

## АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ КОРПУСА ИЗ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА ALSiC ПРИ САМОРАЗОГРЕВЕ МОЩНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

© А. А. Золотарев, К. А. Иванов

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

В статье представлены результаты анализа модуля деформации корпуса, изготовленного из металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния, при монтаже в него мощного полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТБШ) с суммарной шириной затвора 20 мм с учётом саморазогрева. Исследовано влияние материала корпуса внутрисогласованного мощного ПТБШ на модуль деформации закреплённого винтами корпуса с использованием методов математического моделирования. Представлены сравнительные результаты для четырёх материалов корпуса: ALSiC (композит), МД-40, Cu (медь), СМС (Cu-Mo-Cu).

**Ключевые слова:** GaN – нитрид галлия, металломатричный композит, ALSiC, полевой транзистор с барьером Шоттки

**Сведения об авторах:** Золотарев Алексей Алексеевич, аспирант, zolotarev\_aa@pulsarnpp.ru; Иванов Кирилл Андреевич, pulsar@dol.ru

## ANALYSIS OF DEFORMATION OF METAL-MATRIX COMPOSITE ALSiC UNDER SELF-HEATING MICROWAVE POWER FET WITH SCHOTTKY BARRIER

A. A. Zolotarev, K. A. Ivanov

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

An analysis of the modulus of deformation of the case made from a metal-matrix composite based on aluminum and silicon carbide for mounting a microwave power field-effect transistor with a Schottky barrier with a total gate width  $WG=20$  mm is considered with self-heating present. The influence of the internally matching power FET casing material on modulus of deformation of a case fixed by screws has been studied using mathematical modeling methods. Comparative results are presented for the four case materials: ALSiC (composite), MD-40, Cu (copper), CMC (Cu-Mo-Cu).

**Keywords:** GaN – gallium nitride, metal-matrix composite, ALSiC, field-effect transistor with a Schottky barrier

**Data of authors:** Zolotarev Alexey Alekseevich, postgraduate, zolotarev\_aa@pulsarnpp.ru; Ivanov Kirill Andreevich, pulsar@dol.ru

### Введение

В последние годы заметно возрос интерес разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, СВЧ модулей и блоков к изделиям на основе широкозонных полупроводников, таких как нитрид галлия [1, 2]. Его уникальные свойства позволяют создавать

электронные приборы с рекордными значениями удельной мощности, КПД, рабочих напряжений, обладающих повышенной стойкостью к воздействию специальных факторов и допустимым уровням входной мощности [3]. Однако с повышением значения выходной мощности электронных приборов

обостряется задача повышения надёжности таких электронных приборов, защиты их от перегрева и деформации кристалла и корпуса, в котором установлен данный прибор.

Для защиты от деформации при повышенных температурах разработчики современных мощных полупроводниковых приборов применяют новые композиционные материалы, такие как металлматричные композитные материалы на основе алюминия и карбида кремния (AlSiC) [4]. Благодаря современным программным комплексам расчёта физических характеристик материалов существует возможность провести теоретический анализ физических свойств материалов современных электронных приборов.

### Метод измерения

Рассмотрим внешний вид корпуса ПТБШ который представлен на рис. 1.

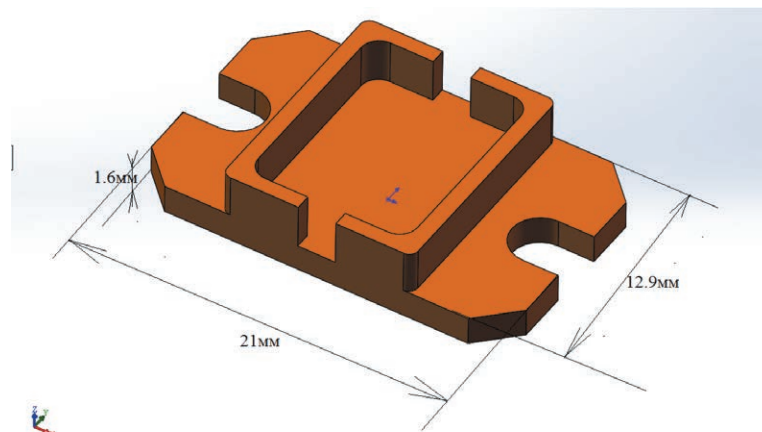


Рис. 1

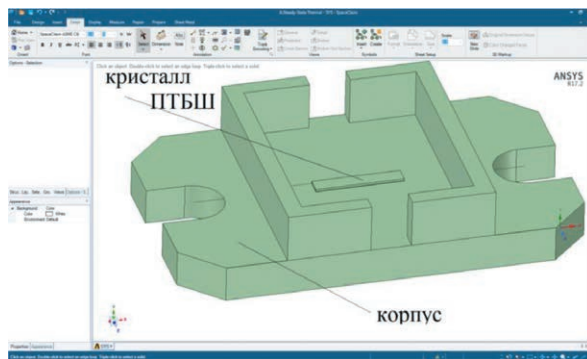
Внешний вид корпуса ПТБШ

В математическом расчёте исследуется влияние материала корпуса на величину деформации закреплённого винтами корпуса при его разогреве посредством монтируемого в него мощного кристалла ПТБШ. В качестве материалов корпуса рассматриваются:

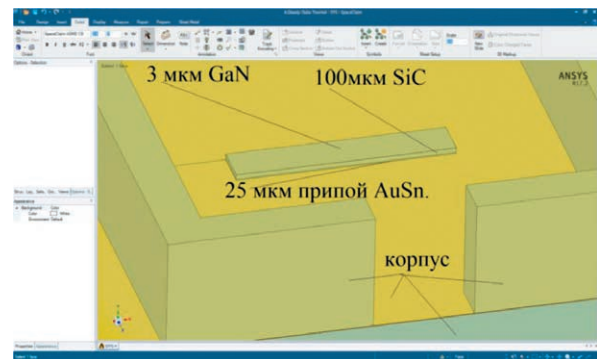
- композиционный материал AlSiC;
- псевдосплав молибден – медь МД40;
- медь;
- Cu-Mo-Cu.

Теплофизические свойства материалов были использованы из источников [5-11].

В центр корпуса золото-оловянным припоем паяется кристалл AlGaN/GaN ПТБШ (рис. 2) В расчёте принято упрощение – тепловой поток задаётся равномерно на всей верхней поверхности слоя GaN кристалла ПТБШ площадью 0,82x4,56 мм.



(а)



(б)

Рис. 2

Геометрия расчётной модели: а) общий вид сборки кристаллы и корпуса; б) расположение кристалла в корпусе

Это упрощение необходимо для сокращения времени расчёта. Так как система уравнений термоупругости существенно нелинейна, и для её решения применяется метод Ньютона, необходимо как можно больше сократить число ячеек сетки. Иначе расчёт нелинейной системы займёт много времени. Потребление ОЗУ во время счёта на fine сетке, при принятой упрощённой постановке задачи, составляет около 4 Гб.

Параметры тепловой модели кристалла ПТБШ приведены в табл. 1. Модель состоит из 3 слоёв различных материалов (AuSn, SiC, GaN). Внешний вид модели кристалла ПТБШ приведён на рис. 2б.

Свойства материалов взяты из [8].

Помимо тепловых параметров материала, представленных в табл. 1, в расчёте термоупругости участвуют также следующие прочностные параметры:

- коэффициент Пуассона;
- модуль Юнга;
- коэффициент линейного теплового расширения.

Эти параметры прочности материала задаются для каждого из трёх слоёв модели кристалла ПТБШ, а также для корпуса.

ПТБШ, по условию задачи, работает в непрерывном режиме с мощностью тепловыделения  $P_{diss} = 133$  Вт (PAE = 35 %, gain = 10,5 dB,  $P_{out} = 80$  Вт). Тепловая мощность вычисляется по следующей формуле:

$$P_{diss} = P_{in} - P_{out} + P_{dc} = \frac{P_{out}}{gain} - P_{out} + \frac{P_{out} - \frac{P_{out}}{gain}}{PAE}. \quad (1)$$

В данной формуле  $P_{in}$  – входная СВЧ мощность,  $P_{out}$  – выходная СВЧ мощность, gain =  $P_{out}/P_{in}$  – коэффициент усиления по мощности,  $P_{dc} = I_{тока} * U_{тока}$  – мощность питания, PAE =  $(P_{out} - P_{in})/P_{dc}$  – КПД в относительных единицах.

Поскольку теплофизические свойства материалов используются с учётом температурной зависимости, то имеет смысл рассмотреть и меньшие значения тепловой мощности  $P_{diss} = 56$  Вт (режим работы без СВЧ сигнала при  $V_d = 28$  В,  $I_{тока} = 2$  А), а также  $P_{diss} = 79,3$  Вт (режим  $V_d = 28$  В,  $I_d = 5,92$  А,  $P_{out} = 49,6$  Вт,  $d_{Bm} = 91,2$  Вт,  $P_{in} = 4,74$  Вт, gain = 12,8 dB = 19,2 раза).

На основании корпуса расположен идеальный теплоотвод (термостабильная поверхность) с температурой +83 °С.

Введём декартову прямоугольную систему координат. Рассмотрим какую-либо точку твёрдого тела. До деформации она имела координаты  $x_1=x$ ,  $x_2=y$ ,  $x_3=z$ . Пусть после деформации она стала иметь координаты  $xi$ . Смещение точки при деформации обозначим вектором  $ui = xi - xi$ . Вектор  $u$  называют вектором деформации (или вектором смещения).

Симметричный тензор деформации в линейном приближении имеет вид:

Таблица 1

Теплофизические параметры модели кристалла GaN ПТБШ

Материал слоя	Толщина слоя, мкм	Теплопроводности материала при 300К, K300 Вт/(м*К)	Показатель степени в формуле для теплопроводности K300·(T/300) <sup>α</sup>	Удельная теплоёмкость при постоянном давлении умноженная на плотность, Дж/(м <sup>3</sup> *К)
GaN	3	130	-0,43	700*6150
SiC	100	370 перпендикулярно плоскости, (470    плоскости)	-1,49	820*3210
AuSn	25	57	0 (const)	143*14510
Корпус ПТБШ				

$$\varepsilon_{ik} = 1/2(\partial u_i/\partial x_k + \partial u_k/\partial x_i). \quad (2)$$

Он выражает изменение элемента длины при деформации [5].

В недеформированном теле расположение молекул соответствует состоянию его теплового равновесия. При этом все его части находятся друг с другом и в механическом равновесии. Это значит, что если выделить внутри тела какой-нибудь объём, то равнодействующая всех сил, действующих на этот объём со стороны других частей, равна нулю. При деформировании же расположение молекул меняется и тело выводится из состояния равновесия, в котором оно находилось первоначально. В результате в нём возникают силы, стремящиеся вернуть тело в состояние равновесия. Эти возникающие при деформировании внутренние силы называются внутренними напряжениями. С внутренними напряжениями связывается симметричный тензор напряжений  $\sigma$ . Если тело не деформировано, то внутренние напряжения в нём отсутствуют.

В случае объёмного моделирования тела связь тензоров деформации и напряжения, а также поля температуры имеет вид (уравнения Коши и Пуассона 20-ые года XIX века):

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{11} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \\ \sigma_{12} &= 2\mu\varepsilon_{12}; \\ \sigma_{22} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{22} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \\ \sigma_{23} &= 2\mu\varepsilon_{23}; \\ \sigma_{33} &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{33} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \\ \sigma_{31} &= 2\mu\varepsilon_{31}; \\ (\theta &= \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon$  – симметричный тензор деформации,  $\sigma$  – симметричный тензор напряжения.

Если тело находится в поле тяжести, то должна исчезать сумма сил внутренних напряжений и силы тяжести  $\rho g$ , действующей на единицу объёма тела ( $\rho$  – плотность). В этом случае уравнения равновесия принимают вид:

$$\partial\sigma_{ik}/\partial x_k + \rho g_i = 0. \quad (4)$$

Это уравнения равновесия Навье (Клод-Луи Мари-Анри Навье Claude-Louis-Marie-Henri Navier (1785-1836)). Таким образом имеем систему трёх уравнений с шестью неизвестными:

$$\begin{cases} \partial\sigma_{11}/\partial x + \partial\sigma_{12}/\partial y + \partial\sigma_{13}/\partial z + \rho g_x = 0; \\ \partial\sigma_{21}/\partial x + \partial\sigma_{22}/\partial y + \partial\sigma_{23}/\partial z + \rho g_y = 0; \\ \partial\sigma_{31}/\partial x + \partial\sigma_{32}/\partial y + \partial\sigma_{33}/\partial z + \rho g_z = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для замыкания системы необходимы ещё три уравнения – уравнения совместности деформаций Сен-Венана [5].

Эта система уравнений в частных производных выражает баланс сил межмолекулярного сцепления, температурного линейного расширения и действие силы тяжести на твёрдое тело. Искомыми величинами здесь являются смещения  $u$ . Остальные величины заданы. Здесь  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения,  $T$  – температура.

Модуль Юнга  $E$ :

$$E_1 = E/(1 - \nu^2).$$

Коэффициент Пуассона  $\nu$ :

$$\nu_1 = \nu/(1 - \nu).$$

Коэффициенты Ляме:

$$\begin{aligned} \lambda &= E_\nu/(1 + \nu)(1 - 2\nu) = (E_1 \nu_1)/(1 - \nu_1^2), \\ \mu &= E_1/2(1 + \nu_1). \end{aligned}$$

Поле температур, участвующее в системе уравнений (3), находится из уравнения теплопередачи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} + s_c + s_p T. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $\rho$  – плотность кг/м<sup>3</sup>,  $C_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении

нии Дж/(кг\*К),  $t$  – время с,  $T$  – температура К,  $\lambda(T) = (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$  – ортотропная теплопроводность, возможно зависящая от температуры,  $s$  – объёмная плотность источников тепла Вт/м<sup>3</sup> ( $s_C$  – постоянная составляющая,  $s_p < 0,0$  линеаризованная составляющая при зависимости мощности тепловыделения от температуры).

### Граничные условия для расчёта теплопередачи

На дне корпуса задан идеальный теплоотвод (термостабилизированная поверхность в 83 °С).

На источниках тепла (тепло выделяется с верхней поверхности слоя GaN равномерно) задан тепловой поток по формуле  $P_{diss}/\text{Square}$ .

На остальных границах ставится условие теплоизоляции (однородное условие Неймана или нулевой тепловой поток).

На границах раздела тел (например, граница AuSn припоя с кристаллом из карбида кремния) выполняется равенство температур и тепловых потоков.

### Граничные условия для расчёта прочности

1. На цилиндрических поверхностях, где корпус привинчивается винтами к

держателю, ставится условие фиксированная граница (нулевое смещение  $u=0$ ).

2. Все остальные границы изделия (модели) являются свободными (не зафиксированная граница, однородные условия Неймана для смещения  $u$  по всем трём координатным направлениям).

3. На границах раздела тел (например, граница AuSn припоя с кристаллом из карбида кремния) выполняется условие связанного контакта (//Mechanical User Guide // Setting Connections // Contact // Contact Formulation Theory из руководства программы ANSYS). Моделирование производилось в программном комплексе ANSYS Mechanical.

Контакт между двумя объектами является одним из наиболее часто встречающихся явлений в инженерном анализе. «Связанный контакт» – это особый случай контактного анализа, где предполагается, что две контактные поверхности склеены во время анализа. Пример задания связанного контакта в программном комплексе ANSYS Mechanical, для рассматриваемой в отчёте задачи, приведён на рис. 3.

На рис. 3 показано, что рассматриваемая задача является сборкой из 6 тел: основание корпуса, два бортика корпуса, припой, слой SiC и слой GaN. Контактные поверхности

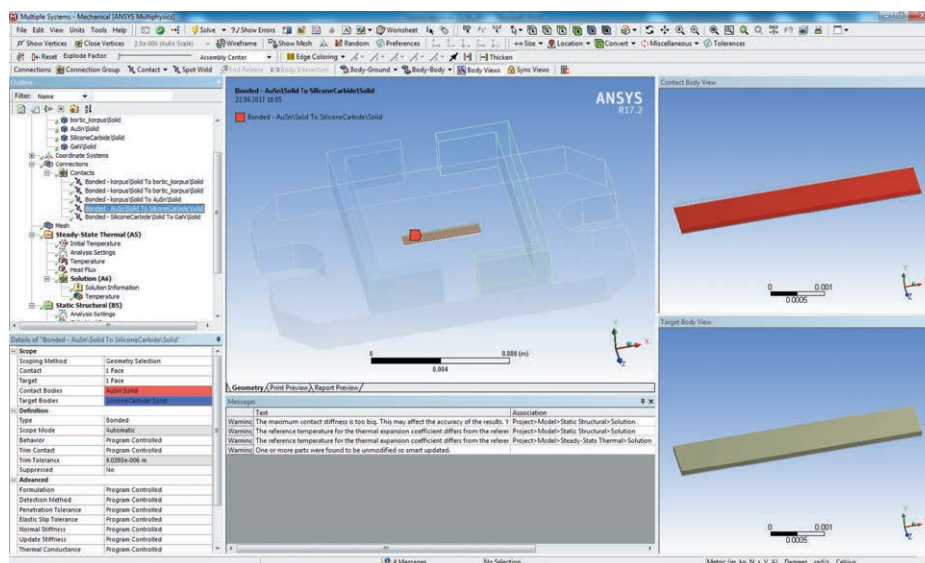


Рис. 3

Пример задания связанного контакта в программном комплексе ANSYS Mechanical

этих шести тел склеены друг с другом во время расчёта с помощью связанного контакта.

Рассмотрим результаты моделирования на ЭВМ в программе ANSYS для AlSiC – корпуса при рассеива-

нии тепловой мощности с верхней поверхности слоя GaN. На рис. 4-6 представлено смещение компьютерной модели корпуса ПТБШ из AlSiC в зависимости от значения рассеиваемой мощности.

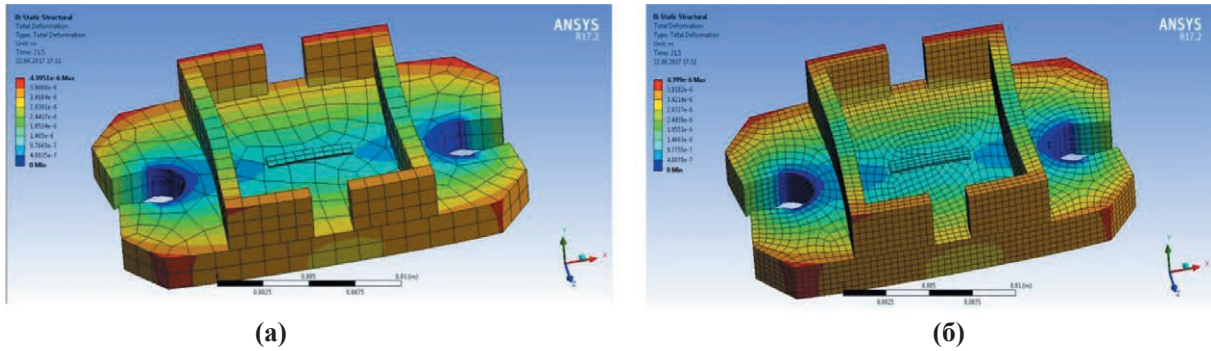


Рис. 4

Смещения на поверхности компьютерной модели. С площади GaN рассеивается  $P_{diss} = 56$  Вт; снизу идеальный теплоотвод в  $+83$  °C; AlSiC – корпус): а) грубая сетка (зависящие от температуры свойства), б) точная сетка (зависящие от температуры свойства)

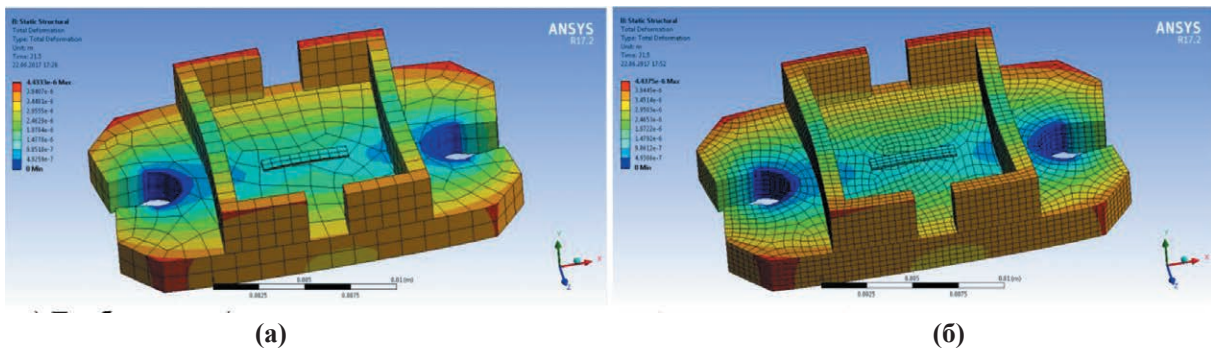


Рис. 5

Смещения на поверхности компьютерной модели (с площади GaN рассеивается  $P_{diss} = 79,3$  Вт; снизу идеальный теплоотвод в  $+83$  °C; AlSiC – 8 корпус): а) грубая сетка (зависящие от температуры свойства), б) точная сетка (зависящие от температуры свойства)

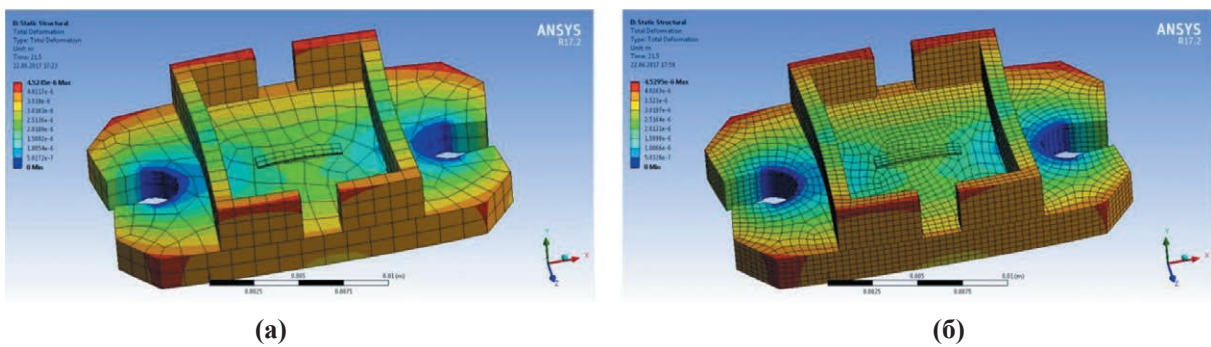


Рис. 6

Смещения на поверхности компьютерной модели (с площади GaN рассеивается  $P_{diss} = 133$  Вт; снизу идеальный теплоотвод в  $+83$  °C; AlSiC – 8 корпус): а) грубая сетка (зависящие от температуры свойства), б) точная сетка (зависящие от температуры свойства)

Итоги моделирования представлены в табл. 2-5.

В табл. 2 и 3 сохранены результаты предыдущего моделирования (при наличии медной балки толщиной 250 мкм и второй пайки припоем AuSn с толщиной 25 мкм).

В табл. 4 и 5 содержатся обновлённые результаты моделирования без медной балки. Кристалл карбида кремния толщиной 100 мкм распаивается золото-оловянным припоем толщиной 25 мкм на основание корпуса.

### Заключение

В результате проведённого математического анализа с использованием программного комплекса ANSYS было установлено, что при увеличении тепловой мощности с поверхности кристалла площадью 0,82x4,56 мм с 56 Вт до 133 Вт максимальные деформации в расчётной области (смещения) возрастают на 3 % (при нали-

Таблица 2

#### Максимальная величина смещения в расчётной области. Грубая сетка (постоянные свойства)

	$P_{diss} = 56 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 79,3 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 133 \text{ Вт}$
AlSiC	4,0 мкм	4,04 мкм	4,15 мкм
Cu	10,48 мкм	10,52 мкм	10,6 мкм
МД40	5,5 мкм	5,55 мкм	5,64 мкм

Таблица 3

#### Максимальная величина смещения в расчётной области. Точная сетка (зависящие от температуры свойства)

	$P_{diss} = 56 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 79,3 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 133 \text{ Вт}$
AlSiC	4,42 мкм	4,46 мкм	4,86 мкм
Cu	10,79 мкм	10,83 мкм	10,92 мкм
МД40	5,52 мкм	5,56 мкм	5,67 мкм
СМС14М1А	6,32 мкм	6,35 мкм	6,41 мкм
СМС14М1В	5,07 мкм	5,09 мкм	5,14 мкм
СМС04М2F	4,14 мкм	4,16 мкм	4,3 мкм

Таблица 4

#### Максимальная величина смещения в расчётной области. Грубая сетка (зависящие от температуры свойства)

	$P_{diss} = 56 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 79,3 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 133 \text{ Вт}$
AlSiC-8	4,4 мкм	4,43 мкм	4,53 мкм
Cu	10,73 мкм	10,77 мкм	10,86 мкм
МД40	5,48 мкм	5,52 мкм	5,6 мкм

Таблица 5

#### Максимальная величина смещения в расчётной области. Точная сетка (зависящие от температуры свойства)

	$P_{diss} = 56 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 79,3 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 133 \text{ Вт}$
AlSiC-8	4,4 мкм	4,44 мкм	4,53 мкм
Cu	10,74 мкм	10,78 мкм	10,87 мкм
МД40	5,49 мкм	5,52 мкм	5,61 мкм
СМС14М1А	6,27 мкм	6,3 мкм	6,35 мкм
СМС14М1В	5,02 мкм	5,04 мкм	5,09 мкм
СМС04М2F	4,09 мкм	4,12 мкм	4,17 мкм

чии медной балки на 10 %) для материала AlSiC. При максимальной тепловой мощности в 133 Вт они составляют не более 4,5 мкм (4,9 мкм при наличии медной балки).

Композиционный материал AlSiC обладает достаточно малыми механическими деформациями. Его опережает по минимальности деформаций только материал СМС04М2F. Однако, материал СМС04М2F обладает втрое большей массой, кроме того для него отсутствуют температурозависимые данные о коэффициенте линейного теплового расширения. Это позволяет сказать, что металломатричный композит AlSiC оптимален среди рассмотренных по критерию минимальная масса = минимальная деформация.

Максимальные деформации достигаются на краях корпуса (4,5 мкм для материала AlSiC), сам кристалл ПТБШ имеет деформации примерно в два раза меньшие (2,25 мкм в условиях корпуса из материала AlSiC).

Таким образом, применение металломатричных композитных материалов в конструкции корпусов электронных приборов на основе нитрида галлия даёт преимущество в весовых характеристиках, а также в минимальных деформациях корпуса по отношению к кристаллу, что увеличивает надёжность работы прибора.

### Литература

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. СВЧ электроника на нитриде галлия – основное направление создания радиоэлектронных систем // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – № 2 (231). – С. 88-101.
2. Герасимов А. О., Миннебаев В. М., Синкевич В. Ф., Редька Ал. В. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN транзисторах: опыт изготовления // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 1 (228). – С. 30-37.
3. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторов для космических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 12. Ч. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 201-207.
4. Нищев К. Н., Елисеев В. В., Эмих Л. А., Новопольцев М. И., Фомин Н. Е., Юдин В. А., Афанасьев-Ходыкин А. Н. Применение металломатричного композиционного материала AlSiC для теплоотводящих оснований приборов силовой электроники – ВИАМ/2011-205863.
5. Сидоров В. Н., Вершинин В. В. Метод конечных элементов в расчёте сооружений. SIMULA Abacus. М.: Издательство АСВ, 2015.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. Т. VII. – М.: Физматлит, 2003.
7. Takahiro Namazu, Hideki Takemoto and Shozo Inone Tensile and Creep Characteristics of Sputtered Gold-Tin Eutectic Solder Film Evaluated by XRD Tensile Testing. February 2009.
8. Свойства материалов GaN и SiC. – Режим доступа: [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru) (дата обращения: 08.08.17).
9. Большая библиотека свойств материалов, включая их зависимости от температуры. – Режим доступа: [www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/...](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/) (дата обращения: 08.08.17).
10. Ceramic Process Systems AlSiC. – Режим доступа: [www.lookpolymers.com](http://www.lookpolymers.com) (дата обращения: 08.08.17).
11. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011.

### References

1. Gruzdov V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Gallium nitride microwave electronics – main direction of radio-electronic systems` development. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 2 (231), pp. 88-101.
2. Gerasimov A. O., Minnebaev V. M., Sinkevich V. F., Redka Al. V. X-band pulsed power amplifier based on GaN transistors: manufacturing practice. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2012, № 1 (228), pp. 30-37.
3. Gruzdov V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Electronic modules based on microwave AlGaIn/GaN/SiC heterotransistors for space applications. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], Issue 12, pt .2. Tula, TulGU Publ., 2016, pp. 201-207.
4. Nishev K. N., Eliseev V. V., Emikh L. A., Novopoltsev M. I., Fomin N. E., Yudin V. A., Afanasyev-Khodykin A. N. Applications for metal-matrix composite material AlSiC for heat sing plates of power electronic devices – VIAM//2011-205863.



5. Sidorov V. N., Vershinin V. V. *Metod konechnykh elementov v raschete sooruzheniy* [Finite element method in the analysis of constructions]. SIMULA Abacus. Moscow, ASV Publ., 2015.
6. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoriya uprugosti* [Elasticity Theory. Vol. VII]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003.
7. Takahiro Namazu, Hideki Takemoto and Shozo Inone Tensile and Creep Characteristics of Sputtered Gold-Tin Eutectic Solder Film Evaluated by XRD Tensile Testing. February 2009.
8. GaN and SiC material properties. – URL: [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru) (accessed 8 August 2017).
9. Data library of material properties, including temperature dependencies. – URL: [www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/...](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/) (accessed 8 August 2017).
10. Ceramic Process Systems AlSiC. – URL: [www.lookpolymers.com](http://www.lookpolymers.com) (accessed 8 August 2017).
11. Quay R. *Elektronika na osnove nitride galliya* [Gallium Nitride Electronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011.