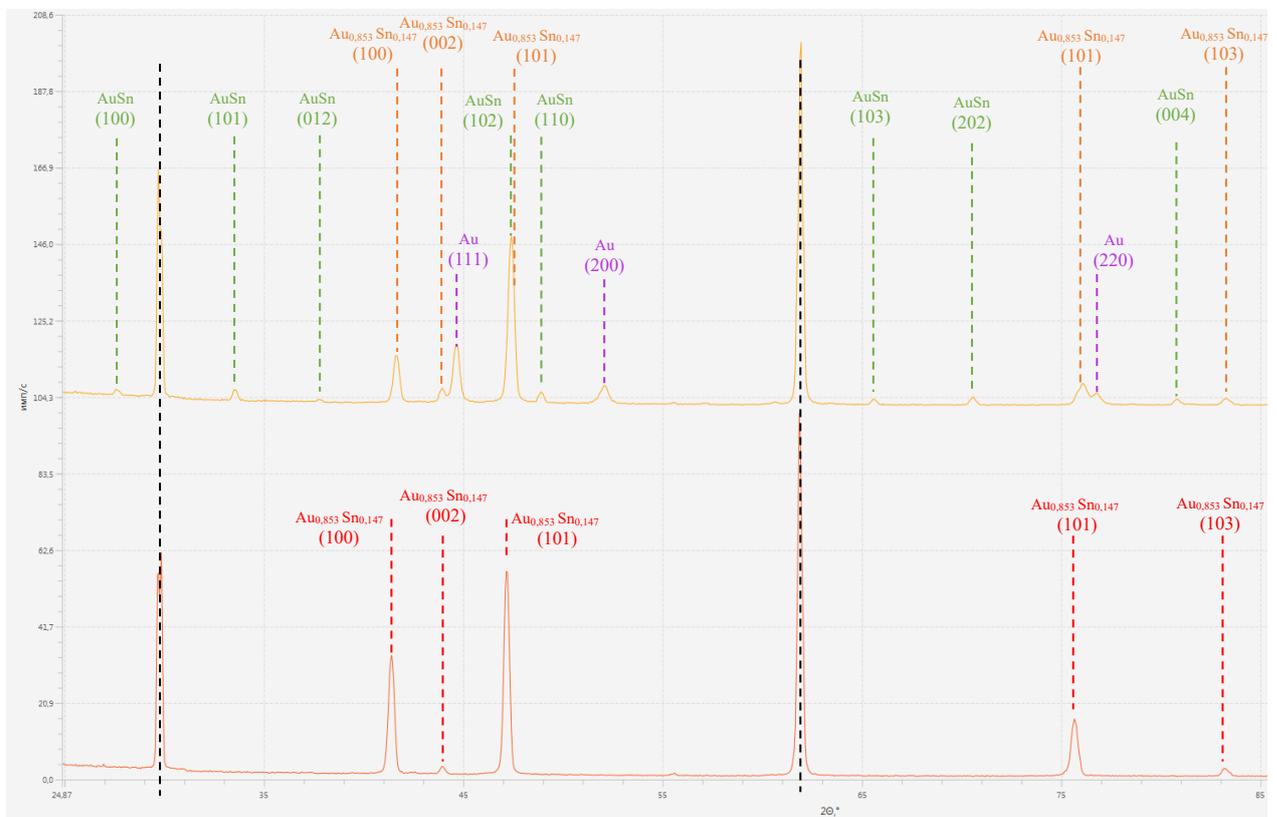


Рис. 32. Сравнение дифрактограмм образца сапфира с нанесенной системой металлизации Ti-Au-Sn-Au-Sn-Au (желтая дифрактограмма – образец до отжига, красная дифрактограмма – образец после термообработки).

### 2.3.4. Исследования соединения кристаллов взаимной переходной диффузией Au-Sn

В качестве соединяемых образцов были использованы два кристалла на подложке сапфира. Первый – сапфировый кристалл с гальваническим покрытием золота 3 мкм, с вспомогательными слоями Ti и Ni по 0,1 мкм. Второй – со сформированным соединяющим слоем из пяти последовательно напыленных слоёв золота и олова, с адгезионным слоем титана 0,15 мкм. Схематичное представление соединяемых кристаллов представлены на рис. 33. Монтаж кристаллов проводился по режиму термообработки согласно профилю, представленному на рис. 34. Температурный режим состоит из семи этапов. 1 – нагрев до 150 °С в течение 90 секунд. 2 – стабилизация при температуре 150 °С в течение 300 секунд. На стадии стабилизации происходит минимизация градиентов температур всех областей образцов. 3 – нагрев до 250 °С в течение 120 секунд. 4 – выдержка при температуре 250 °С в течение 300 секунд. 5 – нагрев до 320 °С в течение 90 секунд. 6 – выдержка в течение 600 секунд при 320 °С. 7 – охлаждение до комнатной температуры в течение 300 секунд. Давление при процессе составляло 5 МПа. Монтаж проходил в условной защитной среде, образцы обдувались потоком N<sub>2</sub>.

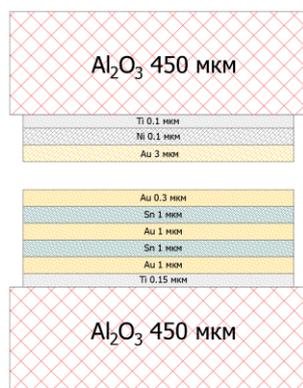


Рис. 33. Схематичное представление монтажа кристаллов

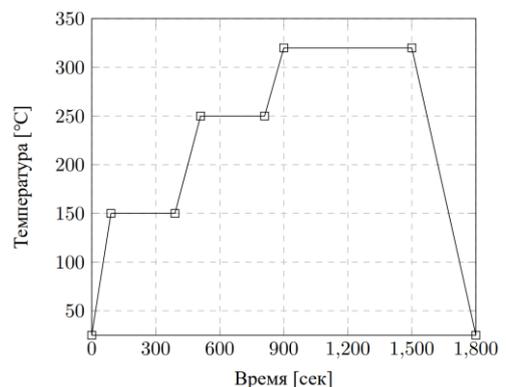


Рис. 34. Температурный режим монтажа кристаллов

### ***Электронная микроскопия смонтированных образцов.***

Морфология области соединения кристаллов была проанализирована на сканирующем электронном микроскопе. Подготовка образцов для анализа включала шлифовку и полировку сборки с последующим травлением. Фотография поперечного сечения соединения представлена на рис. 35.

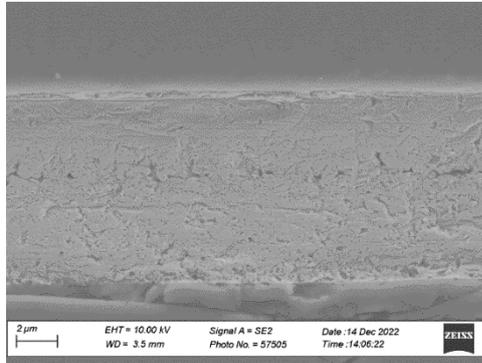


Рис. 35. Фотография поперечного сечения соединяемых кристаллов

Из фотографии видно, что соединение в определённых местах обладает двумя видами дефектов: пустоты и наличие локальных границ раздела двух поверхностей (unbonded-like line). Пустоты, типичные для монтажа методом взаимной переходной диффузии могли в основном быть причиной уменьшения объема при образовании интерметаллических соединений [123]. Одним из вариантов решения данных проблем является увеличение давления при монтаже. Давление при монтаже приводит к уплотнению из-за дополнительного вклада внутренних сил для спекания.

### ***Картирование по элементам методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии смонтированных образцов.***

Результаты картирования элементного состава поперечного сечения области соединения кристаллов представлены на рис. 36. Точечный анализ показал градиент концентрации олова по сечению. По области первого кристалла (с системой Ti-Ni-Au) соотношение варьируется от 2,5 до 13 ат.%. По области второго кристалла (с системой Au-Sn) – от 12,7 до 20 ат.% с максимумом в зоне, близкой к контакту с первым кристаллом. Среднее отношение олова к золоту по поперечному сечению соединения составляет 10,7 ат.%. Данные энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

позволяют предположить, что область соединения состоит из фаз чистого золота (Au),  $\zeta$  ( $\text{Au}_{0.84-0.92}\text{Sn}_{0.16-0.08}$ ) и небольшой доли  $\delta$  (AuSn).

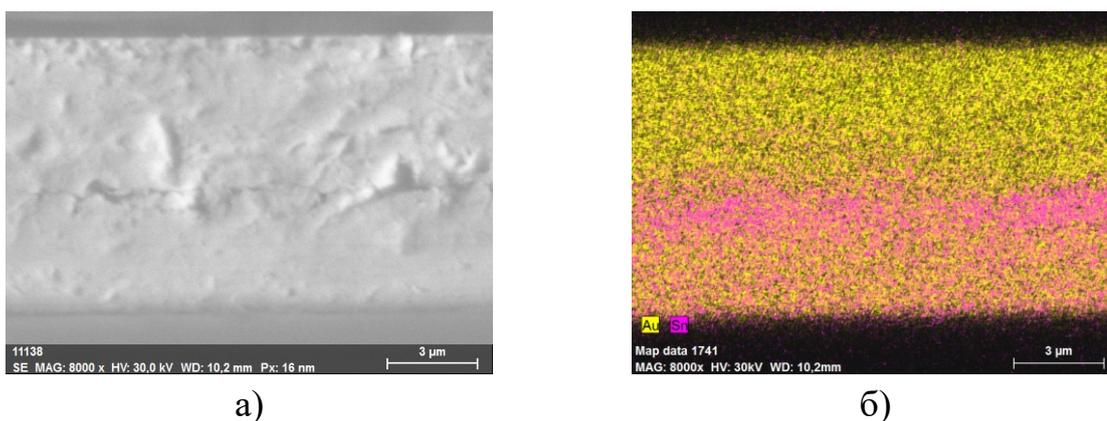


Рис. 36. Фотография поперечного сечения смонтированных кристаллов методом взаимной переходной диффузии (а) и картирование соединения по сечению (б).

### *Исследование прочности соединения монтируемых образцов.*

Количественные данные по прочности соединения методом взаимной переходной диффузии получены по тесту разрыва соединения на сдвиг. Испытания проводилась на установке тестирования микросоединений Nordson Dage 4000Plus. Габаритные размеры монтируемых образцов –  $250 \times 250$  мкм<sup>2</sup> толщиной 300 мкм. Средний показатель прочности составил 32,2 МПа. Разброс по значениям прочности соединения может быть объяснён возможной разницей площади контакта из-за проблем с плоскостностью, образованием пустот, наблюдаемых ранее при анализе поперечного сечения соединения.

### **2.4. Заключение по главе 2**

В данном разделе представлены результаты исследования и разработки технологии формирования соединительного слоя для МИС СВЧ с применением системы слоёв Au-Sn, сформированных на этапе производства пластины. Последовательная система чередующихся металлов золота и олова из пяти слоев была реализована напылением металлических пленок с общей концепцией Au-Sn-Au-Sn-Au толщиной 1,0-1,0-1,0-1,0-0,3 мкм соответственно.

Исследованы морфологические и фазовые характеристики сформированной системы. Анализ поперечного сечения сформированной

системы. Фактическая толщина исследуемой системы составила около 4,5 мкм. Выявлено, что сформированная система слоёв состоит из чистого Au,  $(\text{Au}_9\text{Sn})_{0,2}$  и AuSn. Примечательно, что отсутствует фаза чистого Sn. Это 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. В результате термообработки системы металлов Au-Sn на подложке при температуре 320 °С при выдержке 10 минут образуется единый однородный слой, состоящий из одной фазы  $\zeta \text{Au}_{0,853}\text{Sn}_{0,147}$ . 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 5 последовательных слоёв процесс гомогенизации завершается за 10 минут. Фаза  $\zeta$ , 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 минут, давление 5 МПа. Микроструктура поперечного сечения соединения не содержит выраженных неоднородностей и отдельных морфологий, однако в определённых местах имеет два вида дефектов: пустоты и наличие локальных границ раздела двух поверхностей. Результаты энергодисперсионного анализа поперечного сечения соединения двух кристаллов показывают, что среднее соотношение олова к золоту по поперечному сечению соединения составляет 10,7 ат.%. Комплекс проведённых исследований позволил предположить, что соединение в большей степени включает фазу  $\zeta$ , что обеспечит наилучшие характеристики по механической прочности среди фаз с высоким содержанием золота. Уменьшение объема при образовании интерметаллических соединений может

быть основной причиной образования пустот, типичных для монтажа взаимной переходной диффузией. Локальные границы разделов двух материалов могут говорить о неполном взаимодействии соединения материалов. Одним из вариантов решения данных проблем является увеличение давления при монтаже. Давление при монтаже приводит к уплотнению из-за дополнительного вклада внутренних сил для спекания.

Проведены эксперименты по определению значений прочности соединения. Средняя прочность соединения на сдвиг составила 32,2 МПа. Повышение показателя прочности соединения требует решения проблемы с плоскостностью и устранение дефектов, отмеченных при анализе микроструктуры поперечного сечения соединения. Прочность соединения кристаллов, а также стойкость к внешним воздействующим факторам демонстрируют результаты, показывающие перспективность использования данной технологии в космическом применении.

Направление дальнейших исследований включает в себя оптимизацию соотношения формируемых слоёв и режимов монтажа для уменьшения времени монтажа и увеличения прочности соединения, а также экспериментальные оценки тепловых и электрических характеристик соединяющего слоя из системы слоёв Au-Sn.

Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии на основе системы слоёв Au-Sn, совместимая с существующими полупроводниковыми технологиями изготовления  $A^{III}B^V$  кристаллов, как GaAs, GaN на кремнии или карбиде кремния.

Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии на основе системы слоёв Au-Sn обеспечивает:

- формирование соединяющего слоя на этапе изготовления пластины;
- локальность соединения с минимальным топологическим размером до 10 мкм;
- приемлемую температуру при монтаже;
- высокотемпературную стабильность (выше температуры монтажа);

- толщины соединения до единиц микрометров;
- прочное соединение, стойкое к внешним воздействующим факторам.

Исследование доказало, что использование монтажа методом взаимной переходной диффузии на основе системы слоёв Au-Sn является перспективным процессом для микроэлектроники СВЧ. Приемлемая температура монтажа (260 – 320 °С) в совокупности с высокой температурой переплавления (свыше 500 °С) делают данный способ подходящим для интеграции кристаллов приборов на широкозонных полупроводниковых материалах.

Монтаж взаимной переходной диффузией 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.

### ГЛАВА 3. Беспроволочная гибридно-монолитная интегральная схема СВЧ с применением межсоединений на основе системы Au-Sn

#### 3.1. Исследование частотных характеристик межсоединений для интеграции методом перевернутого монтажа

Результаты исследования соединяющего слоя в виде системы металлов Au-Sn показали прочность получаемых соединений и возможность локального формирования с шагом порядка 10 мкм. В данном разделе представлены исследование частотных характеристик межсоединений при использовании сформированного соединяющего слоя Au-Sn. Основные результаты исследования представлены в работе [124].

##### 3.1.1. Влияние электрических характеристик межсоединений

Оценка электрических составляющих межсоединений проводилась на тестовых конструкциях соединения двух кристаллов арсенида галлия толщиной 100 мкм. Кристалл, на который производится интеграция, имеет металлизацию обратной стороны. Контактные площадки во всех конструкциях представляют собой металлизацию из золота толщиной 2,5 мкм. Трехмерные модели исследуемых конструкций представлены на рис. 37.

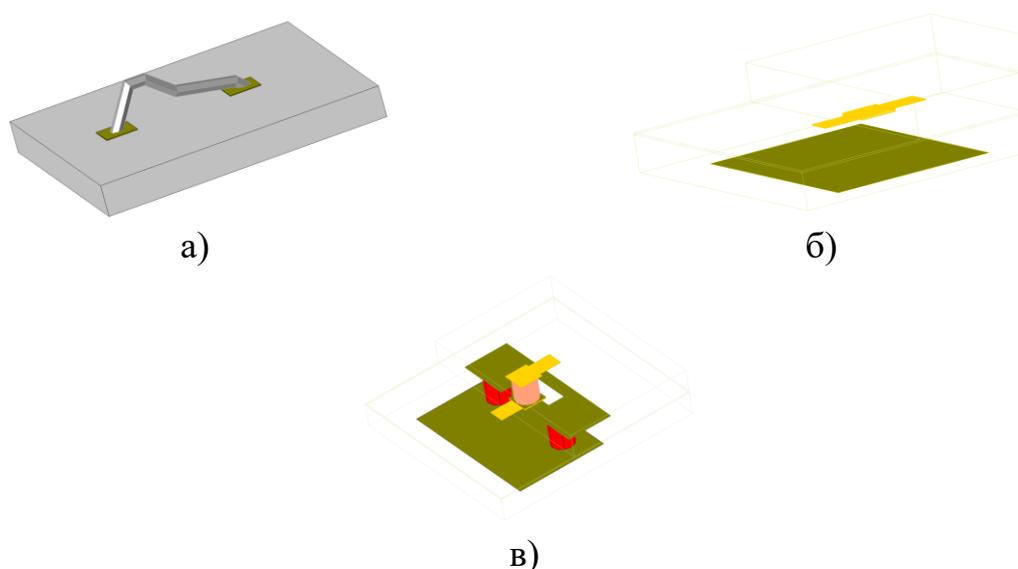


Рис. 37. Трехмерные модели исследуемых конструкций:  
(а) – проволочная интеграция, (б) – перевернутый монтаж, (в) – hot-via

При проволочном соединении контактные площадки размером  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> располагаются друг от друга на расстоянии 300 мкм – типичное значение при интеграции кристаллов, что подразумевает расстояние от края контактной площадки до края кристалла 100 мкм (для каждого кристалла) и зазор между кристаллами 100 мкм. Проволока из Au диаметром 18 мкм соединяет две контактные площадки. Приблизительная длина проволоки с учетом дуги составляет 500 мкм.

При интеграции методом перевернутого монтажа, интегрируемый кристалл монтируется на обобщающий лицевой стороной контактными площадками размером  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> посредством соединяющего слоя, расположенного на контактной площадке обобщающего кристалла, толщиной 5 мкм из системы металлов Au-Sn, сформированного на этапе изготовления кристалльного производства [77]. Интегрируемый кристалл выступает за край контактной площадки на 100 мкм. Интегрируемый кристалл не имеет металлизации обратной стороны.

При интеграции методом hot-via, интегрируемый кристалл соединяется обратной стороной с контактной площадкой размером  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> на обобщающем кристалле, посредством ранее упомянутого соединяющего слоя. Интегрируемый кристалл имеет локальную металлизацию обратной стороны – контактную площадку  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> и металлизацию по остальной площади обратной стороны, с зазором между контактной площадкой 50 мкм. Интегрируемый кристалл имеет сигнальное металлизированное переходное отверстие диаметром 100 мкм, соединяющее контактную площадку на обратной стороне кристалла с металлизацией на лицевой стороне. Обобщающий кристалл в месте расположения заземляющей металлизации обратной стороны интегрируемого кристалла при интеграции, имеет сквозные металлизированные отверстия диаметром 100 мкм, металлизацию и соединяющий слой, для объединения заземляющих плоскостей. Сигнальный путь в данной конструкции проходит от верхней металлизации обобщающего кристалла, через соединяющий слой, к контактной площадке на обратной

стороне интегрируемого кристалла, через сквозное металлизированное отверстие на металлизацию на лицевой стороне.

Электрические параметры конструкций оценивались путем трехмерного электродинамического расчёта, который решался методом конечных элементов, с помощью современных САПР. В конструкциях перевернутого монтажа и hot-via влияние подводящих 50-омных линий было нивелировано с помощью процедуры «deembedding». Результаты расчёта S-параметров конструкций представлены на рис. 38.

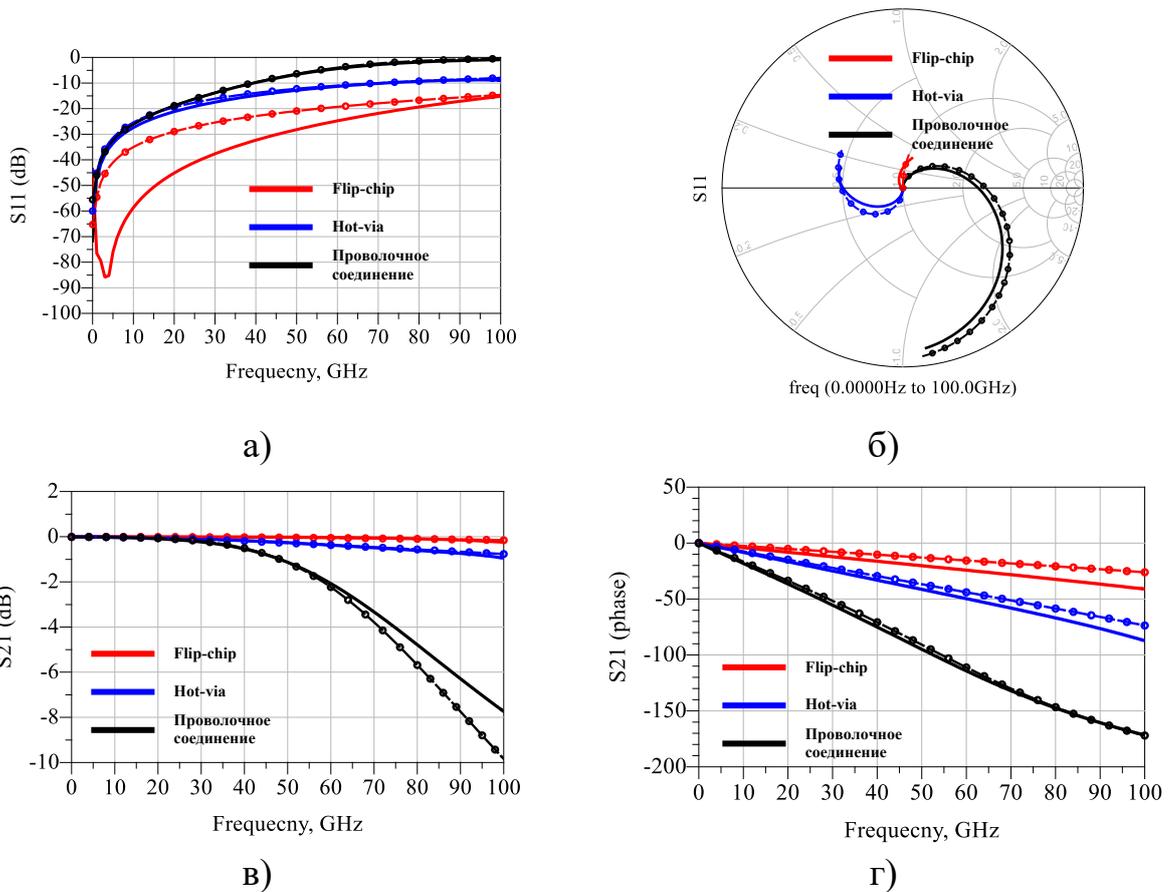


Рис. 38. S-параметры межсоединений 3 типов:

(а) – возвратные потери в дБ, (б) – возвратные потери на диаграмме Смита,  
(в) – потери на проход в дБ, (г) – фазовая составляющая на проход.

Непрерывные линии – ЭМ расчёт, пунктирные линии – эквивалентная схема

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.

На рис. 39 представлена модель эквивалентной схемы проволочного, перевернутого монтажа и hot-via межсоединений [125, 126]. В таблице 9 отражены параметры эквивалентных схем исследуемых межсоединений.

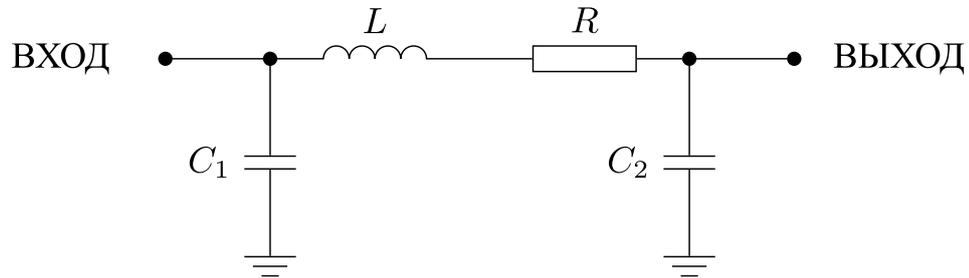


Рис. 39. Эквивалентная схема межсоединений

Таблица 9. Параметры эквивалентных схем межсоединений

Параметр	Проволочное соединение	Flip-chip	Hot-via
L, пГн	268	49	60
C1, фФ	39	1,7	15,6
C2, фФ	38	7,0	42,9
R, Ом	0,167	0,055	0,1

Значения параметров эквивалентной схемы при межсоединении методом перевернутого монтажа в 5 раз меньше, чем при проволочной интеграции, что обеспечивает существенное снижение влияния на рассогласование в волновом тракте.

### 3.1.2. Влияние эффекта рассогласования

Монтаж методом перевернутого монтажа обеспечивает соединение кристалла лицом вниз с подложкой. Как результат, активная область кристалла находится близко к подложке на расстоянии толщины межсоединения. Подложка имеет значительное воздействие на электрические характеристики кристалла. Данное воздействие называется эффект рассогласования или эффект близости. Эффект рассогласования может являться причиной изменения электрических характеристик элементов схемы кристалла, например, сдвига резонансной частоты генератора в связи с диэлектрической нагрузкой. Линия передачи и спиральная индуктивность

чувствительны к рассогласованию, когда транзисторы и элементы маленького размера не показывают видимого воздействия. Влияние рассогласования может варьироваться от типа линий передачи в МИС и расстояния кристалл-подложка. Если присутствует металлизация под кристаллом, эффект рассогласования становится ещё более сильным [82]. Перспективным направлением развития при интеграции методом перевернутого монтажа с высотой межсоединения менее 10 мкм является применение линий передач в виде полосковой линии, для применения в диапазоне частот свыше 100 ГГц [98].

Для микрополосковой и копланарной линий передач выделяют два основных фактора, влияющие на эффект рассогласования: высота межсоединения, материал подложки основания. В данной работе применен трехмерный расчёт методом конечных элементов двух конструкций с микрополосковой и копланарной линиями передачи для анализа частотных характеристик и их зависимости от близости подложки (высоты межсоединения) без перехлёста сплошных металлических слоёв. На тестовой конструкции было исследовано влияние близости диэлектрической подложки с кристаллом микрополосковой и копланарной линиями длиной 500 мкм. Проведены расчёты зависимостей малосигнальных параметров линий передач с волновым сопротивлением 50 Ом от расстояния до диэлектрической подложки GaAs в диапазоне с 200 до 5 мкм. В качестве тестовых конструкций линий передач выбраны микрополосковая и копланарная линии длиной 500 мкм на подложке полуизолирующего арсенида галлия толщиной 100 мкм с сплошной металлизацией обратной стороны. В качестве диэлектрической подложки применен арсенид галлия толщиной 100 мкм. Схематичная исследуемая конструкция представлена на рис. 40, где  $h$  – расстояние до диэлектрической подложки, соответствующее высоте межсоединения при локальной интеграции.

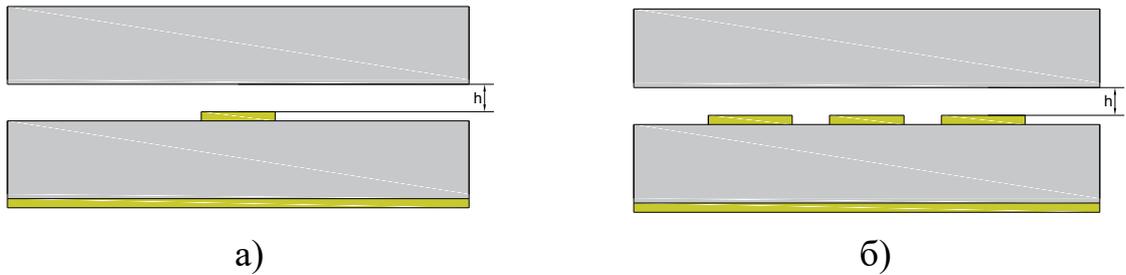


Рис. 40. Схематичное представление исследуемых микрополосковой (а) и копланарной (б) линий от расстояния до диэлектрической подложки

Микрополосковая линия шириной 70 мкм. Толщина металлизации – 2 мкм. Сигнальная линия копланарной линии – 40 мкм. Зазор – 50 мкм. Зависимости потерь на проход и возвратных потерь по входу микрополосковой линии от расстояния до диэлектрической подложки на разных частотах представлены на рис. 41, а копланарной линии на рис. 42.

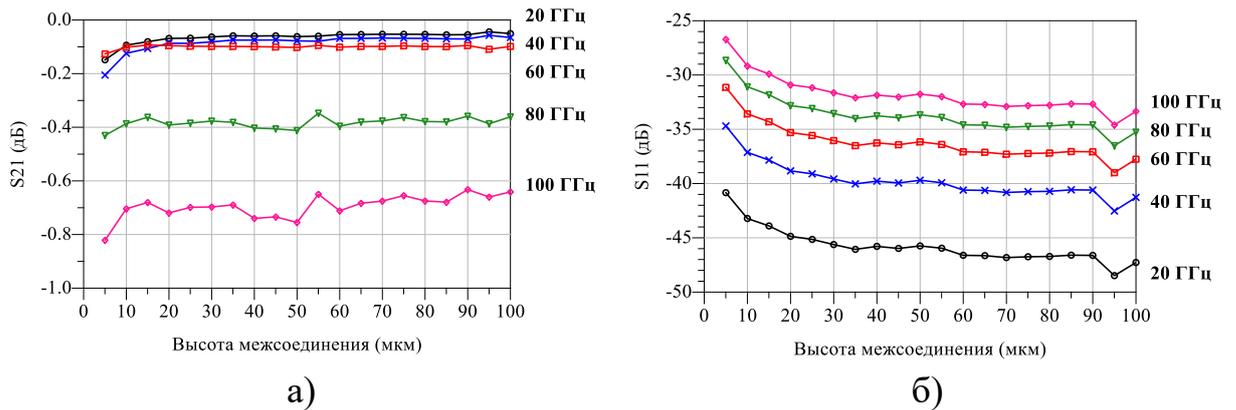


Рис. 41. Зависимости потерь на проход (а) и возвратных потерь по входу (б) микрополосковой линии от расстояния до диэлектрической подложки на разных частотах

Выявлено, что при расстоянии исследуемых линий передач до диэлектрической подложки свыше 50 мкм эффекта рассогласования не наблюдается, что соответствует половине толщины подложки с линией передачи. В микрополосковой линии максимальное увеличение потерь при ближайшем расположении диэлектрической подложки 5 мкм составляет 0,18 дБ на частоте 100 ГГц, а в копланарной линии – 0,062 дБ на частоте 100 ГГц. При этом, потери в копланарной линии приблизительно в 4 раза меньше, чем в микрополосковой линии на частотах 100 ГГц и высоте межсоединений 5 мкм.

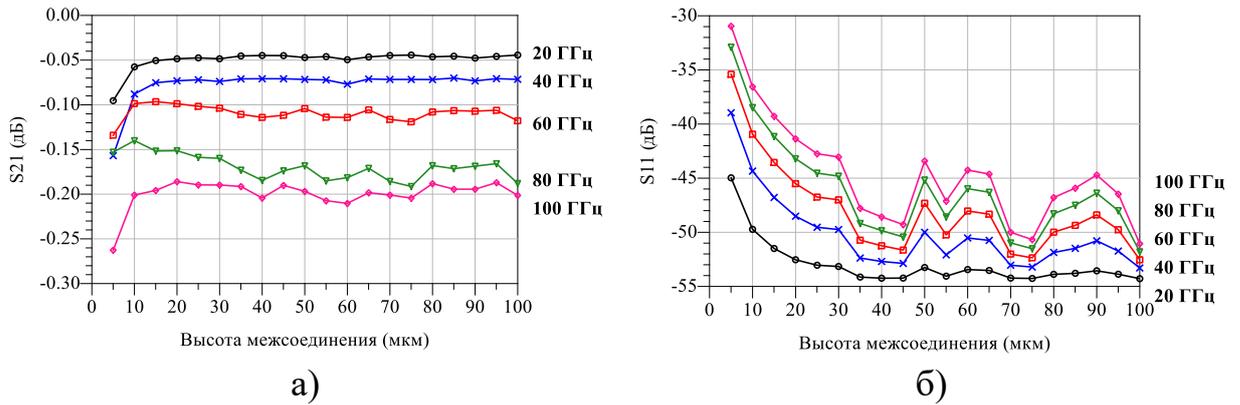


Рис. 42. Зависимости потерь на проход (а) и возвратных потерь по входу (б) копланарной линии от расстояния до диэлектрической подложки на разных частотах

При уменьшении расстояния до диэлектрической подложки с 50 до 5 мкм наблюдается экспоненциальный рост отклонения фазы сигнала прохождения до 12 % в микрополосковой линии и до 16 % в копланарной линии по сравнению с линиями без присутствия диэлектрической подложки. Зависимости отклонения фазы на проход от расстояния до диэлектрической подложки для тестовых линий передач представлены на рис. 43.

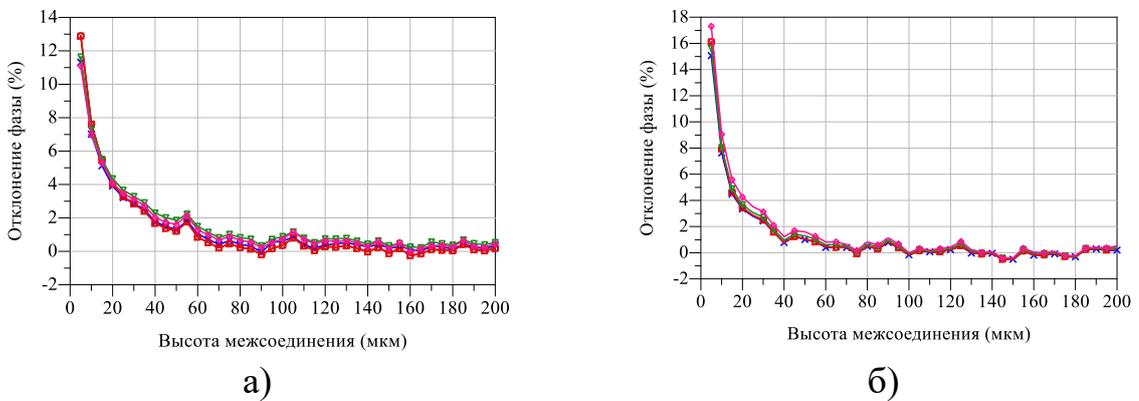


Рис. 43. Зависимости отклонения фазы на проход микрополосковой (а) и копланарной (б) линий передачи от расстояния до диэлектрической подложки на разных частотах

На рис. 44 и 45 представлены отдельно реальная и мнимая части входного сопротивления  $Z_{\text{вх}}$ , где

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\overline{Z_0} + Z_0 \cdot S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (1)$$

Из графиков видно, что зависимость значений от частоты при разном расстоянии до диэлектрической подложки имеют схожие формы.

В конструкции с микрополосковой линией, при близости диэлектрической подложки увеличивается мнимая часть входного сопротивления примерно на  $6 \Omega$ , что негативно сказывается на согласовании с трактом  $50 \Omega$ . В конструкции с копланарной линией мнимая часть при приближении диэлектрической подложки не увеличивает отклонение от 0. В то время как реальная часть имеет максимальное отклонение от  $50 \Omega$  в  $11 \Omega$  на частоте  $40 \text{ ГГц}$ , возвращаясь к значению  $50 \Omega$  далее по частоте.

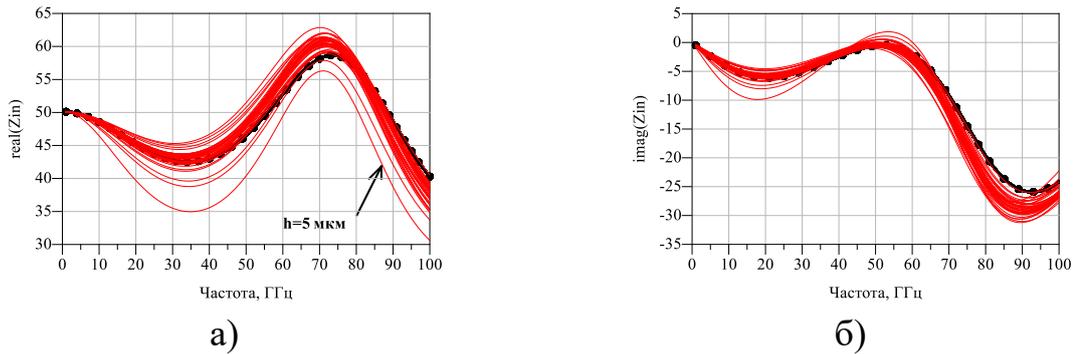


Рис. 44. Зависимости массива реальной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса микрополосковой линии от частоты при разном расстоянии до диэлектрической подложки. Черная линия – без присутствия диэлектрической подложки

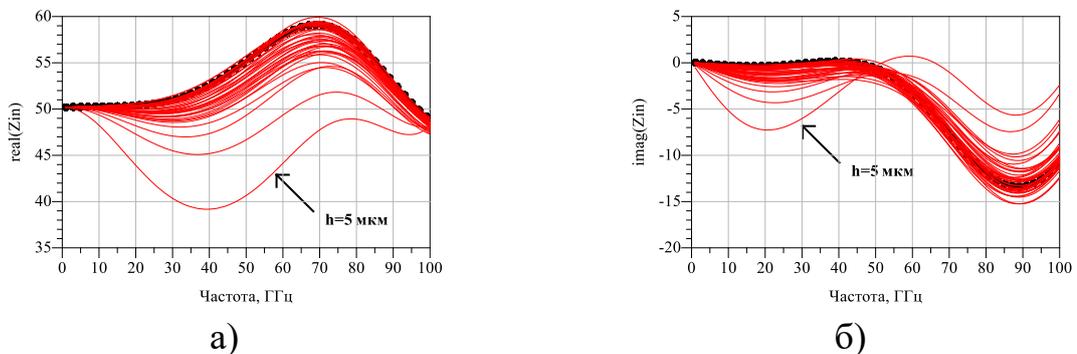


Рис. 45. Зависимости массива реальной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса копланарной линии от частоты при разном расстоянии до диэлектрической подложки. Черная линия – без присутствия диэлектрической подложки

### 3.1.3. Выводы

Представлены результаты трехмерного электродинамического анализа переходных межсоединений 3 видов интеграций. Определены параметры эквивалентных схем межсоединений. Результаты подтверждают, что применение метода перевернутого монтажа позволит реализовывать

широкополосные ГМИС миллиметрового диапазона длин волн. Вносимые потери переходного межсоединения при перевернутом монтаже составляют менее 0,25 дБ до 100 ГГц, когда межсоединение при проволочном монтаже превышают 1 дБ при частотах свыше 48 ГГц.

Представлены результаты трехмерного электродинамического анализа отрезков микрополосковой и копланарной линий передачи длиной 500 мкм при разном расстоянии от дополнительной диэлектрической подложки, соответствующее высоте межсоединения при интеграции поверхностным монтажом. Эффект рассогласования не вносит критического влияния при отсутствии металлизации под линией передачи на диэлектрической подложке. В микрополосковой линии максимальное увеличение потерь при ближайшем расположении диэлектрической подложки 5 мкм составляет 0,18 дБ на частоте 100 ГГц, а в копланарной линии – 0,062 дБ на частоте 100 ГГц.

Перспективным направлением развития при интеграции методом перевернутого монтажа с высотой межсоединения менее 10 мкм является применение полосковой линии как линий передач, для применения в диапазоне частот свыше 100 ГГц.

### **3.2. Исследование тепловых характеристик конструкции с применением интеграции методом перевернутого монтажа**

Актуальной проблемой при интеграции мощных кристаллов методом перевернутого монтажа является отвод тепла. Концепция контакта кристалла лицевой стороной при методе перевернутого монтажа обеспечивает электрическое соединение с основанием по кратчайшему пути. Однако ограниченная площадь контакта, обычно порядка 10% от площади кристалла, и его удалённость от области тепловыделения увеличивает тепловое сопротивление схемы. Это приводит к повышенным температурным режимам работы, и как следствие, снижению электрических характеристик и надёжности схемы.

Благодаря активному развитию способов формирования межсоединений, способствующему миниатюризации, повышению рабочего диапазона температур и надежности переходных межсоединений и сборок на их основе, открываются новые возможности применения метода перевернутого монтажа [77]. Работы [84, 127] посвящены исследованию тепловых характеристик конструкций, в которых кристаллы мощных GaN полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на подложке SiC интегрируют методом перевернутого монтажа на единое основание. Недостатки представленных конструкций заключаются в ограничении локальности соединения и в невозможности обеспечить интеграцию на уровне пластины.

Проведено исследование тепловых режимов беспроводного метода интеграции кристаллов в сравнении с традиционным методом, оценка влияния конструктивных элементов схемы на тепловое сопротивление сборки. Основные результаты исследования представлены в работе [128]. Представлены результаты расчёта тепловых режимов работы двух видов конструкций:

- традиционный монтаж обратной стороны кристалла на теплоотводящее основание с помощью припоя;
- метод перевернутого монтажа на диэлектрическую подложку с применением соединяющего слоя в виде системы слоёв Au-Sn.

### **3.2.1. Тестовый активный элемент**

Для анализа конструкций применены два типа активного элемента – GaN HEMT на подложке SiC и GaAs pHEMT. Габаритные размеры кристаллов составляют  $662 \times 824$  мкм<sup>2</sup>. Транзисторы с гребенчатой структурой  $6 \times 200$  мкм, общая ширина затвора – 1,2 мм. Длина затвора 0.15 мкм. Общая толщина кристалла транзисторов составляет 100 мкм, где у GaN HEMT 97 мкм составляет SiC, а 3 мкм – GaN, а у GaAs pHEMT все 100 мкм GaAs. Верхняя металлизация транзистора – Au 2 мкм. Металлизация обратной стороны – Au 3 мкм. Сквозные металлизированные отверстия полые. Топология модели

транзистора представлена на рис. 45. Контактные площадки затвора и стока имеют размеры  $230 \times 120$  и  $230 \times 174$  мкм<sup>2</sup> соответственно. Исток заземлён через 4 сквозных металлизированных отверстия. Внутренние металлические площадки истока имеют габариты  $82 \times 198$  мкм<sup>2</sup>, а внешние –  $72 \times 198$  мкм<sup>2</sup>. Расстояние между площадками истока – 24 мкм. Тепловые характеристики материалов, применяемых в расчёте представлены в таблице 10 и на рис. 46.

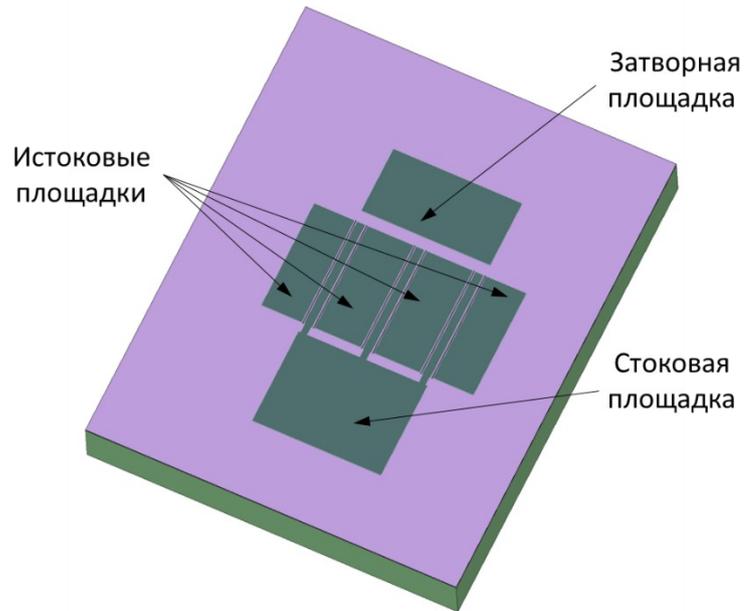


Рис. 46. Модель GaN транзистора

Таблица 10. Теплопроводность применяемых материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м×К)
GaN	130
SiC (4H)	Температурно-зависимая (рис. 46)
Au-Sn	57
Au	301
Cu	398
Si	Температурно-зависимая (рис. 46)
Cu-Mo	210
GaAs	Температурно-зависимая (рис. 46)

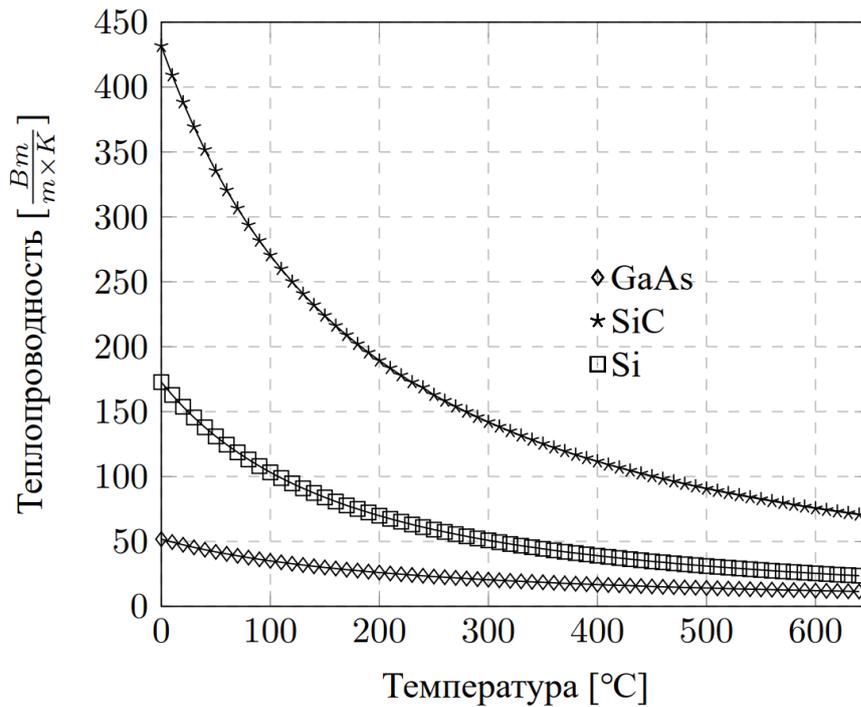


Рис. 46. Температурная зависимость GaAs, SiC и Si

Проведён анализ стационарного теплового распределения. Постоянная температура обратной стороны основания (подложки)  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  была задана граничным условием первого рода. Температура  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  является типичной максимальной требуемой температурой внешней окружающей среды для изделий двойного применения, что является наиболее тяжёлым температурным режимом эксплуатации, ввиду сильной температурной зависимости полупроводниковых и диэлектрических материалов. Источниками тепловыделения были заданы подзатворные области длиной 1 мкм. Задаваемая рассеиваемая мощность  $P_{diss}$  для расчётов с GaN НЕМТ составила 6 Вт (5 Вт/мм), для GaAs рНЕМТ – 2 Вт (1,67 Вт/мм).

### 3.2.2. Тепловой расчёт конструкции с применением традиционного метода интеграции

В качестве традиционного способа интеграции используется монтаж кристалла транзистора на теплоотводящее основание с помощью припоя 80AuSn толщиной 20 мкм. В качестве основания выбран материал Cu-Mo толщиной 250 мкм. Габаритные размеры основания –  $3 \times 3\text{ мм}^2$ . Трёхмерная модель конструкции представлена на рис. 47.

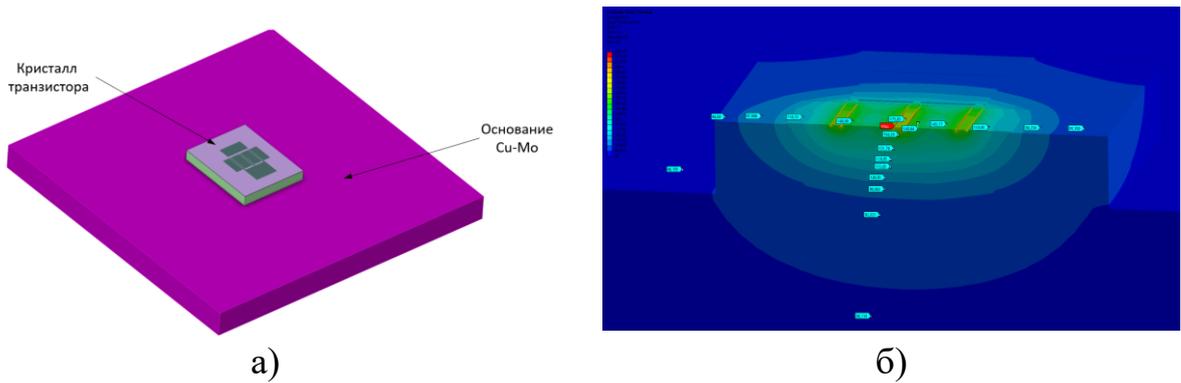


Рис. 47. Модель интеграции транзистора на теплоотводящее основание (а) и тепловое распределение вблизи активного элемента для GaAs рНЕМТ. Максимальная температура – 228,6 °C (б)

В представленном исследовании для сравнения разных способов интеграции кристалла к основанию (подложке) выбран одинаковый активный тепловыделяющий элемент. Это позволяет произвести оценку теплового сопротивления от области тепловыделения в кристалле транзистора до обратной стороны основания (подложки) следующим образом:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \quad (2)$$

где  $\Delta T$  это разность температур, вызванная рассеиванием мощности в приборе, между наиболее нагретой точкой в канале транзистора и заданной температурой основания. Расчёт для заданных условий показал максимальную разность температур равной 99,7 °C для GaN НЕМТ и 143,6 °C для GaAs рНЕМТ, что соответствует общему тепловому сопротивлению 16,6  $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  и 71,8  $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  соответственно. С целью определения влияния теплового сопротивления отдельных элементов, построена эквивалентная тепловая схема моделей. Эквивалентная схема тепловой модели данной конструкции представлена на рис. 48. Модель состоит из трёх составляющих – тепловое сопротивление кристалла активного элемента ( $R_{tr}$ ), соединяющего слоя 80AuSn ( $R_{AuSn}$ ) и основания ( $R_{carrier}$ ). С целью верификации модели, проводились вспомогательные расчёты, вычитая влияние отдельных элементов конструкции.

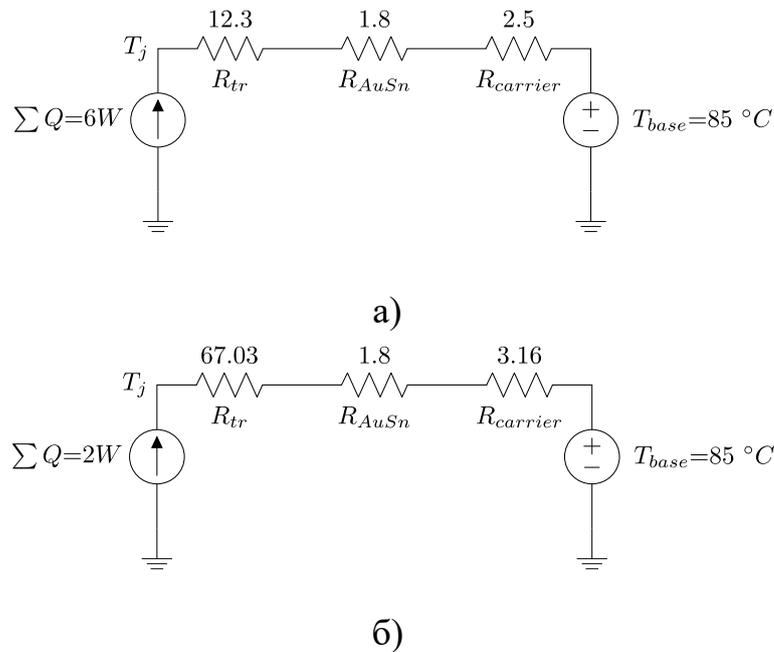


Рис. 48. Эквивалентная схема тепловой модели традиционного способа интеграции: (а) – для GaN НЕМТ, (а) – для GaAs рНЕМТ

Уменьшение общего теплового сопротивления с  $16,6 \frac{^\circ C}{Вт}$  и  $71,8 \frac{^\circ C}{Вт}$  требует снижения теплового сопротивления по крайней мере одной из составляющей конструкции. Тепловое сопротивление кристалла активного элемента составляет 74 % для GaN НЕМТ и 93 % для GaAs рНЕМТ от общего теплового сопротивления конструкции. То есть, наибольший вклад вносит тепловое сопротивление транзистора, однако, в большинстве случаев, кристалл транзистора имеет законченную конструкцию, изменение его габаритов и характеристик не представляется возможным. Уменьшение теплового сопротивления соединяющего слоя в виде припоя 80AuSn подразумевает снижение его толщины. Так, использование соединяющего слоя толщиной 5 мкм вместо 20 мкм снижает общее тепловое сопротивление на  $0,7 \frac{^\circ C}{Вт}$  в схеме с GaN НЕМТ, обеспечивая уменьшение максимальной температуры на  $4,6^\circ C$ . Однако, это добавляет дополнительные технологические трудности, в связи с отсутствием в широком доступе фольги припоя требуемой толщины. Технологические требования становятся сопоставимы с применением локального соединяющего слоя, сформированного на уровне изготовления пластины. Для теплоотводящего основания был выбран материал Cu-Мо

толщиной 250 мкм, являющийся основой современных корпусов для мощных МИС и ГМИС СВЧ [7]. Данный материал совместим с технологией изготовления СВЧ корпусов для поверхностного монтажа. Совокупность тепловых характеристик и реализуемых габаритов обеспечивает оптимальные параметры теплового сопротивления из существующих вариантов интеграции кристаллов мощных МИС СВЧ. Весомое уменьшение теплового сопротивления требует применения подложек на основе алмаза, которые на текущий момент имеют высокую себестоимость и технологические сложности с точки зрения требуемой обработки. Таким образом, традиционная конструкция интеграции МИС СВЧ имеет ограниченные возможности по снижению теплового сопротивления без существенного повышения технологической сложности, что ограничивает развитие ГМИС СВЧ.

### **3.2.3. Тепловой расчёт конструкции с применением интеграции методом перевернутого монтажа**

Исследуемая конструкция интеграции методом перевернутого монтажа представлена на рис. 49. Кристалл активного элемента лицевой стороной интегрируется на лицевую сторону диэлектрической подложки с контактными площадками, на которых реализован соединяющий слой. В качестве диэлектрической подложки в данной работе применяются как карбид кремния, так и высокоомный кремний. Теплопроводность исследуемых диэлектрических подложек выбрана с учётом зависимости от температуры (рис.46). Металлизация диэлектрической подложки представляет собой слой Au 3 мкм. Контакт лицевой стороны транзистора с диэлектрической подложкой обеспечивается посредством соединяющего слоя, который располагается на контактных площадках диэлектрической подложки. Контактные площадки для соединения реализованы как зеркальное дублирование контактных и металлических площадок транзистора с уменьшенными на 5 мкм с каждого края размерами. Площадь соединяющего

слоя на 6 контактных площадках составляет  $101592 \text{ мкм}^2$ , что соответствует 18,6 % от общей площади кристалла.

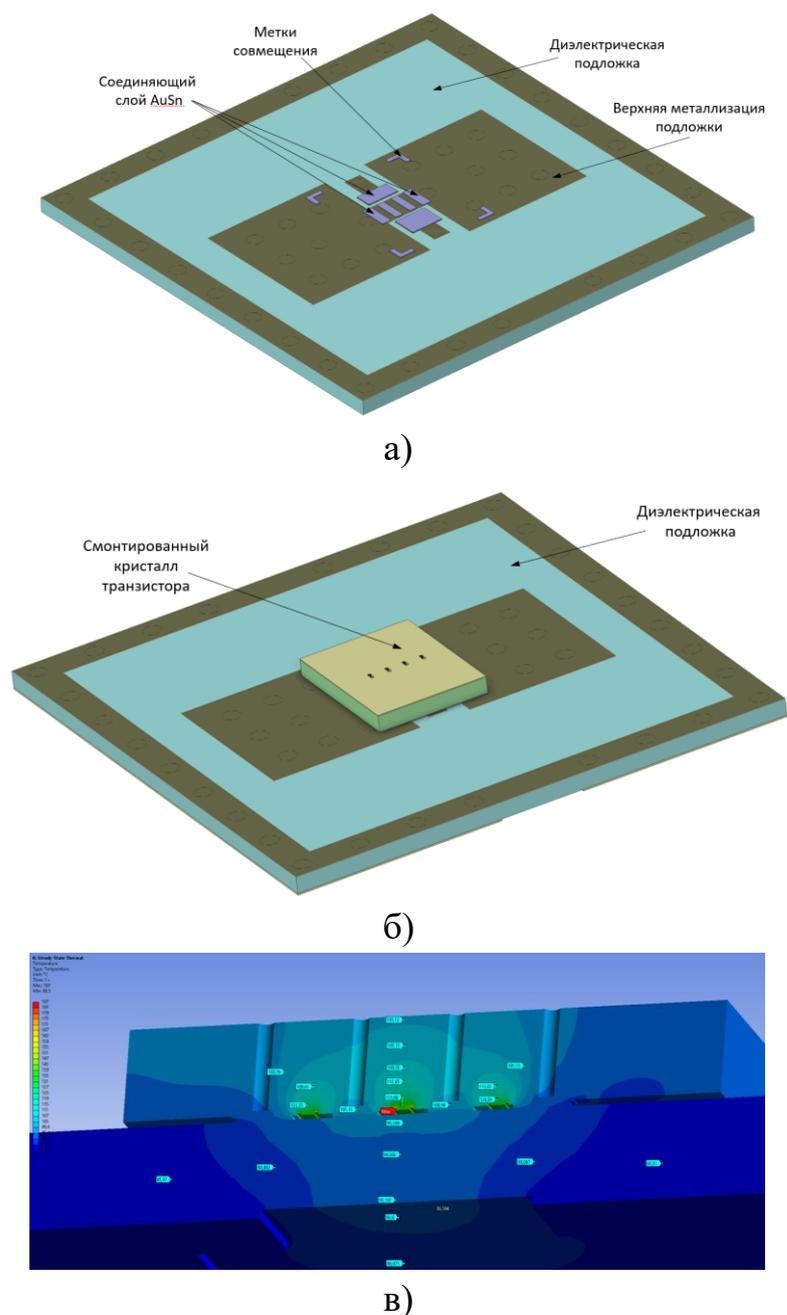


Рис. 49. Модель интеграции транзистора методом перевернутого монтажа: (а) – лицевой стороны диэлектрической подложки; (б) – смонтированного кристалла на подложку; (в) – тепловое распределение вблизи активного элемента для GaAs pHEMT. Максимальная температура –  $187 \text{ °C}$

Базовый материал соединяющего слоя – система металлических слоёв Au-Sn, сформированная на этапе производства пластины диэлектрической подложки, которая обеспечивает соединение методом взаимной переходной

диффузии. В расчёте материал Cu был рассмотрен как альтернативный вариант соединяющего слоя для варианта интеграции GaN HEMT.

Данный способ обеспечивает возможность формирования всех пассивных элементов схемы на лицевой стороне диэлектрической подложки и беспроводный контакт с кристаллами активных элементов методом перевернутого монтажа с помощью соединяющего слоя, сформированного на уровне пластины. Беспроводный монтаж кристалла обеспечивает снижение паразитных составляющих межсоединений и уменьшение габаритных размеров. В свою очередь, интеграция всех пассивных элементов на диэлектрической подложке дополнительно снижает массогабаритные характеристики общей конструкции.

В данной работе исследована зависимость максимальной температуры в канале от толщины соединяющего слоя в пределах от 2 до 20 мкм. Подобные толщины возможно реализовать на уровне изготовления пластины диэлектрической подложки с применением процессов напыления тонких плёнок либо гальванического осаждения [77].

Зависимости максимальной разности температур от толщины соединяющего слоя представлена на рис. 50 и 51. Влияние толщины исследовано при двух типах диэлектрической подложки – SiC и Si, а для GaN HEMT и при двух типах соединяющего слоя – системы Au-Sn и Cu.

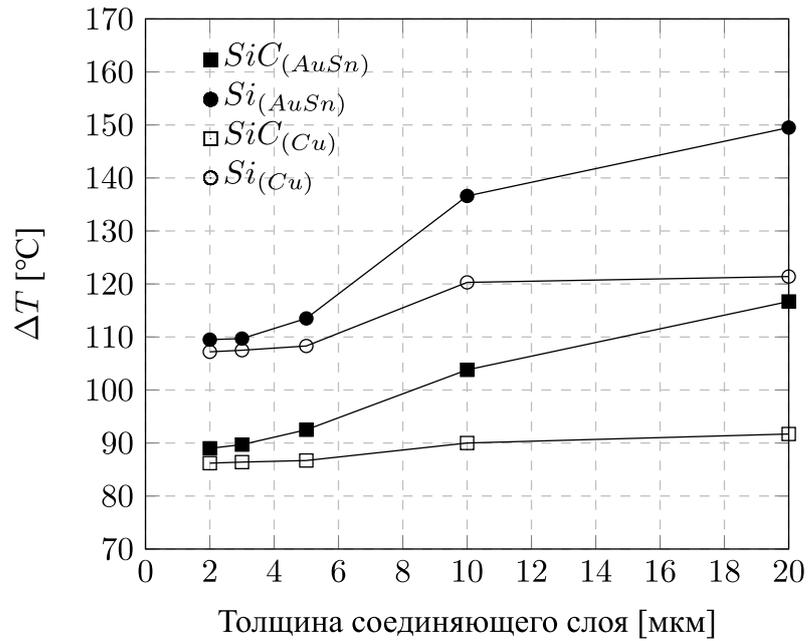


Рис. 50. Зависимость максимальной разности температур от толщины соединяющего слоя для GaN HEMT

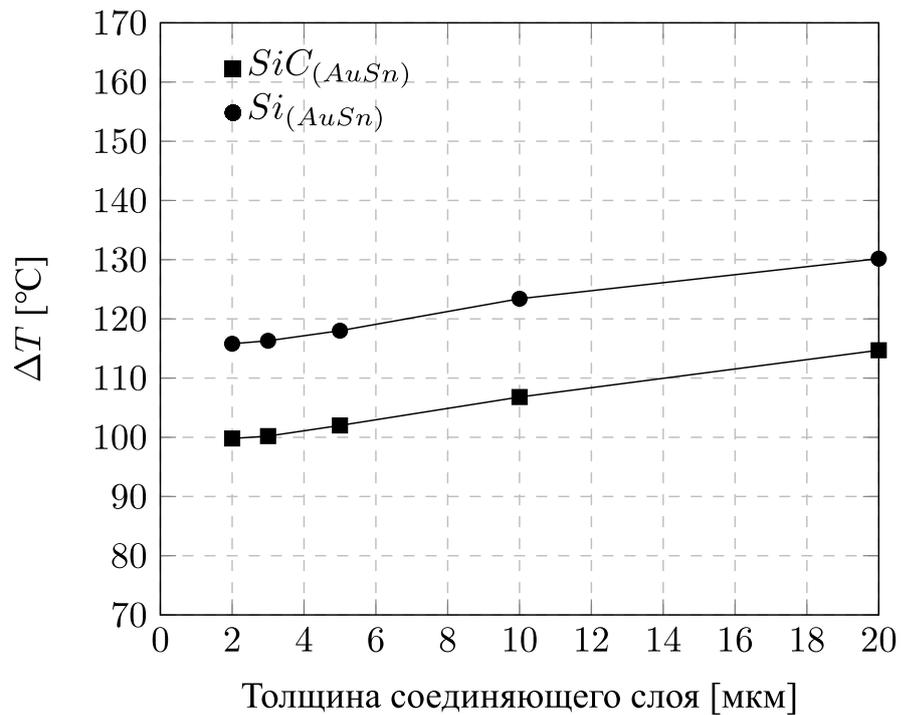
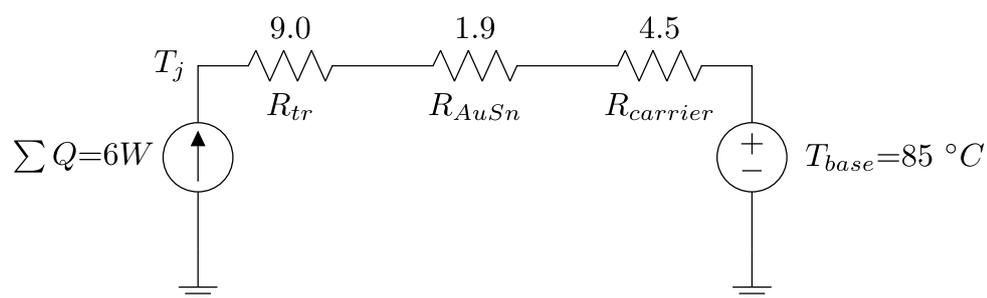


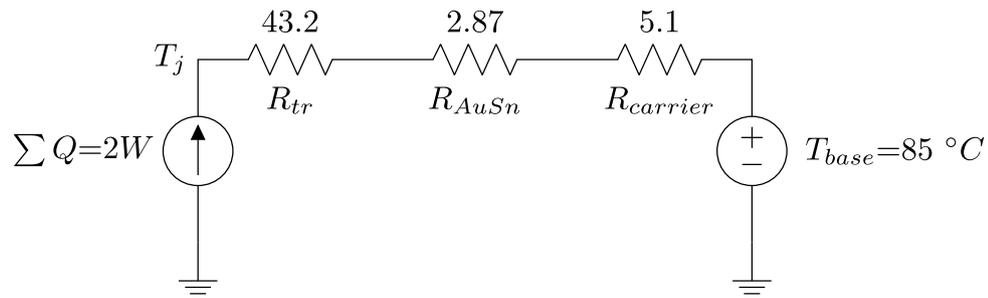
Рис. 51. Зависимость максимальной разности температур от толщины соединяющего слоя для GaAs pHEMT

Из полученных результатов следует, что влияние толщины соединяющего слоя из системы Au-Sn является критичным в диапазоне от 5 до 20 мкм. Для GaN HEMT, максимальная разность температур снижается на 24,2 и 36 °C при диэлектрической подложке SiC и Si соответственно.

Уменьшение толщины соединяющего слоя с 5 до 2 мкм снижает максимальную разность температур на 3,5 и 4 °С соответственно. В то же время, применение диэлектрической подложки SiC по сравнению с Si уменьшает  $\Delta T$  на 21 °С при толщине соединяющего слоя 5 мкм. С ростом толщины разница максимальной разности температур увеличивается, из-за более выраженного изменения теплового сопротивления диэлектрической подложки Si по сравнению с SiC, ввиду снижения теплопроводности при повышенных температурах. Эквивалентная схема тепловой модели конструкции беспроводной интеграции при диэлектрической подложке SiC и соединяющем слое из системы Au-Sn толщиной 5 мкм представлена на рис. 52. Схема состоит из трёх составляющих – теплового сопротивления кристалла активного элемента ( $R_{tr\ face}$ ), соединяющего слоя Au-Sn ( $R_{PAD}$ ) и диэлектрической подложки ( $R_{subst}$ ). Расчёт для заданных условий с базовыми элементами, диэлектрической подложкой SiC и соединяющим слоем Au-Sn толщиной 5 мкм, показал максимальную разность температур равную 92,5 °С и 102 °С для GaN HEMT и GaAs pHEMT, что соответствует общему тепловому сопротивлению  $15,4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  и  $51 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  соответственно. Данное значение меньше на 7,2% и 29% теплового сопротивления традиционного способа интеграции.



a)



б)

Рис. 52. Эквивалентная схема тепловой модели интеграции методом перевернутого монтажа:

(а) – для GaN HEMT, (б) – для GaAs pHEMT

В таблице 11 представлены результаты исследования температурных режимов от толщины и материала соединяющего слоя выраженные через тепловое сопротивление для интеграции GaN HEMT.

Таблица 11. Зависимость теплового сопротивления соединяющего слоя от толщины и материала для GaN HEMT

Материал	Толщина соединяющего слоя				
	2 мкм	3 мкм	5 мкм	10 мкм	20 мкм
Тепловое сопротивление при Au-Sn, $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	1,4	1,5	2,0	3,9	6,0
Тепловое сопротивление при Cu, $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	1,0	1,0	1,1	1,6	1,9

Построение и анализ эквивалентных схем показал, что тепловое сопротивление транзистора, соединённого лицевой стороной с диэлектрической подложкой посредством соединяющего слоя, составляет  $9 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  для GaN HEMT и  $43,2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  для GaAs pHEMT, что на 27% и 64% меньше по сравнению с сопротивлением транзисторов при традиционном методе интеграции. Соединение кристалла активного элемента подобным образом обеспечивает кратчайший путь отвода тепла от области тепловыделения. Близкое расположение контакта с подложкой обеспечивается благодаря соединяющему слою, который находится на металлических площадках истока. Тепловое сопротивление диэлектрической подложки, несмотря на высокую теплопроводность SiC играет значительную роль в общем

тепловом сопротивлении конструкции. Это можно связать с ограниченной площадью контакта кристалла активного элемента с подложкой.

Уменьшение общего теплового сопротивления конструкции возможно при повышении площади контакта кристалла с подложкой, особенно вблизи области тепловыделения.

### 3.2.4. Выводы

Исследование тепловых характеристик традиционного метода интеграции кристаллов (обратной стороной на металлическое основание с помощью фольги припоя), показало, что для заданных условий, максимальная разность температур равна  $99,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  для GaN НЕМТ и  $143,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  для GaAs рНЕМТ, что соответствует общему тепловому сопротивлению  $16,6\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  и  $71,8\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  соответственно. Традиционная конструкция интеграции МИС СВЧ имеет ограниченные возможности по снижению теплового сопротивления, что ограничивает развитие современных ГМИС СВЧ.

Исследование тепловых характеристик интеграции кристаллов методом перевернутого монтажа (соединение лицевой стороны кристалла с диэлектрической подложкой с помощью локального соединяющего слоя), с диэлектрической подложкой SiC и соединяющим слоем Au-Sn толщиной 5 мкм выявило максимальную разность температур  $92,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  для GaN НЕМТ и  $102\text{ }^{\circ}\text{C}$  для GaAs рНЕМТ, что соответствует общему тепловому сопротивлению  $15,4\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  и  $51\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  соответственно. Данное значение меньше на 7,2% и 29% теплового сопротивления традиционного метода интеграции. Сильное уменьшение теплового сопротивления конструкции для GaAs рНЕМТ объясняется резким уменьшением теплового пути по подложке GaAs, который обладает низкой теплопроводностью, порядка  $30\frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ , при температуре  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определено влияние отдельных элементов схемы на тепловые режимы работы. Получены эквивалентные схемы тепловых моделей исследуемых конструкций.

Направление дальнейших исследований включает исследование тепловых характеристик конструкций беспроводной интеграции транзисторов и МИС СВЧ, дополнительно снижающих тепловое сопротивление системы [129, 130].

### 3.3. Конструкция беспроводной гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ

Предлагаемая конструкция, где ГМИС СВЧ содержит диэлектрическую подложку, где на лицевой стороне формируются пассивные элементы – линии передачи, конденсаторы, резисторы, сквозные металлизированные заземляющие отверстия и контактные площадки для соединения кристалла активного элемента. Контактные площадки для соединения кристалла активного элемента выполнены из системы металлов Au-Sn при соотношении, в вес. % порядка 80 и 20 соответственно. Система металлов Au-Sn толщиной порядка 5 мкм формируется на этапе изготовления пластины с применением напылительных и фотолитографических процессов. Кристалл активного элемента соединяется с контактными площадками диэлектрической подложки лицевой стороной методом взаимной переходной диффузии на основе системы металлов Au-Sn. Схематичное представление конструкции представлено на рис. 53. На представленную конструкцию получен патент на изобретение РФ [131].

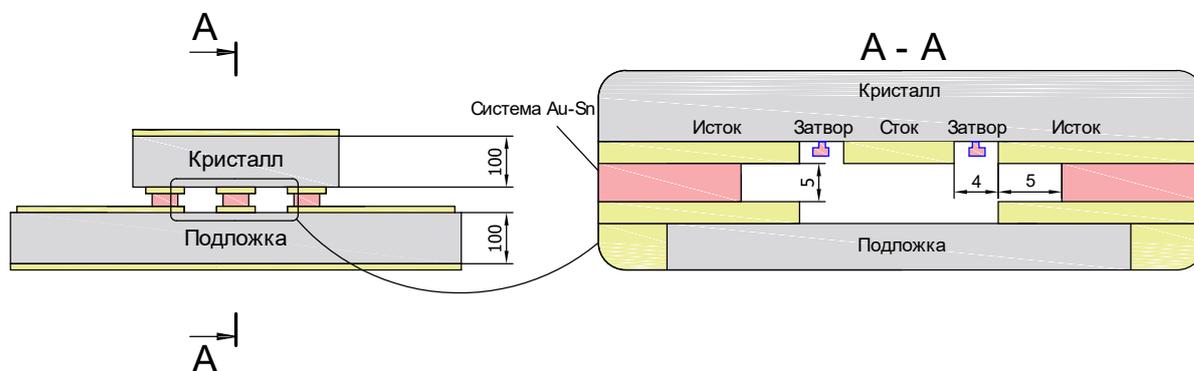


Рис. 53. Схематичное представление ГМИС СВЧ с применением метода перевернутого монтажа

### 3.3.1. Тестовая конструкция и технология

Для экспериментального подтверждения и проверки исследуемой конструкции, была разработана и изготовлена тестовая конструкция. Тестовая конструкция включает кристалл арсенида галлия размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> и толщиной 100 мкм, на котором реализована копланарная линия. Отдельный кристалл сапфира размером  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup> и толщиной 450 мкм. На сапфировом кристалле реализованы подводящие контактные площадки и соединяющие площадки. Количество соединяющих площадок – 22 шт., размер каждой площадки -  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>, кроме двух, расположенных на сигнальных линиях, которые имеют размеры  $90 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. Схематичное представление соединяемых кристаллов проиллюстрировано на рис. 54.

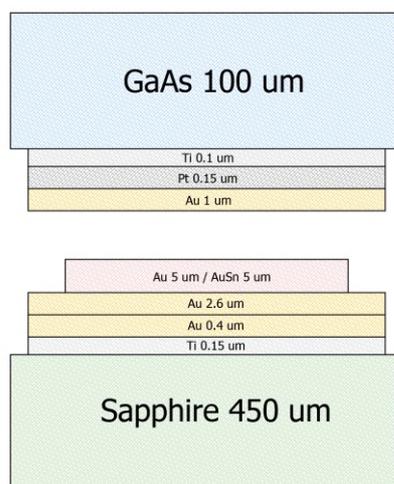


Рис. 54. Схематичное представление интегрируемой структуры

Металлизация на арсенид галлиевом кристалле представляет собой систему последовательно напылённых металлических плёнок Ti/Pt/Au (0,1, 0,15 и 1 мкм соответственно). Металлизация на сапфире сформирована путем магнетронного напыления металлических плёнок Ti/Au (0,1 и 0,4 мкм соответственно) и последующим гальваническим осаждением золота (2,6 мкм). Соединительные площадки сформированы на металлизации двумя вариантами:

- соединительные площадки из Au, толщиной 5 мкм. Каждая соединяющая площадка, сформированная из Au, с целью возможной

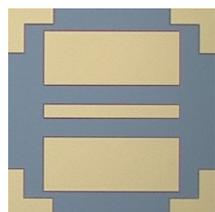
минимизации разности высот при процессе монтажа, разделена на 16 отдельных «столбиков», размером  $21 \times 21$  мкм<sup>2</sup>, с зазором 5 мкм;

- соединительные площадки, сформированные из системы слоёв Au-Sn в весовом соотношении около 80 на 20%, общей толщиной 5 мкм для монтажа методом взаимной переходной диффузии.

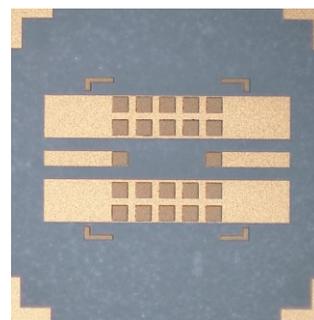
Технология формирования соединяющих слоёв была разработана для применения в стандартных А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> полупроводниковых технологиях производства, как GaAs, GaN на кремнии или карбиде кремния.

### 3.3.2. Экспериментальные результаты тестовой конструкции ГМИС СВЧ с копланарной линией

Изготовлены экспериментальные образцы тестовых кристаллов. Фотографии отдельных кристаллов представлены на рис. 55.



а)



б)

Рис. 55. Фотография изготовленных кристаллов: (а) – GaAs кристалл, (б) – сапфировый кристалл (с межсоединениями Au-Sn)

Монтаж кристаллов с соединяющим слоем Au проводился при температуре 350 °С, с соединяющим слоем Au-Sn – при 320 °С. Соединяющий слой Au обеспечивает монтаж методом термокомпрессии, а соединяющий слой Au-Sn – методом взаимной переходной диффузии. Фотография интегрированных кристаллов представлена на рис. 56.

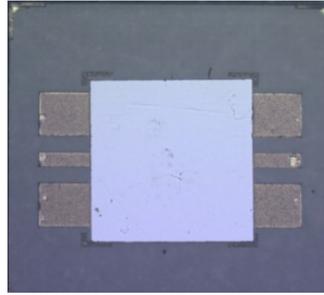


Рис. 56. Фотография интегрированного GaAs кристалла на сапфировую плату

Измерения полученных образцов проводились на полуавтоматической зондовой станции, где были установлены зонды G-S-G (ground-signal-ground, земля-сигнал-земля) с шириной зазора 250 мкм с применением анализатора цепей N5247A. Была применена стандартная калибровка в диапазоне частот от 10 МГц до 50 ГГц. Измерены более 10 сборок как с соединяющим слоем Au, так и Au-Sn. Различий в электрических параметрах уборок с разным типом соединяющего слоя не наблюдалось. Типичные характеристики S-параметров сборки представлены на рис. 57.

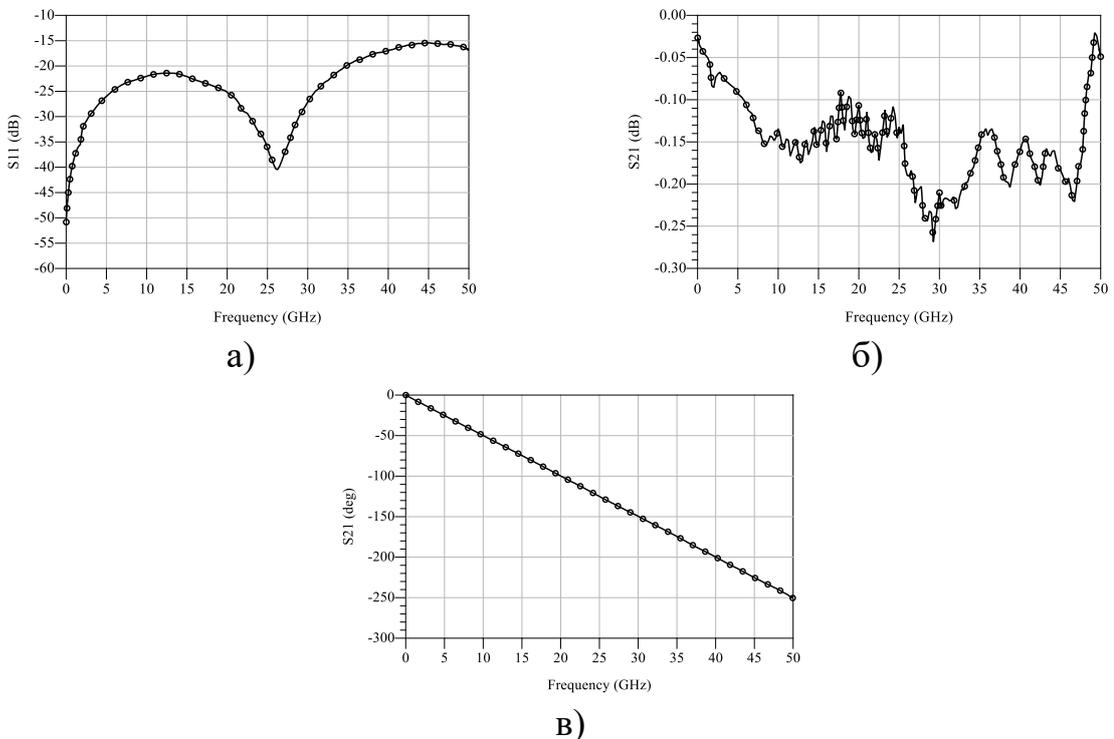


Рис. 57. S-параметры измерений тестовой конструкции: (а) –  $S_{11}$  (дБ), (б) –  $S_{21}$  (дБ), (в) –  $S_{21}$  ( $^{\circ}$  эл.)

Результаты измерений показывают, что возвратные потери полученной системы не превышают -15 дБ в диапазоне частот до 50 ГГц, а потери

на проход менее 0,3 дБ, указывая что потери в интегрированной копланарной линии составили менее 0,4 дБ/мм, включая два переходных соединения.

Прочность соединения была определена путём проведения испытаний на механическую стойкость и термоциклы. Образцы выдержали испытания, включающие чередующиеся механические удары 1800g, и климатическое воздействие (термоциклы  $-60^{\circ}\text{C}$  и  $+200^{\circ}\text{C}$ ). Количественная оценка стойкости соединения к разрыву на сдвиг проводилась на установке тестирования микросоединений Nordson Dage 4000Plus. Испытаны по три образца с разным типом соединяющего слоя. Контактная площадь кристалла с подложкой составляет  $0,22\text{ мм}^2$ . Результаты эксперимента представлены в таблице 12. Прочность соединения на сдвиг превышает 44 МПа, что показывает надёжность полученного монтажа.

Таблица 12. Результаты тестов на прочность соединения

№ Эксперимента	Au соединяющий слой		Au-Sn соединяющий слой	
	Значение, МПа	Отклонение от среднего	Значение, МПа	Отклонение от среднего
1	72,5	4,1%	61	6,2%
2	84,7	21,5%	44,5	-22,5%
3	51,8	-25,6%	66,8	16,3%
Среднее	69,7		57,4	

Соединение  $A^{III}B^V$  кристаллов с возможностью локального контакта может быть реализовано либо с помощью термокомпрессии Au-Au, либо технологией взаимной переходной диффузии на основе системы слоёв Au-Sn. Технология монтажа методом взаимной переходной диффузии, имеет такие преимущества по сравнению с традиционной термокомпрессией, как: относительно пониженная температура, пониженная требовательность к качеству поверхности. Монтаж взаимной переходной диффузией 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.

### 3.3.3. Экспериментальные результаты тестовой конструкции ГМИС СВЧ с транзистором

Дополнительно проведены эксперименты интеграции кристаллов активного элемента СВЧ методом перевернутого монтажа с применением системы металлов Au-Sn. Изготовлены экспериментальные образцы кристаллов основания для монтажа кристалла малошумящего GaAs рHEMT транзистора ЗПЗ107АН5 [132, 133, 134]. Малошумящий полевой транзистор обладает высокими СВЧ параметрами в диапазоне частот до 40 ГГц. Транзистор с гребенчатой структурой  $4 \times 40$  мкм, общая ширина затвора 160 мкм, длина затвора 0,13 мкм. Контактные площадки затвора и стока имеют идентичные размеры  $68 \times 70$  мкм<sup>2</sup>. Контактные площадки истоков имеют размер  $254 \times 120$  мкм<sup>2</sup>. Расстояние между металлизацией истоков и стока/затвора – 12 мкм. Общие габаритные размеры кристалла транзистора –  $0,38 \times 0,5 \times 0,1$  мм<sup>3</sup>. Верхний слой металлизации контактных площадок представляет собой Au толщиной 5 мкм. Фотография кристалла транзистора представлена на рис. 58.

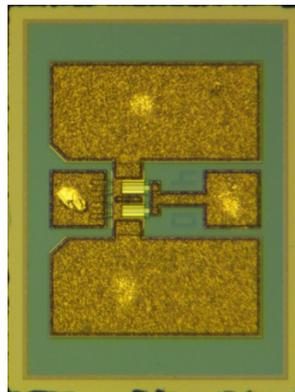


Рис. 58. Полевой транзистор малошумящий ЗПЗ107АН5.  
Габаритные размеры:  $0,38 \times 0,5 \times 0,1$  мм<sup>3</sup>

Кристалл основания имеет габаритные размеры  $3 \times 3 \times 0,3$  мм<sup>3</sup>, выполнен на подложке сапфира. Кристалл имеет контактные площадки, приспособленные для измерения СВЧ параметров с применением зондов G-S-G с шагом 250 и 500 мкм. Контактные площадки размером  $140 \times 140$  мкм<sup>2</sup> и подводящие линии шириной 70 мкм и длиной 161 мкм для выводов стока

и затвора идентичны. На финальном отрезке подводящих линий сформирован соединяющий слой из системы металлов Au-Sn площадью  $68 \times 70$  мкм<sup>2</sup>. Верхний слой металлизации на кристалле сапфира – Au 1 мкм. На нём локально, с применением процессов фотолитографии, сформирован соединяющий слой из системы металлов Au-Sn, общей толщиной 4,5 мкм. Топология расположения соединяющего слоя зеркальна топологии контактных площадок транзистора 3П3107АН5. Фотография кристалла основания представлена на рис. 59.

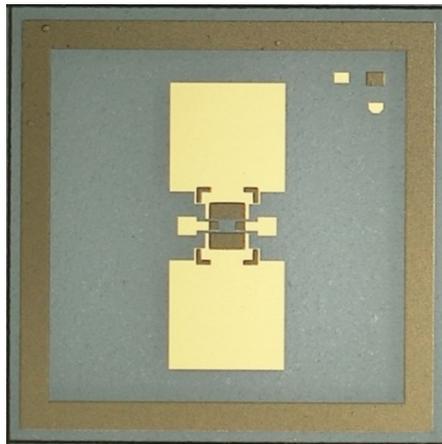


Рис. 59. Сапфировый кристалл со сформированной системой Au-Sn.  
Габаритные размеры:  $3 \times 3 \times 0,3$  мм<sup>3</sup>

Монтаж кристаллов осуществлялся при максимальной температуре 270 °С, время воздействия – 5 мин, давление – 5 МПа. Фотография интегрированных кристаллов представлена на рис. 60. Измерения проводились на анализаторе цепей N5247A с помощью полуавтоматической зондовой станции с применением зондов G-S-G с шириной зазора 250 и 500 мкм. Режим транзистора по постоянному току  $V_{ds} = 2$  В,  $I_{ds} = 16$  мА, оптимальный для минимального коэффициента шума.

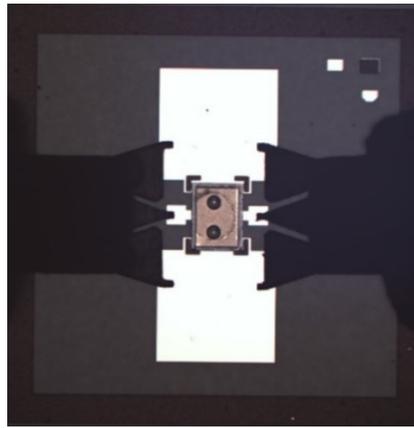


Рис. 60. Фотография интегрированного кристалла транзистора 3П3107АН5 на сапфировый кристалл при измерениях

Моделирование электрических характеристик изготовленных переходных межсоединений необходимо для оценки влияния процесса монтажа на СВЧ-параметры активного элемента. Расчётная модель сборочной конструкции включает табличные значения измерений S-параметров транзистора на пластине, электромагнитную модель контактных площадок и подводящих линий, модели переходного межсоединения в виде эквивалентной схемы. Значения S-параметров транзистора получены при измерении на пластине в рабочей точке  $V_{ds} = 2$  В,  $I_{ds} = 13$  мА. Электромагнитная модель получена при расчёте трехмерной модели топологии на подложке сапфира с применением современных САПР с использованием метода конечных элементов. Эквивалентная схема переходного межсоединения представлена на рис. 61. Значения эквивалентной схемы переходного межсоединения размером  $70 \times 68$  мкм<sup>2</sup> и толщиной 4,5 мкм определены аналогично порядку, представленному в п. 3.1.1.

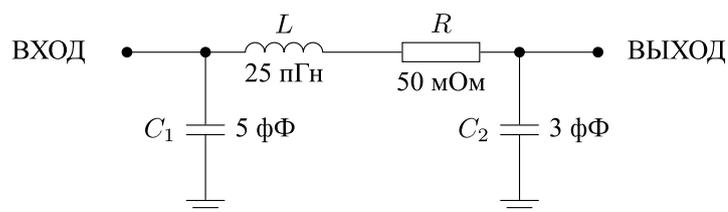


Рис. 61. Эквивалентная схема переходного межсоединения кристалла основания с транзистором

Графики зависимостей малосигнальных характеристик от частоты в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом измерений и расчёта модели сборочной конструкции в сравнении с измерениями транзистора 3П3107АН5 на пластине, представлены на рис. 62.

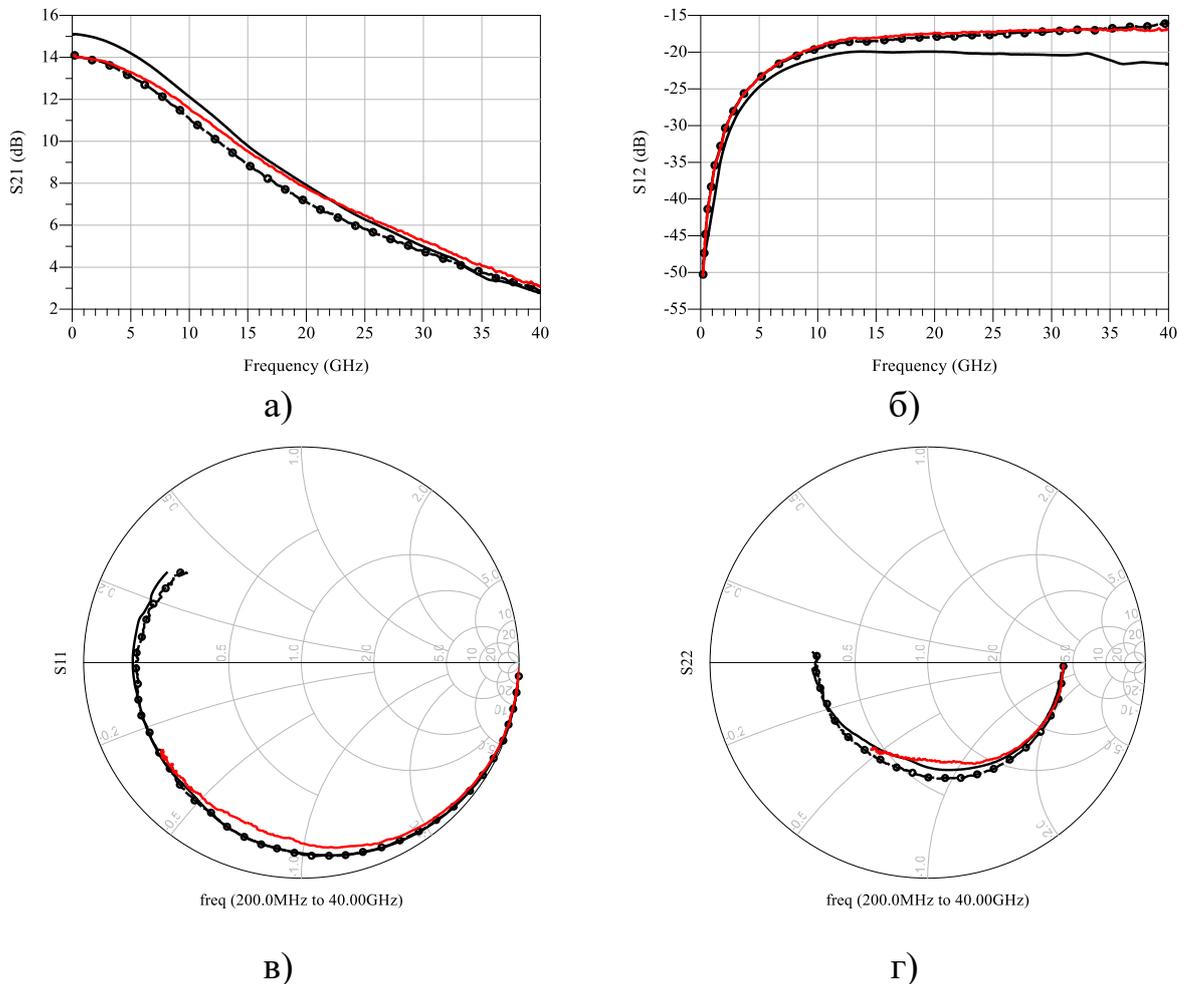


Рис. 62. Графики зависимостей малосигнальных параметров транзистора 3П3107АН5 от частоты. (а) – коэффициент усиления, (б) – изоляция, (в) – коэффициент отражения по входу, (г) – коэффициент отражения по выходу.

Чёрная линия – измерения сборочной конструкции, пунктирная линия – расчёт модели сборочной конструкции, красная линия – измерения транзистора на пластине.

Сходимость экспериментальных и расчётных значений сборочной конструкции говорит о точности построенной модели. Зависимости коэффициента усиления и изоляции сборочной конструкции не показывают значительных различий от измерений транзистора на пластине. Однако, расхождения в коэффициентах отражения по входу и выходу свидетельствует

о внесении реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы интегрируемой конструкции. Дополнительные реактивные паразитные составляющие при интеграции транзистора являются ограничительным фактором при построении цепей согласования, ограничивая диапазон рабочих частот и ухудшая характеристики активного элемента. Контактные площадки и подводящие линии не являются необходимыми элементами при интеграции транзистора методом перевернутого монтажа. Таким образом, для корректной оценки характеристик интегрированного транзистора необходим анализ его электрических характеристик с учётом реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений.

На рис. 63 представлены графики зависимостей малосигнальных параметров 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. Значения S-параметров транзистора получены при измерении на пластине в режиме работы  $V_{ds} = 3$  В,  $I_{ds} = 44$  мА. Проволочные соединения из золотой проволоки диаметром 18 мкм и длиной 400 мкм. Переходные межсоединения для интеграции методом перевернутого монтажа размером  $70 \times 68$  мкм<sup>2</sup> и толщиной 4,5 мкм. Значения  $h_{21}$  рассчитаны из результатов S-параметров согласно формуле:

$$h_{21} = \frac{-2 \cdot S_{21}}{(1 - S_{11}) \cdot (1 - S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}} \quad (3)$$

Результаты расчёта электрических характеристик транзистора с учётом реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений в сравнении с измерениями транзистора на пластине показывают, что применение проволочных соединений вносит критичное влияние на импеданс транзистора по входу и выходу с 10 ГГц, что ограничивает возможность его согласования в широкой полосе частот. В то же время, переходные межсоединения для поверхностного монтажа

оказывают несущественное влияние на импеданс транзистора, не ограничивая его рабочий диапазон частот.

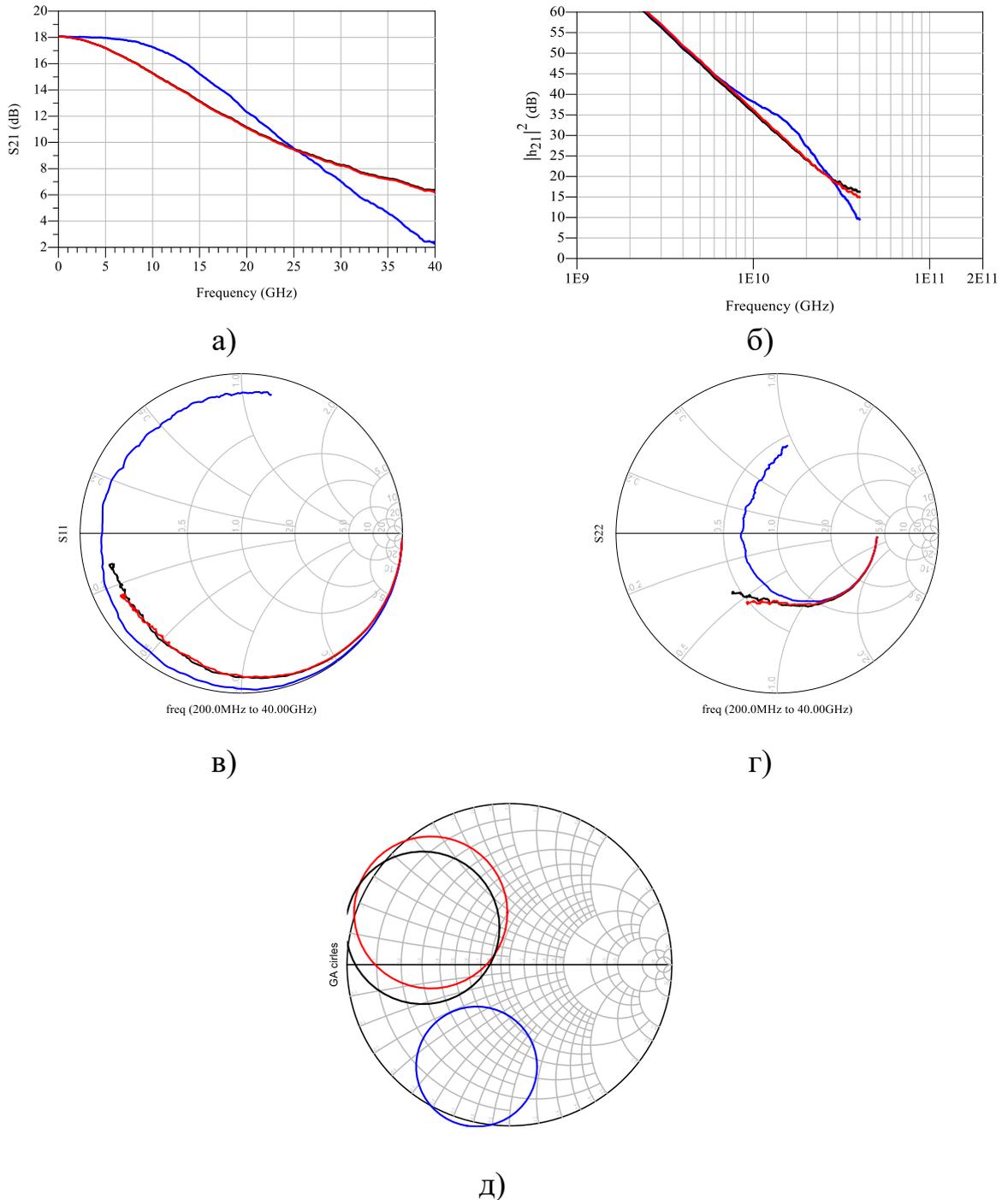


Рис. 63. Графики зависимостей малосигнальных параметров транзистора ЗП3107АН5 от частоты. (а) – коэффициент усиления, (б) –  $|h_{21}|^2$ , (в) – коэффициент отражения по входу, (г) – коэффициент отражения по выходу, (д) – контуры коэффициента усиления свыше 10 дБ на частоте 30 ГГц. Чёрная линия – транзистор с межсоединениями для поверхностного монтажа, синяя линия – транзистор с проволочными соединениями, красная линия – измерения транзистора на пластине.

Контуры реализуемого коэффициента усиления уровня свыше 10 дБ на частоте 30 ГГц демонстрируют, что площади для транзистора с межсоединениями для поверхностного монтажа и измеренного на пластине почти совпадают, указывая на схожие импедансы. Контур для транзистора с проволочными соединениями не имеет совпадений остальными, а общая площадь импедансов ниже в  $\sim 1,5$  раза. Значения  $|h_{21}|^2$  свидетельствуют о том, что использование проволочных соединений снижает предельную частоту усиления по току транзистора.

### 3.3.4. Выводы

Представлен метод интеграции  $A^{III}B^V$  кристаллов на пластине, обеспечивающий высокие частотные характеристики в миллиметровом диапазоне длин волн. Кристаллы  $A^{III}B^V$  методом перевернутого монтажа интегрированы на подложку, на которой сформирован соединяющий слой на этапе изготовления пластины. Монтаж обеспечивался с помощью соединяющего слоя из системы металлов Au-Sn. Результаты измерений показывают, что возвратные потери полученной системы не превышают -15 дБ в диапазоне частот до 50 ГГц. Потери интегрированной копланарной линии составили менее 0,4 дБ/мм, включая два переходных соединения. Данные по прочности соединения демонстрируют многообещающие результаты, показывающие перспективность предложенной конструкции в космическом применении.

### 3.4. Заключение по 3 главе

Проведено исследование переходных межсоединений с разработанной системой слоёв Au-Sn. Применение метода перевернутого монтажа обеспечивает потери в межсоединении порядка 0,1 дБ на частотах 50 ГГц.

На основе примера тестовой конструкции проведено исследование тепловых режимов интеграции кристаллов методом перевернутого монтажа, которое выявило, что максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм может быть снижена на 7 для GaN HEMT и на 41 °C для GaAs pHEMT по сравнению с традиционным методом интеграции.

Предложена конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ, где  $A^{III}B^V$  кристаллы СВЧ лицевой стороной интегрированы на диэлектрическую подложку кремния либо карбида кремния посредством соединяющего слоя Au-Sn, обеспечивающего монтаж методом взаимной переходной диффузии. На представленную конструкцию получен патент на изобретение РФ [131].

Реализована тестовая конструкция интеграции  $A^{III}B^V$  кристаллов методом перевернутого монтажа. Представленные экспериментальные данные электрических характеристик подтверждают работу конструкции ГМИС СВЧ в диапазоне до 50 ГГц. Результаты тестов на прочность показывают стойкость к механическим и климатическим воздействиям, предъявляемые к современной ЭКБ СВЧ специального назначения.

Предложенная оригинальная конструкция ГМИС СВЧ открывает перспективы создания отечественных ГМИС миллиметрового диапазона длин волн.

## **ГЛАВА 4. Гибридно-монолитная интегральная схема СВЧ для поверхностного монтажа**

С развитием потребности систем беспроводной связи и радиолокации, рабочие частоты продвигаются в миллиметровый диапазон. Радиоэлектронная аппаратура миллиметрового диапазона длин волн требует не только функциональных компонентов интегральных схем (МИС СВЧ), но и корпусированных решений с низкой стоимостью и низкими значениями реактивных паразитных составляющих эквивалентной схемы переходных межсоединений. Корпусирование МИС СВЧ обеспечивает защиту от механических и внешних окружающих воздействий. Применение ЭКБ СВЧ в корпусе для поверхностного монтажа подразумевает простоту применения и сборки, что обеспечивает низкую стоимость изготовления модулей.

Доступные сегодня ЭКБ СВЧ в корпусах для поверхностного монтажа широко представлены до частот 40-45 ГГц [135]. Дальнейшее продвижение вверх по частотному диапазону является актуальной задачей.

Основными параметрами корпуса являются:

- паразитные составляющие сигнального межсоединения;
- паразитная индуктивность заземления;
- тепловое сопротивление конструкции;
- массогабаритные характеристики, полезная используемая площадь корпуса.

### **4.1. Анализ современных конструкций СВЧ схем для поверхностного монтажа**

Тип корпуса QFN (Quad Flat No-leads) является наиболее распространённым в диапазоне СВЧ для корпусированных интегральных схем (ИС) для поверхностного монтажа. Конструкция подразумевает наличие планарных выводов (выводной рамки) на нижней стороне корпуса. Наиболее применяемыми методами реализации подобных корпусов являются plastic-overmold, air cavity, LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramic) и laminate технологии. Типичная структурная схема конструкции интеграции ИС

в корпус типа QFN представлена на рис. 64. Конструкции plastic-overmold и air cavity наиболее широко применимы при корпусировании МИС СВЧ в диапазоне частот до 20 ГГц, однако их частотный диапазон ограничен из-за сильного влияния диэлектрической нагрузки крышки (либо заполняемого диэлектрика) и фиксированной топологии выводной рамки.

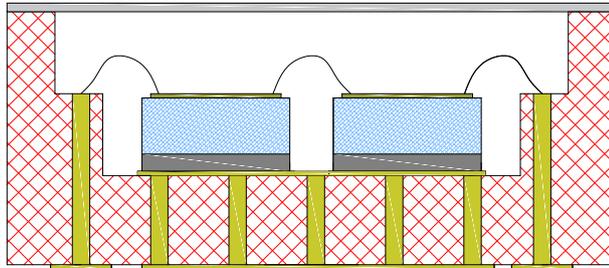
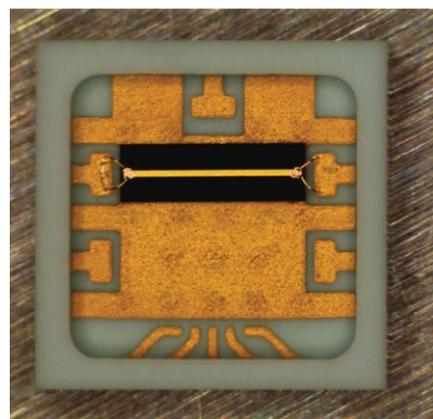
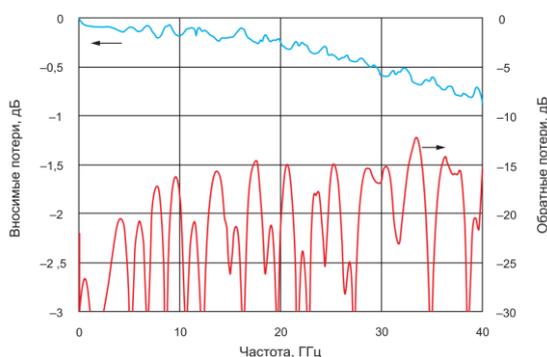


Рис. 64. Типичная конструкция СВЧ ИС в корпусе QFN

Корпуса для поверхностного монтажа для работы свыше 20 ГГц применяют керамические диэлектрические основания. Наиболее применимыми являются корпуса типа QFN на основе LTCC-керамики. Подобная конструкция позволяет обеспечивать интеграцию МИС СВЧ в диапазоне до 40 ГГц [136, 137]. На рис. 65 представлены малосигнальные параметры и фотография внешнего вида корпуса со смонтированной микрополосковой линией, изготовленного в АО «НИИПП». Вносимые потери корпуса, включая микрополосковую линию составляют менее 1 дБ на частоте 40 ГГц.



а)

б)

Рис. 65. Малосигнальные параметры (а) и фотография внешнего вида (б) корпуса со смонтированной микрополосковой линией АО «НИИПП» [136]

Тепловое сопротивление корпуса, зависящее от толщины и теплопроводности материала, в случае применения технологии LTCC-керамики, вносит существенную роль в тепловой режим работы схемы, и сильно ограничивает применение и корпусирование мощных схем в подобной конструкции.

Для более мощных приборов могут быть использованы корпуса на основе AlN [138]. Однако высокие значения индуктивности заземления, из-за невозможности формирования сквозных металлизированных отверстий в объёме корпуса ограничивает диапазон частот применения до 20 ГГц. Перспективной конструкцией для реализации корпусов для мощных СВЧ кристаллов является использование поликристаллической алмазной плёнки (ПАП), в качестве диэлектрического основания ввиду уникальных свойств алмаза [139]. Однако, современный уровень обработки пластин ПАП, например, сложность формирования сквозных металлизированных отверстий и обеспечение высокой плоскопараллельности, не позволяет обеспечить масштабного промышленного применения.

В типе корпуса QFN два типа паразитных сигнальных составляющих: сигнальные корпуса и проволоки. Для минимизации влияния проволочных соединений, топологию контактных площадок оптимизируют, формируя фильтр низких частот. В QFN корпусах реализованных по LTCC технологии потери в сигнальном пути могут быть оптимизированы и не превышать 0,5 дБ на частотах 70 ГГц [140, 141], но ограничение по толщине основания, примерно 200 мкм, обеспечивает внесение паразитной индуктивности заземления около 30 пГн.

Достоинствами представленных конструкций корпусов являются невысокая стоимость изготовления, простота и технологическая зрелость процессов сборки и для некоторых технологий. Недостатками данной конструкции являются ограничение по частотному диапазону около 40 ГГц, невысокая степень площади МИС в общей площади корпуса.

Как показано ранее, сигнальные выводы корпуса типа QFN, реализованные на основе керамики могут иметь приемлемые частотные характеристики и на 80 ГГц, однако дальнейшее соединение кристалла с корпусом с применением металлических проволок сильно ограничивает частотные характеристики интегрированной системы.

Одним из вариантов интеграции кристаллов с корпусами типа QFN является применение технологии MicroCoax [142]. Способ представляет собой использование проволочных соединений и превращение их в структуру типичного коаксиального кабеля. Подобный проводник не требует компенсаций, так как имеет фиксированный импеданс  $Z_0$ . Типичный процесс формирования подобной структуры проиллюстрирован на рис. 66.

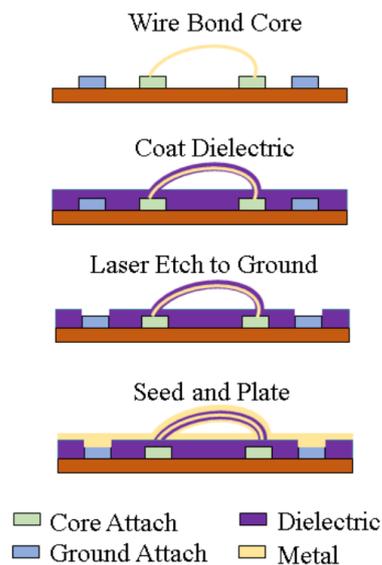


Рис. 66. Схематичное представление процесса формирования структуры MicroCoax [143]

Процесс интеграции с применением подобной технологии состоит из трёх основных этапов:

1. Интеграция кристаллов в корпус, электрическое соединение проволоками;
2. Покрытие кристалла и проволочных соединений диэлектрическим слоем определённой толщины для реализации требуемого импеданса. Локальные отверстия в диэлектрическом слое обеспечивают дальнейшее соединение внешней металлизации и заземляющего покрытия;

3. Внешнее покрытие металлом, обеспечивающее экранирование, что полностью формирует структуру, похожую на коаксиальный кабель.

Диаметр формируемого кабеля составляет порядка 70 мкм. Результаты измерений частотных характеристик (рис. 67) демонстрируют потери в MicroCoax менее 1 дБ/мм до 115 ГГц.

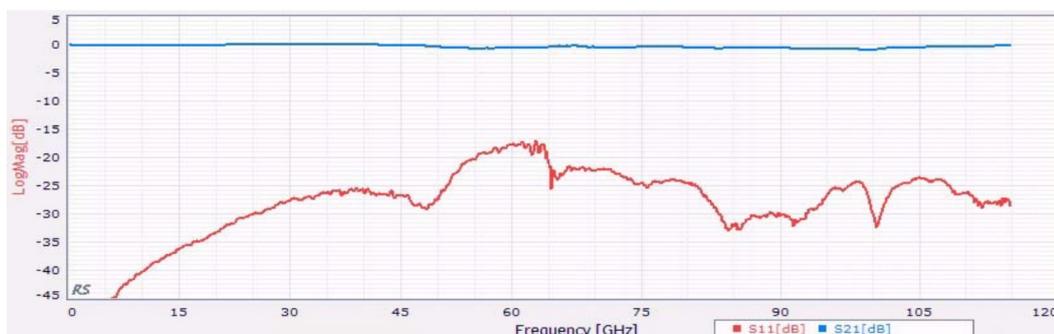


Рис. 67. Частотные характеристики MicroCoax длиной 2.2 мм [142]

Однако, недостатком данной конструкции является необходимость применения технологических этапов полупроводникового производства после интеграции кристаллов в корпус. Формирование экранирующего слоя металла требует напыления в два и более этапа при разных углах, для равномерного распределения металла по поверхности окружности.

Комбинация технологий QFN корпуса на основе LTCC керамики с интеграцией полупроводниковых кристаллов методом перевернутого монтажа позволяет расширить область диапазона частот до 70 ГГц [144, 145].

Так, в работе [144] реализована конструкция, где корпус для поверхностного монтажа изготовлен из LTCC в связи с возможностью формировать произвольные ширины металлизации, что позволяет достичь высокой степени интеграции. Схематичное представление конструкции показано на рис. 68. Для интеграции МИС СВЧ применен метод перевернутого монтажа. В качестве межсоединений были использованы локальные межсоединения из золота, сформированные из проволоки. Монтаж МИС СВЧ обеспечивался методом термокомпрессии с ультразвуком. В качестве теплоотводящей крышки использован сплав CuW. Частотные характеристики

модуля в корпусе показывают, что во всём диапазоне частот работы МИС СВЧ обеспечивается и работка схемы в корпусе.

Ограничением по частотам остаётся толщина основания, равная порядка 200 мкм, которая обеспечивает последовательную паразитную индуктивность соединения около 30 пГн.

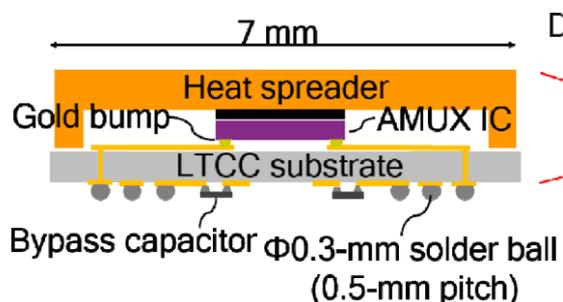


Рис. 68. Схематичный вид сбоку СВЧ модуля в корпусе для поверхностного монтажа [144]

Дальнейшее повышение электрических характеристик во многом зависит от снижения толщины диэлектрического основания, что подразумевает применение полупроводниковых диэлектрических подложек и сопутствующих технологических процессов.

В работе [146] представлены результаты реализации приёмопередающего модуля в конструкции для поверхностного монтажа. Схематичное представление конструкции и процесса интеграции проиллюстрировано на рис. 69. Конструкция требует кремниевой платы со сформированными пассивными элементами, кристаллы активных и пассивных МИС СВЧ и кремниевой крышки. МИС СВЧ смонтирована методом «hot-via» на пластину кремниевой платы со сформированными локальными межсоединениями Cu/Ni/Sn. Кремниевая плата имеет сквозные металлизированные отверстия, слой диэлектрика и два слоя металлизации, благодаря которым реализованы линии передачи, индуктивности, конденсаторы и контактные площадки. Защита от внешних воздействующих факторов обеспечивается крышкой, выполненной из кремния с сформированными полостями глубиной 150-350 мкм и покрытая

металлизацией TiW/Cu толщиной ~ 3 мкм, которая соединяется с кремниевой платой.

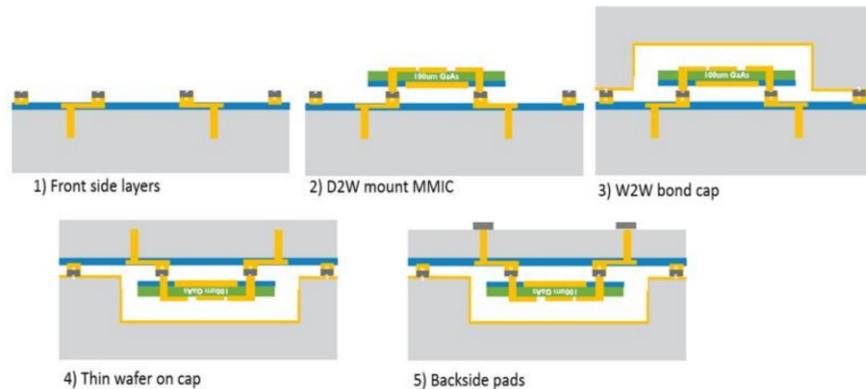


Рис. 69. Схематическое представление процесса формирования приёмопередающего модуля [146]

Реализация представленной конструкции проиллюстрирована на примере приёмопередающего модуля Ka-диапазона частот. Модуль включает УМ, МШУ и смеситель, реализованные как отдельные кристаллы на GaAs, и высокочастотные и низкочастотные фильтры, ряд согласующих цепей, сформированных на кремниевой плате. Частотные характеристики корпуса до соединения с элементами схемы отдельно не были исследованы. Габаритные размеры приёмопередающего модуля составили  $8 \times 5,6 \times 0,9$  мм<sup>3</sup>.

Интеграция кристаллов МИС СВЧ без применения проволочных соединений позволяет снизить паразитные эффекты соединения в миллиметровом диапазоне длин волн.

Применение кремниевой платы, на которой сформированы пассивные элементы, и интеграция кристаллов МИС СВЧ без применения проволочных соединений позволяет снизить паразитные эффекты соединения в миллиметровом диапазоне длин волн, достичь высокой степени миниатюризации многофункциональных СВЧ приборов. Реализация контактных выводов с обратной стороны кремниевой платы и применение крышки для защиты активных и пассивных элементов модуля от внешних факторов обеспечивает дальнейшее удобство применения модуля

с представленной конструкцией. Сравнительный анализ разных конструкций для поверхностного монтажа представлен в таблице 13.

Таблица 13. Способы реализации схем для поверхностного монтажа

Ссылка, компания, страна	Потери на проход, дБ	Тип соединения с кристаллом	Толщина основания, мкм	Материал основания	Материал диэлектрика
[136] НИИПП / Россия	<0,4 @ 40 ГГц	Проволоки	200	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
[139] НПП «Исток» / Россия	1,5 @ 40 ГГц	Проволоки	100	C	C
[140, 141] Kyocera / Япония	1,0 @ 50 ГГц	Проволоки	250	CuMo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
[146] Nan Jing / Китай	?	Flip-chip (шарики припоя CuSn)	100	Si	Si
[147] Southwest university / Китай	<0,6 @ 75 ГГц	Flip-chip (шарики припоя 75 мкм)	250	RO3003	RO3003
[129] Fraunhofer IZM / Германия	?	Flip-chip (шарики припоя)	940	SiC	SiC

Для компактной интеграции и корпусирования в качестве распределительной платы (основания) применяются разные технологии, как HTCC, LTCC, HDBU (High Density Build-Up органические подложки), кремний, стекло и карбид кремния. Применение конструкции корпуса для поверхностного монтажа, где межсоединения кристалла и корпуса обеспечены проволочными соединениями ограничивают диапазон рабочих частот до ~45 ГГц. Продвижение вверх по частотному диапазону требует ухода от проволочных соединений. Совокупность применения технологий LTCC и метода flip-chip позволяет расширить диапазон рабочих частот до 70 ГГц.

Объединение способов интеграции кристаллов с подложкой методом перевернутого монтажа и реализация подложки с толщиной менее 200 мкм, делает возможным повышение рабочей полосы до 100 ГГц. Исследование и разработка подобных конструкций является актуальной задачей в микроэлектронике СВЧ.

#### **4.2. Исследование влияния электрических характеристик длины сквозных металлизированных отверстий**

Важнейшими параметрами корпуса для поверхностного монтажа являются значения реактивных паразитных составляющих эквивалентной

схемы переходных межсоединений и паразитная индуктивность заземления. Данные параметры в основном зависят от физических характеристик сквозного металлизированного отверстия в диэлектрической подложке, так как именно оно является ключевым элементом, вносящим паразитные составляющие. Его длина – определяющий фактор. Далее приведены расчётные данные значений индуктивности тестовой конструкции металлизированного отверстия в зависимости от его длины. Значения индуктивности рассчитывались по формуле:

$$L_{\text{отв}} = \frac{\text{imag}(Z_{11})}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4)$$

где  $\text{imag}(Z_{11})$  – мнимая часть  $Z_{11}$  матрицы импедансов, а  $f$  – частота.

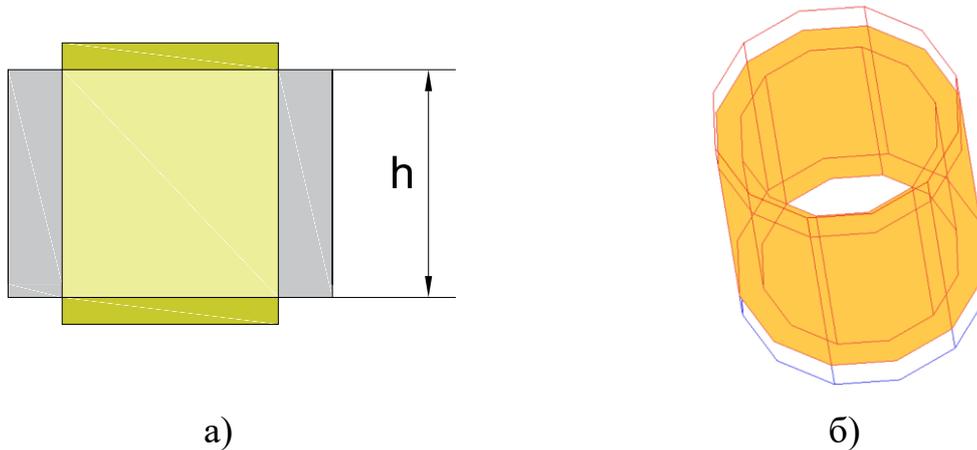


Рис. 70. Тестовая конструкция сквозного металлизированного отверстия: схематичное представление, вид сбоку (а) и трехмерная модель (б)

Тестовая конструкция сквозного металлизированного отверстия, представленная на рис. 70, имеет диаметр 100 мкм с металлизированными стенками толщиной 10 мкм. Внутренний объем отверстия – GaAs. Зависимость реактивной паразитной составляющей эквивалентной схемы отверстия, индуктивности, от материала заполнения внутреннего объема минимальна, не превышает 5% в диапазоне частот до 100 ГГц. Верхняя и нижняя металлизация толщиной 2 мкм выполнена из Au. Нижняя металлизация является заземляющей плоскостью. Показатели индуктивности отверстия имеют слабую частотную зависимость, и варьируются от 2,5% до 11% с уменьшением влияния при повышении длины отверстия в диапазоне

частот 1 – 100 ГГц. Зависимость значения индуктивности отверстия от его длины на частоте 50 ГГц представлена на рис. 71.

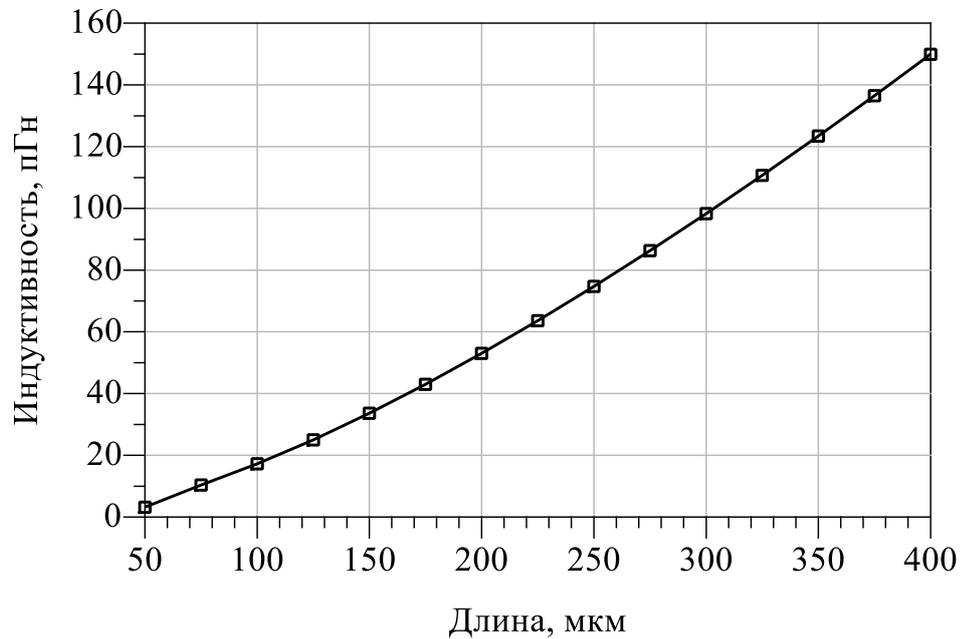


Рис. 71. Зависимость значения индуктивности сквозного металлизированного отверстия от его длины на частоте 50 ГГц

Таким образом, при длинах отверстия 50, 100, 200 и 300 мкм индуктивность составляет 3, 17, 53 и 98 пГн соответственно. Заземляющая индуктивность ухудшает возвратные потери, коэффициент передачи и изоляцию активных приборов. Анализ влияния индуктивности заземляющей плоскости на электрические характеристики усилительного каскада был проведён на примере модели ПТШ, включенного по схеме с общим истоком. В качестве модели активного элемента выбрана масштабируемая малосигнальная модель рНЕМТ-транзисторов, изготовленных на основе GaAs с проектной нормой 0,1 мкм [148].

Зависимости коэффициента усиления усилительного каскада транзистора с общим истоком от частоты при разных значениях индуктивности заземления представлены на рис. 72. Коэффициент усиления при оптимальных нагрузках по входу и выходу для минимального коэффициента шума, рассчитан по формуле [149]:

$$G_T = \frac{(1 - |\Gamma_S|^2) \cdot |S_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_L|^2)}{|(1 - S_{11} \cdot \Gamma_S) \cdot (1 - S_{22} \cdot \Gamma_L) - S_{12} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_S \cdot \Gamma_L|^2} \quad (5)$$

где  $\Gamma_S$  – оптимальный коэффициент отражения по входу для обеспечения минимального коэффициента шума, а  $\Gamma_L$  рассчитан по формуле:

$$\Gamma_L = S_{22} + \frac{S_{12} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_S}{1 - S_{11} \cdot \Gamma_S} \quad (6)$$

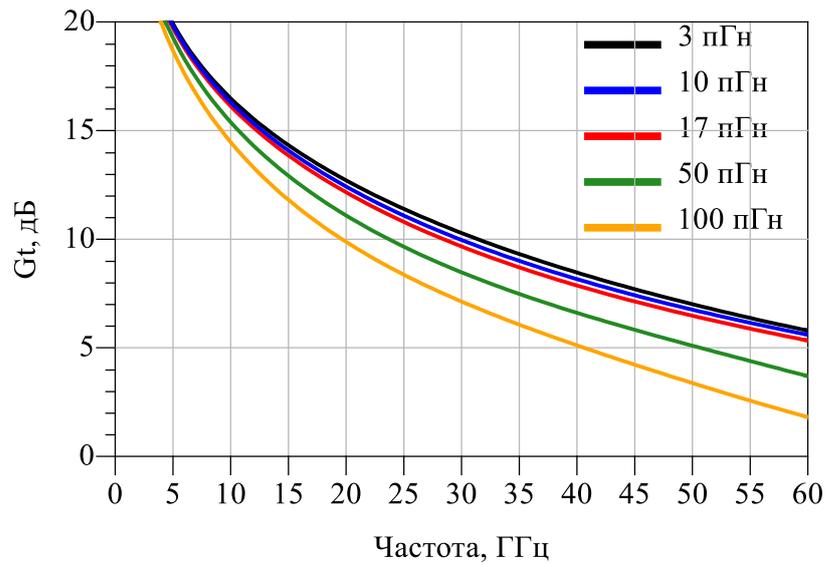


Рис. 72. График зависимости  $G_T$  транзистора при разной индуктивности заземления от частоты

На частоте 40 ГГц  $G_T$  усилительного каскада с транзистором  $4 \times 50$  мкм составил 8,4, 7,8, 6,6 и 5,1 дБ при индуктивностях, идентичных толщине заземляющего отверстия 50, 100, 200 и 300 мкм соответственно. На частоте 40 ГГц реактивная паразитная составляющая эквивалентной схемы, индуктивность, заземляющего отверстия толщиной 100 мкм снижает коэффициент усиления каскада на 10%, а при толщине 200 мкм на 26%. Таким образом, при увеличении толщины со 100 мкм до 200 мкм, что соответствует увеличению индуктивности с 17 до 50 пГн, коэффициент усиления усилительного каскада снижается с 7,8 до 6,6 дБ, или на 15%. Дополнительные 100 мкм длины заземляющего отверстия до 300 мкм повышают значение индуктивности до 98 пГн, что в свою очередь снижает коэффициент усиления до 5,1 дБ, или на 45% по сравнению с применением индуктивности, соответствующей длине заземляющего отверстия 100 мкм.

### 4.3. Конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа

Предложена конструкция гибридно-монокристаллической интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, включающая диэлектрическую подложку, выполненную из карбида кремния либо кремния, кристалл активного элемента (транзисторы и МИС), крышку, выполненную из высоколегированного кремния. На лицевой стороне диэлектрической подложки реализованы все пассивные элементы схемы, на обратной – контактные площадки питания и сигнальные выводы. Электрическое соединение лицевой и обратной сторон обеспечено сквозными металлизированными отверстиями. Конструкция, обеспечивающая поверхностный монтаж, облегчает дальнейшую интеграцию схем в радиоэлектронную аппаратуру. Кристалл активного элемента лицевой стороной интегрирован на лицевой стороне диэлектрической подложки с контактными площадками, на которых реализован соединяющий слой – система металлических слоёв Au-Sn, сформированный на этапе производства пластины. Обратная же сторона активного элемента соединена с углублением крышки. Крышка, выполненная из высоколегированного кремния, соединена с диэлектрической подложкой посредством ранее упомянутого соединяющего слоя, обеспечивая герметичность схемы и, как следствие, – расширение области применения. Схематичное представление конструкции представлено на рис. 73. На представленную конструкцию получен патент на изобретение РФ [130].

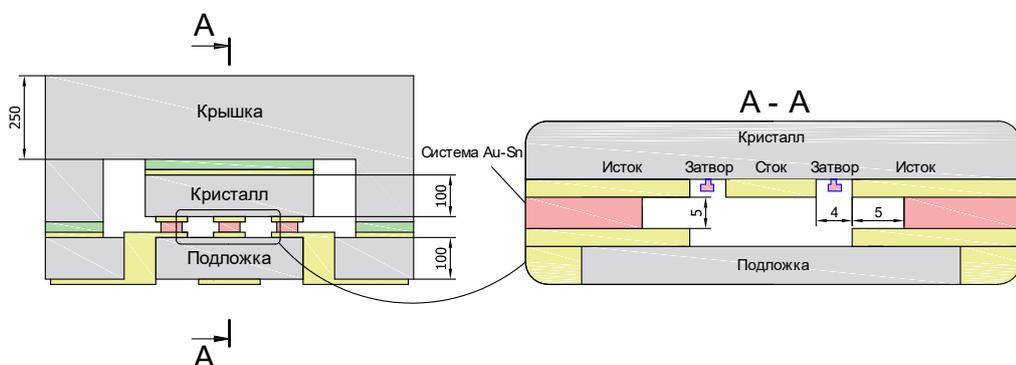


Рис. 73. Схематичное представление ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа

### 4.3.1. Частотные характеристики ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа

Построена трехмерная модель гибридно-монолитной интегральной схемы для поверхностного монтажа. Толщина диэлектрического основания выбрана 100 мкм, как оптимальное значение с точки зрения как электрических характеристик, так и технологических возможностей. Выводные контактные площадки размером  $200 \times 300$  мкм<sup>2</sup> электрически соединены сквозным металлизированным отверстием диаметром 100 мкм с линией до контактной площадки с межсоединением из системы металлов Au-Sn для интеграции A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> кристаллов на лицевой стороне диэлектрической подложки. В качестве материала диэлектрической подложки в данном расчёте применён SiC. Трёхмерная модель исследуемой конструкции представлена на рис. 74.

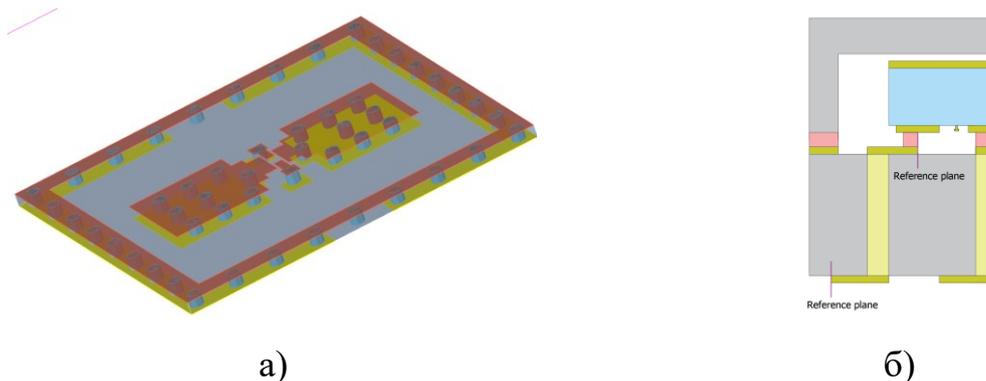
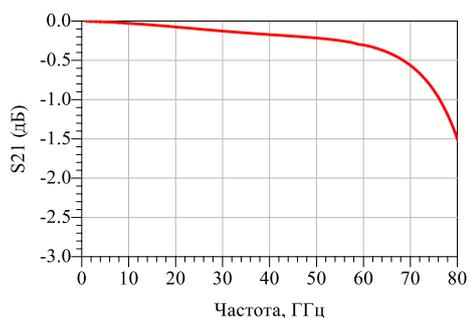
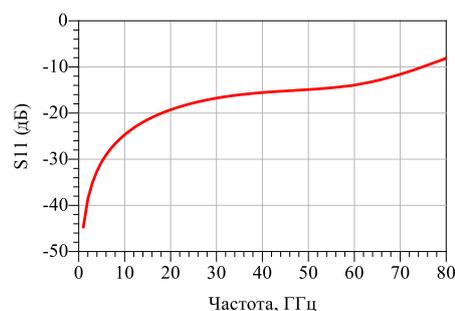


Рис. 74. Модель исследуемой конструкции: (а) – трёхмерная модель, (б) – схематичное представление сигнального пути

Электрические параметры конструкций оценивались путем трехмерного электродинамического расчёта методом конечных элементов, с помощью современных САПР. Результаты расчёта S-параметров конструкции представлены на рис. 75.



а)



б)

Рис. 75. Частотные характеристики ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа: (а) – потери на проход, (б) – возвратные потери

Исследуемая конструкция обеспечивает внесение потерь одного межсоединения менее 0,55 дБ в диапазоне частот до 70 ГГц. Дальнейшее продвижение по частотам возможно при оптимизации топологии выводных контактных площадок.

#### 4.3.2. Исследование тепловых режимов ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа

Модель исследуемой конструкции представлена на рис. 76. Топология диэлектрической подложки идентична конструкции, представленной в п.3.3. Исследуемая конструкция дополнительно включает крышку, выполненного из низкоомного кремния. Основные результаты исследования представлены в работе [150].

На лицевой стороне диэлектрической подложки реализованы все пассивные элементы схемы, на обратной – контактные площадки питания и сигнальные выводы. Электрическое соединение лицевой и обратной сторон обеспечено сквозными металлизированными отверстиями.

Кристалл активного элемента лицевой стороной интегрируется на лицевой стороне диэлектрической подложки с контактными площадками, на которых реализован соединяющий слой – система металлических слоёв Au-Sn, сформированный на этапе производства пластины. Обратная же сторона активного элемента соединяется с углублением крышки. Крышка, выполненная из высоколегированного кремния, соединяется

с диэлектрической подложкой посредством ранее упомянутого соединяющего слоя, обеспечивая герметичность схемы.

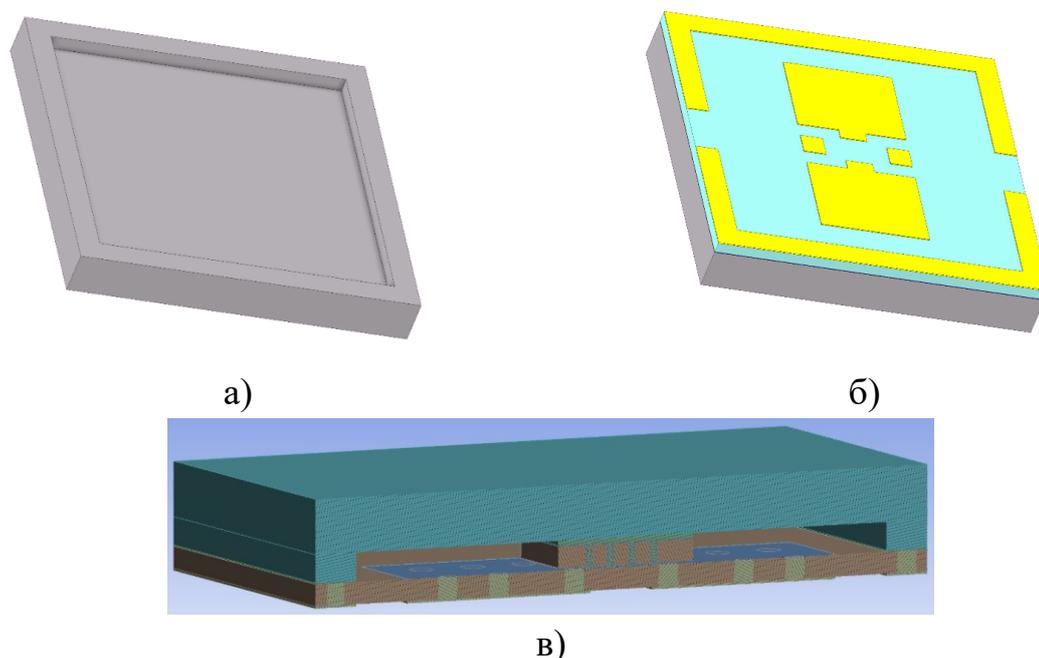


Рис. 76. Модель исследуемой ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа: (а) – крышка, (б) – ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа, (в) – срез модели исследуемой конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа

Как и в представленных ранее расчётах, проведён анализ стационарного теплового распределения. Постоянная температура обратной стороны подложки  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  была задана граничным условием первого рода. Источниками тепловыделения были заданы подзатворные области длиной 1 мкм. Задаваемая рассеиваемая мощность  $P_{diss}$  составила 6 Вт для GaN НЕМТ и 2 Вт для GaAs рНЕМТ.

Исследована зависимость максимальной разности температур от толщины соединяющего слоя в пределах от 2 до 20 мкм. Зависимости максимальной температуры в канале от толщины соединяющего слоя представлены на рис. 77. Влияние толщины исследовано при двух типах диэлектрической подложки – SiC и Si. Базовый материал соединяющего слоя – система металлических слоёв Au-Sn, сформированная на этапе производства пластины диэлектрической подложки, которая обеспечивает соединение методом взаимной переходной диффузии. Материал Cu был рассмотрен

как альтернативный вариант соединяющего слоя для варианта интеграции GaN НЕМТ.

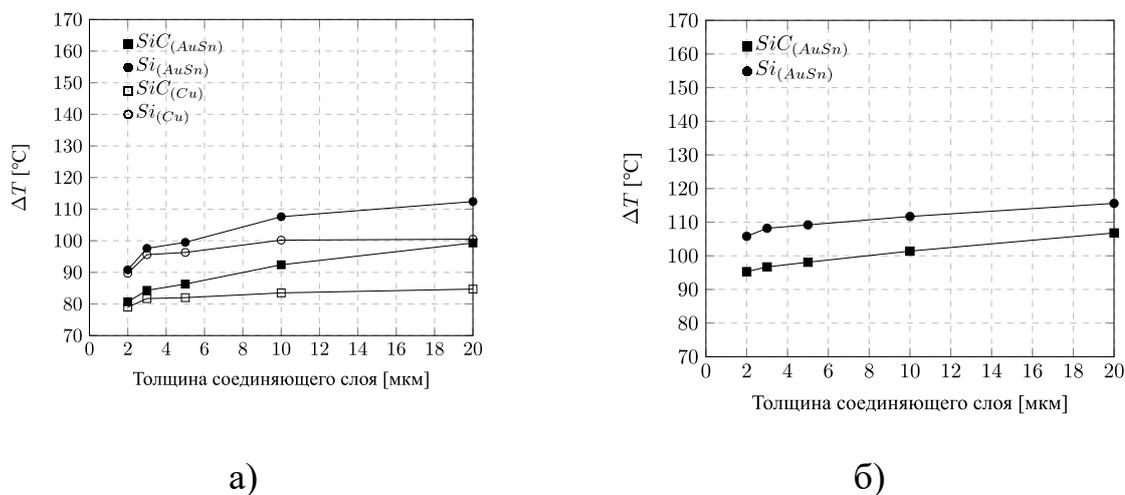


Рис. 77. Зависимость максимального перегрева в конструкции от толщины соединяющего слоя конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа: (а) – для GaN НЕМТ, (а) – для GaAs рНЕМТ

В сравнении с конструкцией ГМИС с применением перевернутого монтажа, толщина соединяющего слоя оказывает меньшее влияние на максимальный перегрев в конструкции. При применении диэлектрической подложки SiC изменение максимальной разности температур составляет 18,6 °C по сравнению с 27,7 °C в конструкции ГМИС с применением перевернутого монтажа при GaN НЕМТ и 11,5 °C по сравнению с 14,9 °C при GaAs рНЕМТ. Применение диэлектрической подложки Si приводит к изменению максимальной разности температур на 21,6 °C, когда в конструкции, приведённой в главе 3, изменение составляет 40 °C для GaN НЕМТ, в то время как для GaAs рНЕМТ изменение температуры составляет 19,8 °C и 14,6 °C соответственно. Срез модели и тепловое распределение вблизи активного элемента проиллюстрировано на рис. 78.

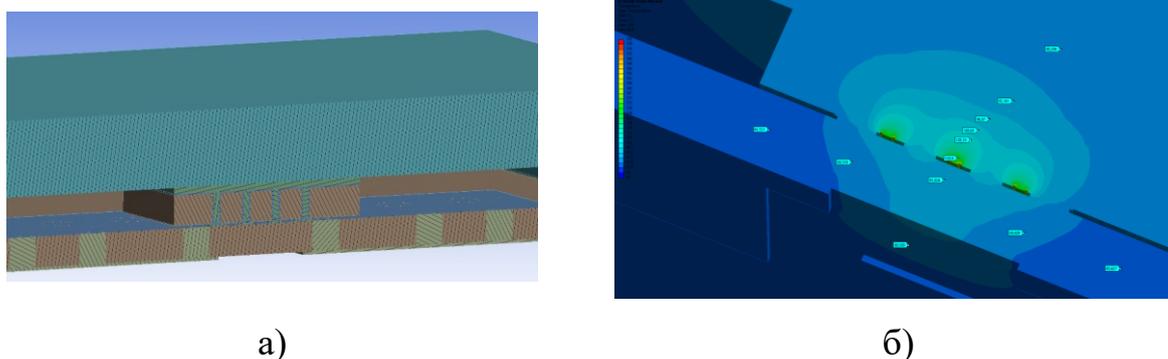


Рис. 78. Срез модели исследуемой конструкции ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа: (а) – срез модели конструкции вблизи активного элемента, (б) – тепловое распределение вблизи активного элемента для GaAs pHEMT. Максимальная температура – 183,1 °С

Изменение толщины крышки в месте углубления с 150 до 250 мкм снижает тепловое сопротивление на  $0,3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ . Дальнейшее увеличение толщины крышки является труднореализуемым. Выбранная толщина крышки является оптимальной с конструктивной и технологической точек зрения, так как типичная толщина пластины высоколегированного кремния составляет 350 мкм, а высота углублений 100 мкм, в следствие стандартной толщины кристаллов  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ .

Применение диэлектрической подложки SiC по сравнению с Si уменьшает максимальную разность температур на 13,2 °С для GaN HEMT и 16 °С для GaAs pHEMT, при толщине соединяющего слоя 5 мкм, что соответствует снижению теплового сопротивления всей конструкции  $R_{th}$  с  $16,6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  до  $14,4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ , или на 13,25 % и с  $59 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$  до  $51 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ , или на 13,4% соответственно.

При заданных тепловых условиях обратной стороны диэлектрической подложки +85 °С и с базовыми элементами, диэлектрической подложкой SiC и соединяющим слоем Au-Sn толщиной 5 мкм, максимальная разность температур составила 86,3 °С, обеспечив её уменьшение на 6,2 °С и 13,3 °С по сравнению с интеграции ГМИС методом перевернутого монтажа и традиционным методом, соответственно, для GaN HEMT, когда для GaAs

pHEMT максимальная разность температур составила 98,1 °С, обеспечив её уменьшение на 4 °С и 45,5 °С соответственно.

Построение эквивалентной тепловой схемы моделей позволило оценить влияние отдельных элементов конструкции на общее тепловое сопротивление (рис. 79). Схема состоит из 4 основных составляющих – тепловое сопротивление кристалла активного элемента, соединяющего слоя  $R_{PAD}$ , крышки, включающий слой припоя  $R_{AuSn}$  и собственно кремниевую крышку  $R_{RM}$ , диэлектрической подложки  $R_{subst}$ . Первая составляющая – тепловое сопротивление кристалла активного элемента. Поскольку в данной конструкции отвод тепла обеспечивается не через одно направление, а два, то тепловая модель транзистора должна иметь и два соединения с последующими составляющими электрической эквивалентной схемы тепловой модели схемы.

В качестве кристалла активного элемента используется как мощный GaN HEMT на подложке SiC, так и GaAs pHEMT. GaAs pHEMT имеет толщину 100 мкм из материала GaAs. GaN HEMT имеет общую толщину 100 мкм, из которых 97 мкм – SiC, а 3 мкм – структуры GaN. Распределение тепла идёт в нескольких направлениях. Первое – по поверхности структуры GaN. Второе – внутрь кристалла, с дальнейшим распределением как на лицевые контактные площадки кристалла, так и на обратную сторону кристалла через всю его толщину. Тепловое сопротивление кристалла активного элемента состоит из  $R_{tr\ int}$ ,  $R_{tr\ up}$ ,  $R_{tr\ back}$  и  $R_{tr\ GaN}$  (или  $R_{tr\ surface}$ ), где  $R_{tr\ GaN}$  (или  $R_{tr\ surface}$ ) – тепловое сопротивление по поверхности структуры GaN (GaAs),  $R_{tr\ int}$  отражает тепловое сопротивление, включающее отвод от источника тепловыделения и распределение тепла в кристалле активного элемента,  $R_{tr\ up}$  – тепловое сопротивление через структуру по вертикальной оси  $z$ , а  $R_{tr\ back}$  – тепловое сопротивление к обратной стороне кристалла.

Оценочные данные составляющих тепловых сопротивлений  $R_{tr\ GaN}$  и  $R_{tr\ surface}$  исследуемого активного элемента рассчитано по формуле:

$$R_{th} = \frac{l}{k \cdot A} \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \right) \quad (7)$$

где  $l$  – длина по оси  $x$  (м),  $k$  – теплопроводность  $\left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right)$ ,  $A$  – площадь поперечного сечения по осям  $y - z$  ( $\text{м}^2$ ).

Для исследуемого частного случая:

$$R_{tr GaN} = \frac{18 \cdot 10^{-6}}{130 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^{-6}} = 256,4 \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \right) \quad (8)$$

и

$$R_{tr surface} = \frac{18 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^{-6}} = 1111 \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \right) \quad (9)$$

Данные значений  $R_{tr int}$  и  $R_{tr back}$  определялись с целью совпадения данных электрической эквивалентной схеме тепловой модели с трехмерным анализом конструкции.

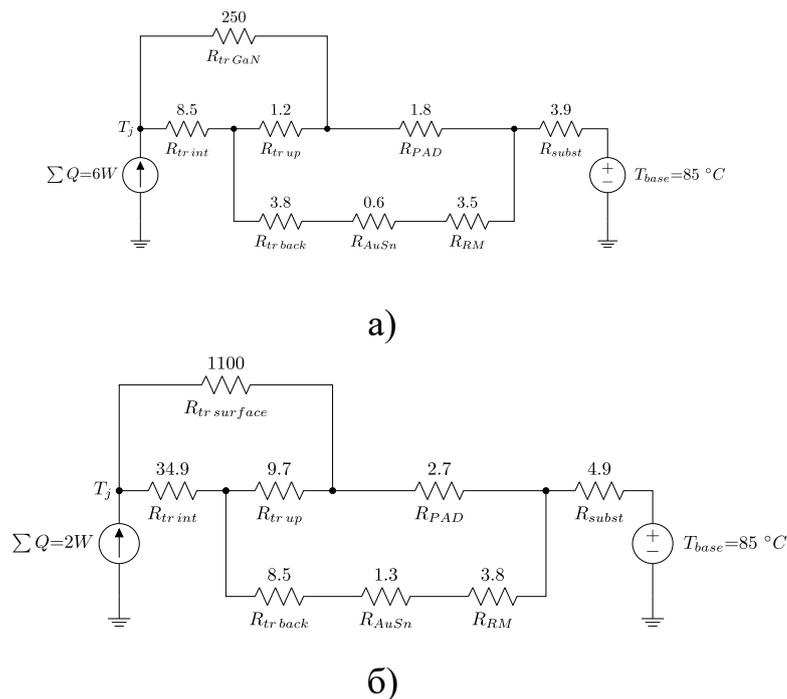


Рис. 79. Эквивалентная схема тепловой модели ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа: (а) – для GaN НЕМТ, (б) – для GaAs рНЕМТ

Общее тепловое сопротивление как по построенной эквивалентной тепловой схеме модели, так и по расчётным данным для GaN НЕМТ составляет  $14,4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ , когда для GaAs рНЕМТ –  $49,1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ . Данное значение меньше, чем у традиционного способа интеграции и конструкции ГМИС

с применением перевернутого монтажа на 13,3 % и 6,5 %, соответственно, для GaN HEMT, на 31,7 % и 3,8 % для GaAs pHEMT.

#### 4.4. Заключение по главе 4

Проведен анализ современных конструктивных способов реализации интегральных схем СВЧ для поверхностного монтажа. Продвижение вверх по частотному диапазону требует как ухода от проволочных соединений, так и минимизацию толщины диэлектрической подложки, что подразумевает применение полупроводниковых технологических процессов.

Исследовано влияние электрических характеристик усилительного каскада с общим истоком от длины заземляющего сквозного металлизированного отверстия. На частоте 40 ГГц реактивная паразитная составляющая эквивалентной схемы, индуктивность, заземляющего отверстия толщиной 100 мкм снижает коэффициент усиления каскада на 10%, а при толщине 200 мкм на 26%.

Предложена конструкция гибридно-монолитной интегральной схемы СВЧ для поверхностного монтажа, включающая диэлектрическую подложку, кристалл активного элемента (транзисторы и МИС) и крышку, выполненную из высоколегированного кремния. Кристалл активного элемента лицевой стороной интегрирован к контактными площадкам 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. На представленную конструкцию получен патент на изобретение РФ [130]. Исследованы электрические характеристики конструкции, вносимые потери в межсоединении с кристаллом активного элемента не превышают 0,5 дБ в диапазоне частот до 60 ГГц. Исследование тепловых режимов конструкции показало, что максимальная разность температур схемы с толщиной подложки 100 мкм снижена на 13 – 45 °С по сравнению с традиционным методом интеграции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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  $\zeta$ , 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 может быть снижена на 7 – 40 °С по сравнению с традиционным методом интеграции. Предложена конструкция гибридно-монолитной 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-монолитной 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 площадкам 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 может быть снижена на 13 – 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Темнов А.М. Гибридно-монокристалльные интегральные схемы СВЧ/ диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук – Фрязино, 2020. – 306 с.
2. Кищинский, А. А. Сверхширокополосные твердотельные усилители мощности СВЧ диапазона: схемотехника, конструкции, технологии / А. А. Кищинский // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 4-13. – EDN XUGIFN.
3. Богданов Ю.М. Исследование и создание гибридно-монокристалльных СВЧ-генераторов и преобразователей частоты на универсальных активных GaAs МИС в диапазоне частот 1...18 ГГц – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Фрязино, 2007. – 149 с.
4. S. V. Garmash, A. A. Kistchinsky, V. G. Lapin and M. S. Rogozhnikova, "Using a passive GaAs matching network in the fabrication of broadband microwave power amplifiers," 1999 9th International Crimean Microwave Conference 'Microwave and Telecommunication Technology'. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.99EX363), Sevastopol, Ukraine, 1999, pp. 5-8, doi: 10.1109/CRMICO.1999.815129.
5. Гармаш С.В., Кищинский А.А., Радченко А.В. Квазимонокристалльный транзисторный усилитель диапазона 8...18 ГГц с выходной мощностью 2 Вт. Материалы 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 2009 г, том 1, стр. 53-54.
6. Ефимов А. С., Темнов А.М., Дудинов К.В. и др. Гибридно-монокристалльные 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.
7. Гармаш, С. В. Применение пассивных интегральных схем на арсениде галлия для построения импульсного усилителя мощности в X-диапазоне частот / С. В. Гармаш // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – С. 57-61. – EDN FKCLNK.

8. 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.

9. Мякишев Ю., Гуляев В., Журавлев К. Квазимонолитные интегральные СВЧ-схемы: технология и приборы //Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2006. – №. 6. – С. 84-86. – EDN HYWXPН.

10. Мякишев Ю.Б., Гуляев В.И., Глазунов В.В. и др. Результаты разработки квазимонолитных усилителей мощности СВЧ на нитриде галлия // Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике, Н. Новгород – 2011. – С. 60-64.

11. K. V. Dudinov and A. M. Temnov, "Design of microwave hybrid-monolithic integrated circuits with the use of flip-chip technique," 11th International Conference 'Microwave and Telecommunication Technology'. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01EX487), Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2001, pp. 128-129. doi: 10.1109/CRMICO.2001.961497.

12. N. Collaert *et al.*, "III-V/III-N technologies for next generation high-capacity wireless communication," in *2022 International Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, CA, USA, Dec. 2022, p. 11.5.1-11.5.4. doi: 10.1109/IEDM45625.2022.10019555.

13. F. Herrault, J. C. Wong, Y. Tang, H. Y. Tai and I. Ramos, "Heterogeneously Integrated RF Circuits Using Highly Scaled off-the-Shelf GaN HEMT Chiplets," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 11, pp. 1061-1064, Nov. 2020, doi: 10.1109/LMWC.2020.3025126.

14. G. Mounce, J. Lyke, S. Horan, W. Powell, R. Doyle, and R. Some, "Chiplet based approach for heterogeneous processing and packaging architectures," in *2016 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, Mar. 2016, pp. 1–12. doi: 10.1109/AERO.2016.7500830.

15. X. Ma, Y. Wang, Y. Wang, X. Cai, and Y. Han, "Survey on chiplets: interface, interconnect and integration methodology," *CCF Trans. HPC*, vol. 4, no. 1, pp. 43–52, Mar. 2022, doi: 10.1007/s42514-022-00093-0.
16. OMMIC D01PH технологический процесс. [Электронный ресурс] URL: <https://www.macom.com/european-semiconductor-center/mesc-processes> (дата обращения: 24.08.2023)
17. R. Lai *et al.*, "High Performance and High Reliability of 0.1 $\mu$ m InP HEMT MMIC Technology on 100 mm InP Substrates," *2007 IEEE 19th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials*, 2007, pp. 63–66, doi: 10.1109/ICIPRM.2007.381123.
18. R. Leblanc *et al.*, "6W Ka Band Power Amplifier and 1.2dB NF X-Band Amplifier Using a 100nm GaN/Si Process," *2016 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, Austin, TX, USA, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/CSICS.2016.7751009.
19. G. Avenier *et al.*, "0.13  $\mu$ m SiGe BiCMOS Technology Fully Dedicated to mm-Wave Applications," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 9, pp. 2312–2321, Sept. 2009, doi: 10.1109/JSSC.2009.2024102.
20. P. Chevalier *et al.*, "High-Speed SiGe BiCMOS Technologies: 120-nm Status and End-of-Roadmap Challenges," in *2007 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, Long Beach, CA, Jan. 2007, pp. 18–23. doi: 10.1109/SMIC.2007.322759.
21. N. Zamdmer *et al.*, "A 0.13- $\mu$ m SOI CMOS technology for low-power digital and RF applications," *2001 Symposium on VLSI Technology. Digest of Technical Papers (IEEE Cat. No.01 CH37184)*, 2001, pp. 85–86, doi: 10.1109/VLSIT.2001.934959.
22. 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>.

23. J. Ren, C. Liu, C. W. Tang, K. M. Lau and J. K. O. Sin, "A Novel Si–GaN Monolithic Integration Technology for a High-Voltage Cascoded Diode," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 38, no. 4, pp. 501-504, April 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2665698.
24. C. Bayram, C.-W. Cheng, D.K. Sadana, K.-T. Shiu, "Selective gallium nitride regrowth on (100) silicon", Patent US9099381B2, Aug. 4, 2015
25. W.E. Hoke, "Semiconductor structure having silicon devices, column III-Nitride devices, and column III-non-Nitride or Column II-VI devices", Patent US8823146B1, Sep.2, 2014.
26. R.Dutta, S.Goktepli, A.Scuderi, G.P.Imthurn, "Monolithic integration of GaN HEMT and Si CMOS", Patent US20200135766A1, Apr.30, 2020.
27. Herrick, K., Kazior, T., Liu, A. *et al.* Direct Growth of III-V Devices on Silicon. *MRS Online Proceedings Library* 1068, 10680201 (2007). <https://doi.org/10.1557/PROC-1068-C02-01>.
28. T. E. Kazior, "Beyond CMOS: heterogeneous integration of III–V devices, RF MEMS and other dissimilar materials/devices with Si CMOS to create intelligent microsystems," *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 372, no. 2012, p. 20130105, Mar. 2014, doi: 10.1098/rsta.2013.0105.
29. R. Zhang *et al.*, "Silicon-on-insulator with hybrid orientations for heterogeneous integration of GaN on Si (100) substrate," *AIP Advances*, vol. 8, no. 5, p. 055323, May 2018, doi: 10.1063/1.5030776.
30. T. E. Kazior, "More than Moore: III-V devices and Si CMOS get it together," *2013 IEEE International Electron Devices Meeting*, 2013, pp. 28.5.1-28.5.4, doi: 10.1109/IEDM.2013.6724711.
31. T. E. Kazior, J. R. LaRoche, and W. E. Hoke, "More Than Moore: GaN HEMTs and Si CMOS Get It Together," in *2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, Monterey, CA, USA: IEEE, Oct. 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/CSICS.2013.6659239.

32. J. C. Mendes, M. Liehr, and C. Li, "Diamond/GaN HEMTs: Where from and Where to?," *Materials*, vol. 15, no. 2, p. 415, Jan. 2022, doi: 10.3390/ma15020415.
33. Патент № 2654970 С1 РФ, МПК H01L 27/00. Интегральная схема СВЧ : № 2017115402 : заявл. 02.05.2017 : опубл. 23.05.2018 / А. М. Темнов, Н. Б. Гудкова, К. В. Дудинов.
34. Park, J.-S.; Tang, M.; Chen, S.; Liu, H. Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon. *Crystals* 2020, 10, 1163. <https://doi.org/10.3390/cryst10121163>.
35. N. Collaert, "Sub-THz III-V on Si technologies for 6G electronics," in *2022 14th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz (GSMM)*, Seoul, Korea, Republic of, May 2022, pp. 219–221. doi: 10.1109/GSMM53818.2022.9792338.
36. S. Bao *et al.*, "A review of silicon-based wafer bonding processes, an approach to realize the monolithic integration of Si-CMOS and III–V-on-Si wafers," *J. Semicond.*, vol. 42, no. 2, p. 023106, Feb. 2021, doi: 10.1088/1674-4926/42/2/023106.
37. G. Gao *et al.*, "Die to Wafer Hybrid Bonding for Chiplet and Heterogeneous Integration: Die Size Effects Evaluation-Small Die Applications," in *2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, CA, USA, May 2022, pp. 1975–1981. doi: 10.1109/ECTC51906.2022.00310.
38. S. Warnock *et al.*, "InAlN/GaN-on-Si HEMT with 4.5 W/mm in a 200-mm CMOS-Compatible MMIC Process for 3D Integration," *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 289-292, doi: 10.1109/IMS30576.2020.9224061.
39. A. D. Carter *et al.*, "Si/InP Heterogeneous Integration Techniques from the Wafer-Scale (Hybrid Wafer Bonding) to the Discrete Transistor (Micro-Transfer Printing)," *2018 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics*

*Technology Unified Conference (S3S)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/S3S.2018.8640196.

40. Jeffrey LaRoche, "Towards a Si foundry-compatible GaN-on-Si MMIC process on 200mm Si with Cu damascene BEOL (Conference Presentation)," Proc. SPIE 11280, Gallium Nitride Materials and Devices XV, 112801G (10 March 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2543913>.

41. M. Hossain *et al.*, "A Hetero-Integrated W-Band Transmitter Module in InP-on-BiCMOS Technology," in *2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, Madrid: IEEE, Sep. 2018, pp. 97–100. doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539915.

42. B. Corbett, R. Loi, W. Zhou, D. Liu, and Z. Ma, "Transfer print techniques for heterogeneous integration of photonic components," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 52, pp. 1–17, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.pquantelec.2017.01.001.

43. Gong, Z. Layer-Scale and Chip-Scale Transfer Techniques for Functional Devices and Systems: A Review. *Nanomaterials* 2021, 11, 842. <https://doi.org/10.3390/nano11040842>.

44. Moutanabbir, Oussama and U. Gösele. "Heterogeneous Integration of Compound Semiconductors." *Annual Review of Materials Research* 40 (2010): 469-500. doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104448.

45. Zhang, J., Wu, Y., Li, Z. *et al.* High-performance Acetone Soluble Tape Transfer Printing Method for Heterogeneous Integration. *Sci Rep* 9, 15769 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52235-0>.

46. R. Reiner *et al.*, "Characteristics of Hetero-Integrated GaN-HEMTs on CMOS Technology by Micro-Transfer-Printing," in *2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Nagoya, Japan: IEEE, May 2021, pp. 323–326. doi: 10.23919/ISPSD50666.2021.9452264.

47. R. Lerner and N. H. Hansen, "Commercial Sweet Spots for GaN and CMOS Integration by Micro-Transfer-Printing," in *ISPS'21 Proceedings*,

Czech Technical University in Prague, 2021, pp. 99–106.  
doi: 10.14311/ISPS.2021.015.

48. D. J. Meyer *et al.*, "Epitaxial Lift-Off and Transfer of III-N Materials and Devices from SiC Substrates," in *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 29, no. 4, pp. 384-389, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSM.2016.2599839.

49. R. Lerner *et al.*, "Integration of GaN HEMTs onto Silicon CMOS by micro Transfer Printing," in *2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Prague, Czech Republic, Jun. 2016, pp. 451–454. doi: 10.1109/ISPSD.2016.7520875.

50. B. P. Downey *et al.*, "Micro-transfer Printing of GaN HEMTs for Heterogeneous Integration and Flexible RF Circuit Design," in *2020 Device Research Conference (DRC)*, Columbus, OH, USA, Jun. 2020, pp. 1–2. doi: 10.1109/DRC50226.2020.9135179.

51. J. Kamioka *et al.*, "A Low-Cost 30-W Class X-Band GaN-on-Si MMIC Power Amplifier with a GaAs MMIC Output Matching Circuit," *2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, Madrid, 2018, pp. 93-96, doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539903.

52. N. J. Koliass and M. T. Borkowski, "The development of T/R modules for radar applications," in *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada: IEEE, Jun. 2012, pp. 1–3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259727.

53. M. Joodaki, A. Kricke, H. Hillmer, and G. Kompa, "Interconnects Analyses in Quasi-Monolithic Integration Technology (QMIT)," in *2006 IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging*, Scottsdale, AZ: IEEE, Oct. 2006, pp. 229–232. doi: 10.1109/EPEP.2006.321236.

54. D. Kim, J. M. Yook, S. J. An, S. R. Kim, J. -G. Yook and J. C. Kim, "A compact and low-profile GaN power amplifier using interposer-based MMIC technology," *2014 IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 2014, pp. 672-675, doi: 10.1109/EPTC.2014.7028416.

55. Yoon, Hong-Sun & Yook, Jong-Min & Kim, Jun & Park, Youngcheol & Kim, Dongsu. (2020). A broadband RLC matched GaN power amplifier using interposer-MMIC technology. *Microwave and Optical Technology Letters*. 62. doi:10.1002/mop.32283.
56. G. Kompa, E. Wasige, and M. Joodaki, "Quasi Monolithic Hybrid Technology Based on Si Micromachining and Low-Temperature Thin-Film Processing", *World Micro-technologies Congress of MICROTEC.2000*, pp. 109-114, Sept. 2000.
57. F. Herrault *et al.*, "Metal-Embedded Chiplet Assembly for Microwave Integrated Circuits," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.*, vol. 10, no. 9, pp. 1579–1582, Sep. 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.3012505.
58. A. Estrada, G. Lasser, M. Pinto, F. Herrault and Z. Popović, "Metal-Embedded Chip Assembly Processing for Enhanced RF Circuit Performance," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 9, pp. 3537-3546, Sept. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2931010.
59. H.-B. Lee, B.-W. Min, Y.-G. Kim, J. M. Yook, S. Kim, and W. Kim, "Si-Embedded IC Package for W-band Applications: Interconnection Analysis," in *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Singapore, Singapore, Dec. 2019, pp. 1080–1082. doi: 10.1109/APMC46564.2019.9038484.
60. Y. Cao *et al.*, "Qorvo's Emerging GaN Technologies for mmWave Applications," *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 570-572, doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223913.
61. Y. Cui *et al.*, "Monolithically Integrated Self-Biased Circulator for mmWave T/R MMIC Applications," *2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2021, pp. 4.2.1-4.2.4, doi: 10.1109/IEDM19574.2021.9720611.
62. X. He, B. K. Tehrani, R. Bahr, W. Su, and M. M. Tentzeris, "Additively Manufactured mm-Wave Multichip Modules With Fully Printed 'Smart' Encapsulation Structures," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 68, no. 7, pp. 2716–2724, Jul. 2020, doi: 10.1109/TMTT.2019.2956934.

63. M. M. Abdin, W. J. D. Johnson, J. Wang and T. M. Weller, "W-Band MMIC Chip Assembly Using Laser-Enhanced Direct Print Additive Manufacturing," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 12, pp. 5381-5392, Dec. 2021, doi: 10.1109/TMTT.2021.3124237.
64. M. T. Craton, X. Konstantinou, J. D. Albrecht, P. Chahal and J. Papapolymerou, "Additive Manufacturing of a W-Band System-on-Package," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 9, pp. 4191-4198, Sept. 2021, doi: 10.1109/TMTT.2021.3076066.
65. Röhrl, F., Jakob, J., Bogner, W., Weigel, R., & Zorn, S. (2019). Bare die connections via aerosol jet technology for millimeter wave applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 11(5-6), 441-446. doi:10.1017/S1759078719000114.
66. G. Cung, T. Spence, and P. Borodulin, "Enabling broadband, highly integrated phased array radiating elements through additive manufacturing," in *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, Oct. 2016, pp. 1–9. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832632.
67. E. M. Davis, W. E. Harding, R. S. Schwartz and J. J. Corning, "Solid Logic Technology: Versatile, High-Performance Microelectronics," in *IBM Journal of Research and Development*, vol. 8, no. 2, pp. 102-114, April 1964, doi: 10.1147/rd.82.0102.
68. P. V. Testa, H. Morath, P. Goran, C. Carta and F. Ellinger, "A Cost-Effective Flip-Chip Interconnection for Applications from DC until 200 GHz," *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021003.
69. S. Enoch, A. Gola, P. Lecoq, and A. Rivetti, "Design considerations for a new generation of SiPMs with unprecedented timing resolution," *J. Inst.*, vol. 16, no. 02, pp. P02019–P02019, Feb. 2021, doi: 10.1088/1748-0221/16/02/P02019.
70. W. S. Tsai, C. Y. Huang, C. K. Chung, K. H. Yu, and C. F. Lin, "Generational changes of flip chip interconnection technology," in *2017 12th*

*International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, Taipei, Oct. 2017, pp. 306–310. doi: 10.1109/IMPACT.2017.8255955.

71. D. S. Green, C. L. Dohrman, J. Demmin, and T.-H. Chang, “Path to 3D heterogeneous integration,” in *2015 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, Sendai, Japan, Aug. 2015, p. FS7.1-FS7.3. doi: 10.1109/3DIC.2015.7334469.

72. A. A. Bajwa *et al.*, “Heterogeneous Integration at Fine Pitch ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ) Using Thermal Compression Bonding,” in *2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, USA, May 2017, pp. 1276–1284. doi: 10.1109/ECTC.2017.240.

73. Tofteberg, Hannah Rosquist, Kari Schjølberg-Henriksen, Eivind Johan Fasting, Alexander Stene Moen, Maaikke M. Visser Taklo, Erik Poppe and Christian J. Simensen. “Wafer-level Au–Au bonding in the 350–450 °C temperature range.” *Journal of Micromechanics and Microengineering* 24 (2014): 084002. doi: 10.1088/0960-1317/24/8/084002.

74. L. Sun *et al.*, Recent progress in SLID bonding in novel 3D-IC technologies, *Journal of Alloys and Compounds*, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152825>.

75. Liang Zhang, Zhi-quan Liu, Sinn-Wen Chen, Yao-dong Wang, Wei-Min Long, Yong-huan Guo, Song-quan Wang, Guo Ye, Wen-yi Liu, “Materials, processing and reliability of low temperature bonding in 3D chip stacking,” *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 750, 2018, Pages 980-995, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.040>.

76. M. Rausch *et al.*, "Technology for the Heterointegration of InP DHBT Chipllets on a SiGe BiCMOS Chip for mm-wave MMICs," *2022 52nd European Microwave Conference (EuMC)*, Milan, Italy, 2022, pp. 28-31, doi: 10.23919/EuMC54642.2022.9924451.

77. 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.

78. C. -H. Li, W. -T. Hsieh and T. -Y. Chiu, "A Flip-Chip-Assembled W-Band Receiver in 90-nm CMOS and IPD Technologies," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 4, pp. 1628-1639, April 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2894426.

79. Y. Zhang, D. Zhao and P. Reynaert, "A Flip-Chip Packaging Design With Waveguide Output on Single-Layer Alumina Board for E-Band Applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 4, pp. 1255-1264, April 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2536602.

80. S. Pavlidis, G. Alexopoulos, A. Ç. Ulusoy, M. Cho and J. Papapolymerou, "Encapsulated Organic Package Technology for Wideband Integration of Heterogeneous MMICs," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 2, pp. 438-448, Feb. 2017, doi: 10.1109/TMTT.2016.2630067.

81. V. Radisic, D. W. Scott, K. K. Loi, C. Monier, R. Lai, and A. Gutierrez-Aitken, "Heterogeneously Integrated W-Band Downconverter," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 739-741, Aug. 2017, doi: 10.1109/LMWC.2017.2724001.

82. W. Heinrich, "The flip-chip approach for millimeter wave packaging," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 36-45, Sept. 2005, doi: 10.1109/MMW.2005.1511912.

83. D. Schwantuschke *et al.*, "Fan-out Wafer Level Packaging of GaN Traveling Wafer Amplifier," in *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2022*, Denver, CO, USA, Jun. 2022, pp. 579-582. doi: 10.1109/IMS37962.2022.9865579.

84. Fegghi, R, Joodaki, M. Thermal analysis of microwave GaN-HEMTs in conventional and flip-chip assemblies. *Int J RF Microw Comput Aided Eng.* 2018; 28:e21513. <https://doi.org/10.1002/mmce.21513>

85. S.-P. Tsai, H.-T. Hsu, J. Wuerfl, and E. Y. Chang, "Performance Enhancement of Flip-Chip Packaged AlGaIn/GaN HEMTs by Strain Engineering Design," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 63, no. 10, pp. 3876–3881, Oct. 2016, doi: 10.1109/TED.2016.2594043.
86. K. Seemann et al., "Flip-Chip Integration of Power HEMTs: A Step Towards a GaN MMIC Technology," 2003 33rd European Microwave Conference, Munich, Germany, 2003, pp. 383-386, doi: 10.1109/EUMA.2003.340970.
87. S. Song, Y. Kim, J. Maeng, H. Lee, Y. Kwon and K. Seo, "A Millimeter-Wave System-on-Package Technology Using a Thin-Film Substrate With a Flip-Chip Interconnection," in *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 32, no. 1, pp. 101-108, Feb. 2009, doi: 10.1109/TADVP.2008.2006626.
88. W. Heinrich et al., "Connecting Chips With More Than 100 GHz Bandwidth," *IEEE J. Microw.*, vol. 1, no. 1, pp. 364–373, Jan. 2021, doi: 10.1109/JMW.2020.3032879.
89. J. McSpadden et al., "MIDAS mmW Aperture," 2022 *IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/PAST49659.2022.9974982.
90. K. Tsukashima et al., "Transceiver MMIC's for street surveillance radar," 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2016, pp. 329-332, doi: 10.1109/EuMIC.2016.7777557.
91. T. E. Kazior, H. N. Atkins, A. Fatemi, Y. Chen, F. Y. Colomb and J. P. Wendler, "DBIT-direct backside interconnect technology: a manufacturable, bond wire free interconnect technology for microwave and millimeter wave MMICs," 1997 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1997, pp. 723-726 vol.2, doi: 10.1109/MWSYM.1997.602892.
92. F. J. Schmuckle, A. Jentsch, C. Gassler, P. Marschall, D. Geiger and W. Heinrich, "40 GHz hot-via flip-chip interconnects," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2003, 2003, pp. 1167-1170 vol.2, doi: 10.1109/MWSYM.2003.1212576.

93. J. Yang, B. Zou, J. Xu, and J. Zhou, "A Hot-via Chip-to-substrate Interconnect for Ultra-compact System Package Application up to W Band," *PIER Letters*, vol. 107, pp. 75–81, 2022, doi: 10.2528/PIERL22020201.
94. P. Alleaume, C. Toussain, C. Auvinet, D. Domnesque, P. Quentin and M. Camiade, "Millimetre-wave Hot-Via interconnect-based GaAs chip-set for automotive RADAR and security sensors," *2008 European Microwave Integrated Circuit Conference*, 2008, pp. 52-55, doi: 10.1109/EMICC.2008.4772226.
95. V. Radisic *et al.*, "Heterogeneously Integrated V-Band Amplifier," in *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA: IEEE, Jun. 2018, pp. 289–292. doi: 10.1109/MWSYM.2018.8439384.
96. M. Rausch *et al.*, "Broadband Hetero-Integration of InP Chipleths on SiGe BiCMOS for mm-Wave MMICs up to 325GHz," in *2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2023*, San Diego, CA, USA: IEEE, Jun. 2023, pp. 466–469. doi: 10.1109/IMS37964.2023.10188164.
97. J. Lee, J. Y. Lee, J. Song, G. Sim, H. Ko, and S. H. Kong, "Implementation of Flip-Chip Microbump Bonding between InP and SiC Substrates for Millimeter-Wave Applications," *Micromachines*, vol. 13, no. 7, p. 1072, Jul. 2022, doi: 10.3390/mi13071072.
98. N. G. Weimann *et al.*, "Manufacturable Low-Cost Flip-Chip Mounting Technology for 300–500-GHz Assemblies," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 494–501, Apr. 2017, doi: 10.1109/TCPMT.2016.2636444.
99. F. Niklaus, G. Stemme, J. -Q. Lu and R. J. Gutmann, "Adhesive wafer bonding", *Journal of Applied Physics* 99, 031101 (2006) <https://doi.org/10.1063/1.2168512>.
100. B. G. Yacobi, S. Martin, K. Davis, A. Hudson, and M. Hubert, "Adhesive bonding in microelectronics and photonics", *Journal of Applied Physics* 91, 6227-6262 (2002) <https://doi.org/10.1063/1.1467950>.

101. S.J. Bleiker, V. Dubois, S. Schröder, G. Stemme, F. Niklaus, Adhesive wafer bonding with ultra-thin intermediate polymer layers, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 260, 2017, Pages 16-23, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.018>.
102. Alim, M.A.; Abdullah, M.Z.; Aziz, M.S.A.; Kamarudin, R.; Gunnasegaran, P. Recent Advances on Thermally Conductive Adhesive in Electronic Packaging: A Review. *Polymers* 2021, 13, 3337. <https://doi.org/10.3390/polym13193337>.
103. Bernstein, L. (1966), "Semiconductor joining by the solid-liquid-interdiffusion (SLID) process", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 113 No. 12, pp. 1282-1288.
104. Paulonis, D. F., Duavall D.S., Owczarski W.A., "Diffusion Bonding Utilizing Transient Liquid Phase", Patent US3678570, July 25th, 1972.
105. D. S. Duvall, W. A. Owczarski and D. F. Paulonis, "Transient Liquid Phase Bonding: A New Method for Joining Heat Resistant Alloys," *Welding Journal*, Vol. 53, No. 4, 1974, pp. 203-214.
106. R. W. Johnson, C. Wang, Y. Liu and J. D. Scofield, "Power Device Packaging Technologies for Extreme Environments," in *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 30, no. 3, pp. 182-193, July 2007, doi: 10.1109/TEPM.2007.899158.
107. F. P. McCluskey, M. Dash, Z. Wang, and D. Huff, "Reliability of high temperature solder alternatives," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, no. 9–11, pp. 1910–1914, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.microrel.2006.07.090.
108. Wang, T.B., Shen, Z.Z., Ye, R.Q. et al. Die bonding with Au/In isothermal solidification technique. *J. Electron. Mater.* 29, 443–447 (2000). <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0158-5>.
109. Holaday, J.R., Handwerker, C.A. (2019). Transient Liquid Phase Bonding. In: Siow, K. (eds) *Die-Attach Materials for High Temperature Applications in Microelectronics Packaging*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99256-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99256-3_9).

110. Panchenko, J. Grafe, M. Mueller and K. Wolter, "Effects of bonding pressure on quality of SLID interconnects," 2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference, 2012, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESTC.2012.6542097.
111. L. Sun et al., Recent progress in SLID bonding in novel 3D-IC technologies, *Journal of Alloys and Compounds*, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152825>.
112. Liang Zhang, Zhi-quan Liu, Sinn-Wen Chen, Yao-dong Wang, Wei-Min Long, Yong-huan Guo, Song-quan Wang, Guo Ye, Wen-yi Liu, "Materials, processing and reliability of low temperature bonding in 3D chip stacking," *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 750, 2018, Pages 980-995, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.040>.
113. Okamoto, H. Au-Sn (Gold-Tin). *J Phs Eqil and Diff* 28, 490 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11669-007-9147-1>.
114. Ramm, Peter & Lu, J.-Q & Visser Taklo, Maaike. (2012). *Handbook of Wafer Bonding*. doi:10.1002/9783527644223.
115. Chromik, R.R., Wang, D.N., Shugar, A. et al. Mechanical properties of intermetallic compounds in the Au–Sn system. *Journal of Materials Research* 20, 2161–2172 (2005). <https://doi.org/10.1557/JMR.2005.0269>.
116. Tollefsen, T.A., Larsson, A., Løvvik, O.M. et al. Au-Sn SLID Bonding—Properties and Possibilities. *Metall Mater Trans B* 43, 397–405 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9609-z>.
117. A. Larsson, T. A. Tollefsen and K. E. Aasmundtveit, "Ni-Sn solid liquid interdiffusion (SLID) bonding — Process, bond characteristics and strength," 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESTC.2016.7764673.
118. Lis, Adrian Verfasser. *High Power Electronics Packaging by Transient Liquid Phase Bonding*. Zürich: ETH-Zürich, 2015. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010573731>.

119. G. O. Cook and C. D. Sorensen, "Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding," *J Mater Sci*, vol. 46, no. 16, pp. 5305–5323, Aug. 2011, doi:10.1007/s10853-011-5561-1.
120. 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.
121. M. Nishiguchi, N. Goto and H. Nishizawa, "Highly reliable Au-Sn eutectic bonding with background GaAs LSI chips," in *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 523-528, Sept. 1991, doi: 10.1109/33.83938.
122. A. Jentsch and W. Heinrich, "Theory and measurements of flip-chip interconnects for frequencies up to 100 GHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 49, no. 5, pp. 871–878, May 2001, doi: 10.1109/22.920143.
123. O. Mokhtari, "A review: Formation of voids in solder joint during the transient liquid phase bonding process - Causes and solutions," *Microelectronics Reliability*, vol. 98, pp. 95–105, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.microrel.2019.04.024.
124. 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.
125. H. N. M. Ghouz and E. . -B. El-Sharawy, "An accurate equivalent circuit model of flip chip and via interconnects," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2543-2554, Dec. 1996, doi: 10.1109/22.554598.
126. T.-P. Wang and Y.-F. Lu, "Fast and Accurate Frequency-Dependent Behavioral Model of Bonding Wires," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 13, no. 5, pp. 2389–2396, Oct. 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2737525.
127. H. Chen, T. G. Lim, and G. Tang, "Thermal Challenges and Design Considerations in Heterogeneous Integrated Through-Silicon-interposer Platform

for III-V HEMT Flip Chip,” in 2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA, May 2022, pp. 1030–1035. <https://doi.org/10.1109/ECTC51906.2022.00168>.

128. 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>.

129. Mackowiak P., Wittler O., Braun T., Erbacher K., Schiffer M., Schneider-Ramelow M. SiC Fan-out Wafer Level Package for High Power Application. IEEE 24th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Singapore. Singapore. 2022, P. 104–108. <https://doi.org/10.1109/EPTC56328.2022.10013212>.

130. 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.

131. 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.

132. Крутов, А. В. Малошумящий GaAs PHEMT транзистор с повышенным динамическим диапазоном ЗП3107 / А. В. Крутов, Н. А. Кувшинова, А. С. Ребров // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2016. – Т. 1. – С. 96-100. – EDN WKGMXV.

133. Груша, А. В. Нелинейная EHEMT модель серийного транзистора ЗП3107АН / А. В. Груша, А. В. Крутов, А. С. Ребров // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 100-104. – EDN XUGILR.

134. Груша, А. В. Шумовые параметры серийных малошумящих транзисторов ЗП3102-А,Б,В и ЗП3107АН5 / А. В. Груша, А. В. Крутов, А. С. Ребров // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 58-62. – EDN JFUOGO.

135. L. Devlin "The future of mm-wave packaging" *Microw. J.* vol. 57 no. 2 pp. 24-38 Feb. 2014.
136. Широкополосные СВЧ-переключатели для поверхностного монтажа / А. Ющенко, А. Усюкевич, Г. Айзенштат [и др.] // СВЧ-электроника. – 2018. – № 3(7). – С. 6-8. – EDN HWQBBDG.
137. Ермолаев Е., Шугаев Ш., Ахметгалиев Р. Использование керамики производства АО "ЗПП" в металлокерамических корпусах, работающих в СВЧ-диапазоне // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* – 2021. – № 10(211). – С. 122-127. – DOI 10.22184/1992-4178.2021.211.10.122.126. – EDN ZKJРАН.
138. Металлокерамические корпуса для монолитных интегральных СВЧ схем усилителей мощности с диапазоном рабочих частот до 22 ГГц / А. Г. Чупрунов, Е. М. Савченко, И. А. Биларус [и др.] // *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы.* – 2021. – № 3(262). – С. 25-33. – doi: 10.36845/2073-8250-2021-262-3-25-33. – EDN ZDLADE.
139. Темнов, А. М., Дудинов К.В., Емельянов А.М. Корпуса SMD для герметизации мощных МИС диапазона до 40 ГГц // *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника.* – 2018. – № 2(537). – С. 22-43. – EDN UVEBPS.
140. Корпуса миллиметрового диапазона. [Электронный ресурс] URL: <https://global.kyocera.com/prdct/semicon/semi/compo/millimeter.html> (дата обращения: 24.08.2023).
141. K. Yoshida, T. Shirasaki, S. Matsuzono and C. Makihara, "50 GHz broadband SMT package for microwave applications," 2001 Proceedings. 51st Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.01CH37220), Orlando, FL, USA, 2001, pp. 744-749, doi: 10.1109/ECTC.2001.927815.
142. E. A. Sanjuan and S. S. Cahill, "QFN-based Millimeter Wave Packaging to 80GHz," 2009 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Signal Integrity and High-Speed Interconnects, Guadalajara, Mexico, 2009, pp. 9-12, doi: 10.1109/IMWS.2009.4814898.

143. D. A. Torres, A. Kopa, R. D. White, and C. Gray, "Co-Fabrication of Microcoaxial Interconnects and Substrate Junctions for Multichip Microelectronic Systems," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 151–159, Jan. 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2019.2955553.

144. H. Wakita, M. Nagatani and H. Takahashi, "A Compact DC-to-Over-67-GHz LTCC BGA Package for 100-GBaud Communications Systems," 2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Brisbane, Australia, 2021, pp. 211-213, doi: 10.1109/APMC52720.2021.9661699.

145. H. Morkner and A. Riddle, "A novel 10 MHz to 70 GHz surface mount amplifier for broadband applications," 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference, Rome, Italy, 2014, pp. 166-169, doi: 10.1109/EuMIC.2014.6997818.

146. Z. Jian, H. Min, and P. Soussan, "38 GHz T/R Heterogeneous Integrated Module," in 2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Guangzhou, China: IEEE, Nov. 2022, pp. 1–3. doi: 10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10107122.

147. H. Dong, J. Chen, D. Hou, Y. Xiang, and W. Hong, "A Low-Loss Fan-Out Wafer-Level Package With a Novel Redistribution Layer Pattern and Its Measurement Methodology for Millimeter-Wave Application," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.*, vol. 10, no. 7, pp. 1073–1078, Jul. 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.3000279.

148. Добуш И. М., Дудинов К. В., Зыков Д. Д. и др. Разработка масштабируемой малосигнальной модели 0,1 мкм GaAs-pHEMT-транзистора для усилительных применений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 37-47. – doi: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-37-47. – EDN AYGXDW.

149. G. D. Vendelin, A. M. Pavio, and U. L. Rohde, "MICROWAVE CIRCUIT DESIGN USING LINEAR AND NONLINEAR TECHNIQUES," 2005, p. 1080.

150. 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

GaAs – арсенид галлия (Gallium Arsenide)

GaN – нитрид галлия (Gallium Nitride)

HEMT – транзистор с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor)

InP – фосфид индия (Indium Phosphide)

pHEMT – псевдоморфный транзистор с высокой подвижностью электронов (pseudomorphic HEMT)

SiC – карбид кремния (Silicon Carbide)

SLID – взаимная переходная диффузия (Solid-Liquid Interdiffusion)

TLP – переходная жидкостная фаза (Transient Liquid Phase)

БиКМОП – биполярный КМОП

ГБТ – гетеробиполярный транзистор

ГМИС – гибридно-монолитная интегральная схема

ИМС – интерметаллические составляющие

ИС – интегральная схема

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

МИС – монолитная интегральная схема

МШУ – малошумящий усилитель

МЭМС – микроэлектромеханические системы

САПР – система автоматизированного проектирования

СВЧ – сверхвысокие частоты

УМ – усилитель мощности

ЭКБ – электронная компонентная база

## 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 ACQCMO.

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  $A^3V^5$  кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа // Сборник тезисов Российского форума «Микроэлектроника 2023», Сириус, 2023, С. 855-857.

**ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА**

Статья (6) написана автором лично, в публикациях (1-5, 7-8, 10-14, 16-18) выполнены постановка задачи, получение, обработка и обсуждение результатов (60%), в публикациях (9,15) выполнены обработка и обсуждение результатов (20%).

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ИСТОК» ИМЕНИ А.И.ШОКИНА»



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
– директор по научной работе  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

С.В. Шербаков

2024 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Ефимова Александра Сергеевича «Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ приборов с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкоплёночной системы металлов Au-Sn», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и нанозлектроники, квантовых устройств»

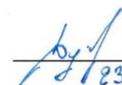
Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертации Ефимова А.С. используются в АО «НПП «Исток» им. Шокина» при разработке метода монтажа монолитных интегральных схем СВЧ на единую подложку в рамках выполнения опытно-конструкторских работ «Одноцветник-65» и «Основа-1».

В научно-технической деятельности АО «НПП «Исток» им. Шокина» нашли применение результаты исследований соединяющего слоя, выполненного из тонкоплёночной системы металлов Au-Sn, сформированного на этапе изготовления полупроводниковой пластины. Разработанное в результате исследований техническое решение, актуально для создания гибридно-монолитных интегральных схем усилителей мощности X- и Ku- диапазонов частот с выходной мощностью более 10 Вт и позволяет реализовать следующие преимущества:

- снижение теплового сопротивления конструкции схемы за счёт применения разработанной системы металлов Au-Sn при механической интеграции МИС СВЧ на единую подложку;
- снижение массогабаритных характеристик схемы за счёт формирования соединяющего слоя в виде системы металлов Au-Sn локально, с применением процессов фотолитографии;
- повышение автоматизации и точности процесса сборки гибридно-монолитных интегральных схем за счёт исключения операции нанесения клеевого соединения.

Главный конструктор  
ОКР «Одноцветник-65»  
и ОКР «Основа-1»

Заместитель начальника НПК-4  
по научной работе

  
23.01.24

К.В. Дудинов

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2782184

**Интегральная схема СВЧ**

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Исток" имени А.И. Шокина" (АО "НПП "Исток" им. Шокина") (RU)*

Авторы: *Ефимов Александр Сергеевич (RU), Темнов Александр Михайлович (RU), Дудинов Константин Владимирович (RU)*

Заявка № 2021135646

Приоритет изобретения 03 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 03 декабря 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2782187

## Интегральная схема СВЧ

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Исток" имени А.И. Шокина" (АО "НПП "Исток" им. Шокина") (RU)*

Авторы: *Ефимов Александр Сергеевич (RU), Темнов Александр Михайлович (RU), Дудинов Константин Владимирович (RU)*

Заявка № 2021139182

Приоритет изобретения **28 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **21 октября 2022 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **28 декабря 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Ю.С. Зубов*

