

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ И МИКРОСБОРОК

Н. П. Кузьмин

Ульяновский государственный технический университет,
УФирЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Ульяновск

Моделирование тепловых процессов в изделиях микроэлектроники широко используется на стадии проектирования и при контроле качества многокристалльных электронных модулей и микросборок (ЭМ и МС). Расчеты существенно упрощаются при использовании тепловых моделей ЭМ и МС, полученных на основе принципа электротепловой аналогии в виде теплоэлектрической эквивалентной схемы (ТЭС) [1,2]. Расчет значений параметров ТЭС, например, тепловых сопротивлений по формуле $R_t = L/\lambda \cdot S$, где λ – коэффициент теплопроводности среды, а L , S – длина и площадь поперечного сечения канала передачи тепла соответственно, практически не возможен, поскольку реальная геометрия тепловых потоков в конструкции ЭМ и МС не известна.

Предлагаемый алгоритм расчета параметров ТЭС основан на решении системы уравнений, составленной путем приравнивания аналитических выражений для коэффициентов передачи температуры между кристаллами ЭМ или МС, полученных из топологии ТЭС, численным значениям этих коэффициентов, измеренных на ЭМ или МС. Аналогичный алгоритм используется в синтезе электрических схем и известен как метод компонентных уравнений [3].

Алгоритм апробирован на макете из трех диодных сборок (ДС) типа ВУ028, закрепленных на плате из фольгированного текстолита (рис.1). Каждая ДС содержит два диода, один из которых используется как нагреватель, другой как датчик температуры. ТЭС данного макета, показанная на рисунке 2, содержит тепловые сопротивления R_2, R_3, R_4, R_5 , которые необходимо определить. Тепловое сопротивление R_1 , соответствующее участку «кристалл ДС1 – окружающая среда», было измерено характеристографом ИХПП [4] и составило 4.23 К/Вт.

Поочередно нагревая ДС и измеряя температуры кристаллов всех ДС, определяем коэффициенты температуропередачи между каждой парой ДС. Так, при нагреве ДС1 на 66 °С увеличение температуры ДС2 составило 7°С, а ДС3 – на 2,5°С. По результатам измерений получены следующие значения коэффициентов температуропередачи: $K_{12}=7/66=0.1060$, $K_{13}=2,5/66=0.0378$, $K_{21}=0.1194$, $K_{23}=0.3651$, $K_{31}=0.0402$, $K_{32}=0.3281$.

Используя приложение CIRSWM [6, 7], по ТЭС макета, приведенной на рисунке 2, определяем символьные выражения для коэффициентов передачи

по напряжению и приравниваем их к численным значениям K_{12} , K_{13} , K_{21} , K_{23} , K_{31} , K_{32} , полученным по результатам измерений при нагреве ДС:

$$K_{12}=0.1060=(R3 + R5) \times R4 / ((R2 + R3 + R5) \times R4 + R2 \times (R3 + R5));$$

$$K_{13}=0.0378=R4 \times R5 / ((R2 + R3 + R5) \times R4 + R2 \times (R3 + R5));$$

$$K_{21}=0.1194= R1 / (R1 + R2);$$

$$K_{23}=0.3651=R5 / (R3 + R5);$$

$$K_{31}=0.0402=R4 \times R1 / ((R1 + R2 + R3) \times R4 + R3 \times (R1 + R2));$$

$$K_{32}=0.3281=(R1 + R2) \times R4 / ((R1 + R2 + R3) \times R4 + R3 \times (R1 + R2)).$$

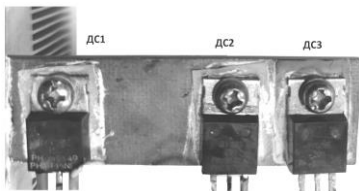
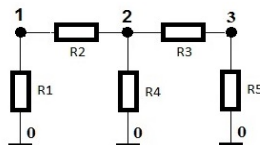


Рисунок 1 - Макет из трех ДС, закрепленный слева на радиаторе



узлы 1,2,3 соответствуют номерам ДС на рис.1; узел № 0 – окружающая среда.

Рисунок 2 - ТЭС макета из трех ДС

При $R1=4.23$ К/Вт получаем решение системы: $R2=31.18114$ К/Вт, $R3=8.90095$ К/Вт, $R4=4.98050$ К/Вт, $R5=5.12044$ К/Вт.

Для проверки правильности значений параметров ТЭС, используем симулятор схем Multisim (рис.3).

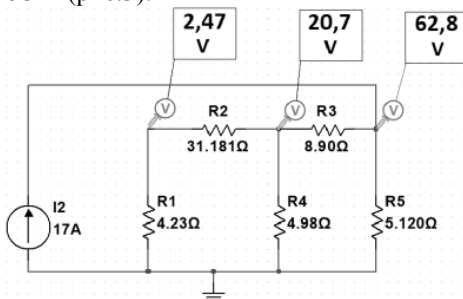


Рисунок 3 – Анализ модели макета в среде Multisim

При подаче греющей мощности к кристаллу ДС3 кристаллы ДС1, ДС2, ДС3 нагрелись на 2,25 °С, 19,25 °С, 66 °С. Напряжения в узлах 1,2,3 модели ТЭС (рис.3) составили 2,47 В, 20,7 В, 62,8 В. Расхождение температур кристаллов диодов и значений модели не превысило 9,7%.

Применение алгоритма позволяет формализовать процесс расчета параметров эквивалентных электрических схем, сокращает время проектирования и повышает достоверность электрического моделирования тепловых процессов в реальных многокристалльных полупроводниковых системах.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

Список использованных источников

1. Сергеев, В. А. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых изделий // В.А. Сергеев, А.М. Ходаков. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 184 с.
2. Туищев А.И. Принципы моделирования тепловых режимов вычислительных устройств методом электротепловых аналогий // Инновации, наука, образование.– Тольятти, 2018.– № 5.
3. Оптимальная реализация линейных электронных RLC-схем / Ланнэ А.А., Михайлова Е.Д., Саркисян Б.С., Матвийчук Я.Н. – Киев : Наук. Думка, 1981. – 208 с.
4. Ходаков А.М., Смирнов В.И., Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Гавриков А.А. Моделирование и анализ распределений температуры и термомеханических напряжений в многокристальном электронном модуле. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):215-222. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.215.
5. Курганов Д.С., Филаретов В.В. Программа символьного анализа и диагностики электронных цепей CIRSWMW32.– М. : ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России. – № ОФАП 9589; №ГР 50200702592. – 2007.
6. Кузьмин Н.П. Анализ теплового режима электронных устройств методом схемных определителей. Синтез, анализ и диагностика электронных цепей. Международный сборник научных трудов - Ульяновск, 2024. С. 129-138.

Кузьмин Николай Павлович, инж. I кат. УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, асп. каф. радиотехники, опто- и нанoeлектроники УлГТУ, niko_rus@mail.ru

УДК 620.179.18; 621.315.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПИКОВОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

И. А. Зайцев

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», г. Самара

Ключевые слова: Высоковольтные линии электропередач, короткое замыкание, импульсное магнитное поле.

Высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП) работают под воздействием ряда факторов: перекрытие изоляции или её повреждение, коммутационные перенапряжения, повышения и понижения температуры, воздействие ветра и т.д. Вследствие этого в них происходят короткие замыкания (КЗ), приводящие к появлению импульсного магнитного поля (ИМП). Технические средства (ТС) в составе изделий ракетно-космической техники, находящиеся вблизи ВЛЭП, подвергаются воздействию ИМП.