

УДК 621.382.029

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ВЫХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНАВ. А. Сергеев^{1,2}, Р. Г. Тарасов³, А. М. Ходаков¹¹ Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова д.48/2² Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32³ АО «НПП «Завод Искра», 432030, Ульяновск, пр-т Нариманова, д. 75

Статья поступила в редакцию 29 августа 2019 г.

Аннотация. Представлены результаты теплового 3D-моделирования в программной среде Comsol Multiphysics и расчета температурных полей субмодуля выходного усилителя мощности (ВУМ) приемо-передающего модуля (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР) X-диапазона, содержащего две монолитных интегральных схемы GaAs СВЧ-усилителей с тремя каскадами усиления. Расчет распределения температуры на поверхности МИС и на поверхности монтажной пластины вдоль оси X, проходящей по центру третьего каскада усиления МИС, показал, что тепловая связь между кристаллами МИС в составе ВУМ рассматриваемой конструкции слабая и для оценки тепловых параметров МИС можно использовать одномерное приближение с учетом расширения теплового потока. Оценки значений тепловых сопротивлений слоев конструкции субмодуля в этом приближении показали, что основной вклад (более 60%) в полное тепловое сопротивление МИС вносит слой материала контактного соединения (адгезива). Предложен способ определения теплового сопротивления переход-корпус МИС в составе ВУМ по результатам измерения температуры МИС при двух уровнях рассеиваемой ВУМ мощности.

Ключевые слова приемо-передающий модуль АФАР, субмодуль выходного усилителя мощности, GaAs СВЧ-усилитель, монолитные интегральные схемы, тепловое моделирование, температурные поля, тепловые параметры, измерение.

Abstract. The results of thermal 3D modeling in the software Comsol Multiphysics and calculation of temperature fields of the submodule of the output power amplifier

(OPA) of the transmitting-receiving module (TRM) of the X-band active phased antenna array APAA, which contains two monolithic integrated circuits of GaAs microwave amplifiers with three amplification stages, are presented. The calculation of the temperature distribution on the surface of the MIC and on the surface of the mounting plate along the x-axis passing through the center of the third stage of the MIC amplification showed that the thermal connection between the MIC crystals as part of the MIC of the structure under consideration is weak and one-dimensional approximation can be used to estimate the thermal parameters of the MIC taking into account the expansion of the heat flux. Estimates of the thermal resistances of the submodule construction layers in this approximation have shown that a layer of contact bond material (adhesive) contributes primarily (more than 60%) to the full thermal resistances of the MIC. A method is proposed for determining thermal resistance of a transition-housing of an MIC as part of a OPA based on the results of measuring temperature of the MIC at two levels of power dissipated by the OPA.

Keywords: APAA transceiver module, submodule of output power amplifier, GaAs microwave amplifier, monolithic integrated circuits, thermal modeling, temperature fields, thermal parameters, measurement.

Введение

Основной элементной базой современных submodule выходных усилителей мощности (ВУМ) приемно-передающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР) являются монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ-усилителей мощности на кристаллах GaAs [1,2]. Для получения необходимой выходной мощности в ВУМ обычно используют суммирование СВЧ-мощности двух и более МИС. Коэффициент полезного действия (к.п.д.) современных ВУМ, как правило, не превышает 20-25%, и выделяющаяся в МИС мощность приводит к их существенному нагреву. При этом температура активной области МИС определяется как качеством отвода тепла, так и распределением рассеиваемой ВУМ мощности между МИС, которое в свою очередь определяется качеством СВЧ-тракта ВУМ. Таким образом, разница температур МИС может служить информативным параметром о качестве монтажа submodule ВУМ.

Тепловые модели и тепловые режимы работы ВУМ ППМ АФАР рассматривались во многих работах [3–5]. Однако оценок тепловой связи между МИС и отдельных компонент полного теплового сопротивления МИС в составе конструкции ВУМ не проводилось, и способов экспериментального определения тепловых параметров МИС в составе ВУМ при неизвестном распределении между МИС полной рассеиваемой ВУМ мощности не предлагалось.

Моделирование тепловых режимов МИС ВУМ

Внешний вид рассмотренного в настоящей работе submodule ВУМ АФАР X-диапазона представлен на рис. 1.

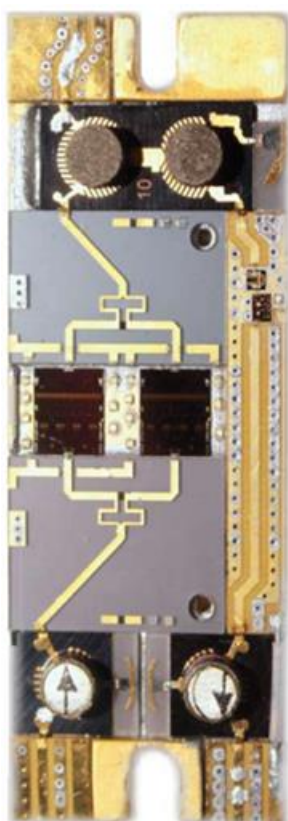


Рис. 1. Внешний вид submodule ВУМ ППМ АФАР X-диапазона с двумя параллельно включенными МИС.

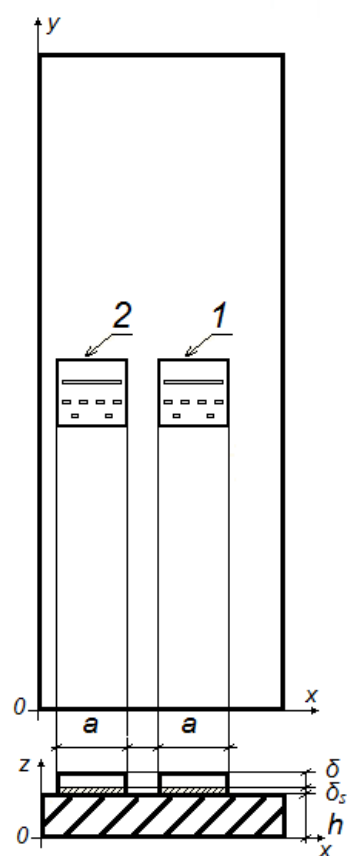


Рис. 2. Геометрия тепловая модели ВУМ ППМ АФАР: 1, 2– МИС с расположением источников тепла на поверхности кристалла.

В номинальном режиме выходная импульсная мощность данного ВУМ составляет 15 Вт при длительности радиоимпульсов 10 мкс и скважности $Q = 5$ [6]. Мощность, рассеиваемая МИС ВУМ, определяется как разность между мощностью, потребляемой от источника питания, и мощностью, выделяющейся в

нагрузке. При к.п.д. ВУМ, равном 20%, импульсная мощность, рассеиваемая МИС ВУМ, равна 60 Вт, а средняя за период следования радиоимпульсов – 12 Вт. При равномерном распределении мощности между МИС, каждая МИС рассеивает по 6 Вт средней мощности. Мощностью рассеиваемой другими элементами ВУМ можно пренебречь.

Геометрия тепловой модели ВУМ представлена на рисунке 2 в виде двух одинаковых прямоугольных GaAs кристаллов МИС со сторонами размером $b \times a$ и толщиной δ , закрепленных на медной теплоотводящей пластине толщиной h с помощью слоя адгезива толщиной δ_s и с коэффициентом теплопроводности λ_s ; размеры кристалла МИС $b \times a \times \delta = 4,29 \times 4,94 \times 0,1$ мм; размеры монтажной пластины $17 \times 46 \times 5,5$ мм. Положение усилительных каскадов и активных элементов (транзисторов), являющихся основными источниками тепла, на поверхности кристалла МИС аналогично рассмотренному в [3,4] и показано на рис. 2, причем полная мощность, рассеиваемая МИС, распределена между усилительными каскадами МИС в пропорции $P_{a1} : P_{a2} : P_{a3} = 1 : 2 : 12$.

Математическое описание модели состоит в общем случае из нестационарного уравнения теплопроводности:

$$\nabla(\lambda_i(T_i)\nabla T_i(x, y, z, t)) = c_i(T_i)\rho_i(T_i)\frac{\partial T_i(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ_i , c_i , ρ_i – коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности материала i -го элемента (слоя) конструкции ВУМ соответственно.

Начальные условия:

$$T_i(x, y, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

На верхней поверхности кристалла МИС заданы тепловые потоки

$$-\lambda_j(T)\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=z_0} = \begin{cases} P_{ak} / S_k, & (x, y) \in S_k \\ 0, & (x, y) \in (S_0 - S_k) \end{cases}, \quad j = 1, 2; \quad (3)$$

на нижней поверхности монтажной пластины задана постоянная температура:

$$T_3(x, y, 0, t) = T_0, \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды; k – номер теплового источника в каскадах усиления МИС; S_0, S_k – площади верхней поверхности кристалла и k -го теплового источника; j – номер МИС.

Условие 4 означает, что на нижней поверхности пластины обеспечивается идеальный теплоотвод. Потоки тепла с внешних поверхностей кристалла МИС и монтажной пластины отсутствуют. В областях контактов слоев с разными теплофизическими параметрами задаются стандартные условия сопряжения.

Расчет температурных полей проводился в программной среде Comsol Multiphysics с заданным распределением источников тепла в активной области МИС с учетом температурной зависимости теплофизических параметров материалов [7,8]. Значения теплофизических параметров GaAs и меди и их температурные зависимости брались из библиотеки Comsol Multiphysics и [9]. Толщина слоя адгезива принималась равной 15 мкм, а коэффициент теплопроводности адгезива $\lambda_s = 3,0$ Вт/К·м.

Картина температурного поля в стационарном тепловом режиме при полной рассеиваемой ВУМ мощности 12 Вт и равномерном распределении рассеиваемой мощности между МИС приведена на рис. 3, а распределение температуры по поверхности кристалла МИС – на рис. 4.

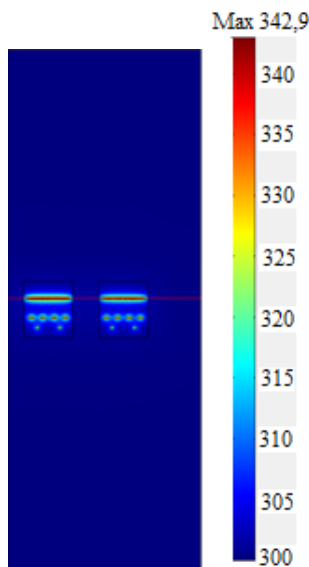


Рис. 3. Картина температурного поля на поверхности ВУМ.

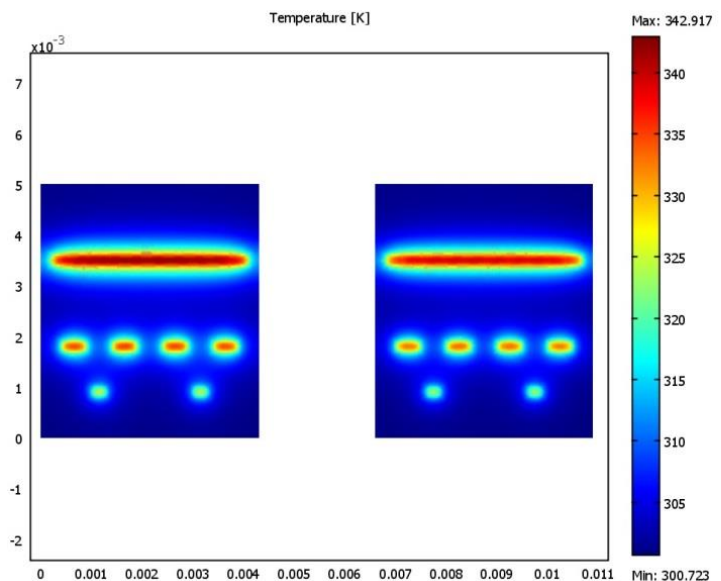


Рис. 4. Картина температурного поля на поверхности МИС ВУМ.

Как видно из рисунка, наиболее нагретыми являются СВЧ-транзисторы усилительных каскадов и прилегающие области кристалла, тогда как температура на краях кристалла близка к температуре окружающей среды.

Выходной каскад МИС №2 нагревается заметно (на 3 °С) сильнее, чем каскад МИС №1 в результате краевого ограничения теплового потока МИС №2 из-за несимметричного расположения МИС на монтажной пластине. Распределение температуры на поверхности МИС вдоль оси x, проходящей по центру третьего каскада усиления МИС показано на рисунке 5. Неровный (зубчатый) профиль температуры на поверхности МИС объясняется разбиением слоев модели на конечные элементы.

На рисунке 6 приведено распределение температуры поверхности монтажной пластины вдоль оси x под третьим каскадом (то есть, в самых нагретых точках монтажной пластины).

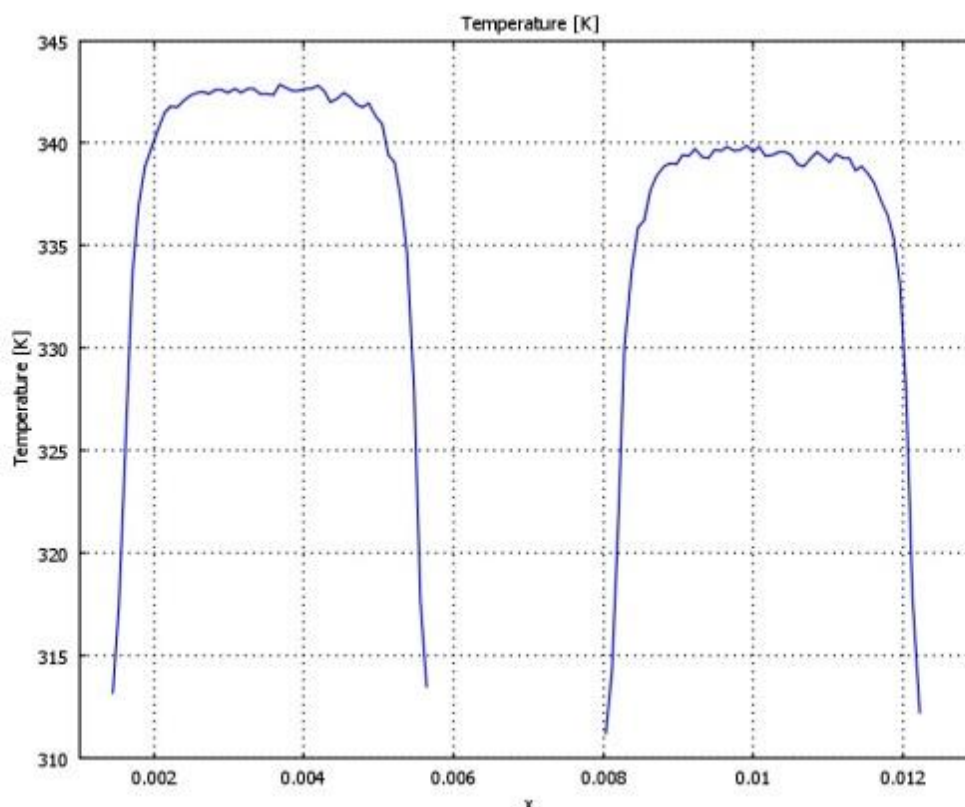


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности МИС вдоль оси x, проходящей по центру третьего каскада усиления МИС.

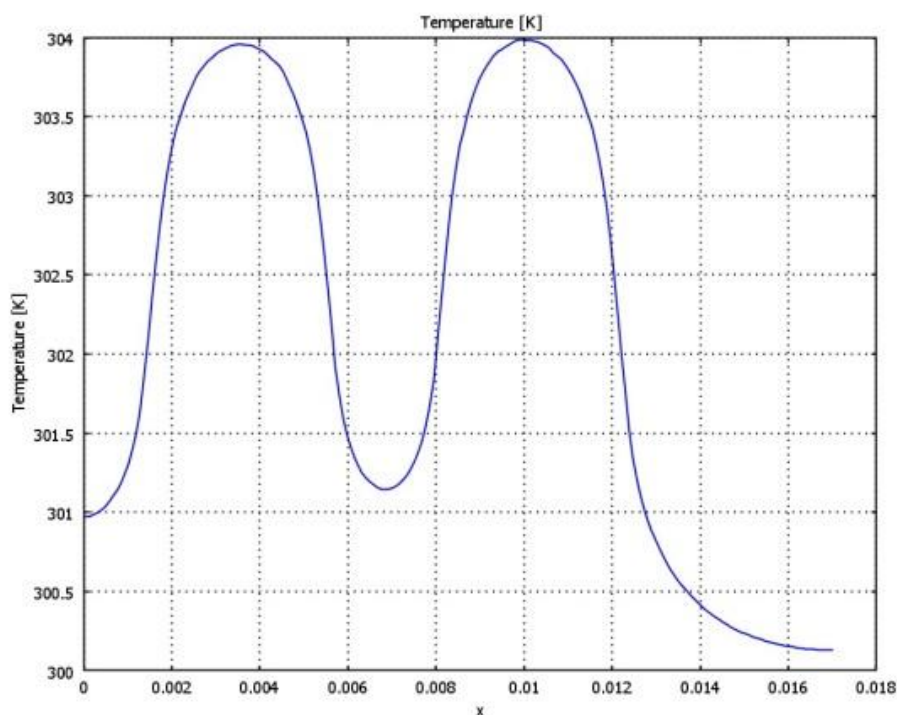


Рис. 6. Распределение температуры на верхней поверхности монтажной пластины вдоль оси x под третьим каскадом усиления МИС.

Приращение температуры верхней поверхности монтажной пластины в самой нагретой точке не превышает 4°C . Важным является тот факт, что тепловая связь между МИС очень слабая; температура перегрева монтажной пластины в точках посредине между МИС чуть больше 1°C , тогда как перегрев активной области МИС составляет более 40°C .

Для проверки результатов моделирования с помощью инфракрасного (ИК) датчика температуры MLX90614-DCI были измерены температуры перегрева МИС в номинальном режиме, то есть при средней рассеиваемой ВУМ мощности 12 Вт. Результаты измерений показали хорошее соответствие с расчетными значениями с учетом погрешности калибровки ИК-датчика: температура поверхности МИС №1 оказалась равной 41°C , а МИС №2 – 45°C .

Поскольку тепловой связью между МИС в данном submodule ВУМ можно пренебречь, то эквивалентная тепловая схема такого submodule в представлении Фостера по аналогии с [10] будет иметь вид двух параллельно соединенных RC-звеньев, соответствующих кристаллам МИС со слоем адгезива, и одного RC-звена, соответствующего передаче тепла от верхней поверхности монтажной

пластины в окружающую среду (рис. 7). Тепловые сопротивления $\tau_{Tn-kj} = R_{Tn-kj} C_{Tn-kj}$ переход-корпус МИС при этом равны сумме тепловых сопротивлений кристалла и адгезива, теплоемкость $\tau_{Tn-kj} = R_{Tn-kj} C_{Tn-kj}$ переход-корпус – эффективную суммарную теплоемкость указанных слоев конструкции ВУМ поскольку удельные теплоемкости GaAs и адгезива примерно одинаковы. Тепловое сопротивление $\tau_{Tk-c} = R_{Tk-c} C_{Tk-c}$ и теплоемкость $\tau_{Tk-c} = R_{Tk-c} C_{Tk-c}$ корпус-среда ВУМ в рассматриваемом приближении равны тепловому сопротивлению и теплоемкости пластины с учетом эффективной площади теплового потока

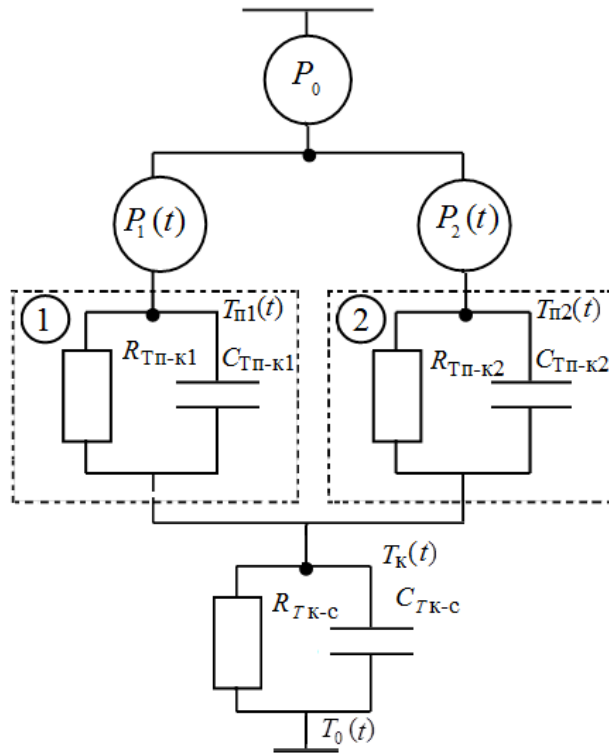


Рис. 7. Эквивалентная тепловая схема ВУМ в представлении Фостера.

Изменение температуры активной области (рабочей поверхности) кристалла МИС при подаче на ВУМ мощности P_0 в момент времени $t=0$ будет описываться выражениями:

$$\Delta T_{n1}(t) = P_1 R_{Tn-k1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Tn-k1}}\right) \right) + P_0 R_{Tk-c} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Tk-c}}\right) \right); \quad (5)$$

$$\Delta T_{n2}(t) = P_2 R_{Tn-k2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Tn-k2}}\right) \right) + P_0 R_{Tk-c} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Tk-c}}\right) \right), \quad (6)$$

где $\Delta T_{nj}(t) = T_{nj}(t) - T_0$, $T_{nj}(t)$ – температура перехода j -й МИС; T_0 – температура окружающей среды; P_j – мощность, рассеиваемая j -й МИС, при этом $P_2 + P_1 = P_0$; $\tau_{Tn-kj} = R_{Tn-kj} C_{Tn-kj}$ – тепловая постоянная времени переход-корпус j -й МИС; $\tau_{Tk-c} = R_{Tk-c} C_{Tk-c}$ – тепловая постоянная времени корпус-среда ВУМ, причем для рассмотренной конструкции ВУМ выполняется условие $\tau_{Tk-c} \gg \tau_{Tn-k}$.

Согласно одномерной модели при условии, что тепло распространяется в одном направлении от рабочей поверхности кристалла МИС к основанию монтажной пластины, тепловое сопротивление i -го слоя конструкции можно рассчитать по формуле $R_{Ti} = d_i / S_i \cdot \lambda_i$, где d_i , λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности материала i -го слоя конструкции, S_i – эффективная площадь теплового потока, на поверхности МИС равная площади источников тепла. Источники тепла в рассматриваемых МИС занимают примерно 4% общей площади кристалла, равной 21 мм². Тепловое сопротивление кристалла при коэффициенте теплопроводности GaAs 55 Вт/м·К и толщине кристалла 100 мкм равно 2,2 К/Вт. Тепловое сопротивление слоя адгезива с учетом увеличения площади теплового потока в 1,5 раза составляет 3,8 К/Вт, тепловое сопротивление медной пластины толщиной 5,5 мм и коэффициенте теплопроводности 400 Вт/м·К с учетом расширения площади теплового потока до 21 мм² равно 0,60 К/Вт. Результаты расчета приведены в таблице.

Таблица.

Расчет компонент R_{Ti} полного теплового сопротивления МИС и температуры перегрева ΔT_i слоев конструкции ВУМ в номинальном режиме при $P_1 = P_2 = 6$ Вт

Параметр	Слой конструкции ВУМ			Полное значение (Σ)
	Кристалл	Адгезив	Пластина	
R_{Ti} , К/Вт	2,2	3,8	0,60	6,6
ΔT_i , °С	13,2	22,8	7,2	43,2

Приведенные оценки дают значение температуры активной области МИС 43,2 °С и довольно хорошее совпадение с расчетом по 3D модели. Заметим, что основной вклад в тепловое сопротивление вносит слой адгезива из-за его малой теплопроводности. Это накладывает жесткие условия на качество нанесения

этого слоя и контроль его толщины, поскольку увеличение толщины слоя адгезива всего на 5 мкм приведет к увеличению полного теплового сопротивления и температуры перегрева кристалла МИС на 20%.

Способ измерения тепловых параметров МИС в составе ВУМ

Для измерения тепловых параметров МИС в составе ВУМ не применимы стандартные и известные способы [11-13] измерения тепловых параметров полупроводниковых изделий (ППИ) в составе электронных модулей с возможностью независимого задания электрического режима каждого ППИ по отдельности, поскольку МИС в составе ВУМ гальванически связаны и мощности, рассеиваемые МИС, не могут быть определены отдельно. Задача состоит в обеспечении возможности измерения тепловых параметров кристаллов гальванически связанных МИС в составе ВУМ оценка распределения рассеиваемой мощности между МИС при невозможности отдельного измерения мощности, потребляемой каждой МИС в отдельности.

В [14] предложен способ контроля тепловых параметров гальванически связанных ППИ в составе электронных модулей по результатам измерения температуры при двух уровнях полной рассеиваемой мощности. Рассмотрим этот способ с учетом указанных выше особенностей конструкции ВУМ. Как уже отмечалось, полная электрическая мощность P_0 , поглощаемая ВУМ, распределяется между МИС в общем случае неравномерно; мощности P_1 и P_2 , рассеиваемые каждым отдельным кристаллом МИС, определяются качеством СВЧ-тракта и в общем случае неизвестны. При равномерном распределении очевидно $P_1=P_2=P_0/2$; при неравномерном распределении – рассеиваемые МИС мощности можно записать через относительное отклонение δ мощности от равновесного распределения:

$$\begin{aligned} P_1 &= (P_0/2)(1 + \delta); \\ P_2 &= (P_0/2)(1 - \delta). \end{aligned} \quad (7)$$

Измерив температуры МИС через время t равное $3-5 \tau_{Tn-k}$ после подачи на ВУМ ступеньки греющей мощности уровня P_0 , пока температура $T_k(t)$ верхней поверхности монтажной пластины остается практически неизменной, получим

два уравнения $P_j R_{Tn-kj} = \Delta T_j$. Очевидно, что двух уравнений недостаточно для нахождения трех неизвестных. Однако, если задать режим работы ВУМ с другим значением рассеиваемой мощности, например путем изменения (в допустимых пределах) напряжения питания или скважности радиоимпульсов, и вновь измерить температуру МИС, можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} P_{11} R_{Tn-\kappa 1} = \Delta T_{11}, \\ (P_{01} - P_{11}) R_{Tn-\kappa 2} = \Delta T_{21}, \\ P_{12} R_{Tn-\kappa 1} = \Delta T_{12}, \\ (P_{02} - P_{12}) R_{Tn-\kappa 2} = \Delta T_{22}, \end{cases} \quad (8)$$

где $P_{01,2}$ – полная мощность в первом и втором режимах работы ВУМ соответственно; $\Delta T_{jk} = (T_{jk} - T_0)$ – приращение температуры j -й МИС в k -м режиме P_{jk} – мощность, рассеиваемая j -й МИС в k -м режиме.

В качестве критерия качества монтажа МИС можно использовать отношение тепловых сопротивлений $R_{Tn-\kappa 2} / R_{Tn-\kappa 1}$ кристаллов, для которого из решения системы (4) нетрудно получить следующее выражение:

$$R_{Tn-\kappa 2} / R_{Tn-\kappa 1} = \frac{b \Delta T_{12} - \Delta T_{22}}{\Delta T_{21} - b \Delta T_{11}} = q, \quad (9)$$

где $b = P_{02} / P_{01}$ – отношение полных мощностей, рассеиваемых ВУМ во втором и первом режимах работы, соответственно.

В качестве критерия оценки качества СВЧ-тракта ВУМ можно использовать отношение мощностей, рассеиваемых МИС в первом (номинальном) режиме:

$$\frac{P_{11}}{P_{21}} = \frac{\Delta T_{11}}{\Delta T_{21}} \frac{b \Delta T_{21} - \Delta T_{22}}{\Delta T_{12} - b \Delta T_{11}} = k. \quad (10)$$

Из соотношений (4) и (5) не сложно получить выражения для абсолютных значений тепловых сопротивлений переход-корпус. Из (10) с учетом (7) получим относительное отклонение δ_1 от равномерного распределения мощностей в первом режиме:

$$\delta_1 = \frac{k-1}{k+1}, \quad (11)$$

и, соответственно

$$R_{Tn-\kappa 1} = \frac{2\Delta T_{11}}{P_{01}(1+\delta_1)}, \quad (12a)$$

$$R_{Tn-\kappa 2} = \frac{2\Delta T_{21}}{P_{01}(1-\delta_1)} = \frac{R_{Tn-\kappa 1}}{q}, \quad (12б)$$

Для упрощения вычислений и снижения погрешностей отношение полных мощностей, рассеиваемых ВУМ, удобнее выбрать, равным целому числу, например 2. Для ВУМ ППМ АФАР это легко реализуется, например, путем изменения скважности следования радиоимпульсов.

Универсальным для всех вариантов ВУМ является измерение температуры кристаллов МИС с помощью инфракрасной камеры или ИК-радиометра. Заметим, что в этом случае не требуется знать точное значение коэффициента излучательной способности поверхности кристаллов МИС, поскольку все искомые параметры определяются только отношениями приращений температур, и коэффициенты излучательной способности будут сокращаться.

Выводы

Путем численного моделирования в программной среде Comsol Multyphysics получены распределения температуры по поверхности элементов конструкции ВУМ. Результаты измерения температуры поверхности МИС с помощью ИК-датчика в номинальном режиме показали хорошее соответствие с результатами моделирования. Показано, что тепловая связь между МИС в составе ВУМ рассматриваемой конструкции мала и для оценки тепловых параметров МИС можно использовать эквивалентную тепловую схему в представлении Фостера. Численные оценки параметров тепловой схемы показали, что основной вклад в тепловое сопротивление МИС вносит слой адгезива. Даже небольшой в 15-20% разброс толщины адгезива приведет к разнице температур активной области МИС в номинальном режиме работы в 5–6 °С, что в свою очередь может приводить к снижению выходной мощности и ускоренной деградации ВУМ.

Причиной различия температур нагрева МИС могут быть не только

дефекты монтажа МИС, но и неравномерное распределение между МИС мощности, рассеиваемой submodule ВУМ, из-за дефектов СВЧ-трактов. Для комплексного контроля качества сборки ВУМ предложен способ определения тепловых сопротивлений переход-корпус МИС и распределения рассеиваемой мощности между МИС по результатам измерения температуры МИС в начале нагрева при подаче на ВУМ греющей мощности различного уровня.

Литература

1. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2012. № 7. С. 60–73.
2. Красников Г.Я., Волосов А.В., Котляров Е.Ю. Приемо-передающий submodule X-диапазона частот. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2016. № 3. С. 23-29.
3. Коломейцев В. А., Езопов А.В., Семенов А.Э. Тепловой режим выходного усилителя мощности приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки. // Антенны. 2012. № 8 (183). С. 15–19.
4. Коломейцев В. А., Езопов А.В. Разработка метода контроля температуры выходного усилителя мощности приемо-передающего модуля активной фазированной антенной решетки. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 1 (52), вып. 1. С. 149–153.
5. Сергеев В. А., Ходвов А.М., Тарасов Р.Г. Моделирование нестационарных тепловых процессов в выходных усилителях мощности модулей АФАР // Сборник научных трудов международной конференции «Математические методы и модели: теория, приложения и роль в образовании». Ульяновск: УГТУ, 2016. С. 133–137.
6. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. Выборочные распределения submodule выходных усилителей мощности АФАР X-диапазона по энергетическим параметрам // Известия вузов. Электроника. 2018. № 1. С. 93–98.
7. Сергеев В. А., Ходаков А.М. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых изделий. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 184 с.

8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. : Наука, 1964. 487 с.
9. NSM Archive – Physical Properties of Semiconductors [электронный ресурс]. URL: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>
10. Сергеев, В. А. Анализ тепловых режимов мощных светодиодов в составе светодиодных излучателей // Известия вузов. Электроника. 2013. №1. С. 85–87.
11. ОСТ 11 0944-96 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. М.: ГНПП «Пульсар», 1997.
12. ГОСТ 19656.15-84 Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления. М.: Издательство стандартов, 1984.
13. Laurent Dupont, Yvan Avenas, and Pierre-Olivier Jeannin Comparison of Junction Temperature Evaluations in a Power IGBT Module Using an IR Camera and Three Thermosensitive Electrical Parameters // IEEE Transaction on Industrial Applications. 2013. Vol. 49, № 4. P. 1599–1608.
14. Сергеев В.А., Смирнов В.И., Тарасов Р.Г. Проблемы и возможности диагностики качества электронных модулей по тепловым характеристикам // Автоматизация процессов управления. 2017. № 4 (50). С. 108–116.

Для цитирования:

В. А. Сергеев, Р. Г. Тарасов, А. М. Ходаков. Расчет и измерение тепловых параметров монолитных интегральных схем СВЧ-усилителей в составе выходных усилителей мощности X-диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.9.1