

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.3>

УДК: 621.3.049.77

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ИНТЕГРАЦИИ МОЩНЫХ СВЧ КРИСТАЛЛОВ

А.С. Ефимов<sup>1</sup>, А.В. Груша<sup>1</sup>, Р.А. Чибирев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПП «Исток» им. Шокина»  
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2А

<sup>2</sup> ООО «Инноцентр ВАО»  
107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, д. 2, стр. 2

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2023 г.

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты расчетов тепловых характеристик двух типов интеграции кристаллов СВЧ: традиционный монтаж обратной стороны кристалла на теплоотводящее основание с помощью припоя и метод перевернутого монтажа на диэлектрическую подложку с применением соединяющего слоя в виде системы слоёв Au-Sn. Для анализа конструкций был использован мощный полевой GaN HEMT на подложке SiC с общей шириной затвора 1.2 мм, с размерной обработкой 0.15 мкм. Результаты расчёта конструкции с перевернутым монтажом с базовыми элементами показал снижение общего теплового сопротивления схемы на 7.2% по сравнению с традиционным подходом интеграции. Определены зависимости отдельных элементов схемы на тепловые режимы работы. Получены электрические эквивалентные схемы тепловых моделей исследуемых конструкций.

**Ключевые слова:** монолитная интегральная схема СВЧ, гибридно-монолитная интегральная схема СВЧ, flip-chip, GaN HEMT, поверхностный монтаж, Au-Sn, тепловой анализ.

**Автор для переписки:** Ефимов Александр Сергеевич, [easmov@gmail.com](mailto:easmov@gmail.com)

## Введение

Электронная компонентная база (ЭКБ) СВЧ развивается в части повышения уровней мощности, рабочих частот и полосы, степени функциональности и миниатюризации. Электрическое соединение отдельных кристаллов в единый модуль является важным переходом от характеристик отдельных кристаллов к функциональной системе. В то время как монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ имеют заметное продвижение вверх по частотному диапазону, их электрический контакт между друг другом остается проблемным и ограничивающим фактором применения широкополосной ЭКБ СВЧ миллиметрового диапазона частот.

Традиционный подход гибридно-монолитной интеграции кристаллов СВЧ подразумевает монтаж кристаллов пассивных и активных элементов на единое металлизированное основание и электрическое соединение между кристаллами с помощью проволок. Проволочное электрическое соединение кристаллов ограничивает частотные характеристики схем. Отвод тепла осуществляется через подложку и соединяющий слой в упомянутое основание. Основными элементами, влияющими на общее тепловое сопротивление сборки в данном случае, являются толщина и теплопроводность подложки кристалла и соединяющего слоя.

Интеграция методом перевернутого монтажа (flip-chip) обеспечивает наилучшие частотные характеристики с точки зрения электрического соединения кристаллов с подложкой, и на сегодняшний день является наиболее быстрорастущим подходом в области построения СВЧ модулей на основе гибридно-монолитной интеграции [1].

Актуальной проблемой при интеграции мощных кристаллов методом перевернутого монтажа является отвод тепла. Концепция контакта кристалла лицевой стороной при методе flip-chip 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 надёжности переходных межсоединений и сборок на их основе, открываются новые возможности применения метода перевернутого монтажа [2]. Работы [3, 4] 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.

Целью данной работы является исследование тепловых характеристик беспроводного метода интеграции кристаллов в сравнении с традиционным подходом, оценка влияния конструктивных элементов схемы на тепловое сопротивление сборки.

В данной работе 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 [2].

## **1. Тестовый активный элемент**

Для анализа конструкций применен одинаковый активный элемент – мощный GaN HEMT на подложке SiC, с типичными характеристиками. Габаритные размеры кристалла составляют  $662 \times 824$  мкм. Транзистор имеет типоразмер  $6 \times 200$  мкм, общая ширина затвора – 1.2 мм. Длина затвора 0.15 мкм. Общая толщина кристалла транзистора составляет 100 мкм, из которых 97 мкм составляет SiC, а 3 мкм – GaN. Верхняя металлизация транзистора – Au 2 мкм.

Металлизация обратной стороны – Au 3 мкм. Сквозные металлизированные отверстия полые. Топология модели транзистора представлена на рис. 1. Контактные площадки затвора и стока имеют размеры 230×120 и 230×174 мкм соответственно. Исток заземлён через 4 сквозных металлизированных отверстия. Внутренние металлические площадки истока имеют габариты 82×198 мкм, а внешние – 72×198 мкм.

Тепловые характеристики материалов, применяемых в расчёте представлены в таблице 1 и на рис. 2.

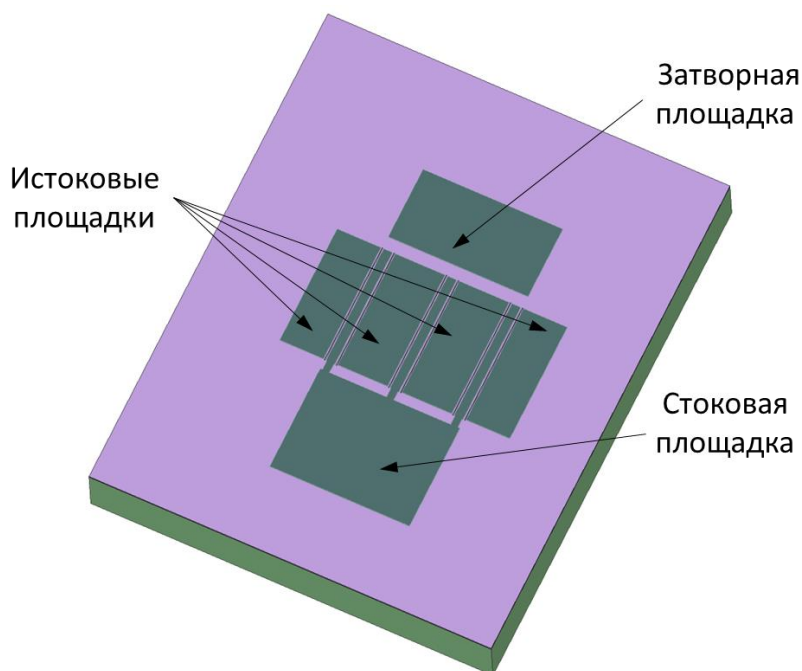


Рис. 1. Модель GaN транзистора

Таблица 1. Теплопроводность применяемых материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м×К)
GaN	130
SiC (4H)	Температурно-зависимая (рис.2)
Au-Sn	57
Au	301
Cu	398
Si	Температурно-зависимая (рис.2)
Cu-Mo	210

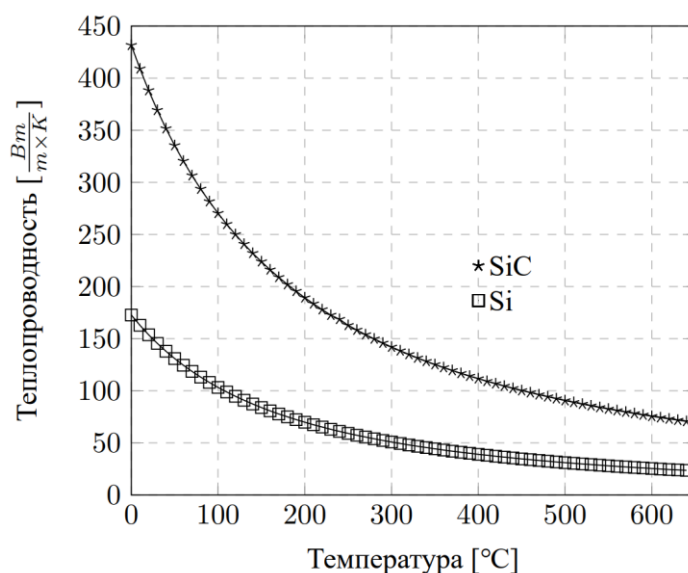


Рис. 2. Температурная зависимость Si и SiC

Анализ теплового распределения проводили для стационарного нагрева. Граничным условием первого рода являлась постоянная температура обратной стороны основания или диэлектрической подложки  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Источником равномерного тепловыделения рассеиваемой мощности были заданы подзатворные области длиной 1 мкм. Задаваемая рассеиваемая мощность  $P_{diss}$  для всех расчётов составила 6 Вт.

## 2. Тепловой расчёт традиционного подхода интеграции

В качестве традиционного подхода 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 –  $3 \times 3\text{ мм}^2$ .

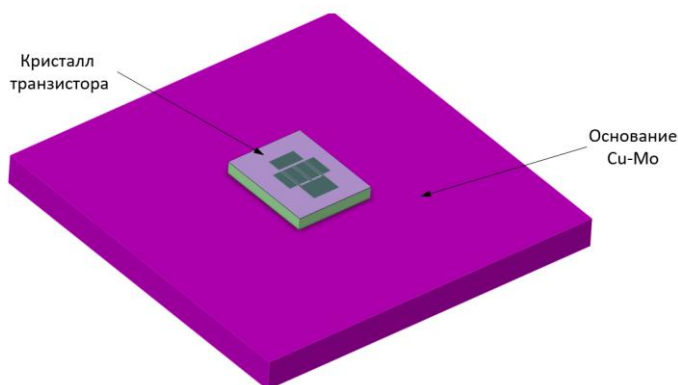


Рис. 3. Модель интеграции транзистора на теплоотводящее основание

В данной работе использован подход статического теплового сопротивления, которое определяется как:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}},$$

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 температуру в канале равной  $184.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что соответствует общему тепловому сопротивлению  $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . С целью определения влияния теплового сопротивления отдельных элементов, построена тепловая модель. Электрическая эквивалентная схема тепловой модели данной конструкции представлена на рис. 4. Модель состоит из трёх составляющих – тепловое сопротивление кристалла активного элемента ( $R_{tr}$ ), соединяющего слоя  $80\text{AuSn}$  ( $R_{AuSn}$ ) и основания ( $R_{carrier}$ ). С целью верификации модели, проводились вспомогательные расчёты, вычитая влияние отдельных элементов конструкции.

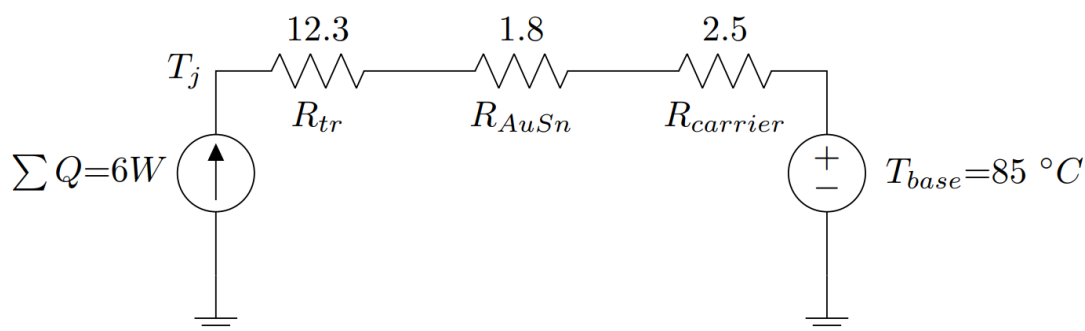


Рис. 4. Электрическая эквивалентная схема тепловой модели традиционного подхода интеграции

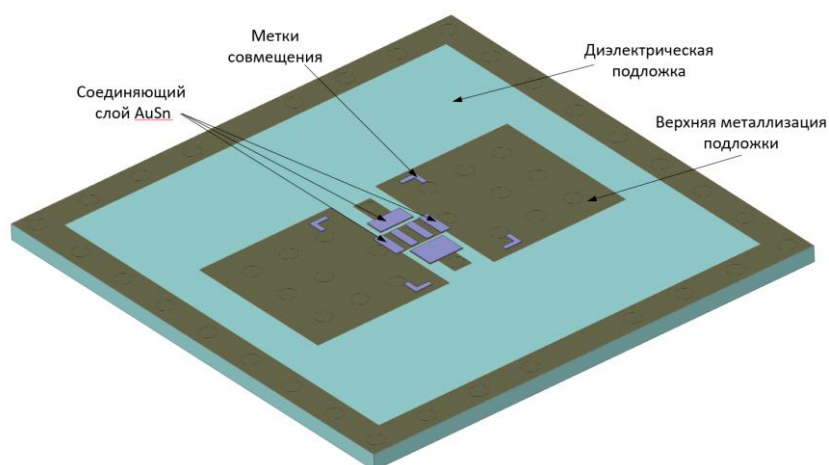
Уменьшение общего теплового сопротивления с  $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  требует снижения теплового сопротивления по крайней мере одной из составляющей конструкции. Наибольший вклад вносит тепловое сопротивление транзистора, однако, в большинстве случаев, кристалл транзистора имеет законченную конструкцию, изменение его габаритов и характеристик не представляется возможным. Уменьшение теплового сопротивления соединяющего слоя в виде припоя  $80\text{AuSn}$  подразумевает снижение его толщины. Так, использование

соединяющего слоя толщиной 5 мкм вместо 20 мкм снижает общее тепловое сопротивление на  $0.7 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ , обеспечивая уменьшение максимальной температуры канала на  $4.6^{\circ}\text{C}$ . 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 [2]. Для теплоотводящего основания был выбран материал Cu-Mo толщиной 250 мкм, являющийся основой современных корпусов для мощных МИС и ГМИС СВЧ [5]. 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 современных ГМИС СВЧ.

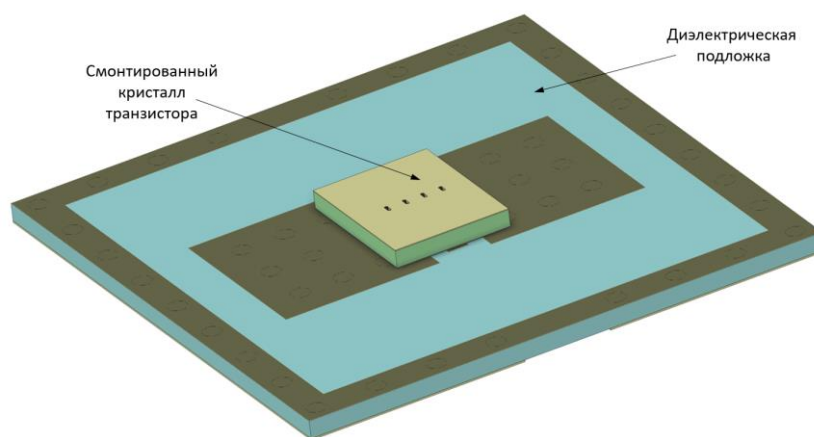
### **3. Тепловой расчёт интеграции методом перевернутого монтажа**

Исследуемая конструкция интеграции методом перевернутого монтажа представлена на рис. 5. 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. 2). 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 мкм<sup>2</sup>, что соответствует 18.6 % от общей площади кристалла.



(а)



(б)

Рис. 5. Модель интеграции транзистора методом перевернутого монтажа: (а) – лицевой стороны диэлектрической подложки; (б) – смонтированного кристалла на подложку

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.

Данный подход 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. Беспроволочный 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 [2].

Зависимости максимальной температуры в канале от толщины соединяющего слоя представлена на рис. 6. Влияние толщины исследовано при двух типах диэлектрической подложки – SiC и Si, и двух типах соединяющего слоя – системы AuSn и Cu.

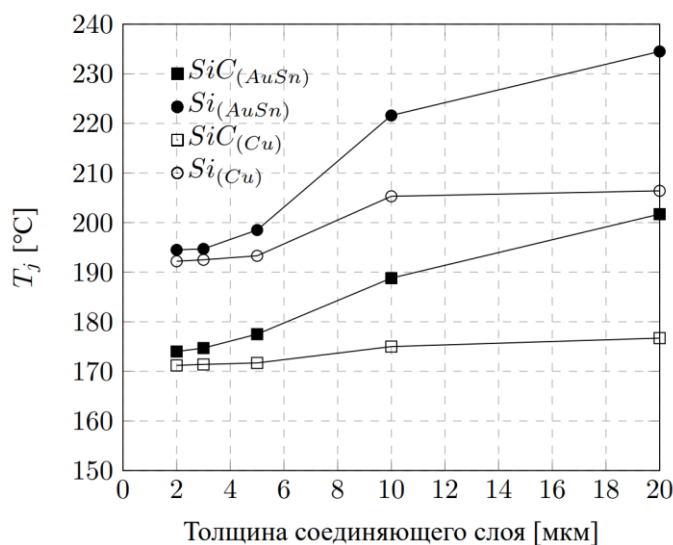


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры канала от толщины соединяющего слоя

Из полученных результатов следует, что влияние толщины соединяющего слоя из системы Au-Sn является критичным в диапазоне от 5 до 20 мкм. Максимальная температура канала снижается на 24.2 и 36 °С при диэлектрической подложке SiC и Si соответственно. Уменьшение толщины соединяющего слоя с 5 до 2 мкм снижает температуру на 3.5 и 4 °С соответственно. В то же время, применение диэлектрической подложки SiC по сравнению с Si уменьшает максимальную температуру канала на 21 °С при толщине соединяющего слоя 5 мкм. С ростом толщины разница максимальной температуры канала увеличивается, из-за более выраженного изменения теплового сопротивления диэлектрической подложки Si по сравнению с SiC, ввиду снижения теплопроводности при повышенных температурах. Электрическая эквивалентная схема тепловой модели конструкции беспроводной интеграции при диэлектрической подложке SiC и соединяющем слое из системы Au-Sn толщиной 5 мкм представлена на рис. 7. Модель 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 температуру в канале равной 177.5 °С, что соответствует общему тепловому сопротивлению  $15.4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ . Данное значение меньше на 7.2% теплового сопротивления традиционного подхода интеграции.

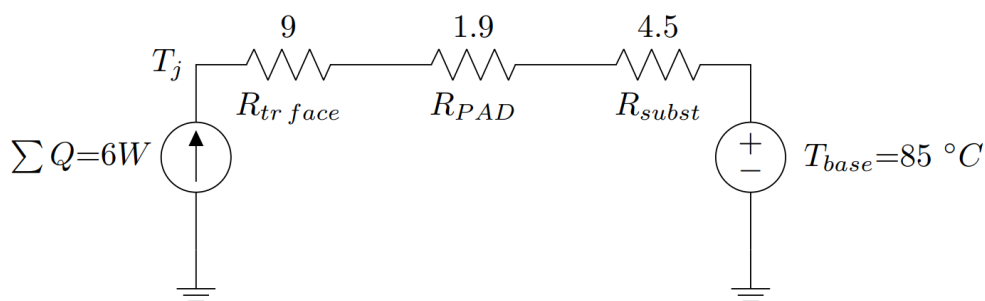


Рис. 7. Электрическая эквивалентная схема тепловой модели интеграции методом перевернутого монтажа

В таблице 2 представлены результаты исследования температурных режимов от толщины и материала соединяющего слоя выраженные через тепловое сопротивление.

Таблица 2. Зависимость теплового сопротивления соединяющего слоя от толщины и материала

Материал	Толщина соединяющего слоя				
	2 мкм	3 мкм	5 мкм	10 мкм	20 мкм
Тепловое сопротивление при $\text{AuSn}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	1,4	1,5	2,0	3,9	6,0
Тепловое сопротивление при $\text{Cu}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	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  $9 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ , что на 27% меньше по сравнению с сопротивлением транзистора традиционным методом 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.

Повышение площади контакта кристалла с подложкой, особенно вблизи области тепловыделения, является перспективным направлением для уменьшения общего теплового сопротивления конструкции.

## Заключение

Исследование тепловых характеристик традиционного метода интеграции кристаллов (обратной стороной на металлическое основание с помощью фольги припоя), показало, что для заданных условий, максимальная температура в канале равна 184.7 °С, что соответствует общему тепловому сопротивлению  $16.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ . Традиционная конструкция интеграции МИС СВЧ имеет ограниченные возможности по снижению теплового сопротивления без существенного повышения технологической сложности, 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 уменьшение теплового сопротивления схемы на 7.2% в сравнении с традиционным подходом интеграции. Определено влияние отдельных элементов схемы на тепловые режимы работы. Получены электрические эквивалентные схемы тепловых моделей исследуемых конструкций.

Направление дальнейших исследований включает исследование тепловых характеристик конструкций беспроводной интеграции транзисторов и МИС СВЧ, снижающих тепловое сопротивление системы [6, 7].

## Литература

1. Heinrich W., Hossain M., Sinha S., Schmuckle F.-J., Doerner R., Krozer V., Weimann N. Connecting chips with more than 100 GHz bandwidth. *IEEE Journal Microwaves*. 2021. V.1. №1. P.364-373. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3032879>

2. Efimov A.S., Temnov A.M., Korolkova D.D., Zaycev A.A., Dudinov K.V., Rudina A.D., Kurochka A.S., Emelianov A.M., Ranzhin Y.S. Flip-Chip integration of III-V chips on wafer for mmW applications. *IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC)*. Moscow. Russian Federation. 2022. P.220-222. <https://doi.org/10.1109/RMC55984.2022.10079408>
3. Fegghi R., Joodaki M. Thermal analysis of microwave GaN-HEMTs in conventional and flip-chip assemblies. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2018. V.28. №8. P.e21513. <https://doi.org/10.1002/mmce.21513>
4. Chen H., Lim T.G., Tang G. Thermal Challenges and Design Considerations in Heterogeneous Integrated Through-Silicon-interposer Platform for III-V HEMT Flip Chip. *IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. San Diego. USA. 2022. P.1030-1035. <https://doi.org/10.1109/ECTC51906.2022.00168>
5. Гармаш С.В. Применение пассивных интегральных схем на арсениде галлия для построения импульсного усилителя мощности в X-диапазоне частот. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2021. Т.1. С.57-61. <https://www.elibrary.ru/FKCLNK>
6. 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>
7. Патент РФ №2782187. Ефимов А.С., Темнов А.М., Дудинов К.В. *Интегральная схема СВЧ*. Дата заявки: 28.12.2021. Дата публикации: 21.10.2022. 19 с.

**Для цитирования:**

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