

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.382.8.017.7

DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-4-350-360

Оценка адекватности тепловой модели КМОП цифровых интегральных схем по переходным тепловым характеристикам

В.А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин

*Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия*

sva@ulstu.ru

Эффективным диагностическим методом контроля качества цифровых интегральных схем (ЦИС) является измерение их тепловых параметров. Значения тепловых параметров реальных изделий определяются качеством их производства и могут существенно отличаться от расчетных значений.

Описан способ измерения переходной тепловой характеристики (ПТХ) ЦИС с использованием температурной зависимости частоты кольцевого генератора, построенного на логических элементах ЦИС. На примере ПТХ ЦИС типа CD4011 показан итерационный алгоритм расчета параметров линейной одномерной тепловой схемы ЦИС в приближении Фостера по значениям ПТХ в точках наименьшей крутизны, которые соответствуют нулям второй производной. Алгоритм апробирован при нахождении нулей второй производной ПТХ путем прямого численного дифференцирования ПТХ и дифференцирования аппроксимирующего ПТХ полинома 9-й степени. Показано, что ПТХ исследуемой ЦИС соответствует трехзвенной тепловой схеме.

Рассмотренные варианты расчета дают практически одинаковые значения тепловых параметров тепловой схемы, которые достаточно хорошо идентифицируются с характерными слоями конструкции ЦИС.

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

Для цитирования: Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г. Оценка адекватности тепловой модели КМОП цифровых интегральных схем по переходным тепловым характеристикам // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 350–360. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-4-350-360

Assessment of Adequacy of the CMOS Linear Thermal Model of Digital Integrated Circuits on Transient Thermal Characteristics

V.A. Sergeev, Ya.G. Tetenkin

*Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

sva@ulstu.ru

Effective diagnostic method of quality control of the digital integrated circuits (DIC) is measurement of their thermal parameters. Values of thermal parameters of real products are defined by quality of their production and can significantly differ from calculated values.

A method for measuring the transient thermal characteristics (TTC) of the digital integrated circuits (DIC) with the temperature dependence of the frequency of the DIC ring oscillator has been described. An iterative algorithm for calculating parameters of the linear one-dimensional Foster thermal circuit uses the values of TTC, which correspond to the zeros of the TTC second derivative, has been shown. The algorithm was tested in determining the zeros of the second derivative of TTC by direct numerical differentiation method and by differentiating the 9-th order polynomial approximating function. It has been shown that TTC of the tested DIC corresponds to the three-stage thermal circuit.

Both methods of calculation give almost identical values of thermal parameters of the thermal scheme which well corresponds to different technological layers of the DIC structure.

Keywords: digital integrated circuits; thermal equivalent schemes; thermal parameters; transient thermal characteristics; measurement; algorithm of calculation.

For citation: Sergeev V.A., Tetenkin Ya.G. Assessment of Adequacy of CMOS Linear Thermal Model of Digital Integrated Circuits on Transient Thermal Characteristics // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – No. 4. – P. 350–360. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-4-350-360

Введение. Функциональные возможности и физическая надежность цифровых интегральных схем (ЦИС) в эксплуатационных режимах во многом определяются температурой активной области. Тепловые свойства ЦИС закладываются при проектировании. Однако значения тепловых параметров реальных изделий определяются качеством их производства и могут существенно отличаться от расчетных значений. Поэтому эффективным диагностическим методом контроля качества ЦИС является измерение их тепловых параметров [1, 2].

Согласно принципу теплоэлектрической аналогии [1, 2], тепловая схема ЦИС планарной конструкции с односторонним отводом тепла, в которой тепловой поток направлен от активной области на рабочей поверхности чипа к корпусу прибора и далее в окружающую среду, в приближении Фостера представляет собой m последовательно соединенных RC -звеньев (рис.1). Задача контроля тепловых свойств ЦИС сводится к определению значений тепловых сопротивлений R_{T_i} и теплоемкостей C_{T_i} или тепловых постоянных времени ($\tau_{T_i} = R_{T_i}C_{T_i}$) RC -звеньев тепловой схемы, соответствующих определенным слоям конструкции ЦИС.

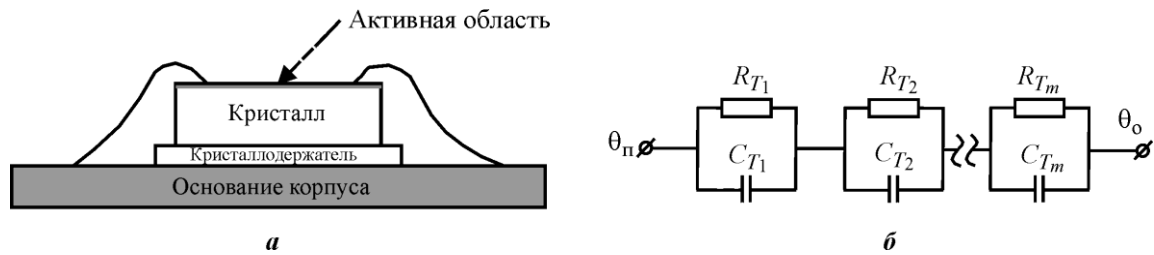


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ЦИС (а) и соответствующая ей тепловая схема (б) в приближении Фостера (θ_n – температура перехода, θ_o – температура окружающей среды)
 Fig. 1. A design of DIC schematically (a) it is schematical, and the thermal scheme (b) corresponding to it in Foster's approach (θ_n – transition temperature, θ_o – ambient temperature)

Способы измерения переходной тепловой характеристики ЦИС. Тепловые параметры ЦИС могут быть определены по переходной тепловой характеристике (ПТХ), которая получена по изменению температуры $\Delta\theta_n(t)$ активной области ЦИС после подачи на нее ступеньки греющей мощности. Для тепловой схемы, состоящей из m RC-звеньев, зависимость $\Delta\theta_n(t)$ описывается выражением [3]

$$\Delta\theta_n(t) = P_T Z_T(t) = P_T \sum_{i=1}^m R_{T_i} (1 - \exp(-t/\tau_{T_i})), \quad (1)$$

где P_T – тепловая мощность, рассеиваемая ЦИС; $Z_T(t) = \sum_{i=1}^m R_{T_i} (1 - \exp(-t/\tau_{T_i}))$ – переходное тепловое сопротивление, или ПТХ ЦИС.

Отметим, что для ЦИС в пластмассовых корпусах приближение одностороннего отвода тепла является довольно грубым. Тем не менее описание тепловых свойств ЦИС с помощью линейной тепловой схемы – удобный для практических приложений способ, однако идентификация параметров этой схемы и их связь с конструктивными параметрами ЦИС нетривиальна. Поэтому оценка адекватности линейных тепловых схем ЦИС в пластмассовых корпусах по их ПТХ представляется актуальной.

В зарубежной практике для измерения ПТХ полупроводниковых изделий с p – n -переходами используется способ по стандарту JESD51-14 [3], состоящий в том, что на полупроводниковое изделие подают ступеньку электрической греющей мощности заданной величины. В процессе разогрева изделия в определенные моменты времени t_j на короткое время (длительностью до нескольких микросекунд) греющую мощность отключают, через p – n -переход пропускают малый прямой ток и измеряют температурочувствительный параметр – напряжение $U_{p-n}(t)$ на p – n -переходе с известным температурным коэффициентом K_U . Приращение температуры $\Delta\theta_n(t_j)$ p – n -перехода в момент времени t_j рассчитывают по формуле

$$\Delta\theta_n(t_j) = \frac{U_{p-n}(t_j) - U_{p-n}(0)}{K_U},$$

где $U_{p-n}(0)$ – падение напряжения на p – n -переходе до разогрева изделия; $U_{p-n}(t_j)$ – падение напряжения на p – n -переходе в момент времени t_j .

Точность измерения ПТХ определяется числом отсчетов на декаду временной оси, и в известном измерителе T3Ster [4], реализующем описанный способ, число отсчетов достигает 20 точек на декаду временной оси.

Недостатком этого способа является значительная погрешность измерения напряжения на p – n -переходе сразу после выключения греющей мощности из-за влияния паразитных переходных электрических процессов при переключении полупроводникового изделия из греющего режима в измерительный режим [5]. Для снижения этой погрешности температурочувствительный параметр необходимо измерять через некоторое время после выключения греющей мощности, за которое электрический переходный процесс в основном завершится. За это время температура p – n -перехода может заметно измениться. Для исключения этой погрешности измеряется кривая охлаждения полупроводникового изделия, т.е. изменение температуры активной области после нагрева до стационарного теплового режима и выключения греющей мощности. При этом время измерения ПТХ увеличивается как минимум в два раза. Следует учитывать, что кривые нагрева и охлаждения полупроводникового изделия не являются строго симметричными. Кроме того, в изделиях со сложной топологией активной области, к которым относятся ЦИС, источники тепла и датчик температуры (p – n -переход), как правило, пространственно разнесены, что приводит к заниженному значению температуры. Применительно к ЦИС в качестве датчика температуры используется один из защитных диодов по входам логических элементов либо диод, специально сформированный в структуре ЦИС.

Измерение переходной тепловой характеристики ЦИС по температурной зависимости частоты кольцевого генератора. Применительно к КМОП ЦИС предлагается легко автоматизируемый способ [6, 7], лишенный описанных недостатков. Разработан аппаратно-программный комплекс [8] для измерения ПТХ по изменению частоты кольцевого генератора, построенного на логических элементах контролируемой ЦИС. Суть способа состоит в том, что в заданные моменты времени t_j после включения кольцевого генератора измеряются мгновенная мощность, потребляемая ЦИС от источника питания, и частота колебаний кольцевого генератора. Значение ПТХ в момент времени t_j определяется по формуле

$$Z(t_j) = \frac{f_{к.г}(0) - f_{к.г}(t_j)}{K_f P_{cp}(t_j)},$$

где $f_{к.г}(0)$ и $f_{к.г}(t_j)$ – частота генерации кольцевого генератора в моменты времени $t_0 = 0$ и t_j соответственно; K_f – температурный коэффициент частоты колебаний кольцевого генератора; $P_{cp}(t_j)$ – средняя мощность, потребляемая ЦИС за время от начала нагрева до момента времени t_j .

В основе способа лежат эффекты саморазогрева ЦИС рассеиваемой при работе кольцевого генератора мощностью и уменьшения частоты его генерации с ростом температуры. Относительный температурный коэффициент ξ частоты генерации кольцевого генератора определяется температурной зависимостью времени задержки распространения сигнала логических элементов ЦИС, является практически постоянным в диапазоне 0–100 °С и имеет значение порядка 0,2–0,3 %/°С, т.е. сравним с температурными коэффициентами электрических параметров ЦИС [1–4]. При реализации предлагаемого способа не требуется переключать ЦИС из режима нагрева в режим измерения температурочувствительного параметра, ПТХ измеряется в режиме нагрева, а датчики

температуры совмещены с источниками нагрева. Отметим, что способ также дает некоторое усредненное по логическим элементам ЦИС значение температуры, но это значение адекватно отражает тепловые свойства ЦИС в эксплуатационных режимах.

Алгоритм определения тепловых параметров ЦИС по переходной тепловой характеристике. Для определения тепловых параметров полупроводниковых изделий по кривым нагрева (или охлаждения) в [9] предложено использовать так называемую дифференциальную структурную функцию, которая определяется как производная суммарной теплоемкости по суммарному тепловому сопротивлению $K = dC_{\Sigma}/dR_{\Sigma}$ слоев полупроводниковых изделий в заданный момент времени по мере распространения тепла в конструкции изделия. Алгоритм расчета структурной функции основан на сложных многоступенчатых преобразованиях при переходе от модели Фостера к модели Кауэра. Это приводит к накоплению систематических ошибок и, как следствие, к потере точности [10, 11].

Более простой алгоритм определения тепловых параметров ЦИС по ПТХ рассмотрим на примере ПТХ ЦИС типа CD4011, измеренной в спокойном воздухе с помощью аппаратно-программного комплекса по изменению частоты кольцевого генератора с 10 отсчетами на каждую (кроме первой) декаду шкалы времени (табл.1).

Таблица 1

Результаты измерения переходной тепловой характеристики ЦИС типа CD4011 по частоте кольцевого генератора

Table 1

Results of measurement of TTC of the CD4011 DIC on RG frequency

t_j , мс	$Z(t_j)$, К/Вт	t_j , мс	$Z(t_j)$, К/Вт	t_j , мс	$Z(t_j)$, К/Вт	t_j , мс	$Z(t_j)$, К/Вт	t_j , мс	$Z(t_j)$, К/Вт
0,13	0,524	11,81	7,393	228,07	21,97	4308	42,25	80988	65,16
0,29	1,170	14,67	7,839	281,07	23,66	5313	43,34	99861	68,18
0,48	2,013	18,19	8,484	347,1	25,34	6552	44,41	123132	71,28
0,72	2,757	22,53	9,054	428,1	26,95	8080	45,45	151825	74,55
1,01	3,476	27,88	9,798	528,1	28,52	9964	46,56	186825	77,92
1,37	3,922	34,48	10,591	651,1	30,10	12287	47,68	229825	81,45
1,81	4,418	42,62	11,48	803,1	31,56	15152	49,02	282825	84,77
2,35	4,914	52,65	12,48	991,1	33,03	18685	50,33	348825	87,87
3,01	5,261	65,02	13,57	1223	34,47	23041	51,92	429825	90,57
3,83	5,558	80,27	14,73	1509	35,73	28412	53,68	529825	92,80
4,84	5,856	99,07	16,00	1861	37,04	35034	55,59	653825	94,66
6,08	6,203	122,07	17,41	2296	38,26	43199	57,65		
7,61	6,550	150,07	18,90	2832	39,80	53267	59,95		
9,49	6,947	185,07	20,43	3493	41,11	65681	62,45		

Тепловые постоянные времени слоев конструкции исследуемой ЦИС различаются на несколько порядков величины. На графике ПТХ (рис.2), построенном в полулогарифмическом масштабе, отчетливо наблюдаются три участка 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 ЦИС и, соответственно, число слагаемых в

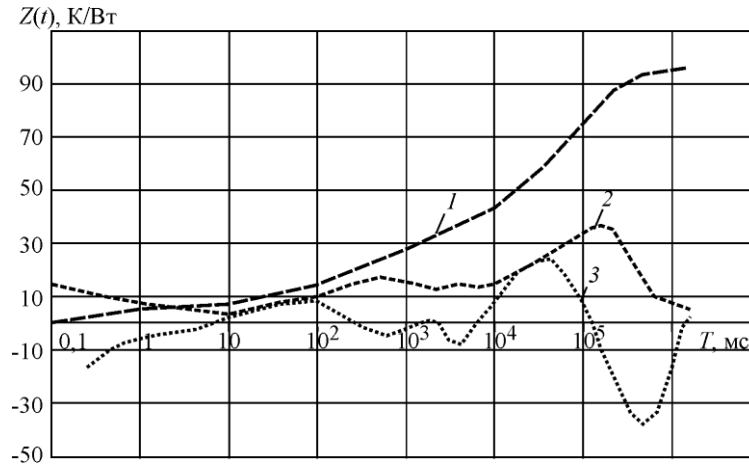


Рис.2. Исходная ПТХ ЦИС типа CD4011 (кривая 1) и ее первая (кривая 2) и вторая (кривая 3) производные, полученные прямым численным дифференцированием по пяти точкам со сглаживанием

Fig.2. Transient thermal characteristic of CD4011 DIC (curve 1) and its first (curve 2) and second (curve 3) derivatives, received by direct numerical differentiation

правой части выражения (1) определяются числом участков быстрого или медленного роста на графике ПТХ. Очевидно, что точки максимальной и минимальной крутизны ПТХ соответствуют максимуму и минимуму ее первой производной или нулям второй производной. Точки перехода через ноль второй производной снизу вверх соответствуют участку ПТХ с минимальной крутизной, и значение полного теплового сопротивления $Z_T\{t_k\}$ в k -й точке минимального роста ПТХ равно сумме тепловых сопротивлений k первых RC -звеньев тепловой цепи:

$$Z_T\{t_k\} = \sum_{i=1}^k R_{T_i}.$$

Поскольку $Z_T\{t_1\} = R_{T_1}$, то для нахождения теплового сопротивления R_{T_1} первого звена тепловой цепи надо определить первую точку минимальной крутизны ПТХ.

Тепловая постоянная времени k -го звена определяется в точках ПТХ, в которых выполняется условие $t = \tau_{T_k}$. Эти точки согласно (1) при выполнении условия $\tau_{T_k} \ll \tau_{T_{k+1}}$ соответствуют моменту времени, при котором тепловое сопротивление k -го слоя достигает значения, равного $(1 - e^{-1}) \approx 0,63$ от полного значения R_{T_k} :

$$Z_T(t = \tau_{T_k}) = \sum_{i=1}^{k-1} R_{T_i} + 0,63R_{T_k} = Z_T\{t_{k-1}\} + 0,63R_{T_k}.$$

Данные точки легко находятся на графике ПТХ. При этом первая тепловая постоянная времени соответствует точке временной оси, для которой переходное тепловое сопротивление $Z_T(t)$ принимает значение, равное 0,63 от теплового сопротивления R_{T_1} первого звена. Для исследуемого образца получено $R_{T_1} = 5,8$ К/Вт, $\tau_{T_1} = 1,35$ мс.

В результате последовательного выполнения итераций для всех точек минимальной крутизны (третья точка найдена экстраполяцией второй производной) получены значения тепловых параметров для всех трех звеньев. Выражение для функции (1) имеет вид (значения тепловых постоянных времени даны в миллисекундах)

$$Z_{T_1}(t) = 5,8(1 - \exp(-t/1,35)) + 34,6(1 - \exp(-t/480)) + 58(1 - \exp(-t/176000)).$$

Для проверки возможности повышения точности определения тепловых параметров тепловой схемы ЦИС проведен их расчет с использованием полиномиальной регрессии экспериментальной ПТХ. Путем подбора в среде Mathcad найден полином 9-й степени, аппроксимирующий исходную ПТХ с минимальной средней квадратической ошибкой (СКО):

$$f(t) = -1,15 + 1,84t - 0,324t^2 + 0,0395t^3 - 0,0029t^4 + 0,00013t^5 - 3,55 \cdot 10^{-6}t^6 + 5,4 \cdot 10^{-8}t^7 - 4,375 \cdot 10^{-10}t^8 + 1,43 \cdot 10^{-12}t^9. \quad (2)$$

Вторая производная аппроксимирующего полинома (2) также имеет три точки перехода через ноль снизу вверх, которые несколько отличаются от точек, полученных прямым численным дифференцированием ПТХ (рис.3).

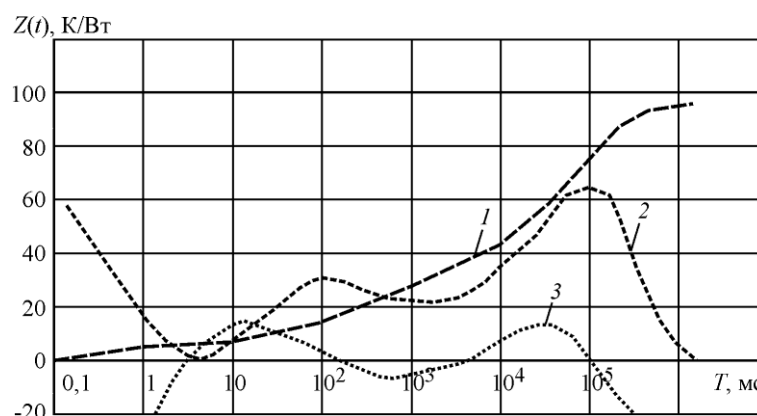


Рис.3. Исходная ПТХ (кривая 1) и ее первая (кривая 2) и вторая (кривая 3) производные аппроксимирующего полинома 9-й степени (для наглядности первая и вторая производные увеличены соответственно в 20 и 100 раз)

Fig.3. Initial TTC (curve 1) and first (curve 2) and second (curve 3) derivatives of the approximating polynomial of the 9th degree (for descriptive reasons the first and second derivatives are increased, respectively in 20 and 100 times)

По итерационному алгоритму определения тепловых параметров получено выражение для функции вида (1), но с другими параметрами:

$$Z_{T_2}(t) = 5,4(1 - \exp(-t/1,30)) + 37,8 \times \\ \times (1 - \exp(-t/520)) + 54,6(1 - \exp(-t/180000)).$$

Как видно из сравнения тепловых параметров ЦИС, найденных с помощью итерационного алгоритма по точкам наименьшей крутизны ПТХ разными способами обработки исходной ПТХ, их различие (кроме τ_{T_2}) не превышает 10 % (табл.2).

Графики исходной экспериментальной ПТХ и аппроксимирующих ее функций приведены на рис.4. СКО аппроксимации экспериментальной ПТХ функцией $Z_{T_1}(t)$ составила 1,48 К/Вт, функцией $Z_{T_2}(t)$ – 1,42 К/Вт. Таким образом, оба способа обработки экспериментальной ПТХ дают практически одинаковые результаты. Наибольшее различие наблюдается у параметров среднего звена, что указывает на неоднородный характер распространения тепла в пластмассовом корпусе ЦИС.

Таблица 2

Тепловые параметры ЦИС, найденные разными способами обработки исходной ПТХ

Table 2

The DIC thermal parameters found with use various ways of processing of initial TTC

Алгоритм расчета	Первое звено		Второе звено		Третье звено	
	R_{T_1} , К/Вт	τ_{T_1} , мс	R_{T_2} , К/Вт	τ_{T_2} , мс	R_{T_3} , К/Вт	τ_{T_3} , с
Прямое дифференцирование	5,8	1,37	34,6	480	58	176
Полиномиальная регрессия	5,4	1,32	37,8	520	54,6	180
Относительная разность, %	7,4	3,7	9,3	11,5	6,2	5,0

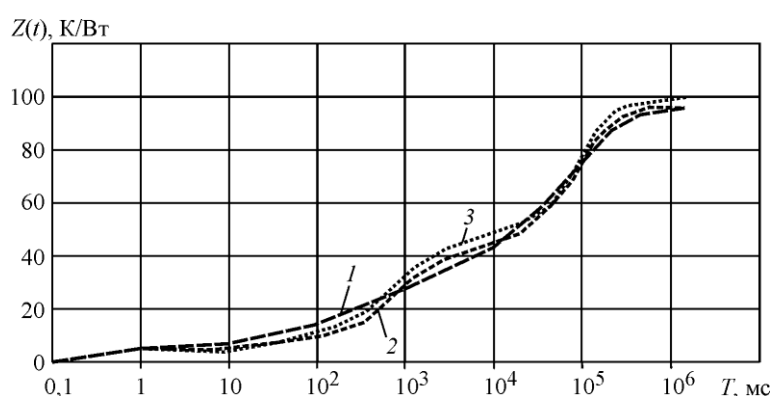


Рис.4. Исходная ПТХ (кривая 1) и аппроксимирующие ее функции $Z_{T_1}(t)$ (кривая 2) и $Z_{T_2}(t)$ (кривая 3), построенные на основе одномерной тепловой модели

Fig.4. Graphs of initial TTC (curve 1), function $Z_{T_1}(t)$ (curve 2) and function $Z_{T_2}(t)$ (curve 3) approximating it constructed on the basis of one-dimensional thermal model

Первое звено тепловой схемы исследуемой ЦИС хорошо идентифицируется как звено, соответствующее кристаллу. Согласно данным производителя [12], площадь активной области кристалла этого типа ЦИС $S_a \approx 1,2 \text{ мм}^2$, толщина кристалла $d = 400 \text{ мкм}$. Принимая теплопроводность сильнолегированного кремния $\lambda = 80 \text{ Вт/м}$ и учитывая, что в кольцевой генератор (область нагрева) включены из четырех только три логических элемента ЦИС, для теплового сопротивления кристалла имеем $R_{T_{кр}} = \frac{3d}{4S_a \cdot \lambda} \approx 5,6 \text{ К/Вт}$, что практически равно среднему значению R_{T_1} , полученному по ПТХ двумя разными способами обработки. Расчетная тепловая постоянная времени кристалла $\tau_{T_{кр}} = d^2/a$ при температуропроводности кремния $a = 9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ равна 1,77 мс, что примерно соответствует значениям τ_{T_1} , полученным по ПТХ.

Точный расчет других звеньев затруднителен, но второе звено можно идентифицировать как соответствующее слою кристаллодержатель – основание корпуса, а третье – участку тепловой цепи основание корпуса – среда. Полное тепловое сопротивление переход – среда аналога ЦИС типа CD4011 микросхем типа 561ЛА7, согласно [13], не превышает 120 К/Вт, что соответствует полученным значениям.

Для проверки алгоритма определения тепловых параметров линейных тепловых схем КМОП ЦИС по ПТХ на рис.5 приведены графики исходной ПТХ и ее первой и второй производных, полученных прямым численным дифференцированием и усредненных по результатам измерения девяти образцов микросхем типа CD4011. Все образцы имеют три нуля второй производной ПТХ, и их тепловые схемы содержат три звена. Усредненные тепловые параметры этих схем приведены в табл.3. Наибольший разброс значений наблюдается для тепловых параметров второго звена, что связано с качеством теплоотвода от кристаллодержателя и неоднородностью теплового потока.

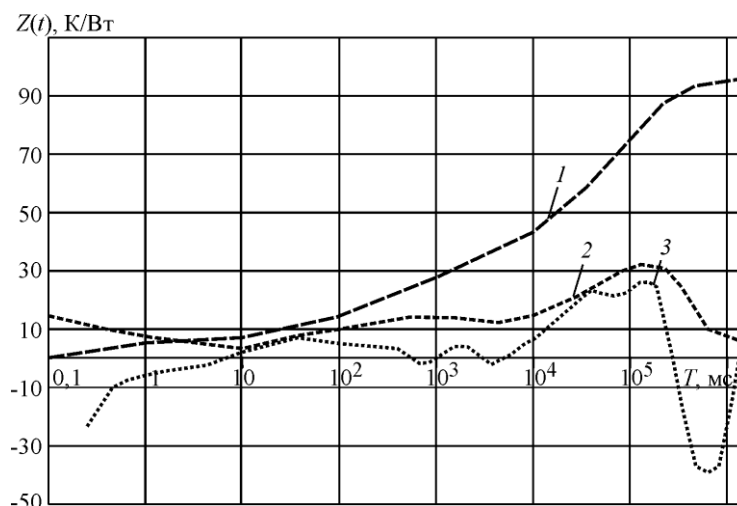


Рис.5. Исходная ПТХ (кривая 1) и ее первая (кривая 2) и вторая (кривая 3) производные ЦИС типа CD4011, усредненные по девяти образцам

Fig.5. TTC (curve 1) and their first (curve 2) and second (curve 3) derivative CD4011 DIC average on 9 samples

Таблица 3

Усредненные по девяти образцам тепловые параметры трехзвенных тепловых моделей ЦИС типа CD4011 и оценки их выборочных СКО

Table 3

The thermal parameters of the CD4011 and estimates of DIC 3-unit thermal models of their selective mean square deviation average on 9 samples

Параметр	Первое звено		Второе звено		Третье звено	
	R_{T_1} , К/Вт	τ_{T_1} , мс	R_{T_2} , К/Вт	τ_{T_2} , мс	R_{T_3} , К/Вт	τ_{T_3} , с
Усредненный тепловой	5,7	1,35	37,2	545	56,0	180
СКО	0,2	0,05	1,8	30	0,8	4

Отметим, что на графике второй производной ПТХ в диапазоне 1–10 с наблюдается локальный максимум, который у большинства образцов не достигает нуля. Этот максимум свидетельствует о наличии слоя конструкции в теле ЦИС, который может быть связан с кристаллодержателем. Особенности профиля второй производной ПТХ могут служить диагностической информацией при контроле качества.

Заключение. По представленным результатам можно сделать вывод, что способ измерения ПТХ по изменению частоты кольцевого генератора, построенного на логи-

ческих элементах ЦИС, имеет сравнимую с известным способом чувствительность, лишен недостатков, связанных с переходными электрическими процессами, и позволяет получать ПТХ с разрешением, достаточным для ее анализа на различных участках. ПТХ исследованных образцов КМОП ЦИС типа CD4011 имеет три характерных участка медленного роста (полки), что соответствует трехзвенной тепловой схеме, и адекватно описывается функцией в виде суммы трех экспоненциальных функций.

Итерационный алгоритм расчета тепловых параметров ЦИС по ПТХ с использованием прямого численного дифференцирования и дифференцирования полиномиальной аппроксимации ПТХ дает практически одинаковые значения параметров тепловой схемы ЦИС, звенья которой хорошо соотносятся со слоями конструкции данного типа ЦИС.

Литература

1. **Закс Д.И.** Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. – М.: Радио и связь, 1983. – 128 с.
2. **Чернышов А.А., Тюхин А. А.** Контроль тепловых характеристик интегральных схем // Зарубежная радиоэлектроника. – 1983. – № 5. – С. 90–95.
3. IC thermal measurement method – electrical test method (single semiconductor device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard. – URL: www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf (дата обращения: 8.02.2017).
4. T3Ster – Thermal Transient Tester. – URL: www.mentor.com/micred (дата обращения: 8.02.2017).
5. **Сергеев В.А., Юдин В.В.** Измерение тепловых параметров полупроводниковых изделий с применением амплитудно-импульсной модуляции греющей мощности // Метрология. – 2010. – № 4. – С. 37–47.
6. **Сергеев В.А., Тетенькин Я. Г., Юдин В.В.** Способ определения теплового сопротивления переход-корпус цифровых интегральных микросхем // Патент России № 2569922, 2015. Бюл. № 34.
7. **Сергеев В. А., Тетенькин Я. Г.** Определение тепловых параметров цифровых микросхем по температурным зависимостям времени задержки сигнала // Автоматизация процессов управления. – 2015. – №3. – С. 89–97.
8. **Сергеев В. А., Тетенькин Я. Г.** Алгоритм определения тепловых параметров цифровых интегральных схем по переходной тепловой характеристике // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 1. – С. 112–119.
9. **Szekely V., Tran van Bien.** Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics. – 1988. – Vol. 31. – No. 9. – P. 1363–1368.
10. **Вяхурев В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3. – С. 90–92.
11. **Schweitzer D., Pape H., Chen L.** Transient measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits // Proc. of 24th IEEE SEMI-THERM Symposium. – San Jose, California, USA. – 2008. – P. 193–199.
12. CD4011 Datasheet(PDF) – Texas Instruments. – URL: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26846/TI/CD4011.html> (дата обращения: 8.02.2017).
13. **Горлов М. И., Николаева Е.П.** Расчет надежности интегральных микросхем: методические указания к выполнению индивидуальных заданий. – Воронеж: ВГТУ, 2006. – 31 с.

Поступила после доработки 13.02.2017 г.; принята к публикации 25.04.2017 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, доцент, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), sva@ulstu.ru

Тетенькин Ярослав Геннадьевич – ведущий инженер Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, соискатель базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Россия, 432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), a732041@yandex.ru

References

1. Zaks D.I. *Parametry teplovogo rezhima poluprovodnikovyykh mikroskhem* [Parameters of the thermal mode of semiconductor integrated circuits]. Moscow, Radio i svyaz', 1983. 128 p. (In Russian).
2. Chernyshov A.A., Tyukhin A. A. Kontrol' teplovykh kharakteristik integral'nykh skhem [Control of thermal characteristics of integrated circuits]. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1983, no. 5, pp. 90–95. (In Russian).
3. *IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard*. Available at: www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf (accessed: 10.02.2017).
4. *T3Ster – Thermal Transient Tester*. Available at: www.mentor.com/micred (accessed: 10.02.2017).
5. Sergeev V.A., Yudin V.V. Izmerenie teplovykh parametrov poluprovodnikovyykh izdelij s primeneniem amplitudno-impul'snoj modulyatsii greyushhej moshhnosti [Measurement of thermal parameters of semiconductor products with application of pulse-amplitude modulation of the heating power]. *Metrologiya – Metrologia*, 2010, no. 4, pp. 37–47. (In Russian).
6. Sergeev V.A., Teten'kin YA. G., Yudin V.V. *Sposob opredeleniya teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus tsifrovyykh integral'nykh mikroskhem* [Method of determination of thermal resistance junction-case of digital integrated circuits]. Patent 2569922 RF, MPK G01R31/28, 2015. (In Russian).
7. Sergeev V. A., Teten'kin YA. G. Opredelenie teplovykh parametrov tsifrovyykh mikroskhem po temperaturnym zavisimostyam vremeni zaderzhki signala [Determination of thermal parameters of digital integrated circuits on temperature dependences of time of a delay of a signal]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya – Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, 2015, no. 3, pp. 89–97. (In Russian).
8. Sergeev V.A., Teten'kin Ya.G. Algoritm opredeleniya teplovykh parametrov tsifrovyykh integral'nykh skhem po perekhodnoj teplovoj kharakteristike [Algorithm of determination of thermal parameters of digital integrated circuits according to the transitional thermal characteristic]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya – Automation of control processes*, 2016, no. 1, pp.112–119. (In Russian).
9. Szekely V., Tran van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, 1988, vol. 31, no. 9, pp. 1363–1368.
10. Vyakhirev V. Izmerenie teplovykh kharakteristik poluprovodnikovyykh ehlektronnykh komponentov [Measurement of thermal characteristics of semiconductor electronic components. *Tekhnologii v ehlektronnoj promyshlennosti – Technologies in Electronic Industry*, 2013, no. 3, pp. 90–92. (In Russian).
11. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits. *Proc. of 24th IEEE SEMI-THERM Symposium*. San Jose, California, USA, 2008, pp. 193–199.
12. *CD4011 Datasheet(PDF) – Texas Instruments*. Available at: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26846/TI/CD4011.html> (accessed: 10.02.2017).
13. Gorlov M.I., Nikolaeva E.P. *Raschet nadezhnosti integral'nykh mikroskhem : metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu individual'nykh zadaniy* [Calculation of reliability of integrated chips: methodical instructions to performance of individual tasks]. Voronezh, VGTU, 2006. 31 p. (In Russian).

Submitted 13.02.2017; accepted 25.04.2017.

Sergeev Viacheslav A. – doctor of engineering, associate professor; head of Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Kotel'nikov UBIRE RAS); head of the Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University at Kotel'nikov UBIRE RAS (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2.), sva@ulstu.ru.

Tetenkin Iaroslav G. – lead engineer, Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), ufire@mv.ru