



УДК 621.38:621.3.049.77:621.382.049.77

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.420.426

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СВЧ Т/Р-МОДУЛЯ X-ДИАПАЗОНА

X-BAND RF T/R-MODULE HEAT BALANCE

ТИМОШЕНКОВ ВАЛЕРИЙ ПЕТРОВИЧ
valeri04@hotmail.com

TIMOSHENKOV VALERI P.
valeri04@hotmail.com

ХЛЫБОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

KHLYBOV ALEXANDER I.

РОДИОНОВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ

RODIONOV DENIS V.

ПАНТЕЛЕЕВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ

PANTELEEV ANDREY I.

ТИМОШЕНКОВ ПАВЕЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ

TIMOSHENKOV PAVEL V.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

National Research University of Electronic Technology
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

Экспериментально и на основе компьютерного моделирования проведены исследования тепловых режимов СВЧ ИМС X-диапазона для модуля АФАР, изготовленных по технологии GaAs, включающих 10-ваттный усилитель мощности, МШУ и устройства управления фазой и амплитудой сигнала. Для усилителя мощности приведены зависимости максимальной температуры кристалла от длительности и скважности импульсов питания.

Ключевые слова: СВЧ-усилитель; GaAs; приемопередающий модуль АФАР

The paper highlights thermal modes research of X-band 10W PA (GaAs), LNA (GaAs) and CoreChip (GaAs) using two approaches: computer simulation and experiment (IR camera). All mentioned blocks are part of T/R AESA module. Power amplifier die surface temperature as function of pulse width and power supply duty cycle has been determined.

Keywords: microwave amplifier; Active Electronically Scanned Array; T/R module; GaAs.

СВЧ ИМС X-диапазона имеют широкое применение в военной и в гражданской областях. Так, например, современные радиолокационные системы используют активные фазированные антенные решетки (АФАР), выполненные по модульному принципу в целях снижения массогабаритных характеристик и возможности достижения сложных тактико-технических системных требований. В связи с этим актуальной становится задача повышения интеграции, многофункциональности и надежности узлов АФАР, которая состоит из набора модулей, содержащих СВЧ-элементы, а также схемы управления, построенные на обычных низкочастотных ИМС. Высокочастотная часть радиолокационной АФАР содержит канал передачи и канал приема, включающих малошумящий усилитель, универсальное управляющее устройство и усилитель мощности. Низкочастотная часть содержит ИМС преобразователя кодов из последовательного кода управления в параллельный [1].

Одним из основных требований к модулю АФАР является формирование выходного СВЧ-сигнала мощностью не менее 10 Вт, что достигается использованием усилителей, изготовленных на основе GaAs- или GaN-материалов. В настоящее время в основном используется арсенид галлия, имеющий более отработанную технологию.

Интегральные СВЧ-схемы на основе арсенида галлия с точки зрения теплового режима имеют ряд следующих особенностей:

- низкая теплопроводность материала подложки;
- высокая удельная мощность на единицу площади кристалла;
- высокая локализация тепловыделяющих элементов по площади кристалла.

Низкая теплопроводность материала подложки обусловлена применением GaAs, имеющего более низкую теплопроводность по сравнению с кремнием (0,46 Вт/см·К для GaAs и 1,5 Вт/см·К для Si).

Высокая удельная мощность на единицу площади кристалла связана с использованием мощных транзисторов с рабочими токами в несколько ампер для обеспечения необходимого уровня СВЧ-сигнала. Так, например, для 10-Вт усилителей мощности X-диапазона удельная мощность составляет более 145 Вт/см². Для сравнения, мощные микропроцессоры на основе кремния имеют удельную мощность 80–90 Вт/см².

Следующая особенность связана с высокой локализацией тепловыделяющих элементов по площади кристалла. Мощные транзисторы представляют собой секции из нескольких десятков параллельно соединенных транзисторов с шириной затвора 100–150 мкм. Для сохранения высокого коэффициента усиления и повышения частотного диапазона транзисторы должны быть расположены как можно ближе к друг другу. Это приводит к тому, что общая площадь, занимаемая транзисторами, т. е. область, где происходит выделение тепловой мощности, уменьшается, составляя всего несколько процентов от площади кристалла.

Современные модули АФАР X-диапазона включают несколько функциональных блоков, в которых наиболее напряженными с точки зрения теплового режима являются универсальное управляющее устройство (Core chip) и усилитель мощности.

Анализ параметров усилителей на основе GaAs показывает, что, например, при КПД = 30% и мощности выходного радиосигнала 10 Вт на самом кристалле усилителя выделяется тепловая мощность 20 Вт. При этом основная часть этой мощности приходится на транзисторы выходных каскадов, занимающие менее 3% площади кристалла ИМС. Срок службы усилителя в основном определяется сроком службы активного прибора. Так, для мощных полевых транзисторов на GaAs, где основным механизмом отказа является взаимная диффузия металлов затвора, срок

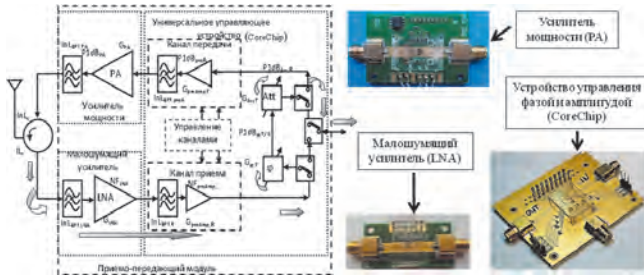


Рис. 1. Структурная схема модуля АФАР

службы уменьшается в 10 раз при повышении температуры рабочего перехода на 30 °С [2]. Таким образом, очень важно знать действительную температуру перехода в процессе работы усилителя. Если мощность подается в импульсном режиме, то температура перехода в процессе работы будет изменяться и максимальное значение температуры будет зависеть от длительности импульса при постоянной скважности импульсов питания. В связи с этим исследование тепловых режимов усилителей мощности, включающее определение максимальной температуры на кристалле и критических режимов работы ИМС, является актуальной задачей [3–4].

В работе проведено исследование тепловых характеристик 10-Вт усилителя мощности, маломощящего усилителя (МШУ) и универсального управляющего устройства (устройство управления амплитудой и фазой) для модуля АФАР X-диапазона. Структурная схема модуля АФАР и микросборки с кристаллами

исследуемых ИМС приведены на рис. 1. Исследование тепловых режимов осуществлялось путем моделирования тепловых процессов с использованием компьютерной программы SolidWorks и методом инфракрасной микроскопии на установке SC5700. При моделировании тепловых режимов предполагалось, что выделяемая транзистором тепловая мощность пропорциональна общей ширине затворов. Мощность определялась экспериментально и распределялась между транзисторами усилителя пропорционально ширине затворов.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МАЛОМОЩЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

В качестве объекта исследования использован маломощящий усилитель СНА1014 X-диапазона фирмы UMS, представляющий собой кристалл, смонтированный на многослойную печатную плату на основе материала Rogers. Размеры кристалла — 2,57×1,37×0,1 мм.

Усилитель построен по двухкаскадной схеме и имеет при выходной мощности 10 дБм в точке единичной компрессии потребляемую мощность 110 мВт. Тепловая картина и поперечное сечение микросборки, проходящее через середину транзисторных структур усилителя, представлены на рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения максимальной температуры кристалла в области расположения транзисторов не превышали окружающую более чем на 8 °С. Максимальное значение внутреннего теплового сопротивления для транзистора первого каскада имело значение 36 °С/Вт.

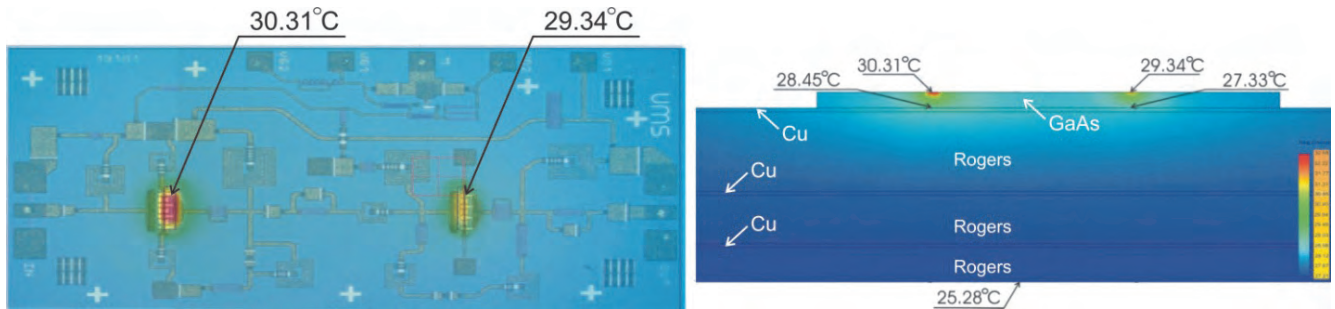


Рис. 2. Тепловая картина и температурный профиль маломощящего усилителя СНА1014 ($T_{ср.вд}$ = 23,0 °С)

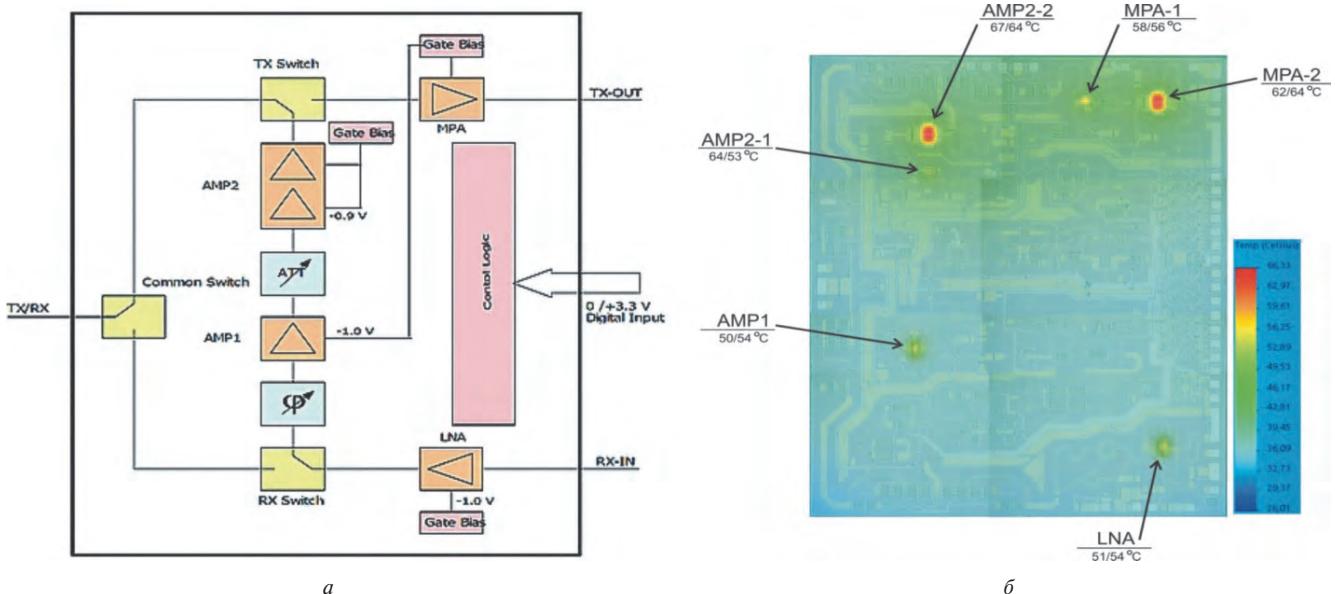


Рис. 3. Функциональная схема ИМС управления амплитудой и фазой (а) и распределение тепла (б)



Таблица 1. Максимальная температура в области транзисторных структур

№ элемента	Название	Ширина транзистора, мкм	Площадь тр-ра, мкм ²	Выделяемая мощность, мВт	Максимальная температура, °С	
					Эксперимент	Моделирование
1	AMP1	8×60 = 480	9600	190,0	50	54,21
2	AMP2-1	6×40 = 240	5000	95,0	64	53,33
3	AMP2-2	8×125 = 1000	25000	395,5	67	64,46
4	MPA-1	4×85 = 340	8500	134,0	58	55,56
5	MPA-2	8×125 = 1000	25000	395,5	62	64,20
6	LNA	8×60 = 480	9600	190,0	51	54,07
ИТОГО		3540		1400		

Таблица 2. Максимальная разность температур между поверхностью кристалла и его основанием

№ элемента	Название	Площадь тр-ра, мкм ²	Выделяемая мощность, мВт	Внутреннее тепловое сопр., К/Вт	Перегрев, °С
1	AMP1	9600	190,0	83,9	15,9
2	AMP2-1	5000	95,0	108,4	10,3
3	AMP2-2	25000	395,5	51,5	20,4
4	MPA-1	8500	134,0	101,0	13,6
5	MPA-2	25000	395,5	52,8	20,9
6	LNA	9600	190,0	90,8	17,3

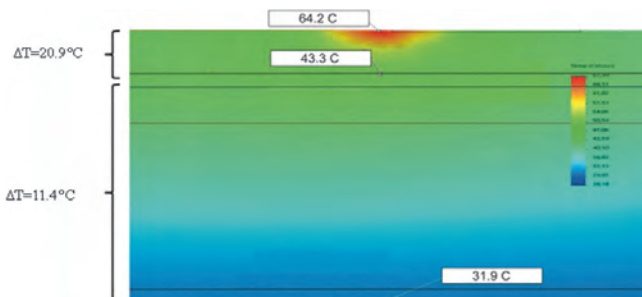


Рис. 4. Распределение температуры по сечению транзистора MPA-2 (температура среды 23 °С), охлаждение — естественная конвекция

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ УНИВЕРСАЛЬНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

В качестве объекта исследования использован кристалл ИМС управления амплитудой и фазой (Core Chip) XZ1002-BD фирмы M/A-COM Tech Asia X-диапазона, смонтированный на многослойную печатную плату на основе материала Rogers. Размеры кристалла — 4,0×5,0×0,11 мм. Интегральная схема устройства содержит переключатели приема-передачи, маломощный усилитель в канале приема, выходной усилитель в канале передачи, фазовращатель на 6 бит, аттенюатор на 5 бит, внутренние усилители сигнала после фазовращателя и аттенюатора, схему управления аттенюатором и фазой, а также схему управления напряжением смещения на затворах транзисторов в усилителях (рис. 3).

Суммарная мощность, рассеиваемая всеми элементами схемы, составляет 1400–1500 мВт. Практически вся тепловая

мощность, что подтверждается результатами эксперимента, выделяется на шести транзисторах усилителей (рис. 3б).

Экспериментальные и расчетные значения максимальной температуры в области транзисторных структур, полученные для температуры окружающей среды 23 °С, представлены в табл. 1.

Учитывая, что результаты эксперимента и моделирования совпадают в пределах погрешности измерений, можно считать, что модель адекватно отражает реальные тепловые процессы. На этом основании рассчитаны внутренние тепловые сопротивления для каждой транзисторной структуры и определен перегрев кристалла за счет внутреннего теплового сопротивления, т. е. максимальная разность температур между поверхностью кристалла и его основанием для каждой транзисторной структуры (табл. 2).

Максимальная температура в области расположения транзисторов превышала окружающую более чем на 30 °С. По результатам моделирования показано, что перегрев кристалла за счет теплового сопротивления используемой конструкции платы составляет не более 12 °С. Таким образом, основной причиной перегрева кристалла является высокое внутреннее тепловое сопротивление, т. е. даже при идеальном теплоотводе перегрев кристалла относи-

тельно окружающей среды будет не менее 20 °С. Разрез моделируемой конструкции через точку с максимальной температурой кристалла с указанием температуры каждого из слоев показан на рис. 4.

Для снижения температуры кристалла необходимо либо утонить кристалл, что крайне нежелательно из-за высокой хрупкости GaAs, либо использовать другой материал подложки, например GaN, имеющий в три раза большую теплопроводность. Некоторого уменьшения теплового сопротивления можно добиться увеличением площади транзистора. Температурный профиль самого мощного транзистора схемы вдоль линии тока, перпендикулярной затворам, показан на рис. 5.

Из рисунка видно, что температура в области канала транзисторов превышает температуру областей истока и стока на 5–7 °С. Необходимо отметить, что области истока, имеющие большие размеры и соединенные через металлизированные переходные отверстия с обратной стороной кристалла, имеют температуру на 6–8 °С ниже других областей истока в этом транзисторе. Используя конструкцию для всех областей истока, имеющую соединение с металлизацией обратной стороны кристалла, можно уменьшить внутреннее тепловое сопротивление, а следовательно, и температуру на поверхности транзисторной структуры.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

В качестве объекта исследования использован усилитель мощности TC1075G X-диапазона фирмы TRANSCOM, представляющий собой кристалл, смонтированный на многослойную печатную плату на основе материала Rogers. Размеры кристалла — 4,52×5,08×0,076 мм. Усилитель построен по двухкаскадной схеме

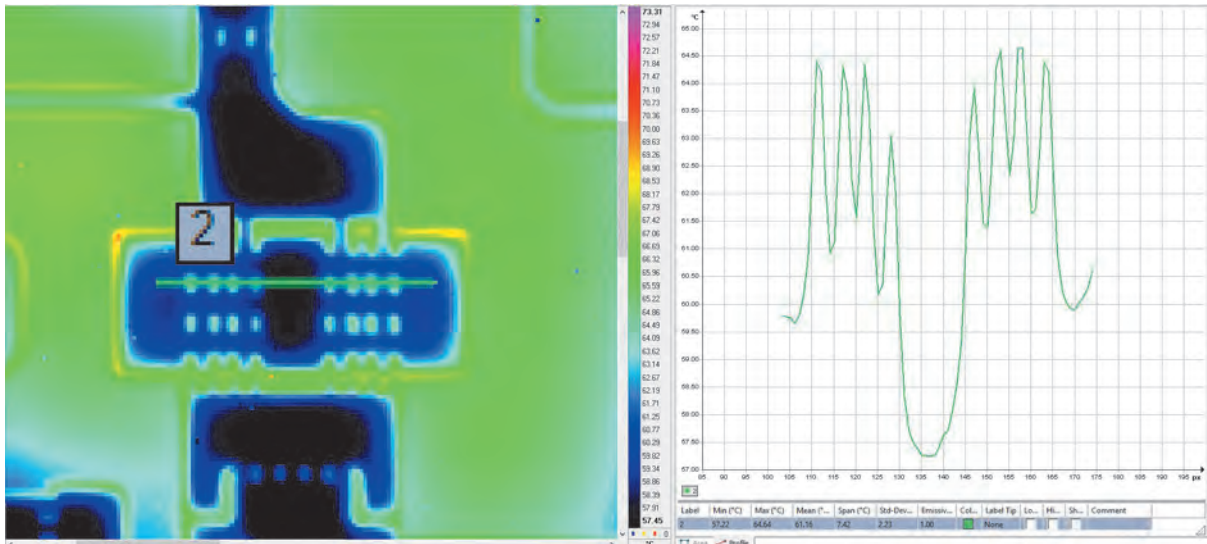


Рис. 5. Изображение области транзистора с ИК-камеры SC5700 и температурный профиль транзистора вдоль линии, показанной на изображении

и имеет при выходной мощности 10 Вт потребляемую мощность 30 Вт. Транзистор первого каскада состоит из двух секций, каждая из которых содержит десять параллельно соединенных транзисторов с шириной затвора 150 мкм. Общая ширина затворов транзистора первого каскада составляет 3000 мкм. Второй каскад состоит из одной секции параллельно соединенных транзисторов с общей шириной затворов 8400 мкм (56×150).

Как уже отмечалось выше, в кристаллах мощных СВЧ ИМС распределение выделяемой тепловой мощности по площади кристалла существенно неравномерно. Как правило, основным местом нагрева являются области выходных транзисторов. Так, в кристалле рассматриваемого усилителя мощности на 10 Вт основным источником нагрева (более 70%) является выходной транзистор, занимающий площадь всего 150×2000 мкм², что составляет менее 2,2% площади кристалла. Огромная мощность в малом объеме приводит к перегреву активной области канала транзистора и деградации его параметров.

Предварительные оценки показывают, что при такой потребляемой мощности даже при идеальном теплоотводе, т. е. только за счет внутреннего теплового сопротивления, температура на поверхности кристалла в области транзисторов будет превышать окружающую более чем на 90 °С. Чтобы избежать перегрева транзисторов, используют импульсный режим работы микросхемы со скважностью по источнику питания 5–20%. Таким образом, средняя выделяемая мощность уменьшается в пять и более раз.

Экспериментальные и расчетные значения температуры кристалла в области расположения выходного транзистора, полученные при температуре окружающей среды 23 °С, длительности импульсов питания 25 мкс и скважности 5%, показаны на рис. 6.

Тепловая картина области транзистора выходного каскада и температурный профиль вдоль линии тока, перпендикулярной затворам, показаны на рис. 7. Разница температур центральной части транзистора и его крайних областей достигала 7–8 °С, а температура областей канала превышала температуру областей истока и стока на 4–5 °С.

Полная мощность P_{tot} , рассеиваемая кристаллом и преобразуемая в тепло, определяется выражением

$$P_{tot} = P_{in} + I_{dd}U_{dd} - P_{out}, \quad (1)$$

где P_{in} , P_{out} — входная и выходная мощность соответственно, $I_{dd}U_{dd} = P_{vdd}$ — мощность, отдаваемая источником питания.

Экспериментальные исследования показали, что выходная мощность радиочастотного сигнала зависит от температуры

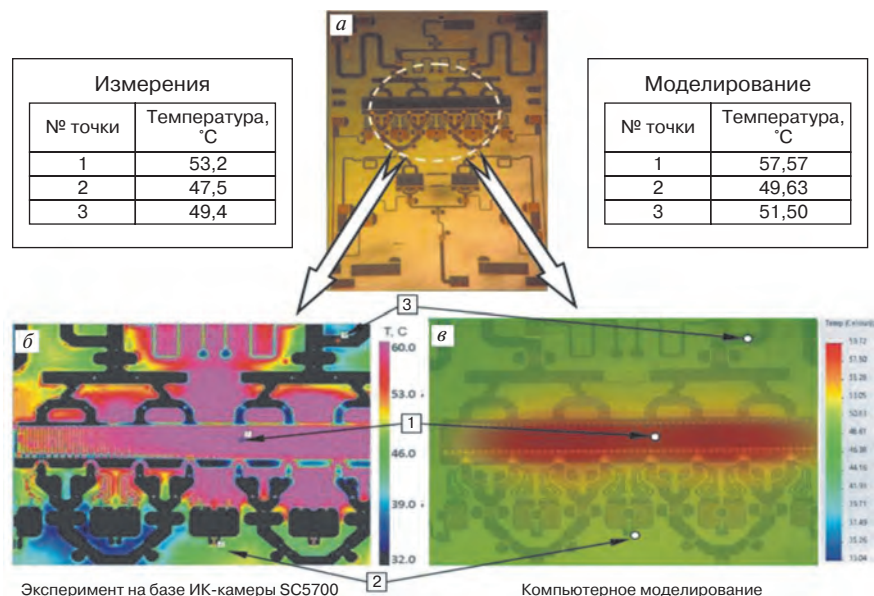


Рис. 6. Исследование растекания тепла на кристалле СВЧ-усилителя мощности (скважность 10%, температура среды 23 °С): а) кристалл усилителя мощности фирмы TRANSCOM, б) экспериментальные исследования на базе ИК-камеры SC5700, в) компьютерное

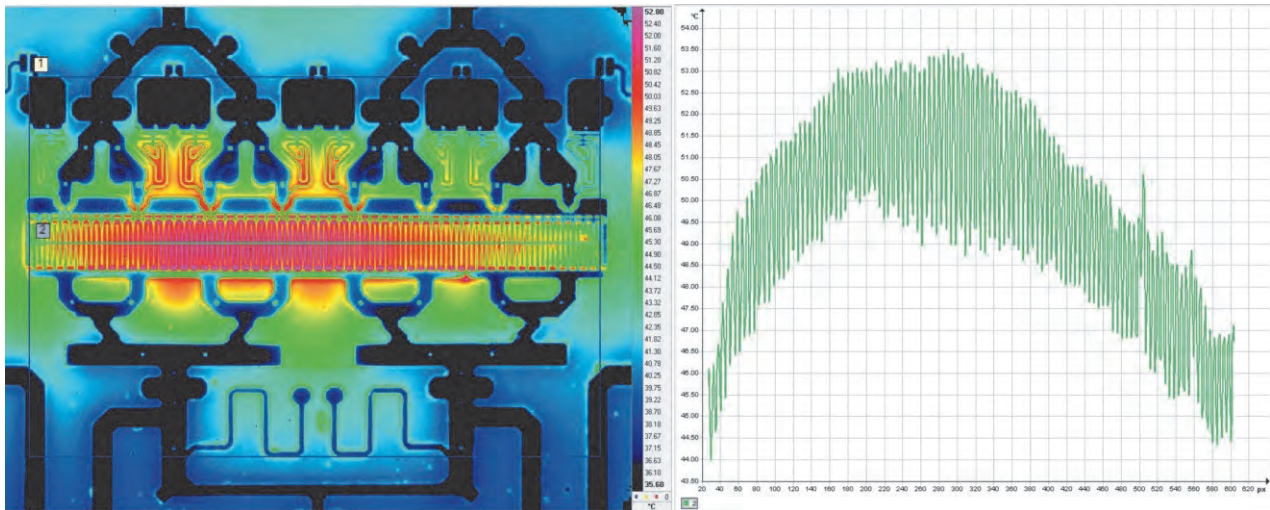


Рис. 7. Температурный профиль транзистора выходного каскада

транзисторов выходного каскада, которая является функцией скважности и длительности импульсов питания. Зависимости выходной мощности и температуры кристалла в области выходного транзистора от скважности импульсов питания приведены на рис. 8.

Из представленных зависимостей видно, что при изменении скважности от 5 до 15% температура выходного транзистора увеличивается более чем на 30 °С, а выходная мощность уменьшается на 20%.

Как отмечалось выше, особенностью теплового режима работы микросхемы при импульсном источнике питания является зависимость максимальной температуры кристалла от длительности импульса питания при постоянной скважности, когда средняя тепловая мощность, выделяемая микросхемой, остается постоянной. При достаточно длинных импульсах, т. е. при низких частотах импульсов питания, область транзистора также может сильно перегреваться. Оценить изменения температуры во время импульса можно следующим образом. Рассмотрим область нагрева на кристалле и ограничим ее изотермической поверхностью, проходящей по границе раздела кристалл — верхний слой платы. Распределение температуры в сечении микросборки, проходящем через плату и кристалл в области выходного транзистора, показано на рис. 9.

Учитывая, что источником тепла является тонкий слой на поверхности кристалла, определяем тепловое сопротивление выделенной области:

$$R_T = \frac{(T_1 - T_2)}{P}, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 — температуры на поверхности кристалла и на границе раздела кристалл — плата соответственно, P — тепловая мощность в непрерывном режиме, т. е. при постоянно включенном источнике питания. Тогда температура в выделенной области на поверхности кристалла, являющейся функцией длительности импульса t , определяется из выражения

$$T = T_0 + P_{MAX} R_T (1 - \exp^{-t/\tau}), \quad (3)$$

здесь T_0 — температура на поверхности кристалла в области транзистора, определяемая по результатам моделирования в непрерывном режиме при выделяемой тепловой мощности $P = K P_{MAX}$, где K — коэффициент скважности, равный 0,05–0,2; P_{MAX} — максимальное значение мощности, т. е. мощность, выделяемая транзистором во время действия импульса питания; τ — постоянная времени, рассчитываемая по формуле

$$\tau = C_T R_T, \quad (4)$$

где C_T — теплоемкость выделенной области, определяемая из выражения

$$C_T = V C_y \rho, \quad (5)$$

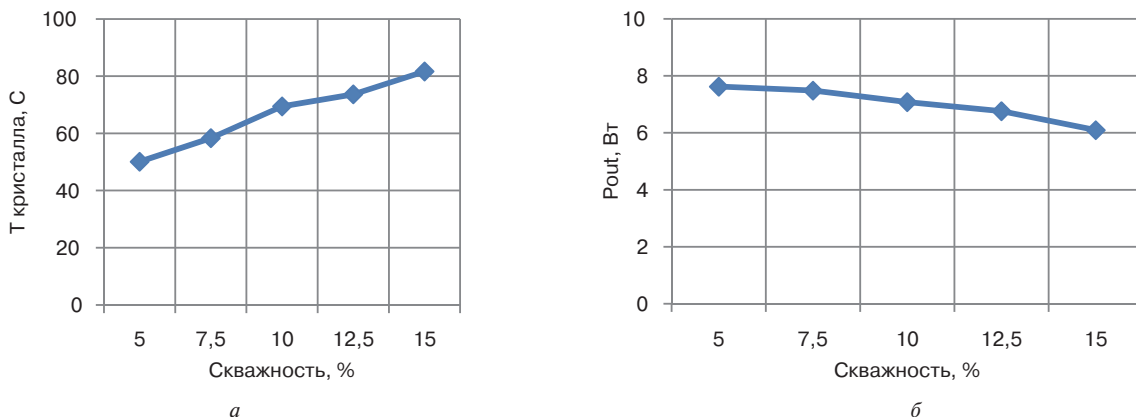


Рис. 8. Зависимость температуры транзистора а) и выходной мощности б) от скважности импульсов питания при длительности 25 мкс. Параметры входного СВЧ-сигнала: частота 10,0 ГГц, входная мощность +23,0 дБм

здесь V — объем выделенной области, C_y — удельная теплоемкость материала, а ρ — плотность материала.

Выражение для температуры транзистора, приведенное выше, будет справедливо для длительностей импульса питания, существенно меньших постоянной времени τ . Для длинного импульса после включения источника питания температура перехода приближается к значению, соответствующему непрерывному режиму:

$$T = T_{\text{СРЕД}} + P_{\text{МАХ}} R_T, \quad (6)$$

здесь $T_{\text{СРЕД}}$ — температура окружающей среды.

Для короткого импульса тепловая инерция будет поддерживать температуру перехода приблизительно постоянной: $T = T_0$. Изменение температуры транзистора за время действия импульса питания определяется выражением

$$\Delta T = P_{\text{МАХ}} R_T (1 - \exp^{-t/\tau}). \quad (7)$$

Максимальное значение для ΔT соответствует непрерывному режиму и равно $P_{\text{МАХ}} R_T$.

Рассчитаем постоянную времени для выходного транзистора исследуемого усилителя мощности, изготовленного на основе арсенида галлия. Тепловое сопротивление, определенное по результатам моделирования, составляет 4,31 К/Вт (см. рис. 5). Объем области транзистора, ограниченной выбранной изотермической поверхностью, имеющей форму усеченной пирамиды (рис. 10), составляет $(S_1 + S_2)d/2$, здесь S_1, S_2 — площади оснований пирамиды изотермической области транзистора, равные соответственно 600000 мкм² и 420000 мкм², d — толщина кристалла, равная 76 мкм. Отсюда получаем величину объема выделенной области — 0,039 мм³. Удельная теплоемкость GaAs равна 0,35 Дж/г·К, а плотность — 5,316 г/см³, следовательно, теплоемкость выделенной области $C_T = 7,3 \cdot 10^{-5}$ Дж/К, а постоянная времени $\tau = C_T R_T = 315 \cdot 10^{-6}$ с или 315 мкс.

Изменение температуры выходного транзистора от длительности импульса питания для разных значений выделяемой тепловой мощности приведено на рис. 11. Величина тепловой мощности транзистора определялась следующим образом. Проводилось измерение общей мощности, потребляемой микросхемой, которая распределялась между транзисторами усилителя пропорционально ширине затворов. Из полученной мощности для выходного транзистора вычиталась выходная мощность СВЧ-сигнала, отдаваемая во внешнюю нагрузку.

При совместном использовании экспериментальных результатов (рис. 9) и зависимостей изменения температуры ΔT выходного транзистора от длительности импульса питания, полученных по результатам моделирования и аналитических расчетов (рис. 12), построены зависимости выходной мощности от длительности импульса питания для разных значений скважности (рис. 12).

Форма импульса источника питания (длительность импульса 150 мкс) и форма радиоимпульса на выходе усилителя мощности ($F = 10$ ГГц) показаны на рис. 13.

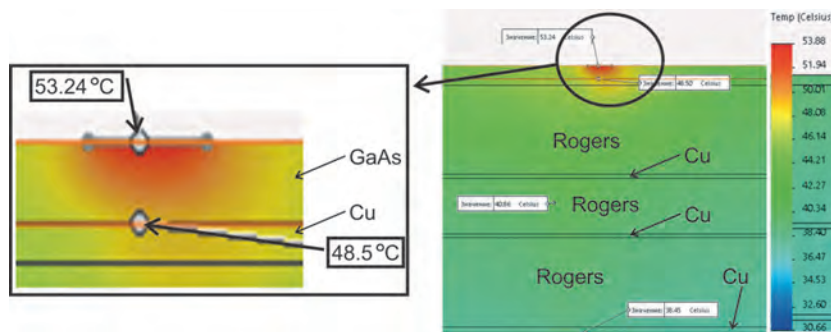


Рис. 9. Распределение температуры в сечении микросборки, проходящем через плату и кристалл в области выходного транзистора для непрерывного режима при $P = 1,1$ Вт (соответствует скважности 5%)

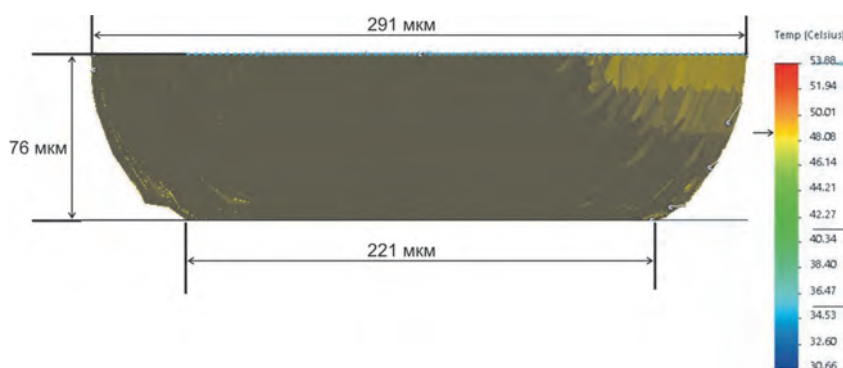


Рис. 10. Поперечное сечение области выходного транзистора, ограниченной изотермической поверхностью 48,5°C

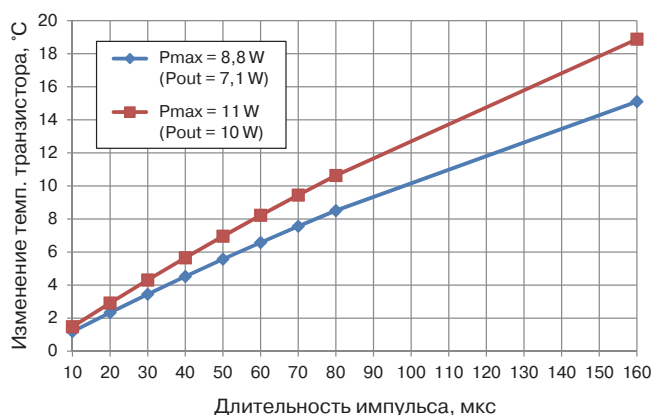


Рис. 11. Зависимость изменения температуры ΔT выходного транзистора от длительности импульса питания для различных значений выделяемой тепловой мощности

На осциллограмме можно видеть уменьшение амплитуды выходного сигнала при постоянной величине напряжения источника питания, что связано с ростом температуры транзистора. Изменение длительности импульса с 25 мкс до 150 мкс приводит к снижению выходной мощности примерно на 8–10%.

Результаты анализа тепловых режимов СВЧ ИМС модуля АФАР X-диапазона, полученные на основе экспериментальных данных и моделирования при температуре окружающей среды 23°C и естественной конвекции, представлены в табл. 3. Здесь приведены самые горячие элементы ИМС и их температура для используемого конструктивного исполнения. Также приведены результаты перегрева за счет внутреннего теплового



Таблица 3. Результаты анализа тепловых режимов СВЧ ИМС T/R модуля X-диапазона

Тип ИМС	Потребляемая мощность, мВт	Горячий элемент				
		Тип элемента	Потр. мощность, мВт	Максимальная температура, °С	Внутреннее тепловое сопр., К/Вт	Максимальный перегрев, °С
МШУ	110	Выходной транзистор	55	31	36,0	2
Core chip	1400	Транзистор АМР2-2	395,5	67	52,8	21
УМ	2190*	Выходной транзистор	8800	70	4,31	7
ИТОГО : 3700						

* При импульсах питания длительностью 25 мкс, скважности 10% и выходной мощности 7,1 Вт.

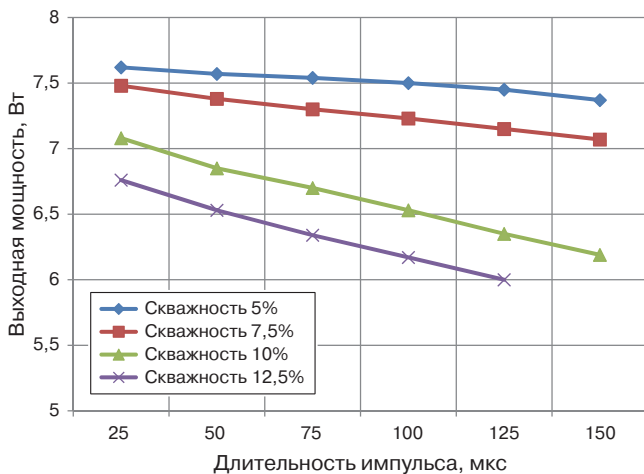


Рис. 12. Зависимость выходной мощности от длительности импульса питания для разных значений скважности. Параметры входного СВЧ-сигнала: частота 10,0 ГГц, входная мощность +23,0 дБм

сопротивления. Они составляют: МШУ — 2°С, Core Chip — 21°С, УМ — 7°С, т.е. при одинаковых температурах теплоотвода кристалл устройства управления будет иметь более высокую максимальную температуру.

ВЫВОДЫ

Экспериментально и на основе компьютерного моделирования проведены исследования тепловых режимов СВЧ ИМС X-диапазона для модуля АФАР, изготовленного по технологии GaAs.

Определены внутренние тепловые сопротивления транзисторных структур и максимальные температуры на поверхности кристалла каждой ИМС. Максимальный перегрев, обусловленный внутренним тепловым сопротивлением, составляет для МШУ — 2°С, Core Chip — 21°С, усилителя мощности — 7°С. При одинаковых температурах теплоотвода для каждой ИМС кристалл устройства управления будет иметь более высокую температуру.

Для усилителя мощности приведены зависимости максимальной температуры на кристалле и выходной мощности от скважности импульсов питания. Изменение скважности от 5% до 15% приводит к увеличению температуры кристалла на 30°С и снижению выходной мощности на 20%.

Определены зависимости максимальной температуры на кристалле и выходной мощности усилителя от длительности

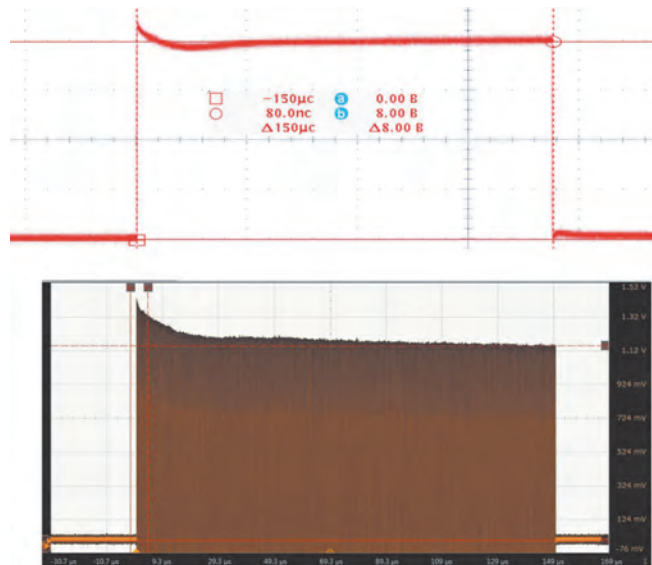


Рис. 13. Форма импульса источника питания (длительность импульса 150 мкс): а) форма радиоимпульса на выходе усилителя мощности ($F = 10$ ГГц), б) параметры входного СВЧ-сигнала: частота 10,0 ГГц, входная мощность +23,0 дБм, аттенуатор на выходе усилителя 25,5 дБ

импульсов питания при постоянной скважности. Показано, что увеличение длительности импульса питания с 25 мкс до 150 мкс приводит к дополнительному перегреву кристалла и снижению выходной мощности на 8–10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Timoshenkov V., Efimov A. *Multi-Channel Receiving Module of Multi Beam C-Band Active Phased Array Antenna* // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017. P. 227–230, DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910534.
2. Prejs A., Wood S., Pengelly R., Pribble W. *Thermal Analysis and its application to High Power GaN HEMT Amplifiers* // IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2009.
3. Rui Ma. *Reliable RF Power Amplifier Design Based on a Partitioning Design Approach* // Kassel, University., Dissertation, Germany 2009. P. 130.
4. Anderson W. T., Mittereder J. A. *Life Testing and Failure Analysis of PHEMT MMICs* // Proc. of GaAs Reliability Workshop, 2000, November 5, 2000. P. 45–52.