УДК 621.382.8.017.7

Я.Г. Тетенькин, В.А. Сергеев

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛИС ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЧАСТОТЫ ВСТРОЕННОГО КОЛЬЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА¹

Тетенькин Ярослав Геннадьевич, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Ведущий инженер Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет научные публикации и изобретения в области автоматизации измерений и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: ufire@mv.ru].

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, профессор, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, заведующий базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет монографии, статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Аннотация

Представлен краткий анализ линейных тепловых моделей цифровых интегральных схем (ЦИС) и алгоритмов определения параметров тепловых эквивалентных схем ЦИС по переходным тепловым характеристикам (ПТХ). Отмечены сложности реализации алгоритма определения тепловых параметров ЦИС методом структурных функций по стандарту JESD51-14. Описан новый способ измерения ПТХ программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) по изменению частоты кольцевого генератора, построенного на логических элементах ПЛИС. Показан вариант реализации аппаратно-программного комплекса для измерения тепловых параметров ПЛИС. Предложен простой алгоритм расчета тепловых параметров ПЛИС, основанный на анализе ПТХ ПЛИС с использованием методов численного дифференцирования. Указанный алгоритм расчета тепловых параметров апробирован на примере ПТХ ПЛИС EPM240T100C5 и Lattice M4A5-64/32.

Ключевые слова: цифровые интегральные схемы, тепловая схема, тепловые параметры, переходная тепловая характеристика, ПЛИС, измерение, алгоритм расчета.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-1-63-82-90

THE MEASUREMENT OF THERMAL PARAMETERS BY CHANGING FREQUENCY OF EMBEDDED RING OSCILLATOR

Iaroslav Gennadevich Tetenkin, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from the Radioengineering Faculty of Ulyanovsk State Technical University; Leading Engineer of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS; an author of scientific publications and inventions in the field of computer-aided measurement and parameter analysis of semiconductor devices and integrated circuits and measuring their thermal characteristics. e-mail: ufire@mv.ru.

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Sciences in Engineering, Professor; graduated from the Physics Faculty of Gorky State Technical University; Head of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS; Head of the Department of Radioengineering, Opto and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University at the Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov IRE of RAS; an author of monographs, inventions, and articles in the field of researching and simulating semiconductor devices and integrated circuits performance, and measuring their thermal characteristics. e-mail: sva@ulstu.ru.

¹ Работа подготовлена в рамках государственного задания.

Abstract

The article describes a brief analysis of linear thermal models of digital integrated circuits (DIC) and algorithms for determining the parameters of thermal equivalent circuits of DIC-based on transient thermal characteristics (TTC). It distinguishes the difficulties in implementing the algorithm for determining the thermal parameters of the DIC-based on the method of structure functions according to the JESD51-14 document and describes a new method for measuring the FPGA TTC by changing the frequency of a ring oscillator embedded in the FPGA logic elements. It also considers the hardware-software complex used for measuring the thermal parameters of FPGAs and proposes a simple algorithm for calculating the thermal parameters of FPGAs based on the analysis of the FPGA TTC using methods of numerical differentiation. The specified algorithm for calculating thermal parameters has been tested on the example of FPGA TTC EPM240T100C5 and Lattice M4A5-64/32.

Keywords: digital integrated circuits, thermal circuit, thermal parameters, transient thermal characteristics, FPGA, measurement, calculating algorithm.

Температура активной области цифровых интегральных схем (ЦИС) является одним из наиболее важных факторов, определяющих функциональную и физическую надежность ЦИС. Значения тепловых параметров (ТП) ЦИС, определяющие характер изменения и распределения температуры в активной области изделия при выделении в нем электрической мощности, в значительной степени зависят от качества изготовления ЦИС и могут сильно отличаться от расчетных значений (иметь значительный разброс от образца к образцу). Поэтому одним из наиболее широко применяемых методов контроля качества ЦИС является измерение их ТП.

Особо следует отметить важность контроля тепловых режимов кристаллов сверхбольших интегральных схем (СБИС), имеющих высокую плотность рассеиваемой в них мощности, достигающую 60–80 Вт/см² [1].

Тепловые свойства планарных ЦИС принято описывать на основе принципа теплоэлектрической аналогии, заключающегося в сходстве уравнений, описывающих процессы теплопроводности и электропроводности.

Согласно этому принципу, перенос тепла аналогичен электрическому току в электрических цепях, а перепад температур – падению напряжения на участке цепи. Для описания процессов переноса тепла в твердотельных системах используются эквивалентные тепловые схемы – аналоги электрических схем. Электрическая

мощность, рассеиваемая ЦИС, преобразуется в тепло в очень тонком слое на поверхности кристалла, и если не учитывать отвод тепла с боковых граней слоев конструкции ЦИС и перенос тепла излучением, то тепловой поток в конструкции ЦИС можно считать одномерным, направленным от рабочей поверхности кристалла ЦИС к основанию корпуса. В этом приближении тепловая схема многослойной конструкции ЦИС в представлении Фостера имеет вид m последовательно соединенных RC -звеньев (рис. 1), где каждое RC -звено соответствует определенному слою конструкции и характеризуется двумя величинами: R_{Ti} и C_{Ti} – тепловое сопротивление и теплоемкость i -го слоя, соответственно. В линейной одномерной схеме изменение температуры $\theta_n(t)$ p - n -перехода определяется только законом изменения рассеиваемой ЦИС мощности $P(t)$ и выражается интегралом Дюамеля [2]:

$$\theta_n(t) = \theta_0 + \int_0^t h(t-t') P(t') dt', \quad (1)$$

где $h(t-t')$ – функции отклика температуры p - n -перехода на δ -подобный импульс мощности в момент времени t' . Для тепловой схемы, показанной на рисунке 1:

Рис. 1. Конструкция ЦИС (схематично) и соответствующая ей тепловая схема в представлении Фостера: θ_n – температура активной области (p - n -перехода), θ_B – температура кристаллодержателя, θ_P – температура корпуса ЦИС, θ_0 – температура окружающей среды

$$h(t-t') = \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} \exp\left(-\frac{t-t_i}{\tau_{Ti}}\right), \quad (2)$$

где $\tau_{Ti} = R_{Ti}C_{Ti}$ – тепловая постоянная времени i -го слоя конструкции ЦИС, и при подаче на ЦИС в момент времени $t = 0$ ступеньки греющей мощности заданного постоянного уровня P_0 можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_n(t) &= \theta_n(t) - \theta_0 = P_0 Z_T(t) = \\ &= P_0 \sum_{i=1}^m R_{Ti} (1 - \exp(t/\tau_{Ti})), \end{aligned} \quad (3)$$

где $Z_T(t) = \sum_{i=1}^m R_{Ti} (1 - \exp(t/\tau_{Ti}))$ – переходное тепловое сопротивление.

Подобное изменение температуры p - n -перехода в структуре ЦИС называется переходной тепловой характеристикой (ПТХ) ЦИС и обозначается $H(t)$. Как видно из (3), ПТХ в принятом приближении определяется переходным тепловым сопротивлением $Z_T(t)$ и содержит информацию о тепловых параметрах всех слоев конструкции ЦИС.

Для измерения ПТХ полупроводниковых изделий (ППИ) с p - n -переходами используют способ в соответствии со стандартом MIL-STD-833E [3] или JESD51-1 [4], состоящий в том, что ППИ размещают на массивном радиаторе, температуру корпуса в определенной точке контакта с радиатором измеряют термопарой, на ППИ подают импульс электрической греющей мощности заданного уровня и длительности t_H . Изменение температуры p - n -перехода после окончания импульса мощности определяют по изменению температурочувствительного параметра (ТЧП) с известным температурным коэффициентом K_{φ} , в качестве которого используют падение напряжения $U_{p-n}(t)$ на p - n -переходе при малом прямом токе. Измерение повторяют много раз при различных значениях t_H и получают ПТХ ППИ.

Недостатком способа является значительная погрешность измерения напряжения на p - n -переходе сразу же после выключения греющей мощности из-за влияния паразитных переходных электрических процессов, при переключении ППИ из греющего режима в измерительный режим, а также существенные ошибки измерения температуры корпуса ЦИС с использованием термопары [5].

Для устранения погрешности, обусловленной применением термопары в способе измерения ПТХ, в стандарте JESD51-14 [6] предложено использовать двойной тепловой интерфейс, а для устранения влияния переходных процессов измерение изменения температуры по изменению падения напряжения на p - n -переходе предлагается проводить в режиме остывания ППИ после отключения греющей мощности при достижении ППИ стационарного теплового состояния.

Но здесь возникают определенные ограничения, которые следует учитывать при анализе полученных результатов. Во-первых, кривые нагрева и охлаждения ИС не являются строго симметричными, что связано с изменением путей распространения тепловых потоков. Например, очевидно, что тепловую неоднородность, вызванную источником или источниками тепла на кристалле (так называемые «горячие точки») в режиме нагрева, принципиально невозможно воспроизвести в режиме охлаждения. Во-вторых, это различие вносит значительные погрешности при измерении тепловых параметров относительно небольших, по сравнению с корпусом, структурных элементов, например, теплового сопротивления участка кристалл-подложка.

Кроме этого, существенно возрастает время проведения подобных измерений – необходимо провести два полноценных измерения ПТХ исследуемого прибора с различными тепловыми интерфейсами. Если измерения проводятся в режиме остывания (как рекомендовано JESD51-14), то длительность цикла измерения увеличивается еще в два раза.

При измерении ПТХ ЦИС стандартными способами необходима возможность прямого подключения к какому-либо p - n -переходу в структуре ЦИС, поэтому в качестве датчиков температуры, а зачастую – и источников тепла, используют защитные диоды по входу или выходу ЦИС. Распределение источников тепла в этом случае совершенно неадекватно распределению плотности мощности при работе ЦИС в номинальном режиме работы ЦИС, что вносит дополнительную погрешность в определение тепловых параметров ЦИС. Кроме того, во многих типах ЦИС (микроконтроллеры, микропроцессоры, ПЛИС и др.) прямой доступ к p - n -переходу в структуре невозможен.

Анализ ПТХ в стандарте JESD51-14 проводится с использованием получившего широкое распространение метода структурных функций [7]. Тем не менее, точность этого подхода ограничена необходимостью использования численных методов преобразования при вычислении структурных функций и достаточно большим числом дополнительных преобразований для получения конечного результата. Все это приводит как к усложнению самого способа измерения теплового сопротивления, так и к накоплению ошибок при этих преобразованиях, что в конечном итоге приводит к ухудшению точности и снижению повторяемости полученных результатов.

1 Новый способ измерения ПТХ ЦИС

Для всех классов и типов ЦИС характерно общее свойство – время задержки распространения сигнала (ВЗРС), при этом ВЗРС практически всех типов ЦИС возрастает с увеличением температуры [8] и может служить альтернативой классическому ТЧП. Наиболее простым и в то же время наиболее точным способом измерения ВЗРС логических элементов (ЛЭ) ЦИС является измерение частоты колебаний кольцевого генератора (КГ), по-

строенного путем включения части ЛЭ тестируемой ЦИС по кольцевой схеме (рис. 2).

Рис. 2. Трехэлементный КГ

Частота генерации КГ зависит только от времени задержки τ_d единичного ЛЭ и общего числа n таких элементов в структуре КГ. Для случая n -каскадного КГ частота генерации будет определяться выражением:

$$f_{\text{КГ}} = \frac{1}{2n\tau_d}. \quad (4)$$

В работе [9] показано, что частота КГ практически линейно зависит от температуры и основными факторами, определяющими зависимость частоты КГ от температуры, при стабильном напряжении питания, являются пороговые напряжения комплементарной пары полевых транзисторов и подвижность носителей в полупроводниковой структуре.

При работе КГ в ЦИС рассеивается электрическая мощность, пропорциональная частоте колебаний КГ, и температура активной области ЦИС будет возрастать в результате саморазогрева. На основе этого эффекта был предложен новый способ для измерения ПТХ ЦИС по изменению частоты встроенного КГ в процессе саморазогрева ЦИС рассеиваемой мощностью [10]. В основе способа лежит уменьшение частоты генерации КГ с ростом температуры. Относительный температурный коэффициент ξ частоты генерации КГ определяется температурной зависимостью времени задержки распространения сигнала ЛЭ ЦИС, является практически постоянным в диапазоне от 0 до 100°C, имеет значение порядка 0,1–0,3%/°C [8], то есть по чувствительности сравним с температурными коэффициентами стандартных способов измерения тепловых параметров ЦИС.

Сущность нового способа измерения ПТХ ЦИС заключается в том, что в заданные моменты времени t_j после включения КГ измеряют мгновенную мощность, потребляемую ЦИС от источника питания, и частоту колебаний КГ и ПТХ в момент времени t_j рассчитывают по формуле:

$$Z(t_j) = \frac{f_{\text{КГ}}(0) - f_{\text{КГ}}(t_j)}{K_f P_{cp}(t_j)}, \quad (5)$$

где $f_{\text{КГ}}(0)$ и $f_{\text{КГ}}(t_j)$ – частота колебаний КГ в моменты времени $t_0 = 0$ и t_j соответственно, K_f – температурный коэффициент частоты колебаний КГ, $P_{cp}(t_j)$ – средняя мощность, потребляемая ЦИС от начала нагрева до мо-

мента времени t_j , которая рассчитывается как среднее арифметическое:

$$P_{cp}(t_j) = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^j P(t_k), \quad (6)$$

где $P(t_k) = U_{\text{num}} I_{\text{nom}}(t_k)$, U_{num} – напряжение источника питания, $I_{\text{nom}}(t_k)$ – ток, потребляемый ЦИС в момент времени t_k .

Выражение (6) для $P_{cp}(t_j)$ учитывает изменение греющей мощности в процессе измерения с тем же температурным коэффициентом, что и частота:

$$P(t') = P_0 \left[1 - \frac{K_f \Delta \theta_n(t')}{f_{\text{КГ}}(0)} \right], \quad \text{где } P_0 \equiv P(0) - \text{мощность, потребляемая ЦИС в начале нагрева.}$$

В этом способе не требуется переключать ЦИС из режима нагрева в режим измерения ТЧП, ПТХ измеряется в режиме саморазогрева, а датчики температуры совмещены с источниками нагрева. Заметим, что способ применим для ЦИС, не содержащих p - n -переходов или не имеющих прямого доступа к ним.

2 ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПТХ ПЛИС

Описанный выше способ достаточно легко применим для программируемых ЦИС высокой степени интеграции: базовых матричных кристаллов, ПЛИС и т. п. На элементах ПЛИС легко синтезируются КГ различного уровня сложности [11]. При этом на кристалле ПЛИС может быть сформировано несколько КГ в различных областях кристалла, что дает как дополнительные возможности для контроля тепловых свойств ПЛИС, так и возможность варьировать общую мощность саморазогрева.

Упрощенная структурная схема измерительного комплекса, использованного для получения ПТХ ПЛИС, приведена на рисунке 3.

Устройство управляется микроконтроллером 7 и включает в себя температурные датчики 1 и 9, тестируемую ПЛИС 2, электронный ключ 3, токосъемный резистор 4, фильтр низких частот 5, усилитель постоянного тока 6, преобразователь интерфейса 8, кварцевый резонатор 10, ОЗУ 11. Полученные данные передаются на компьютер 12. Термодатчик 1 прижат к верхней поверхности ПЛИС. Внутри ПЛИС, помимо КГ, также сформирован делитель частоты на 64, что позволяет устранить влияние внешних цепей на частоту КГ и понизить ее до значения, которое позволяет измерить микроконтроллер (частота не может превышать половины тактовой частоты 20 МГц). Термодатчик 9 измеряет температуру окружающей среды. Схема измерителя достаточно простая и не требует особых пояснений.

Экспериментальные температурные зависимости частоты колебаний пяти экземпляров КГ, собранных на ПЛИС Altera EPM240T100C5 в корпусе TQFP-100, и их линейные аппроксимирующие функции приведены на

Рис. 3. Структурная схема измерительного комплекса

рисунке 4. Значения коэффициента детерминации R , близкие к 1, показывают высокую точность линейной аппроксимации, что подтверждает возможность использовать частоту КГ как ТЧП с относительным температурным коэффициентом равным 0,16%/С. Аналогичные зависимости были получены для ПЛИС фирмы Lattice M4A3-64/32 и M4A5-64/32 в корпусе PLCC-44, частота колебаний КГ которой при 25°C была 202 МГц и для FPGA Cyclone IV EP4CE10E22C8N в корпусе QFP-144, частота генерации которой, при такой же температуре, составила 540 МГц.

В качестве примера, на рисунке 5 показана ПТХ ПЛИС EPM240N100C5, полученная с использованием зависимости частоты КГ от температуры.

Поскольку тепловые постоянные времени различных слоев конструкции исследуемой ЦИС существенно различаются, на графике ПТХ (в полулогарифмическом масштабе) наблюдаются участки быстрого и медленного изменения. Участок быстрого роста соответствует накоплению тепла в соответствующем слое конструкции ЦИС (подобно накоплению заряда в конденсаторе), а участок медленного роста – квазистационарному процессу роста градиента температуры на границе слоев. Число слоев в конструкции

Рис. 4. Зависимости частоты колебаний КГ от температуры корпуса ПЛИС

Рис. 5. ПТХ ПЛИС типа EPM240N100C5

ЦИС и, соответственно, число слагаемых в правой части выражения (3) определяются числом участков быстрого или медленного роста на графике ПТХ.

Следует отметить, что визуальный анализ ПТХ на полулогарифмической шкале не всегда дает возможность даже примерно оценить число составляющих ПТХ таких конструктивно сложных устройств, как современные ИС. Это связано с тем, что некоторые слои могут иметь достаточно небольшие отличия в тепловых постоянных времени. Предлагаемый ниже вариант анализа позволяет в значительной степени решить эту проблему.

3 Анализ ПТХ и алгоритм расчета ТП ПЛИС

Для определения ТП ЦИС по экспериментальным ПТХ применяется метод структурных функций, развитый в работах Szekely V.A. [7]. При этом для реализации алгоритма используется тепловая схема и ПТХ ЦИС в представлении Кауэра. Аналогичный алгоритм разработан нами для определения ТП по ПТХ, заданной в представлении Фостера.

Результирующая экспериментальная ПТХ в представлении Фостера вида (3) – монотонно возрастающая функция, которая при существенном различии тепловых постоянных времени на графиках, построенных в полулогарифмическом масштабе, имеет явно выраженные участки быстрого и медленного роста. Эти участки соответствуют различным слоям конструкции ЦИС и границам между ними. Первая производная этой функции – монотонно спадающая функция:

$$H'(t) = \frac{dH(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \quad (7)$$

Для выявления характерных точек ПТХ с наименьшей и наибольшей крутизной предлагается умножить $H'(t)$ на линейно возрастающую функцию $g_1(t) = t$.

$$G(t) = t \times H'(t) = t \times \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \quad (8)$$

Эта операция эквивалентна операции перехода к логарифмической шкале времени и дифференцированию ПТХ по $\ln t$:

$$G(t) = \frac{dH(t)}{d(\ln t)} = t \times \frac{dH(t)}{dt} = t \times \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \quad (9)$$

Функция $G(t)$ имеет максимумы и минимумы, соответствующие характерным точкам ПТХ. Для нахождения этих характерных точек ПТХ необходимо взять производную от $G(t)$ и найти корни уравнения

Рис. 6. Иллюстрация способа определения числа звеньев тепловой цепи ЦИС

$$G'(t) = \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \left(1 - \frac{t}{\tau_{Ti}}\right) = 0. \quad (10)$$

После несложных преобразований, например, для трехзвенной модели получим следующее уравнение для нахождения характерных точек:

$$F(x) = e^{-x}(1-x) + \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \eta e^{-\eta x}(1-\eta x) + \frac{R_{T3}}{R_{T1}} \mu e^{-\mu x}(1-\mu x) = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } x = \frac{t}{\tau_{T1}}, \quad \eta = \frac{\tau_{T1}}{\tau_{T2}}, \quad \mu = \frac{\tau_{T1}}{\tau_{T3}}.$$

Обычно $\eta \ll 1$, а $\mu \ll \eta$. Тепловые сопротивления слоев различаются менее существенно; их различие может составлять от единиц до десятков раз. При увеличении η и μ максимумы $G(t)$ сглаживаются.

Предлагаемый алгоритм определения числа слагаемых в функции вида (5) проиллюстрирован на рисунке 6. В качестве примера, демонстрирующего возможности способа, проведен анализ взятой в качестве примера дискретной функции с одинаковыми тепловыми сопротивлениями и различающимися на порядок тепловыми постоянными времени шести звеньев:

$$A(t) = 10 \times (1 - \exp(-t/1)) + 10 \times (1 - \exp(-t/10)) + 10 \times (1 - \exp(-t/100)) + 10 \times (1 - \exp(-t/1000)) + 10 \times (1 - \exp(-t/10000)) + 10 \times (1 - \exp(-t/100000)).$$

Значения текущего времени дискретизации t задавались по формуле $0,1 \cdot 1,262^N$, где N – число дискретных значений $A(t)$, в данном примере равное 70.

Визуально кривая $A(t)$ выглядит как монотонно возрастающая функция и, не зная исходной формулы, опре-

делить число составляющих ее звеньев практически невозможно. Там же показана ее первая производная $F1(t)$.

Если умножить функцию $F1(t)$ на показательную функцию $F2 = 0,1 \cdot 1,262^N$, получим функцию $F3(t)$, в которой число максимумов соответствует числу слагаемых (экспонент) в функции $A(t)$. В общем случае, аналитическое значение функции $A(t)$ неизвестно, поэтому первую производную нужно вычислять, используя методы численного дифференцирования.

Очевидно, что аналогичного результата можно достичь, используя численное дифференцирование исследуемой функции на логарифмической шкале временного параметра t . Проведя второе численное дифференцирование, мы получим в местах перехода второй производной через ноль характерные точки, относительно которых несложно рассчитать экспоненциальные составляющие анализируемой ПТХ и на их основе – тепловую модель ИС. Порядок расчета подробно описан в [12].

Результаты анализа ПТХ ПЛИС EPM240T100C5, ее первая и вторая производные, полученные с использованием численного дифференцирования на логарифмической временной шкале, а также результирующая аппроксимация ПТХ показаны на рисунке 7.

Выражение для функции, аппроксимирующей экспериментальную ПТХ, имеет вид:

$$Z(t) = 2,97 \times (1 - \exp(-t/0,96)) + \\ + 8,99 \times (1 - \exp(-t/305)) + \\ + 8,6 \times (1 - \exp(-t/2832)) + \\ + 4,76 \times (1 - \exp(-t/43200)) + \\ + 9,54 \times (1 - \exp(-t/349000)).$$

Тепловая схема, соответствующая этой формуле, показана на рисунке 8.

Результаты анализа ПТХ ПЛИС Lattice M4A5-64/32 показаны на рисунке 9, а результаты расчета параметров ее тепловой схемы – на рисунке 10.

Аппроксимирующая функция, описывающая четырехзвенную тепловую схему ПЛИС типа Lattice M4A5-64/32, выглядит как:

Рис. 7. Расчет ПТХ ПЛИС EPM240T100C5

Рис. 8. 5-звенная тепловая схема ПЛИС EPM240T100C5

Рис. 9. Расчет ПТХ ПЛИС Lattice M4A5-64/32

Рис. 10. 4-звенная тепловая схема ПЛИС Lattice M4A5-64/32

$$Z(t) = 1,51 \times (1 - \exp(-t/0,91)) + \\ + 11,4 \times (1 - \exp(-t/2190)) + \\ + 12,6 \times (1 - \exp(-t/55000)) + \\ + 10,3 \times (1 - \exp(-t/403000)).$$

Сравнительный анализ полученных результатов теплового сопротивления тестируемых ИС с официальными данными производителей ПЛИС EPM240T100C5 [13] и Lattice M4A5-64/32 [14], приведенный в таблице, показал их достаточно близкое сходство.

Таблица
Сравнение результатов измерения
с паспортными данными

	Данные производителя		Экспериментальные данные	
	<i>R_{jc}</i>	<i>R_{ja}</i>	<i>R_{jc}</i>	<i>R_{ja}</i>
ПЛИС				
EPM240T100C5	12	39,5	11,96	34,86
M4A5-64/32	16	35	12,91	35,81

Выводы

1. Показано, что относительная температурная чувствительность ВЗРС ЦИС большинства типов, лежащая в пределах от $-0,1$ до $-0,3\%$ /K, не уступает температурной чувствительности напряжения на $p-n$ -переходе, обладает хорошей линейностью и позволяет использовать ВЗРС в качестве ТЧП при измерении тепловых характеристик ЦИС взамен традиционных термоэлектрических параметров.

2. Использование температурных зависимостей ВЗРС для измерения ПТХ ЦИС позволяет устранить некоторые погрешности, присущие известным способам измерения ПТХ с использованием в качестве ТЧП электрических параметров ЦИС:

- влияние паразитных переходных электрических процессов при переключении ЦИС из режима нагрева в режим измерения;
- влияние паразитных сопротивлений внутренних шин питания ЦИС;
- погрешность, обусловленную пространственным разделением источников тепла и элементов-датчиков температуры в структуре ЦИС.

3. Предложен новый алгоритм идентификации числа звеньев тепловых схем и определения тепловых параметров с использованием в качестве ТЧП температурной зависимости времени распространения сигнала ЛЭ.

4. Экспериментально измерены ПТХ ПЛИС нескольких типов и определены тепловые параметры звеньев тепловых схем. Полученные результаты хорошо соотносятся с известными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ogrenci-Memik Seda. Heat Management in Integrated circuits: On-chip and system-level monitoring and cooling. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2015.
2. Давидов П.Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1967. 144 с.
3. MIL-STD-883E, Test Method Standard For Microcircuits, Method 1012.1, Thermal Characteristics. URL: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
4. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard. URL: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
5. Sofia J.W. Fundamentals of thermal resistance measurement. Analysis Tech., Wakefield, MA, 1995.
6. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path. JEDEC standard JESD51-14. URL: http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14_1.pdf (дата обращения: 15.01.2021).
7. Szekely V.A. New evaluation method of thermal transient measurement results // J. Microelectron. 1997. V. 28. pp. 277–292.
8. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в измерительной аппаратуре. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 280 с.
9. Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г. Кольцевые генераторы: теория, характеристики, применение // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 12. С. 77–92.
10. Пат. 2613481 РФ МПК G01R 31/28/. Способ измерения переходной тепловой характеристики цифровых интегральных схем / Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г. № 2015146346 ; заявл. 27.10.2015 ; опубл. 16.03.2017. Бюл. № 8.
11. Медведев А.В., Чулков В.А. Кольцевые генераторы на ПЛИС // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2009. № 12. С. 50–53.
12. Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г. Определение тепловых параметров цифровых микросхем по температурным зависимостям времени задержки сигнала // Автоматизация процессов управления. 2015. № 3 (41). С. 89–96.
13. MAX II Device Handbook - Intel. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max2/max2_mii5v1.pdf (дата обращения: 15.01.2021).
14. Thermal Management - Lattice Semiconductor. URL: <http://www.latticesemi.com/en/Support/AnswerDatabase/6/8/~media/8089531A8153497C8E370914638998E9.ashx> (дата обращения: 15.01.2021).

REFERENCES

1. Ogrenci-Memik Seda. *Heat Management in Integrated Circuits: On-chip and System-Level Monitoring and Cooling*. London, United Kingdom, The Institution of Engineering and Technology, 2015.
2. Davidov P.D. *Analiz i raschet teplovykh rezhimov poluprovodnikovyykh priborov* [Analysis and Calculating of Thermal Characteristics of Semiconductor Devices]. Moscow, Energiia Publ., 1967. 144 p.
3. *MIL-STD-883E, Test Method Standard for Microcircuits, Method 1012.1, Thermal Characteristics*. Available at: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf> (accessed 15.01.2021).
4. *IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 Standard*. Available at: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf> (accessed 15.01.2021).
5. Sofia J.W. *Fundamentals of Thermal Resistance Measurement*. Analysis Tech., Wakefield, MA, 1995.
6. *JEDEC Standard JESD51-14. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path*. Available at: http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14_1.pdf (accessed 15.01.2021).
7. Szekely V.A. New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results. *J. Microelectron.*, 1997, vol. 28, pp. 277–292.
8. Zeldin E.A. *Tsifrovye integralnye mikroskhemyy v izmeritel'noi apparature* [Digital Integrated Circuits in Measuring Equipment]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 280 p.
9. Sergeev V.A., Tetenkin Ia.G. Koltsevye generatory: teoriya, kharakteristiki, primeneniye [Ring Generators: Analysis, Characteristics and Application]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2015, no. 12, pp. 77–92.
10. Sergeev V.A., Tetenkin Ia.G. *Sposob izmereniia perekhodnoi teplovoi kharakteristiki tsifrovyykh integralnykh skhem* [Method of Thermal Transient Measurement of Digital IC]. Pat. RF 2613481, Int.Cl.: G01R 31/28/. No. 2015146346. Date of filing: October 27, 2015. Date of publication: March 16, 2017. Bull. no. 8.
11. Medvedev A.V., Chulkov V.A. Koltsevye generatory na PLIS [Circular Generator on Programmable Logical Integrated Chip]. *Izvestiia VUZov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2009, no. 12, pp. 50–53.
12. Sergeev V.A., Tetenkin Ia.G. Opredeleniye teplovykh parametrov tsifrovyykh mikroskhem po temperaturnym zavisimostiam vremeni zaderzhki signala [Determination of Digital Integrated Circuits Thermal Parameters with the Use of Temperature Dependence of Signal Delay Time]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 3 (41), pp. 89–96.
13. *MAX II Device Handbook – Intel*. Available at: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max2/max2_mii5v1.pdf (accessed 15.01.2021).
14. *Thermal Management – Lattice Semiconductor*. Available at: <http://www.latticesemi.com/en/Support/AnswerDatabase/6/8/~media/8089531A8153497C8E370914638998E9.ashx> (accessed 15.01.2021).