

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.013

Термодеформационная модель субмодуля выходного усилителя мощности X-диапазона

¹Ходаков А.М., ^{1,2}Тарасов Р.Г., ^{1,3}Сергеев В.А., ^{1,2}Куликов А.А.

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

²НПП «Завод Искра», <http://www.zavod-iskra.ru/>

Ульяновск, 432030, Российская Федерация

³Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: ln23al@yandex.ru, zavod@npp-iskra.ru, sva@ulstu.ru, kulikovaa36@yandex.ru

Поступила 18.02.2021, рецензирована 26.02.2021, принята 09.03.2021

Аннотация. Представлены результаты 3D-моделирования в программной среде Comsol Multiphysics и расчета температурных и термодеформационных полей кристаллов GaAs монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ усилителей в составе субмодуля выходного усилителя мощности (ВУМ) X-диапазона и их контактных соединений с подложкой в импульсных режимах работы с различной скважностью. Показано, что максимальная температура и термомеханические напряжения в кристалле МИС в динамическом режиме работы существенно превышают расчетные значения для стационарного режима и сильно зависят от скважности импульсов рассеиваемой МИС мощности. Термомеханические напряжения принимают максимальное значение в некоторой узкой области вблизи границы клеевого соединения кристалла МИС с монтажной пластиной; это максимальное значение сильно зависит от температурного коэффициента расширения (ТКР) адгезива и принимает наименьшее значение при ТКР адгезива, равном ТКР кристалла GaAs.

Ключевые слова: термодеформации, СВЧ усилитель, скважность импульса

УДК 621.382.029

Благодарности: Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, номер проекта 18-47-730024.

Для цитирования: Ходаков А.М., Тарасов Р.Г., Сергеев В.А., Куликов А.А.

Термодеформационная модель субмодуля выходного усилителя мощности X-диапазона.

РЭНСИТ, 2021, 13(1):13-18. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.013.

Thermal deformation model of the submodule of the X-band output power amplifier

Alexander M. Hodakov, Ruslan G. Tarasov, Vyacheslav A. Sergeev, Alexander A. Kulikov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>

Ulyanovsk 432071, Russian Federation

E-mail: ln23al@yandex.ru, zavod@npp-iskra.ru, sva@ulstu.ru, kulikovaa36@yandex.ru

Received February 18, 2021, peer-reviewed 26 February, 2021, accepted 09 March, 2021

Abstract. The results of 3D modeling in the Comsol Multiphysics software environment and calculation of temperature and thermal deformation fields of GaAs crystals of monolithic integrated circuits (MIC) of microwave amplifiers as part of the submodule of the X-band output power amplifier (OPA) and their contact connections with the substrate in pulse modes of operation with different duty cycles are presented. It is shown that the maximum temperature and thermomechanical stresses in the MIC crystal in the dynamic mode of operation significantly exceed the calculated values for the stationary mode and strongly depend on the pulse duty cycle of the power dissipated by the MIS. Thermomechanical stresses take the maximum value in some narrow region near the boundary of the adhesive connection of the MIC crystal with the mounting plate; this maximum value strongly depends on the temperature coefficient of expansion (TCE) of the adhesive and takes the lowest value when the TCE of the adhesive is equal to the TCE of the GaAs crystal.

Keywords: thermal deformation, a microwave amplifier, the duty cycle of the pulse.

UDC 621.382.029

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task and was supported by the Russian Foundation for Basic Research and Government of Ulyanovsk region (RFBR project No. 18-47-730024)..

For citation: Alexander M. Khodakov, Ruslan G. Tarasov, Vyacheslav A. Sergeev, Alexander A. Kulikov. Thermal deformation model of the submodule of the X-band output power amplifier. *RENSIT*, 2021, 13(1):13-18. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.013.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (14)
2. ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СУБМОДУЛЯ ВЫХОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ (15)
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (17)

ЛИТЕРАТУРА (17)

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной элементной базой современных submodule выходных усилителей мощности (ВУМ) приемопередающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР) являются полупроводниковые монолитные интегральные схемы СВЧ-усилителей мощности на кристаллах GaAs или GaN [1,2]. Для получения необходимой выходной мощности в ВУМ обычно используют суммирование СВЧ-мощности двух и более МИС. Коэффициент полезного действия современных ВУМ, как правило, не

превышает 20-25%, и выделяющаяся в МИС мощность приводит к их существенному нагреву. Неоднородный нагрев МИС и различие в температурных коэффициентах материала контактного соединения и кристалла МИС приводят к большим термомеханическим напряжениям в области контактного соединения МИС с подложкой. Усилия разработчиков направлены на снижение перегрева МИС в процессе работы, однако снижение средней температуры подложки не снимает проблемы локального динамического перегрева МИС в импульсных режимах работы. Тепловые модели и тепловые режимы работы ВУМ X-диапазона рассматривались во многих работах [3-5]. Однако оценок термомеханических напряжений, возникающих в кристаллах МИС и в области их контактных соединений с подложкой в импульсных режимах работы, в литературе не

приводилось. Вместе с тем, эти термодформации являются одной из основных причин повышения теплового сопротивления контактного соединения в результате накопления микротрещин [6] и постепенных (деградационных) отказов ВУМ.

2. ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СУБМОДУЛЯ ВУМ

В качестве объекта исследования в настоящей работе принят субмодуль ВУМ X-диапазона, тепловая модель которого рассмотрена нами в работе [7]. 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 **Рис. 1** в виде двух одинаковых прямоугольных GaAs

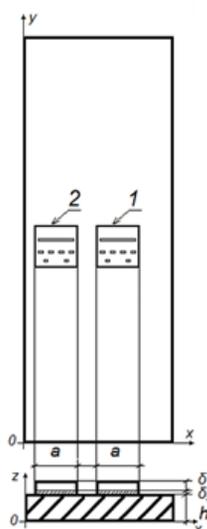


Рис. 1. Геометрия модели ВУМ: 1, 2 – МИС с расположением источников тепла на поверхности кристалла.

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. Для расчета и анализа термодформационных процессов в субмодуле ВУМ в его математическую тепловую модель к нестационарному уравнению теплопроводности добавлено уравнение термоупругости [8]:

$$\mu_i \nabla^2 \bar{u}_i + (\lambda_i + \mu_i) \nabla (\nabla \bar{u}_i) - (3\lambda_i + 2\mu_i) \alpha_i \nabla (T_i - T_0) = 0, \quad i = 1, \dots, 5, \quad (1)$$

где $\bar{u}_i(x, y, z, t)$ – деформационное перемещение элементов структуры ВУМ; T_0 – температура окружающей среды; $\lambda_i = \frac{v_i E_i}{(1+v_i)(1-2v_i)}$, $\mu_i = \frac{E_i}{2(1+v_i)}$ – коэффициенты Ламе; E_i , v_i , α_i – модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения материалов структуры; $\nabla = \nabla(x, y, z)$. Все внешние поверхности элементов структуры ВУМ считаются свободными.

Численное решение модельной задачи находилось методом конечных элементов с использованием программной среды *COMSOL Multiphysics*. Значения механических характеристик GaAs и меди брались из библиотеки *Comsol Multiphysics*. Для базового расчетного варианта в качестве адгезива был выбран серебросодержащий эпоксидный клей ХН9960-1 фирмы NAMICS, толщиной $\delta_s = 15$ мкм с температурным коэффициентом расширения (ТКР) $\alpha = 29e-6 \cdot K^{-1}$ и остальными механическими

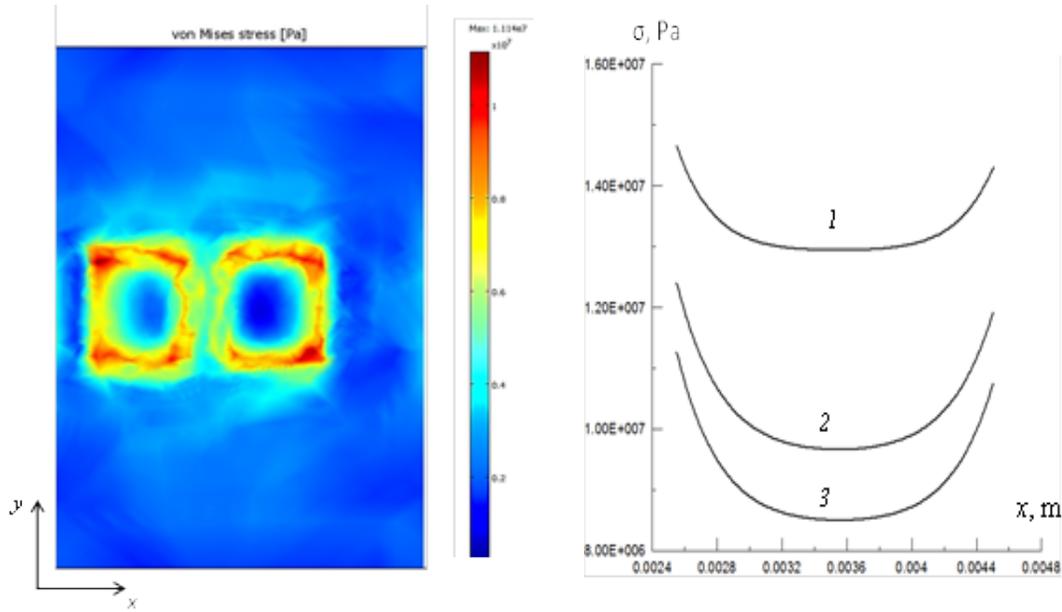


Рис. 2. Распределение механического напряжения в области клеевого соединения; α : 1 – $3e-6 \cdot K^{-1}$, 2 – $29e-6 \cdot K^{-1}$, 3 – $9e-6 \cdot K^{-1}$; $W = 6 \text{ Вт}$.

и теплофизическими характеристиками, которые находились из технической спецификации клея [9]. Критическая температура кристалла GaAs составляет $= 460 \text{ К}$. Предел прочности на сдвиг кристалла для данного типа клея $\sigma_c = 13 \text{ МПа}$.

Как показали расчетные исследования, максимальное значение механического напряжения в структуре концентрируется в небольшой критической области на краю клеевого соединения кристалла МИС с монтажной пластиной (рис. 2).

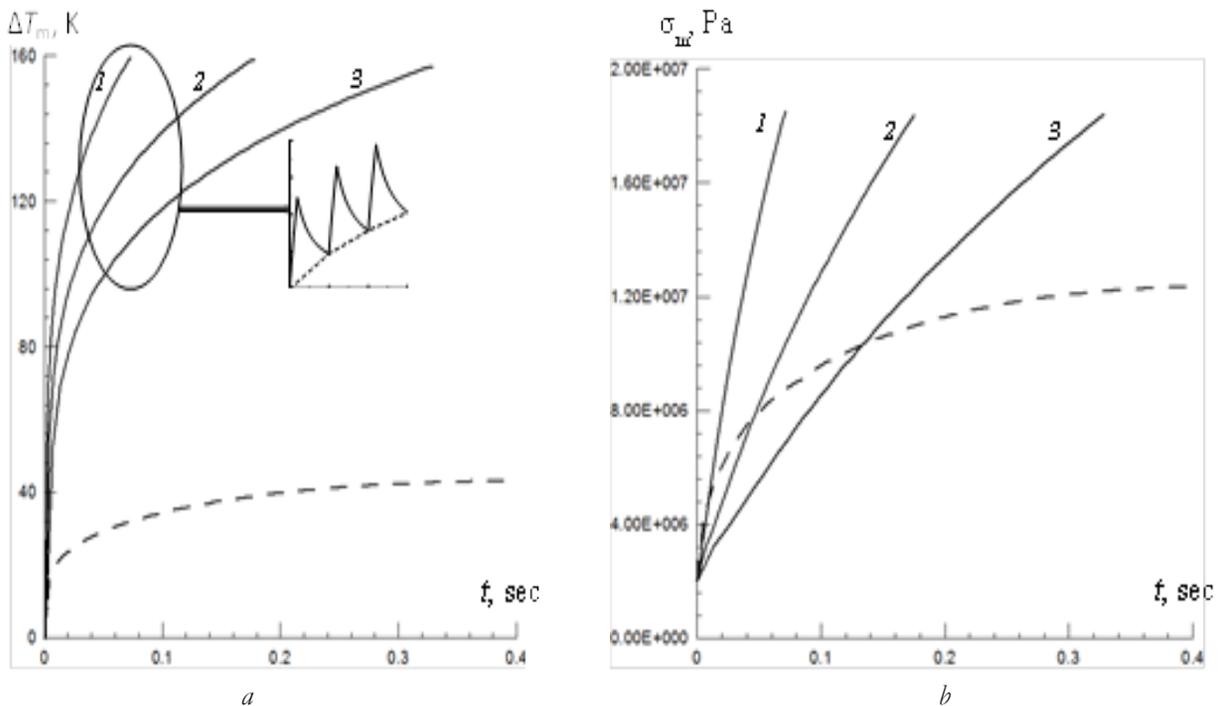


Рис. 3. Кинетика температуры перегрева центра верхней поверхности кристалла МИС (a) и максимального механического напряжения клеевого соединения (b); длительность импульсов $\tau = 10 \text{ мкс}$; скважность Q : 1 – 2, 2 – 5, 3 – 10; $T_c = 460 \text{ К}$.

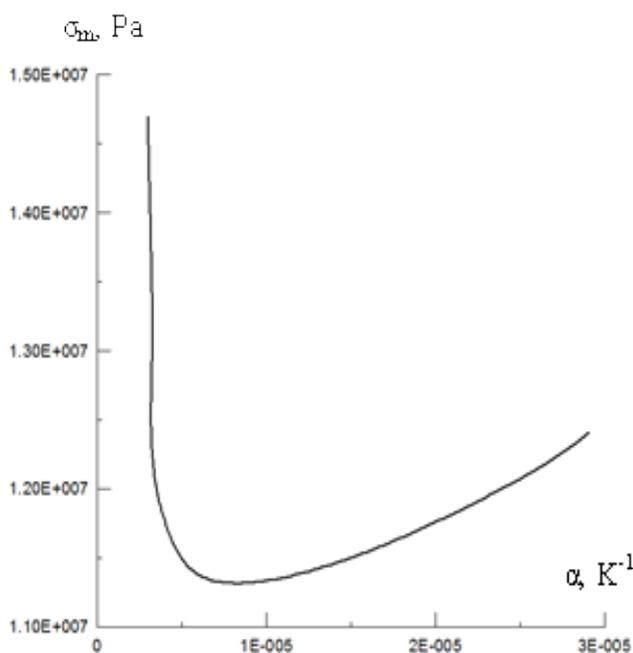


Рис. 4. Зависимость максимального механического напряжения от температурного коэффициента расширения при $W = 6$ Вт.

Временные зависимости температуры перегрева центра верхней поверхности кристалла МИС и максимального механического напряжения в критической области на краю клеевого соединения кристалла с монтажной пластиной, показаны на **Рис. 3**. Штриховая линия соответствует поведению температуры при рассеивании каждой МИС по 6 Вт средней мощности за период, а сплошными линиями – 30 Вт импульсной мощности, с длительностью импульсов $\tau = 10$ мкс и скважностью Q , изменяющейся в диапазоне $Q = 2 \div 10$. Максимальная температура и механическое напряжение в динамическом режиме (при $Q \sim 10$) достигают предельных значений буквально за десятые доли секунды.

Расчеты максимального термомеханического напряжения, действующего в критической области на краю клеевого соединения для нескольких марок используемых для монтажа

кристаллов электропроводящих клеев [9–11], с ТКР изменяющегося в пределах $\alpha = (3 \div 30) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, показали, что расчетная кривая имеет минимум при равенстве ТКР клея и кристалла GaAs (**рис. 4**).

Даже при небольшом уменьшении ТКР клея по сравнению с ТКР GaAs максимальное напряжение в критической области контактного соединения резко возрастает, что необходимо учитывать при выборе материала контактного соединения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование тепловых и термомеханических процессов в субмодуле ВУМ показало, что максимальная температура и термомеханические напряжения в кристалле МИС и в контактном соединении с подложкой в динамическом режиме работы существенно превышают расчетные значения для стационарного режима и сильно зависят от скважности импульсов рассеиваемой МИС мощности. Максимальные значения термомеханических напряжений в области паяного соединения кристалла МИС с монтажной пластиной принимаются в некоторой узкой области вблизи границы кристалла МИС. Максимального механического напряжения сильно зависит от ТКР клея и принимает наименьшее значение при равенстве ТКР клея и кристалла GaAs.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vikulov I. Monolithic Microwave ICs the Technology Basis of AESA. *Electronics: Science, Technology, Business Journal*, 2012, 7:60-73.

2. Krasnikov GIa, Volosov AV, Kotliarov EI. X-Band Transmit/Receive Module. Electronics. Series 3. *Microelectronics*, 2016, 3:23-29.
 3. Kolomeytsev VA, Ezopov AV, Semenov AE. Thermal state of output power amplifier of receiving and transmitting module of active phased antenna array. *Antennas*, 2012, 8(183):15-19.
 4. Сергеев ВА, Тарасов РГ, Куликов АА. Диагностика качества выходных усилителей мощности приемопередающих модулей АФАР по температурным полям. *Автоматизация процессов управления*, 2019, 1:112-117.
 5. Сергеев ВА, Тарасов РГ. Контроль качества субмодулей выходных усилителей мощности X-диапазона по переходным тепловым характеристикам. *Автоматизация процессов управления*, 2020, 2:124-129.
 6. Парфенов АН. Введение в теорию прочности паяных соединений. *Технологии в электронной промышленности*, 2008, 2:46-52.
 7. Сергеев ВА, Тарасов РГ, Ходаков АМ. Расчет и измерение тепловых параметров монолитных интегральных схем СВЧ-усилителей в составе выходных усилителей мощности X-диапазона. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*, 2019, 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/1/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2019.8.12.
 8. Боли Б, Уэйнер Дж. *Теория температурных напряжений*. М., Мир, 1964, 520 с.
 9. Серебросодержащий эпоксидный клей ХН9960-1 [электронный ресурс] <https://namics.co.jp>.
 10. Клеи электропроводящие [электронный ресурс] <https://ostec-materials.ru/materials/dlya-proizvodstva-mi/klei-elektroprovodyashchie.php>.
 11. Исаев АЮ, Петрова АП, Лукина НФ. Токопроводящие клеи с разными наполнителями. *Сб. трудов Всерос. конф. по фундаментальным и прикладным исследованиям в области создания клеев, клеевых связующих и клеевых препрегов* (Москва, 2018). М., ФГУП «ВИАМ», с. 14-29.
- Ходаков Александр Михайлович**
к.ф.-м.н., с.н.с.
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
Ульяновский филиал
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071,
Россия
ln23al@yandex.ru
- Тарасов Руслан Геннадьевич**
генеральный директор
НПП «Завод «Искра»
75, пр-т Нариманова, Ульяновск
432030, Россия
zavod@npp-iskra.ru
- Сергеев Вячеслав Андреевич**
д.т.н., профессор, член-корр. РАЕН
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
Ульяновский филиал
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071,
Россия
sva@ulstu.ru
- Куликов Александр Александрович**
к.т.н., ведущий инженер
НПП «Завод «Искра»
75, пр-т Нариманова, Ульяновск
432030, Россия
kulikova36@yandex.ru