

Программная реализация трехмерного моделирования тепловых процессов в многослойных интегральных схемах космического назначения

В. М. Карабан¹, М. П. Сухоруков^{1,а}, Е. А. Морозов²

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»,
Россия, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 52

E-mail: ^аMax_sukhorukov@mail.ru

Получено 23 апреля 2014 г.,
после доработки 22 мая 2014 г.

В данной работе рассматривается программная реализация трехмерного моделирования тепловых процессов в многослойных интегральных схемах на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Приведены результаты, полученные с помощью реализованного программного обеспечения на примере радиочастотного приемного модуля на основе низкотемпературной керамики для системы автономной навигации. А также приведено сравнение полученных результатов с результатами сертифицированного программного продукта.

Ключевые слова: многослойные интегральные схемы, низкотемпературная совместно обжигаемая керамика, тепловые режимы, космическая аппаратура, математическое моделирование, дифференциальные уравнения

Software implementation of the three-dimensional modeling of thermal processes in multilayer integrated circuits for space purposes

V. M. Karaban¹, M. P. Sukhorukov¹, E. A. Morozov²

¹ Tomsk state university of control systems and radioelectronics, 40 Lenin avenue, Tomsk, Russia, 634050

² The Joint-stock Company Academician M. F. Reshetnev «Information Satellite Systems», 52 Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

Abstract. — In this paper we consider software implementation of three-dimensional modeling of thermal processes in multilayer integrated circuits based on low-temperature co-veneering ceramic. The results obtained by the software implemented by the example of the radio frequency receiver module based on low-temperature ceramics for autonomous navigation systems. And also provides a comparison with the results of certified software product.

Keywords: multilayer integrated circuits, low-temperature co-fired ceramic, thermal conditions, space equipment, mathematical modeling, and differential equations

Работа выполнена в рамках реализации постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218, и договора между ОАО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 12.02.2013 г. № 02.G25.31.0042.

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 397–403 (Russian).

Актуальность

В последнее время широкое распространение в области создания новых радиотехнических устройств, выполняющих функции генерирования, модуляции, усиления, кодирования, декодирования, а также обработки и передачи информации получила гибридная технология многослойных интегральных схем (ИС) на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики.

Применение низкотемпературной совместно обжигаемой керамики имеет ряд преимуществ перед традиционными печатными платами, платами толсто пленочных микросборок и платами на основе высокотемпературной керамики, которые сводятся к следующему:

- сравнительно низкая температура обжига ($870\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяет применять проводники из драгоценных материалов (серебро, золото, платина, палладий) в отличие от высокотемпературной совместно-обжигаемой керамики (с температурой обжига $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$), где требуется применение материалов с более высокой температурой плавления;
- расширение функциональных возможностей аналоговых и цифроаналоговых многослойных трехмерных модулей за счет интеграции пассивных элементов между слоями с готовыми цифровыми сверхбольшими интегральными схемами (в том числе «система-на-кристалле»), элементами оптоэлектроники и акустоэлектроники и, как следствие;
- повышение надежности за счет уменьшения паяных соединений и сокращения объема ручной сборки;
- возможность получения многослойных трехмерных модулей различных конфигураций;
- возможность создания во внутренних слоях многослойных индуктивностей, различных типов линий передач и линий задержки с требуемым волновым сопротивлением (количество сигнальных слоев в три раза больше, чем у многослойных печатных плат);
- имеет лучшую теплопроводность, что позволяет обеспечить лучшие условия охлаждения;
- температурный коэффициент линейного расширения керамик, применяемых в многослойных ИС, соответствует температурным коэффициентам линейного расширения применяемых полупроводниковых материалов, что позволяет использовать бескорпусные полупроводниковые элементы;
- улучшение габаритно-массовых характеристик разрабатываемых модулей за счет комплексирования в одном модуле различных по функциональному назначению планарных элементов и узлов.

В своей работе радиотехнические устройства космического назначения подвергается воздействию самых разнообразных факторов. На одном из первых мест среди дестабилизирующих факторов стоит температура. Поэтому значительное место в проектировании современных многослойных ИС занимает задача обеспечения необходимого теплового режима как при внешних (окружающая среда), так и при внутренних (тепловыделения в электрорадиоизделиях) тепловых воздействиях.

Применение вычислительной техники и программного обеспечения для моделирования тепловых процессов позволят разработчику многослойных ИС обеспечить необходимый тепловой режим на ранних стадиях разработки.

Имеющееся в настоящее время зарубежное программное обеспечение моделирования тепловых процессов (ANSYS, COMSOL Multiphysics, Nastran, SAMCEF и т. д.) трудно в освоении и требует обучения проектировщиков, что непосредственно влечет к появлению дополнительных временных и финансовых затрат. Также стоит отметить высокую стоимость вышеуказанного программного обеспечения.

Среди специализированных отечественных программных продуктов, моделирующих тепловые воздействия на конструкции радиоэлектронную аппаратуру, можно выделить автоматизированную систему АСОНИКА. Однако она предназначена в основном для проектирования и расчета печатных плат, так как построена на аналитических формулах и не использует твердотельного моделирования.

Поэтому разработка программного обеспечения для трехмерного моделирования тепловых процессов многослойных ИС космического назначения на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики, является актуальной и позволит существенно сократить время разработки вновь создаваемых многослойных ИС без специальных навыков работы.

Физическая и математическая постановка

Рассматривается задача о температурном поле многослойной ИС космического назначения на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Данная многослойная ИС (рис. 1) представляет собой совокупность диэлектрических слоев с размещенных между ними плоских токонесущих проводников и смонтированными навесными элементами.



Рис. 1. Пример стека слоев многослойной ИС на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики

При постановке задачи использованы следующие допущения:

1. Теплофизические свойства материалов считаются изотропными, не зависят от температуры.
2. Навесные элементы моделируется в виде параллелепипедов. Это допущение внесет некоторую погрешность в точность расчета, однако, учитывая, что почти все элементы близки по форме к параллелепипедам, вносимая погрешность должна быть незначительной.
3. Тепловой контакт на границах между телами считается идеальным. Для конструктивных элементов многослойных ИС это близкое допущение, благодаря технологии производства.
4. Не учитывается саморазогрев проводников при протекании по ним электрического тока (эффект джоулевого тепла).

Процесс распространения тепла описывается нелинейным нестационарным уравнением теплопроводности, которое в общем случае имеет вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \pm q_v, \tag{1.1}$$

где c — изобарная теплоемкость; ρ — плотность; T — температура; τ — время; λ — коэффициент теплопроводности; q_v — мощность источников (знак плюс) или стоков (знак минус) тепла.

Область решения ограничивается следующими временными и геометрическими условиями:

$$t \in [0, t_{\max}]; \quad x \in [0, L_x]; \quad y \in [0, L_y]; \quad z \in [0, L_z], \tag{1.2}$$

где t_{\max} — время работы; L_x, L_y, L_z — размеры многослойной ИС по осям x, y и z соответственно.

В граничных условиях учитывается радиационный теплообмен (граничное условие III рода):

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{\text{ПОВ}} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma (T_{\text{ВН}}^4 - T_{\text{ПОВ}}^4), \tag{1.3}$$

где $\varepsilon_{\text{ПР}}$ — приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды; σ — постоянная Стефана–Больцмана; $T_{\text{ВН}}$ — температура внешней среды.

Приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды вычисляется по формуле [Сунцов и др., 2012]

$$\varepsilon_{\text{ПР}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{П}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ВН}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon_{\text{П}}$ — коэффициент черноты поверхности тела; $\varepsilon_{\text{ВН}}$ — коэффициент черноты внешней среды.

При задании начальных условий считаем, что температура многослойной ИС в начальный момент времени (T_0) распределена равномерно:

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z). \quad (1.5)$$

Решение дифференциального уравнения трехмерного нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности (1.1) с соответствующими начальным и граничными условиями (1.2–1.5) проводится методом конечных разностей.

Для решения разностных аналогов трехмерного уравнения теплопроводности используются схема расщепления по координатам (локально-одномерная) и метод прогонки. Нелинейности в граничных условиях преодолеваются при помощи итераций, проводимых до получения заданной точности.

Основные особенности конструкции разностного алгоритма для решения нелинейных дифференциальных задач на примере простейшего квазилинейного уравнения теплопроводности подробно рассмотрены в [Берковский, Ноготов, 1976].

Аппроксимация дифференциальных операторов (производных) конечно-разностными выражениями основана на разложении в ряд Тейлора гладких функций.

Для построения разностных аналогов исходного дифференциального уравнения теплопроводности (1.1) введем равномерную прямоугольную сетку с пространственными узлами в точках x_i, y_j, z_k и временными узлами в точках n :

$$\begin{aligned} x_i &= i\Delta x, & \Delta x &= \frac{L_x}{I}, & i &= 1, 2, \dots, I-1, I; \\ y_j &= j\Delta y, & \Delta y &= \frac{L_y}{J}, & j &= 1, 2, \dots, J-1, J; \\ z_k &= k\Delta z, & \Delta z &= \frac{L_z}{K}, & k &= 1, 2, \dots, K-1, K; \\ t^n &= n\Delta t, & n &= 0, 1, \dots, N-1, N; \end{aligned}$$

где Δt — шаг сетки по времени; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — шаги сетки по пространственным координатам x, y, z .

Разностный аналог температуры:

$$T_{i,j,k}^n = T(x_i, y_j, z_k, t^n).$$

Разностный аналог мощности источника:

$$Q_{i,j,k}^n = Q(x_i, y_j, z_k, t^n).$$

Разностные аналоги первой и второй производных температуры по времени и пространственным координатам:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \approx \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t};$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) \approx \frac{T_{i+1,j,k}^{n+1} - 2T_{i,j,k}^{n+1} + T_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2};$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \approx \frac{T_{i,j+1,k}^{n+1} - 2T_{i,j,k}^{n+1} + T_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2};$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \approx \frac{T_{i,j,k+1}^{n+1} - 2T_{i,j,k}^{n+1} + T_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2}.$$

В соответствии со схемой расщепления переход от n к $n+1$ временному слою осуществляется с помощью трех «дробных» шагов, и дифференциальное уравнение (1.1) заменяется эквивалентной системой уравнений:

$$C_p \frac{T_{i,j,k}^{n+1/3} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \lambda \left(\frac{T_{i-1,j,k}^{n+1/3} - 2T_{i,j,k}^{n+1/3} + T_{i+1,j,k}^{n+1/3}}{\Delta x^2} \right) + \frac{1}{3} Q_{i,j,k}^n;$$

$$C_p \frac{T_{i,j,k}^{n+2/3} - T_{i,j,k}^{n+1/3}}{\Delta t} = \lambda \left(\frac{T_{i,j-1,k}^{n+2/3} - 2T_{i,j,k}^{n+2/3} + T_{i,j+1,k}^{n+2/3}}{\Delta y^2} \right) + \frac{1}{3} Q_{i,j,z}^n;$$

$$C_p \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^{n+2/3}}{\Delta t} = \lambda \left(\frac{T_{i,j,k-1}^{n+1} - 2T_{i,j,k}^{n+1} + T_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta z^2} \right) + \frac{1}{3} Q_{i,j,k}^n.$$

Поставленная задача полностью реализована в разработанном программном обеспечении моделирования тепловых процессов в многослойных интегральных схемах «Ceramics» и обладает следующими возможностями:

- имитационное моделирование трехмерных нелинейных нестационарных температурных полей многослойных ИС на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики;
- сохранение/загрузка входных данных для расчета;
- встроенное руководство по использованию программы;
- визуальное отображение результатов моделирования в виде изображения;
- отображение результатов моделирования в форме графиков и таблиц;
- экспорт результатов моделирования в формате *.bmp.

Полученные результаты

В качестве конструкции для расчета был выбран радиочастотный приемный модуль (ПМ) на основе низкотемпературной керамики для системы автономной навигации.

Расчет температурного поля многослойной ИС произведен при следующих значениях исходных данных и параметров:

- размер многослойной ИС: 14×14×1 мм;
- количество слоев многослойной ИС: 5;
- материал подложки многослойной ИС: 951 Green Tape (DuPont) теплофизические свойства материала приведены в таблице 1 [Карабан и др., 2011; Алексеев и др., 2010];
- мощность значимых тепловыделяющих элементов представлена в таблице 2;
- номинальная температура окружающей среды: $T_{\text{вн}} = 273 \text{ K}$;
- приведенный коэффициент черноты поверхности равен 0.8;
- точность вычислений 0.005;
- конечное время расчета температурного поля: 500 с;
- размерность пространственной сетки и величины шага по времени: 280×280×20 (т. е. $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05 \text{ мм}$) и $t = 0.005 \text{ с}$.

Таблица 1. Теплофизические свойства материал подложки многослойной ИС

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·К)
951 Green Tape – DuPont	3100	3.3	989

Таблица 2. Значения мощностей значимых тепловыделяющих элементов ИС ПМ

Обозначение i -го электрорадиоизделия	R6	R7	VD1	VT6	DA1
$P_{i\text{ЭРЭ}}$, 10 ⁻⁶ Вт	5	5	4	5	7

Результаты моделирования многослойной ИС ПМ на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики представлены на рисунке 2.

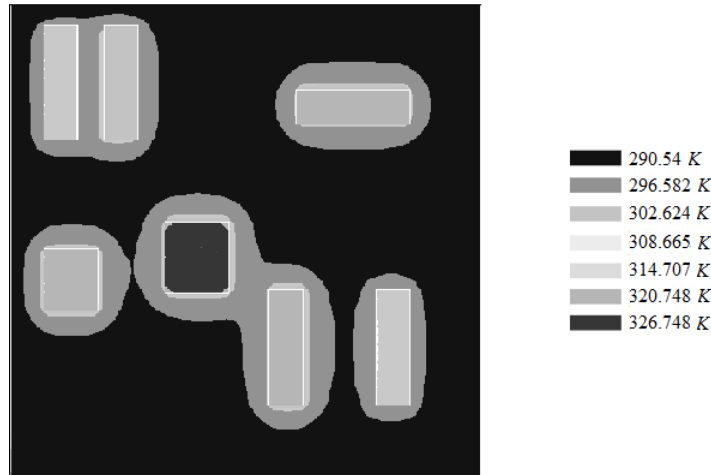


Рис. 2. Распределения температуры многослойной ИС приемного модуля на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики в конечный момент времени полученные в разработанном программном обеспечении «Ceramics»

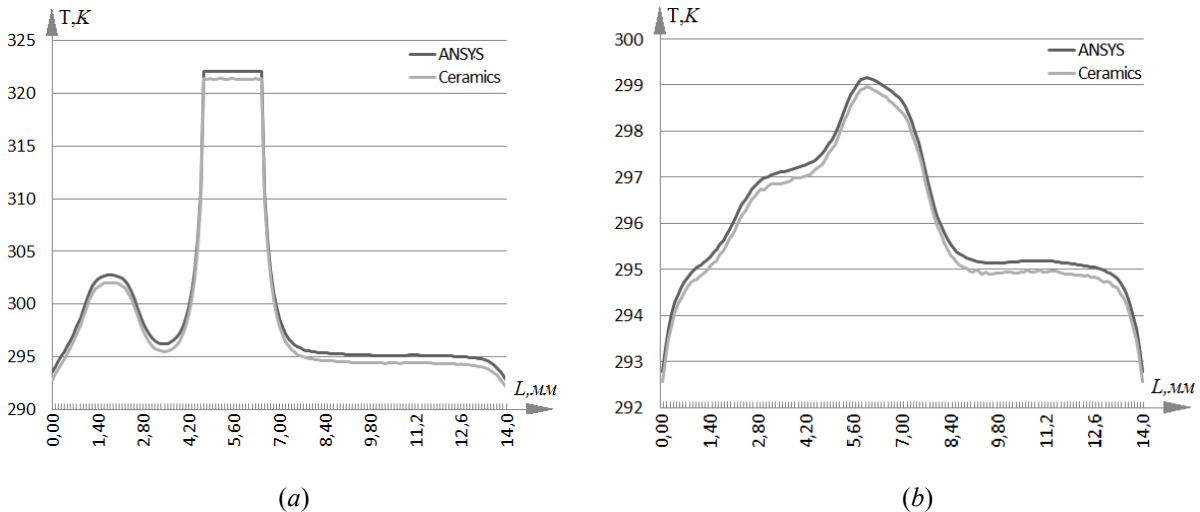


Рис. 3. Распределения температуры на верхней поверхности подложки в конечный момент времени полученные при помощи разработанного программного обеспечения «Ceramics» и сертифицированного программного продукта ANSYS ((a) — вдоль оси x ($y = L_x/2$); (b) — вдоль оси y ($x = L_y/2$))

Для подтверждения достоверности полученных результатов было проведено сопоставление результатов реализованной трехмерной модели с численными решениями, полученными при помощи пакета сертифицированного программного продукта ANSYS (рис. 3). Параметры

пространственной конечно-разностной сетки и шага по времени для представленных расчетов совпадают.

Стоит отметить, что время вычисления в разработанном программном обеспечении «Ceramics», при заданной точности и размерности пространственной сетки, составило 469 с, в программном продукте ANSYS — 526 с. Расхождение во времени расчета, прежде всего, связано с тем, что ANSYS основан на методе конечных элементов, который является более трудоемким и неоправданным по времени и ресурсам машины при расчете тепловых режимов [Алексеев, 2004].

Сопоставление результатов реализованной трехмерной модели с численными решениями, полученными при помощи ANSYS, показало, что расхождение результатов не превышает 0.5 K, что говорит об адекватности реализованного программного обеспечения.

Заключение

1. Решена трехмерная нестационарная задача теплопереноса в конструкции многослойной ИС космического назначения на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики с учетом реальных режимов его работы. Решение сформулированной задачи теплопереноса основывается на применении метода конечных разностей совместно со схемой разделения переменных (локально-одномерной схемой) и метода прогонки.

2. Разработано программное обеспечение моделирования тепловых процессов в многослойных интегральных схемах космического назначения на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики, позволяющие получать пространственные распределения температуры в конструкции с заданной точностью.

3. Получены пространственные распределения температуры в конструкции многослойной ИС космического назначения на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики.

4. Сопоставление результатов расчетов полученные при помощи программного обеспечения «Ceramics» с результатами специализированного пакета ANSYS, позволило говорить об адекватности проводимых расчетов температурных полей в рассматриваемых конструкциях.

Список литературы

- Алексеев В. П., Карабан В. М., Сунцов С. Б., Пономарев С. В. Численное моделирование напряженно-деформированных состояний модуля из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики вследствие тепловых режимов работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Часть 2 — Проведение численного моделирования // Доклады ТУСУРа. — Томск, 2010. — № 2 (22). Часть 1. — С. 232–235.
- Алексеев В. П. Системное проектирование термоустойчивых радиотехнических устройств и систем — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. — 316 с.
- Берковский Б. М., Ноготов Е. Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена // Минск: Наука и техника, 1976. — 144 с.
- Карабан В. М., Ислентьева Т. А., Матюшкина Е. А., Сунцов С. Б., Хвалько А. А. Исследование тепловых свойств керамики GreenTape 951 // Известия вузов. Физика. — 2011. — Т. 54, № 10/2. — С. 88–90.
- Сунцов С. Б., Карабан В. М., Сухоруков М. П., Морозов Е. А. Создание упрощенной тепловой модели унифицированного электронного модуля // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2012. — Т. 55, № 9–3. — С. 114–119.