

**Презентация научного доклада об основных  
результатах подготовленной НКР (диссертации) по  
теме:**

**«Исследование тепловых процессов в  
гетероинтегрированных многокристальных микромодулях  
на основе кремния  
для СВЧ применений»**

**Аспирант**

**Пяточкин Михаил Дмитриевич**

**Научный руководитель**

**Панасенко Петр Васильевич**

Москва, 2021

# Актуальность темы

Предметом диссертационной работы являются теоретические и экспериментальные исследования тепловых процессов, протекающих в приемо-передающих модулях (ППМ) СВЧ диапазона различных конструктивных исполнений.

В последнее время наблюдается тенденция снижения массогабаритных параметров ППМ и увеличения выходной мощности. Реализация этих тенденций обуславливает значительное увеличение интенсивности тепловых потоков, которые отводятся от модуля. Поэтому работы, направленных на исследование тепловых процессов в конструкциях с применением миниатюрных модулей весьма актуальны и своевременны.

# Цели и задачи

- Провести аналитический обзор конструкций и технологий проектирования систем теплоотводов в многокристальных 2.5D и 3D электронных узлах.
- Провести расчеты, компьютерное моделирование, создать 3D модели СВЧ микромодулей и отдельных их узлов, а также провести исследования оптимальных и предельных тепловых режимов приемо-передающих модулей, реализованных на основе кремниевых интерпозеров.
- Выполнить верификацию тепловой модели на примере технологического макета ППМ.
- Исследовать систему эффективного теплоотвода, построенную на принципе адиабатического расширения газа, в качестве альтернативного решения системам с циркуляцией охлаждающей жидкости.
- Исследование системы теплоотвода для ППМ с малым временем эксплуатации, основанной на применении интегрированного теплосборника.

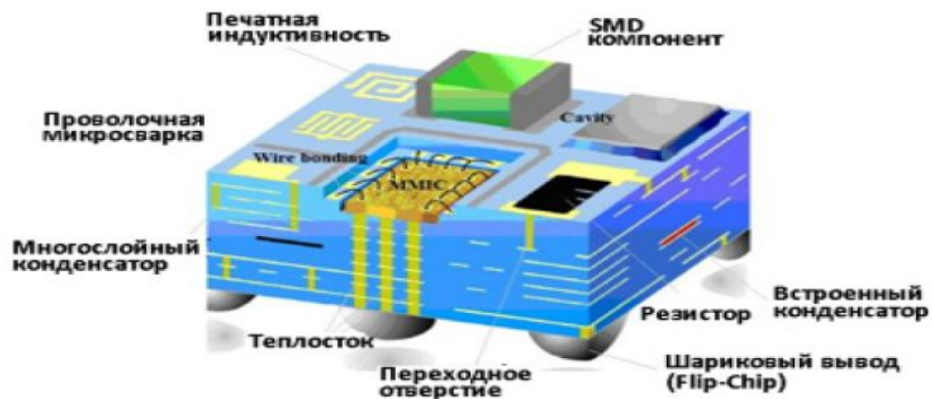
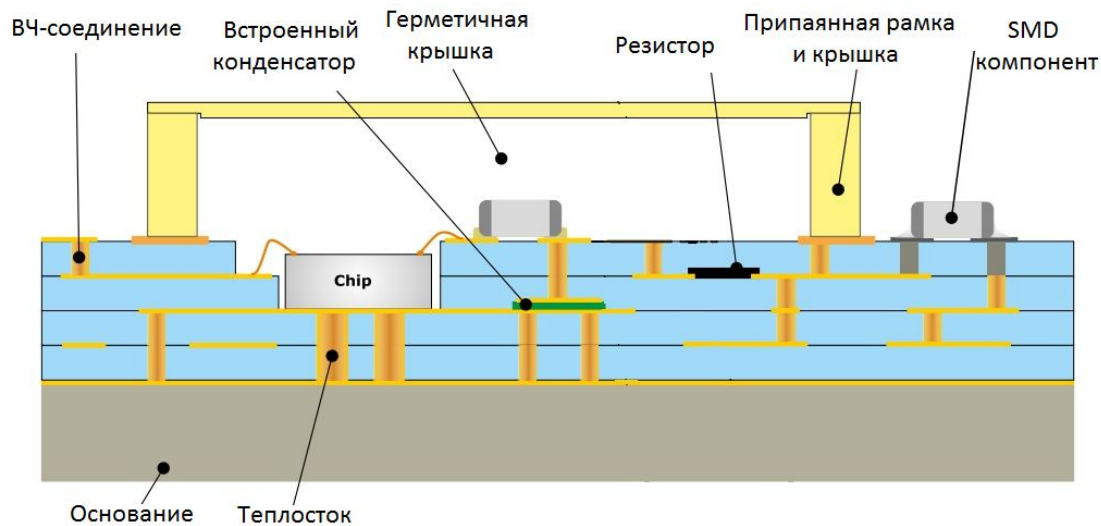
# Научная новизна

1. Впервые предложена система теплоотвода ППМ, построенная на принципе адиабатического расширения газа и обладающая более высокой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости .
2. Установлено, что интеграция в конструкцию ППМ теплосборника на основе материала с высокой теплоёмкостью позволяет увеличить время эксплуатации ППМ в пределах допустимого теплового режима более чем в 3 раза по сравнению с модулем без теплосборника.

# Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны и верифицированы тепловые модели, применимые для моделирования различных приемо-передающих модулей.
2. Предложены конструктивные решения организации и оценена эффективность различных систем теплоотвода для ППМ, построенных на основе кремниевого TSV-интерпозера.
3. Определены условия максимальной эффективности системы теплоотвода на основе TSV-интерпозера. Разработан способ построения 3D модели кристаллов из топологических файлов, позволяющий значительно сократить время исследования и создания 3D модели.
4. Разработаны конструктивно-технологические способы формирования воздуховода для максимальной эффективности систем теплообмена на основе адиабатического расширения газа.

# Схематичная конструкция ППМ на LTCC основании

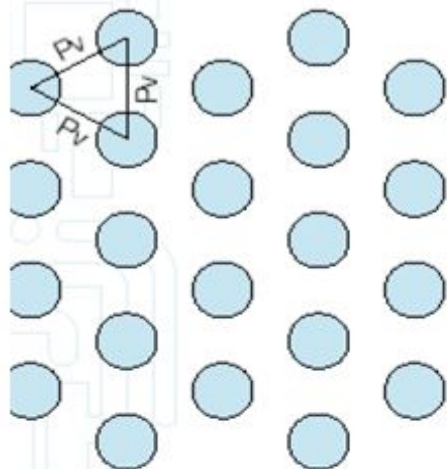


# Реализация тепловых стоков в LTCC

## ОСНОВАНИИ

(фирмы Thales Microsonics и FERRO)

Thermal via distribution



Thales

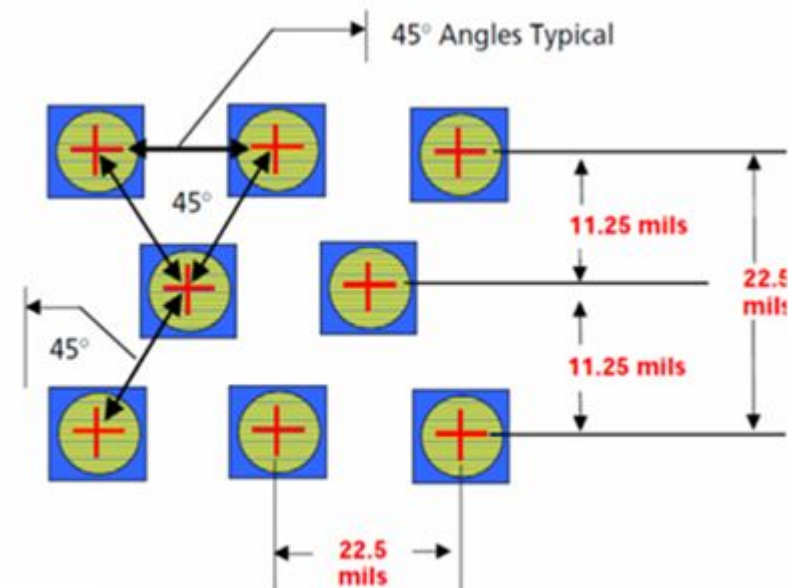
Through thermal vi



Blind thermal via for electrical isolation



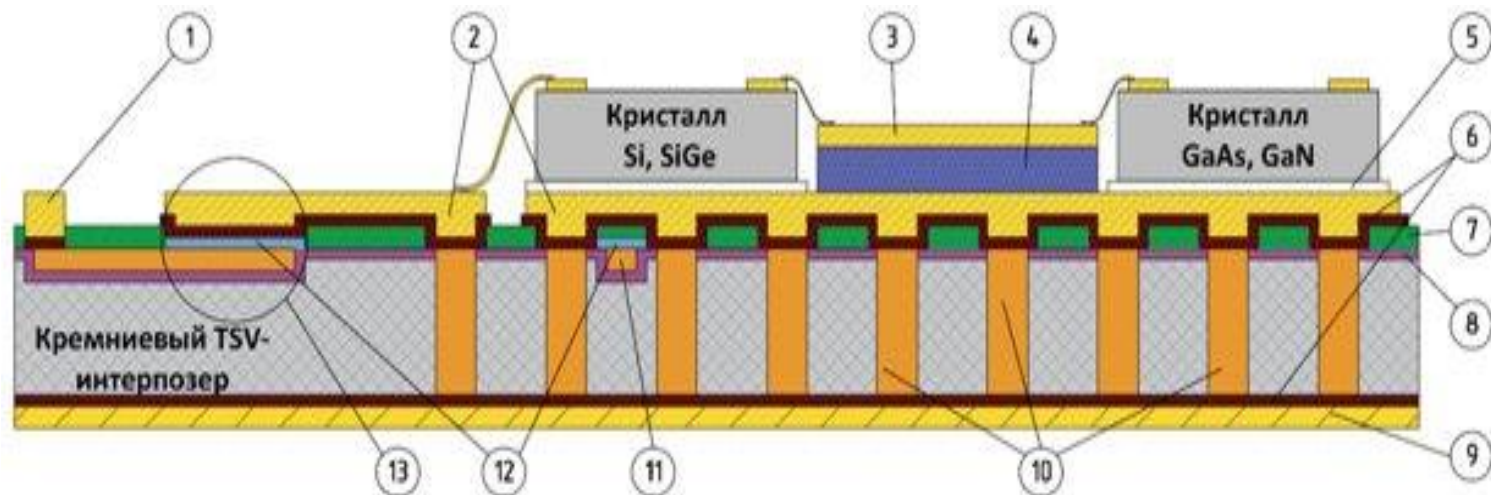
16.0  
mils



FERRO

Глубина отверстий, мкм	Диаметр отверстий, мкм	Плотность отверстий, $\frac{\text{Отв.}}{\text{мм}^2}$	Отверстия от общего объема основания, %	Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$
400	200	7.2	22.7	20
600	200	3.2	10.1	8
300	150	7.2	22.7	20
450	150	3.2	10.1	8
		Без отверстий		3

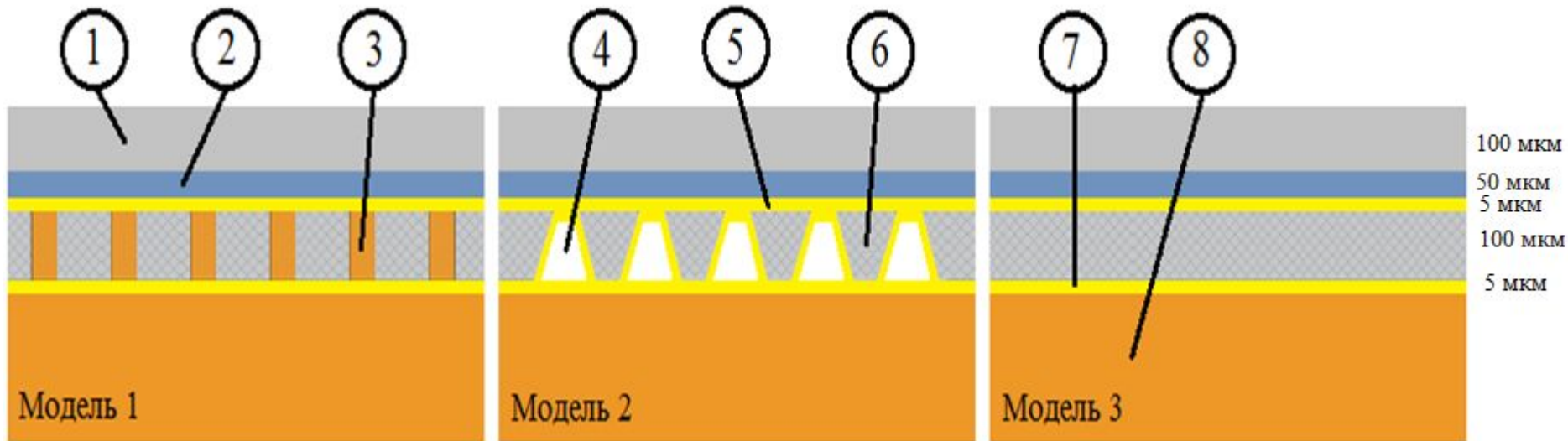
# Схематичная конструкция ППМ на кремниевой коммутационной плате



1- контактная площадка (Au); 2 - межсоединения 2-го уровня (Au); 3 - СВЧ МПЛ (Au); 4 - диэлектрик (BCB); 5 - тепло-, токопроводящий адгезив; 6 - металлический зародышевый слой; 7,8 - изолирующий диэлектрик ( $\text{SiO}_2$ ); 9 - металлизация обратной стороны (Au); 10 - металлизированные TSV-отверстия; 11 - межсоединения 1-ого уровня (Cu); 12 - диэлектрик конденсаторов ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ); 13 - конденсатор.

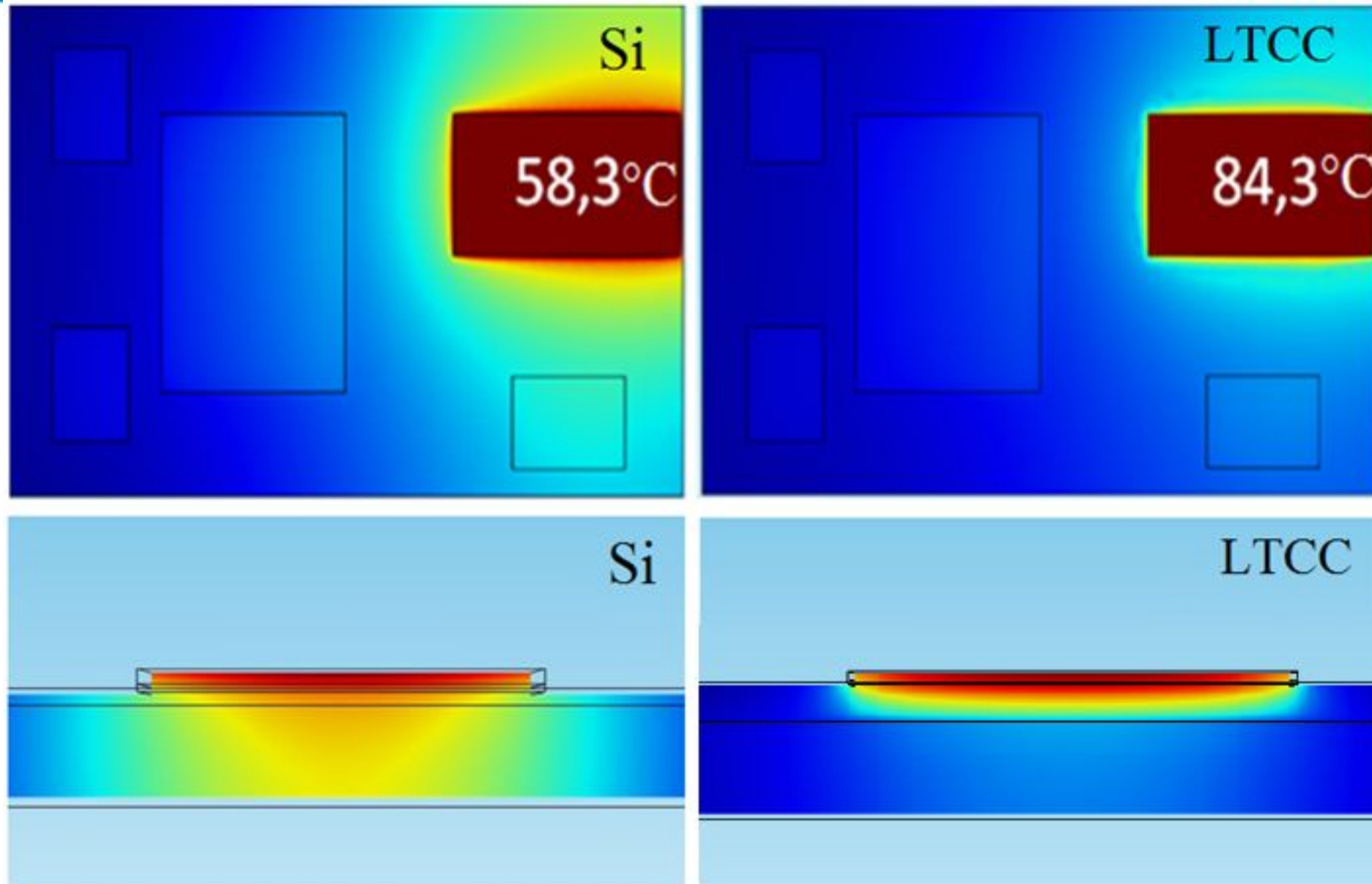


# Тепловые модели кремниевых коммутационных плат использованные в САПРе COMSOL Multiphysics



1- кристалл (GaAs); 2- тепло-, токопроводящий адгезив; 3- медные отверстия; 4- отверстия с золотой металлизацией; 5- межсоединения (Au); 6- кремниевый интерпозер; 7- металлизация обратной стороны (Au); 8- медное основание.

# Латеральный теплоотвод для LTCC и кремниевого интерпозера



# Результаты моделирования тепловых процессов в ППСМ

Модель №	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср. по пов-ти}}, ^\circ\text{C}$
1	59,4	54,2
2	62,1	57,3
3	60,3	55,6

Материал Параметр	Медь (прямой монтаж кристалла на медный теплоотвод)	Кремний с металлизированными TSV (170 Вт/м•К)	LTCC с медными тепловыми стоками (20 Вт/м•К)	Печатная плата (15 Вт/м•К)
Температура на поверхности тепловыделяющих элементов (кристаллов СВЧ МИС), $^\circ\text{C}$	55	58	84	90
Относительный перегрев	0%	5%	53%	64%

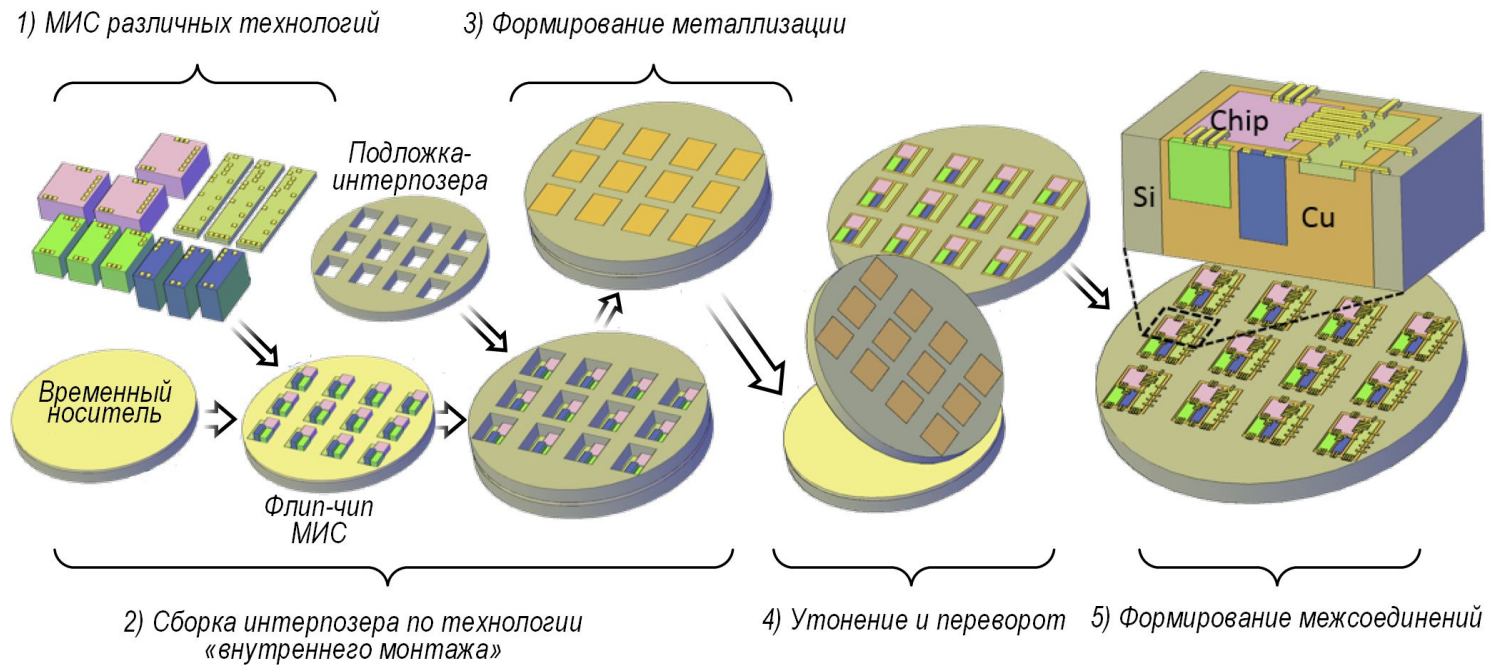
TSV (Trough Silicon Vias) – сквозные отверстия в кристалле кремния, заполненные медью.



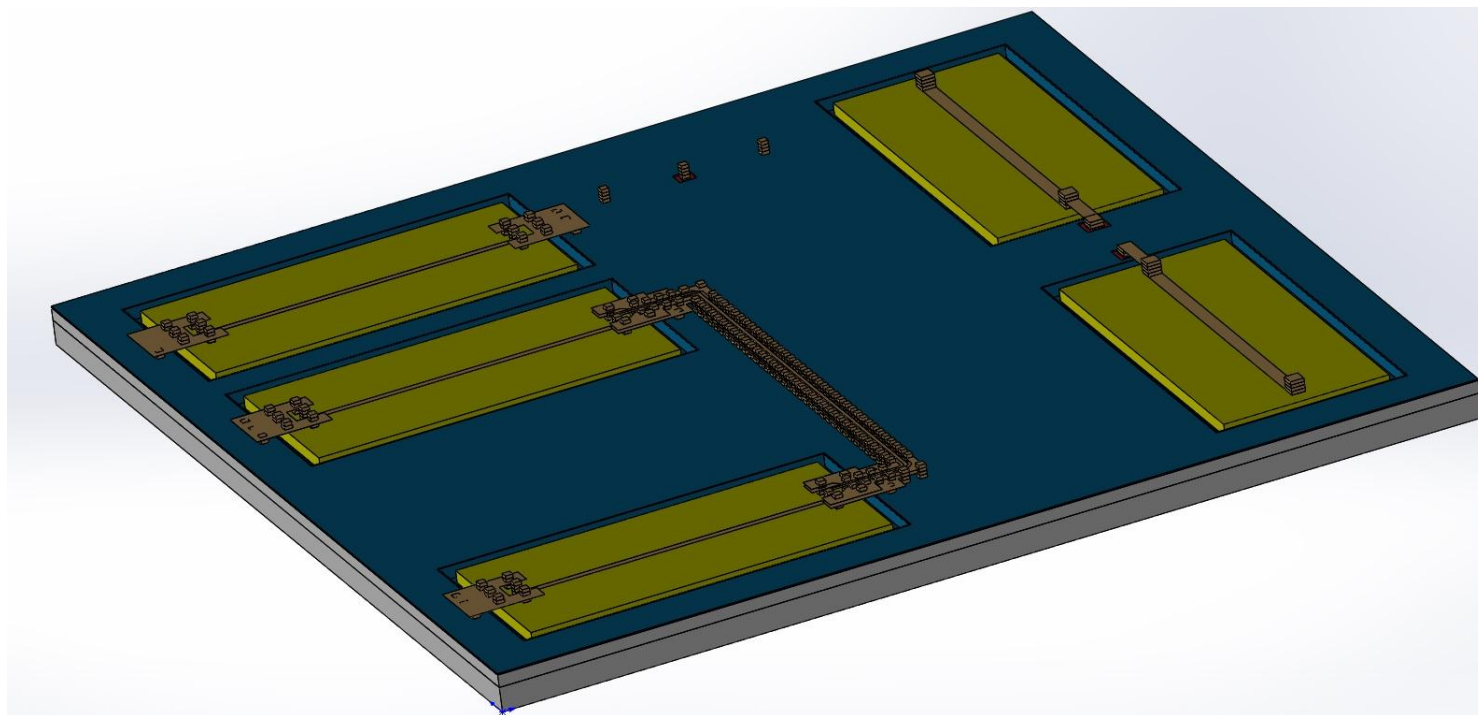
# Преимущества ГПМ, реализованных на основе методов кремниевой 3D ТЕХНОЛОГИИ

1) Высокая воспроизводимость характеристик модулей за счет высокой точности исполнения внутримодульных цепей. 2) Решение проблемы теплоотвода от кристаллов МИС. 3) Возможность матричного исполнения фрагментов антенного полотна АФАР. 4) Использование групповых технологий для изготовления большого количества модулей. 5) Существенное улучшение массогабаритных характеристик. 6) Снижение стоимости и сроков изготовления за счет снижения трудоемкости в пересчете на один модуль.

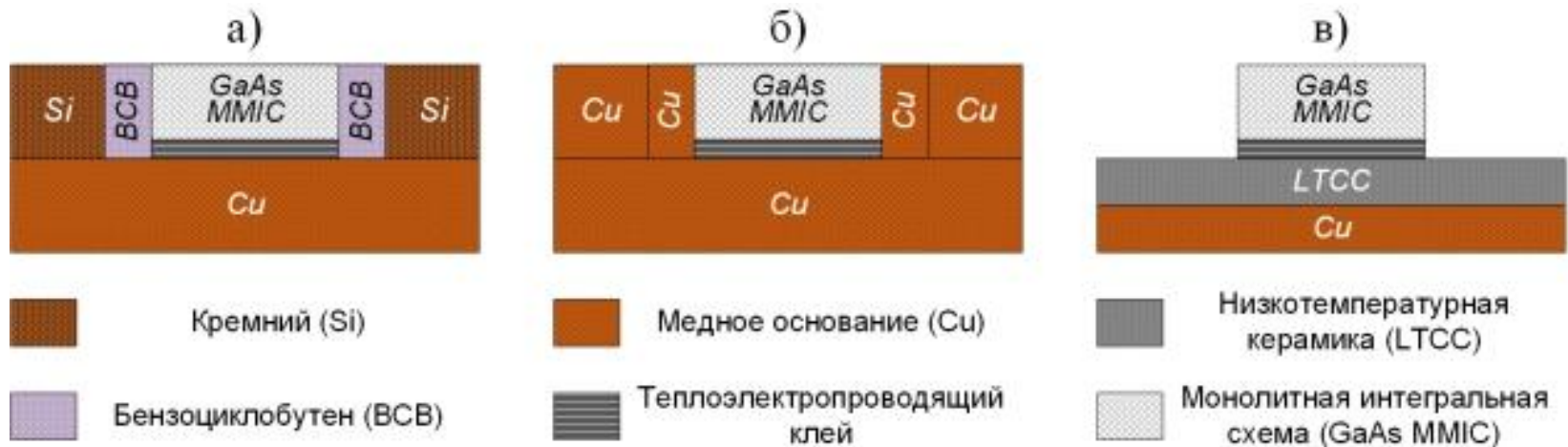
# Процесс сборки 3D ППМ X-диапазона частот, выполненный HRL Laboratories с применением технологии «внутреннего монтажа».



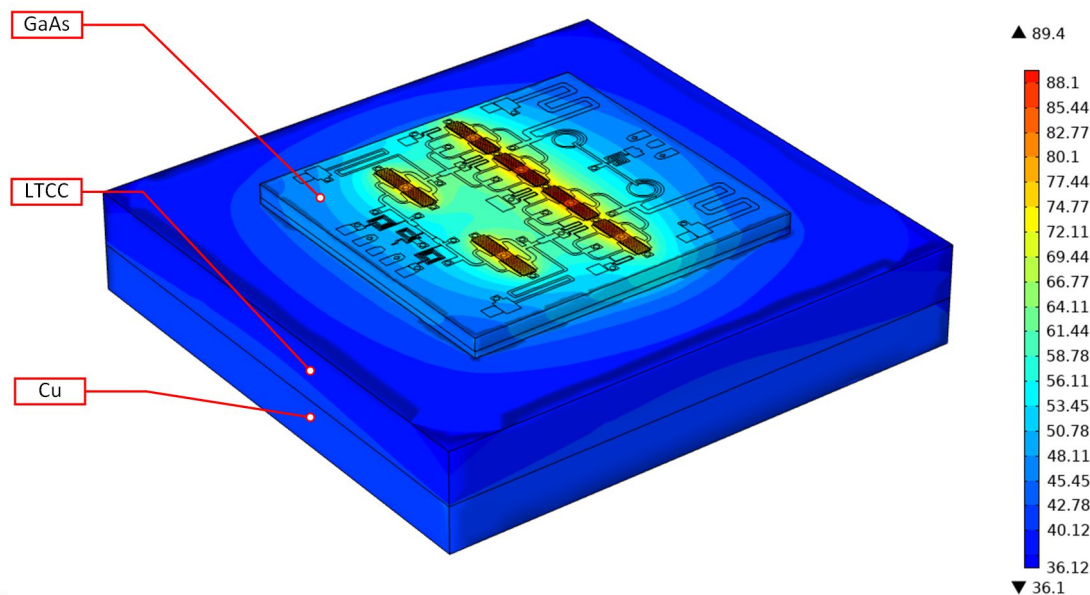
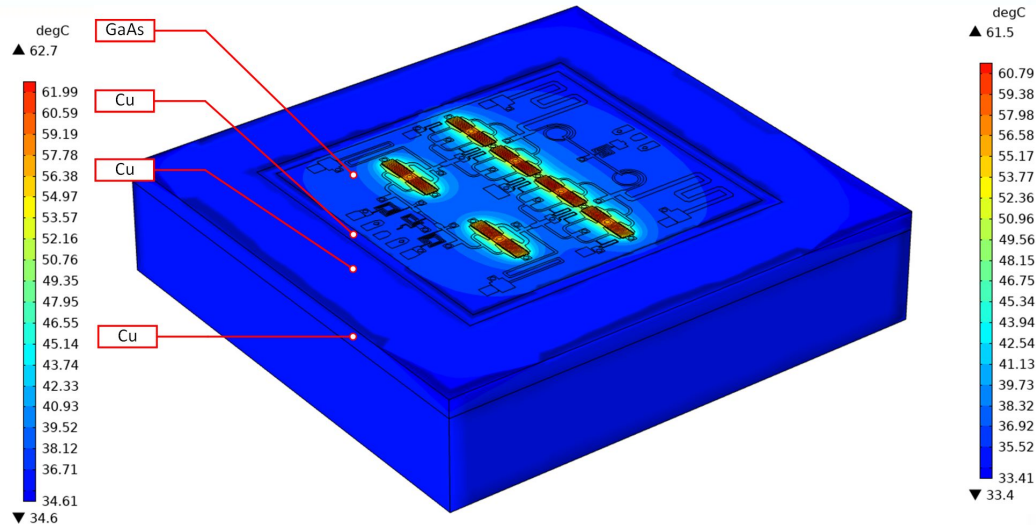
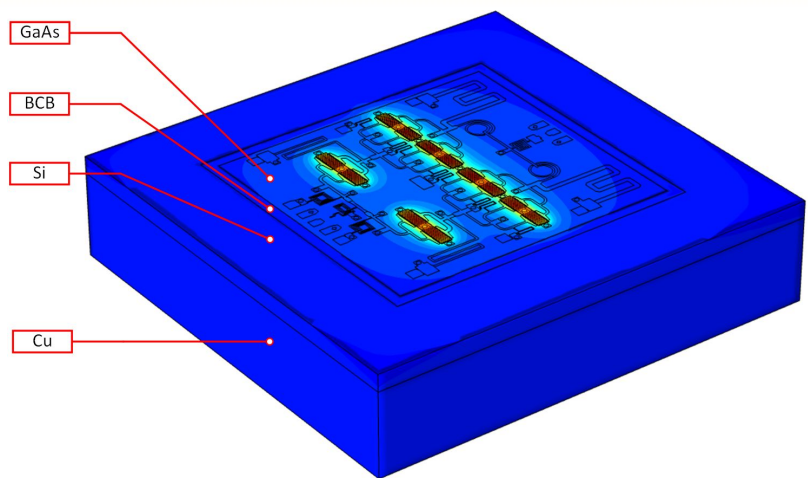
# Модель ППМ с кристаллами внутри кремниевого основания интерпозера



# Условный поперечный разрез ППМ на основе кремниевой коммутационной платы (ККП).

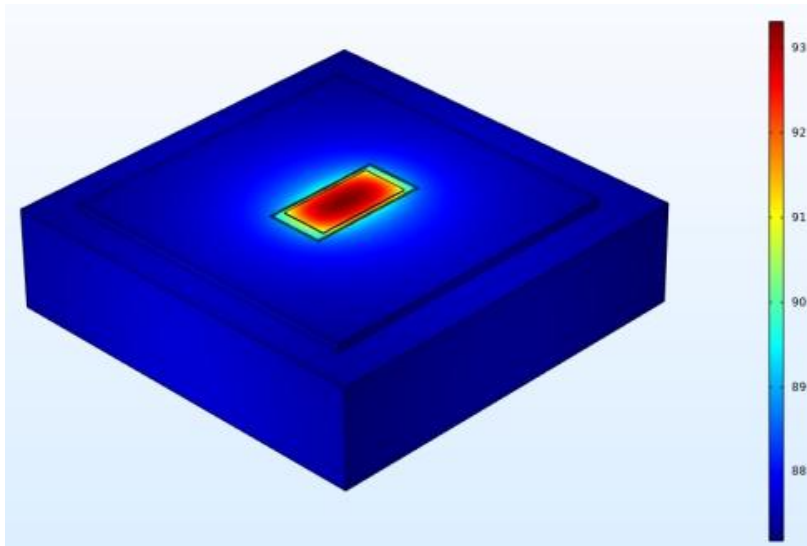
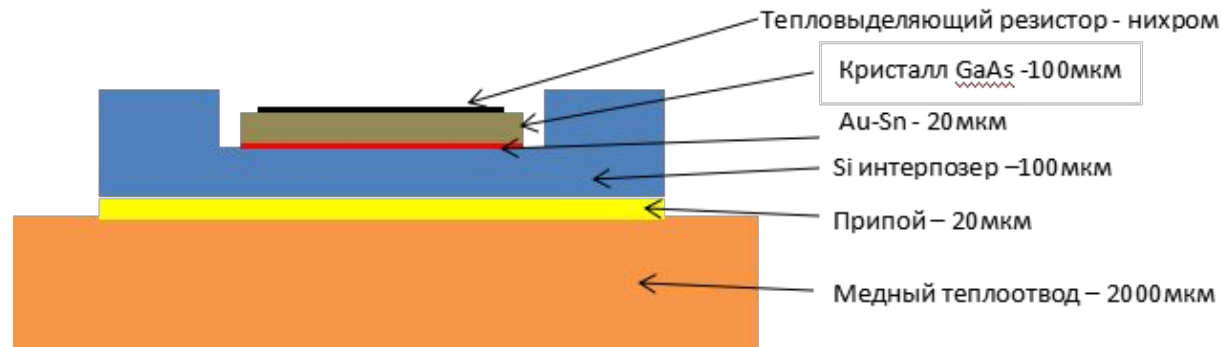


# Результаты моделирования кристалла, углубленного в Si, Cu и на основании из LTCC





# Верификация тепловой модели



$$R_{t \text{ общ}} = \frac{93-88}{10} \frac{\text{K}}{\text{Вт}} = 0,5 \frac{\text{K}}{\text{Вт}}$$

# Верификация тепловой модели

Рассчитаем тепловое сопротивление по формуле  $R_t = \frac{L}{S\lambda}$ , где

$R_t$  — тепловое сопротивление на участке тепловой цепи,  $\frac{K}{Вт}$ ;

$L$  — длина участка тепловой цепи, м;

$S$  — площадь поперечного сечения участка,  $м^2$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала,  $Вт/м \cdot К$ ;

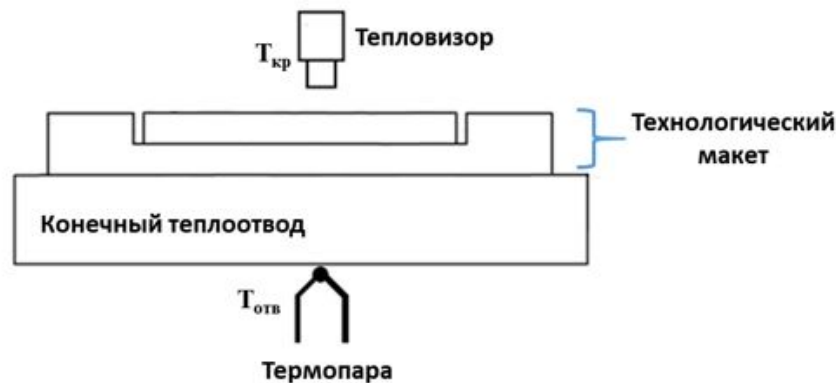
$$R_{t_{кр-ла}} = \frac{100 \cdot 10^{-6} м}{55 \frac{Вт}{м \cdot К} \cdot 0,0014 \cdot 0,003 м} = 0,4 \frac{К}{Вт}$$

$$R_{t_{Аи-Sn}} = \frac{20 \cdot 10^{-6} м}{300 \frac{Вт}{м \cdot К} \cdot 0,0014 \cdot 0,003 м} = 0,02 \frac{К}{Вт}$$

$$R_{t_{TSV}} = \frac{100 \cdot 10^{-6} м}{150 \frac{Вт}{м \cdot К} \cdot 0,005 \cdot 0,005 м} = 0,026 \frac{К}{Вт}$$

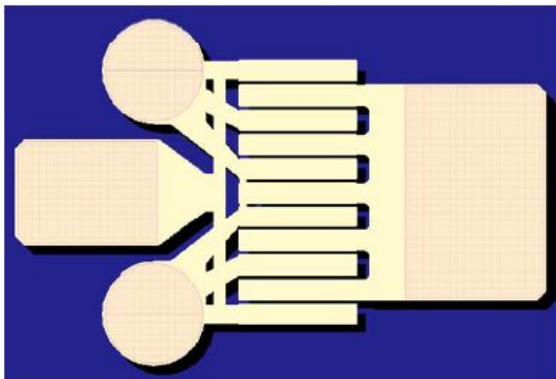
$$R_{t_{пасты}} = \frac{100 \cdot 10^{-6} м}{50 \frac{Вт}{м \cdot К} \cdot 0,005 \cdot 0,005 м} = 0,08 \frac{К}{Вт}$$

$$R_{t_{общ}} = R_{t_{кр-ла}} + R_{t_{Аи-Sn}} + R_{t_{пасты}} + R_{t_{TSV}} = 0,526$$



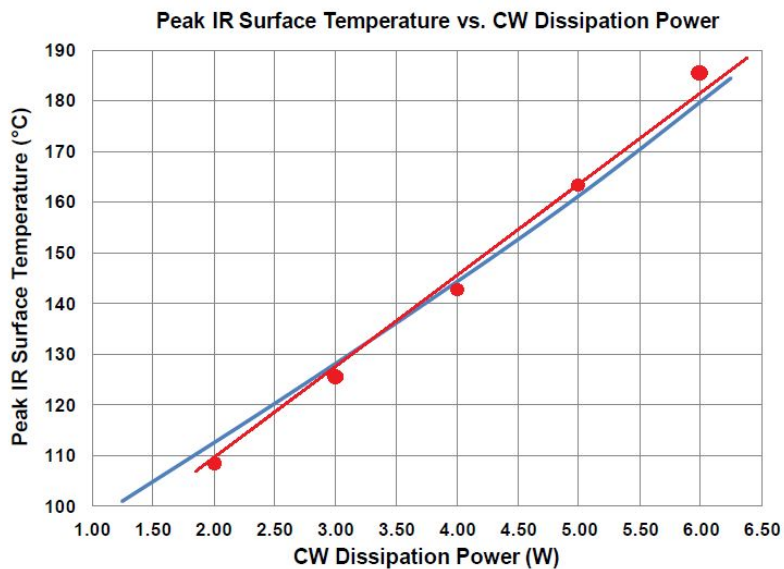
Р, Вт	$T_{кр}, °C$	$T_{отв}, °C$	Тепловое сопротивление $R_t, °C/Вт$		
			Факт. значение параметра	Расчет	Моделирование
10,0	97,9	92,5	0,54	0,526	0,5

# Верификация тепловой модели

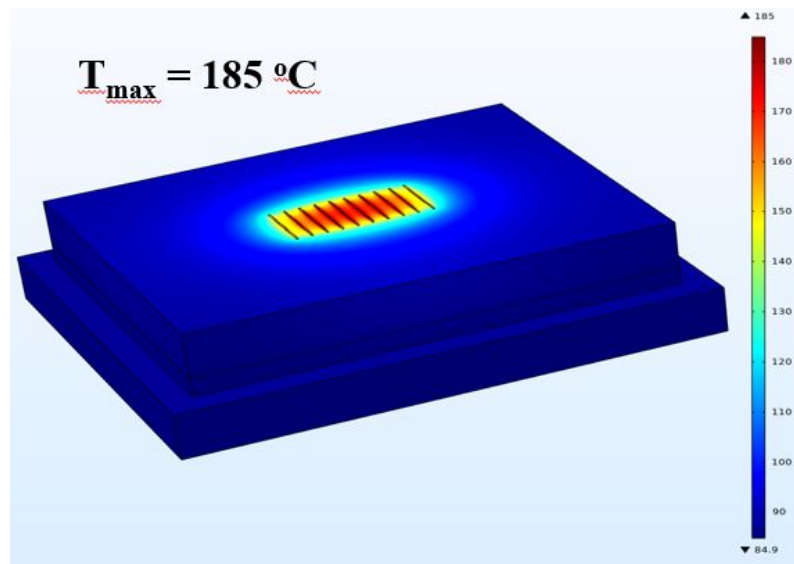


Транзистор QORVO  
TGF2023-2-01 6 Watt

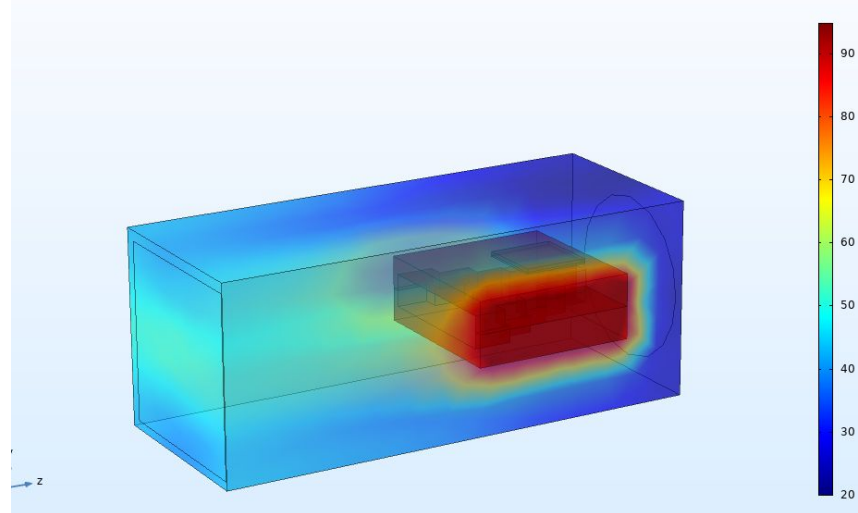
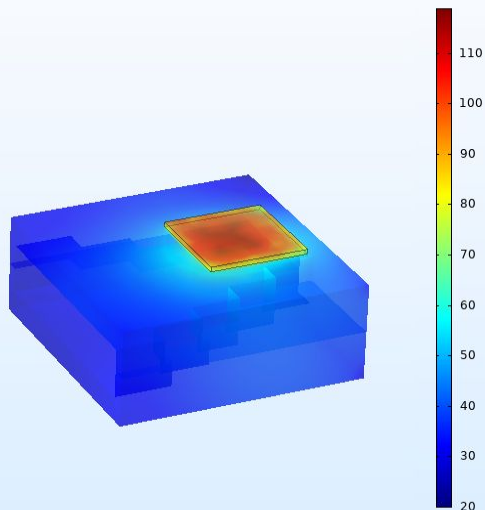
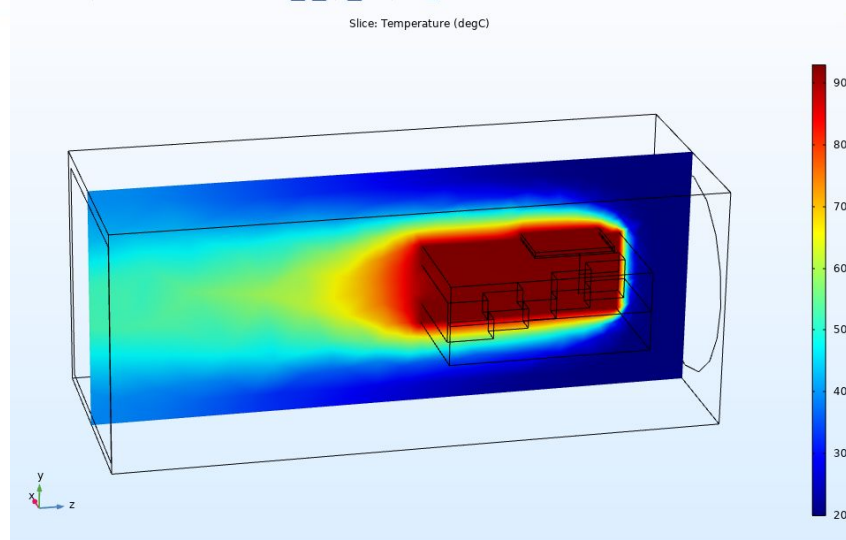
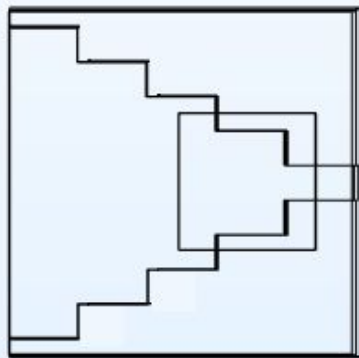
Длина секций затвора	125 $\mu\text{M}$
Толщина подложки SiC	100 $\mu\text{M}$
Температура основания	85 °C
Мощность на единицу длины затвора	4.8 Вт/мм
Шаг между затворами	26 $\mu\text{M}$
Суммарная ширина затвора	1.25 мм
Общая выделяемая тепловая мощность	2-6 Вт



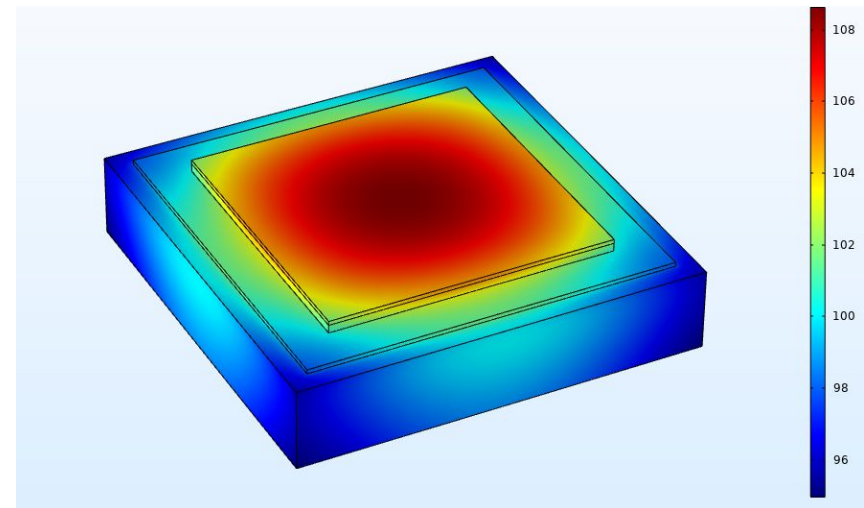
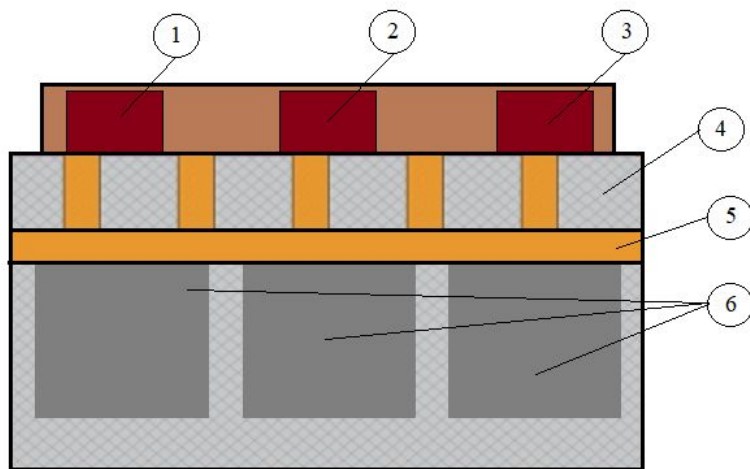
— Моделирование  
— QORVO Data Sheet



# Система теплоотвода I II IM, построенная на принципе адиабатического расширения газа



# Система теплоотвода ППМ с малым временем эксплуатации, основанная на применении интегрированного теплосборника



Схематическая конструкция ППМ на кремниевой коммутационной плате, где 1 – ВУМ, 2 – ПУМ, 3 – С-Chip, 4 – кремниевый TSV-интерпозер, 5 – панель Cu, 6 – парафин.

# Основные выводы работы

По результатам работы получены следующие положения научной новизны:

1. Впервые предложена система теплоотвода ППМ, построенная на принципе адиабатического расширения газа и обладающая более высокой эффективностью по отношению к системам с принудительным конвективным теплоотводом и с циркуляцией охлаждающей жидкости.
2. Установлено, что интеграция в конструкцию ППМ теплосборника на основе материала с высокой теплоёмкостью позволяет увеличить время эксплуатации ППМ в пределах допустимого теплового режима более чем в 3 раза по сравнению с модулем без теплосборника.

# Основные выводы работы

Основные практически значимые результаты работы:

1. Разработаны и верифицированы тепловые модели 2.5 D - 3D микросборок, применимые для моделирования различных приемопередающих модулей.
2. Предложены конструктивные решения конструктивно-технологической реализации и оценена эффективность различных систем теплоотвода для ППМ, построенных на основе TSV-интерпозера.
3. Определены условия максимальной эффективности системы теплоотвода на основе TSV-интерпозера. Разработан способ построения 3D модели кристаллов из топологических файлов, который позволяет значительно сократить временные затраты на исследования и создание модели.
4. Разработаны принципы формирования воздуховода для максимальной эффективности систем теплообмена на основе адиабатического расширения газа.

# ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ НКР

1. Пяточкин М.Д., Волосов А.В., Панасенко П.В., «Моделирование тепловых процессов в СВЧ-модулях с различными основаниями», НАНОИНДУСТРИЯ «ТЕХНОСФЕРА» (Москва), стр. 443-444, 2018 год, DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.443.444.
2. Волосов А.В., Панасенко П.В., Пяточкин М.Д., «Особенности технологии изготовления кремниевых коммутационных плат для СВЧ модулей», НАНОИНДУСТРИЯ «ТЕХНОСФЕРА» (Москва), стр. 346-347, 2018 год, DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.415.416
3. Пяточкин М.Д., Котляров Е.Ю., Мелекесцев В.С., «Миниатюризация приемопередающих модулей СВЧ диапазона, реализованных методами 3D кремниевой технологии», НАНОИНДУСТРИЯ «ТЕХНОСФЕРА» (Москва), стр. 690-693, 2020 год, DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.690.693
4. Пяточкин М.Д., Котляров Е.Ю., Тишин А.С., «Miniaturization of microwave transmit-receive modules, implemented using 3D silicon technology», Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) IEEE, 2020, DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067346



---

**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!**