

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛИС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ КОЛЬЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

© 2016 г. В.А. СЕРГЕЕВ, Я.Г. ТЕТЕНЬКИН

Ульяновский филиал института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук
e-mail: sva@ulstu.ru

Температура активной области цифровых интегральных схем (ЦИС) во многом определяет функциональную и физическую надежность микросхем. Тепловые параметры (ТП) ЦИС определяющие характер изменения и распределения температуры в активной области изделия при выделении в нем электрической мощности, определяются качеством изготовления ЦИС и могут иметь значительный разброс. Поэтому одним из широко применяемых средств контроля качества ЦИС является измерение их ТП [1, 2].

Особо следует отметить важность контроля тепловых режимы работы ЦИС, работающих в широких температурных диапазонах (до +100-120 °С), например в составе бортовой РЭА, а также контроль температуры кристаллов СБИС, имеющих высокую плотность рассеиваемой в них мощности (40-60 Вт/см²).

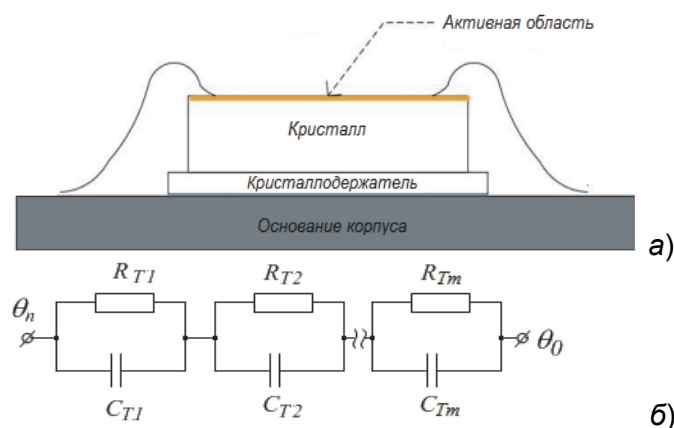


Рис. 1. Конструкция ЦИС (а) схематично, и соответствующая ей тепловая схема (б) в приближении Фостера: θ_n – температура перехода, θ_0 – температура окружающей среды.

Согласно принципу теплоэлектрической аналогии [5], тепловая схема ЦИС планарной конструкции с односторонним отводом тепла, в которой полупроводниковый кристалл (чип) монтируется на металлический кристаллодержатель, закрепленный на основании корпуса, а источники тепла расположены в тонком слое на рабочей поверхности чипа, и 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.

Задача контроля тепловых свойств ЦИС сводится к определению значений тепловых сопротивлений (R_{Ti}) и теплоемкостей (C_{Ti}) или тепловых постоянных времени ($T_{Ti} = R_{Ti}C_{Ti}$) отдельных слоев, составляющих конструкцию ЦИС. Эти параметры могут

быть определены по переходной тепловой характеристике (ПТХ) ЦИС, которая представляет собой зависимость температуры активной области ЦИС от времени после подачи на ЦИС ступеньки единичной греющей мощности. Для тепловой схемы, состоящей из m RC-звеньев, можно записать [6]:

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

где P_T - тепловая мощность, рассеиваемая ЦИС,

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

В зарубежной практике для измерения ПТХ полупроводниковых изделий (ППИ) с p - n -переходами (в том числе и ЦИС) используют метод по стандарту JESD51-14 [7], состоящий в том, что на ППИ 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 напряжение $U_{p-n}(t)$ на p - n -переходе, температурный коэффициент K_U которого известен. Приращение температуры $\Delta\theta_n(t_j)$ p - n -перехода в момент времени t_j определяют по изменению напряжения $U_{p-n}(t)$:

$$\Delta\theta_n(t_j) = \frac{U_{p-n}(t_j) - U_{p-n}(0)}{K_U}, \quad (2)$$

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 .

Недостатком этого 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 [1,8]. Для снижения этой погрешности измерение необходимо проводить 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. При этом длительность релаксации электрических процессов заранее неизвестна, зависит от величины греющей мощности и может значительно отличаться от образца к образцу.

Применительно к КМОП ЦИС нами предложен новый способ и разработан аппаратно-программный комплекс для измерения ПТХ по изменению частоты кольцевого генератора (КГ), построенного на логических элементах (ЛЭ) контролируемой ЦИС [9, 10]. В заданные моменты времени t_j после включения КГ измеряют мгновенную мощность, потребляемую ЦИС от источника питания, и частоту колебаний КГ, и значение ПТХ в момент времени t_j определяют по формуле:

$$Z(t_j) = \frac{f_{KГ}(0) - f_{KГ}(t_j)}{K_f P_{cp}(t_j)}, \quad (3)$$

где $f_{KГ}(0)$ и $f_{KГ}(t_j)$ – 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 момента времени t_j .

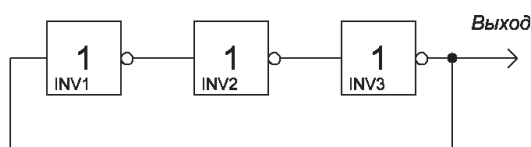


Рис. 2. Трехэлементный кольцевой генератор

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 °С, имеет значение порядка 0,2 - 0,3 %/°С [3], то есть по чувствительности вполне сравним с температурными коэффициентами электрических параметров ЦИС.

Частота генерации КГ зависит только от времени задержки единичного элемента задержки и общего числа таких элементов в структуре КГ.

Для случая m -каскадного КГ частота генерации будет определяться выражением:

$$f_0 = \frac{1}{2m\tau_d}. \quad (4)$$

В работе [4] показано, что основными факторами, определяющими зависимость частоты КГ от температуры, при стабильном напряжении питания, будут пороговые напряжения комплементарной пары полевых транзисторов и подвижность носителей.

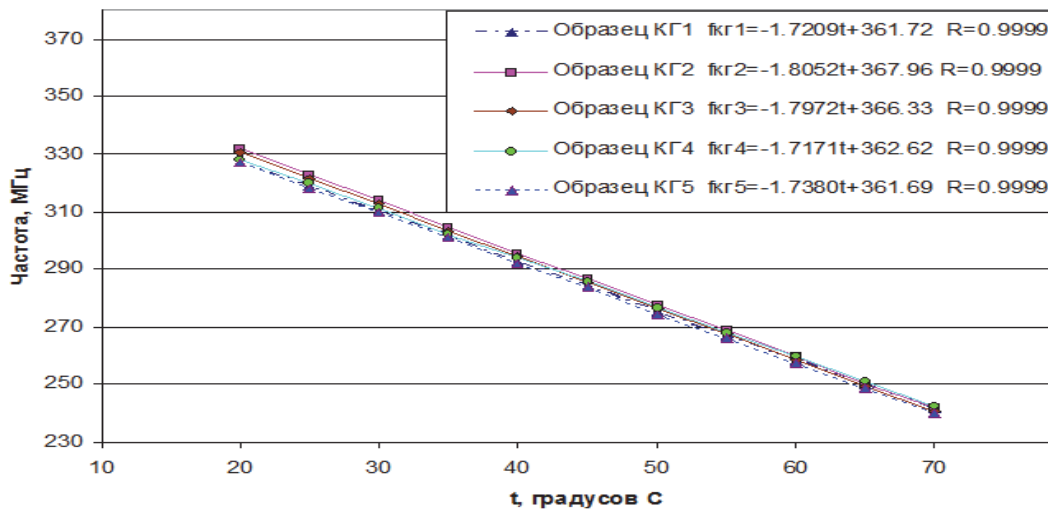


Рис. 3. Зависимости частоты колебаний КГ от температуры корпуса ПЛИС.

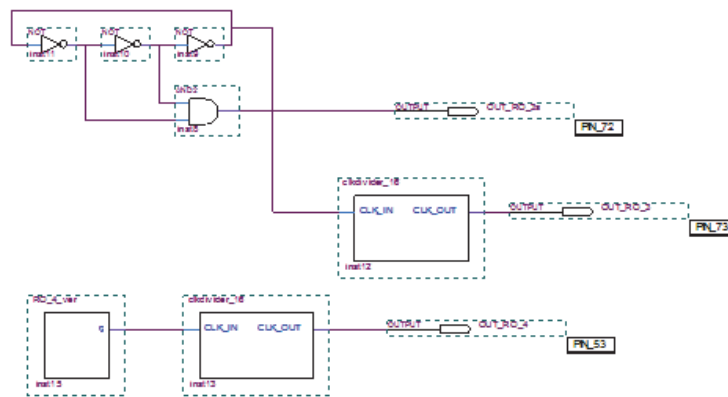


Рис. 4. Проект КГ в среде Quartus II.

Экспериментальные температурные зависимости частоты колебаний пяти экземпляров КГ, собранных на ПЛИС Altera EPM240T100C5 в корпусе TQFP-100, приведены на рис. 3. Там же приведены линейные аппроксимирующие функции, описывающие эти экспериментальные зависимости. Как видно из значений коэффициента детерминации R , точность линейной аппроксимации весьма высокая, что позволяет говорить о практической возможности использовать эти зависимости при измерении тепловых параметров ЦИС как ТЧП с температурным коэффициентом изменения частоты КГ равным 0.16%/С. Аналогичные зависимости были получены для ПЛИС фирмы Lattice iM4A3-64/32 и iM4A5-64/32 в

корпусе PLCC-44, с той лишь разницей, что частота КГ при 25С равнялась 202МГц, что говорит о большей задержке в элементах этих ПЛИС.

Схема проекта для EPM240T100C5, выполненная в среде разработки Altera Quartus II, представлена на рис. 4. В качестве тестовой конфигурации был выбран вариант 4-каскадного КГ, состоящего из трех буферных элементов и одного инвертора. Для устранения влияния внешней нагрузки и возможности сопряжения с измерительным комплексом, КГ дополнен 4-х разрядным делителем на 16. Выходная частота КГ (при 25°С) составила 319 МГц, соответственно на выходе счетчика частота находилась в районе 20 МГц. Проект выполнен с использованием языка описания аппаратуры Verilog HDL и схемотехнического моделирования.

Как уже упоминалось, тепловые модели реализованы по схеме Фостера, полное переходное тепловое сопротивление которой равно сумме переходных тепловых сопротивлений отдельных звеньев тепловой цепи:

$$H_T(t) = \sum_{i=1}^m R_{Ti} [1 - \exp(-t/\tau_{Ti})]. \quad (5)$$

Иначе говоря, результирующая экспериментальная ПТХ всегда будет представлять из себя сумму экспонент.

Это монотонно возрастающая функция, которая при существенном различии тепловых постоянных времени имеет явно выраженные участки быстрого и медленного роста. Эти участки соответствуют различным конструктивным слоям ЦИС и границам между ними.

Первая производная этой функции – монотонно спадающая функция:

$$H'(t) = \frac{dH(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \quad (6)$$

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

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

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

$$G(t) = \frac{dH(t)}{d(\ln t)} = t \times \frac{dH(t)}{dt} = t \times \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \quad (8)$$

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

$$G'(t) = \sum_{i=1}^m \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} e^{-\frac{t}{\tau_{Ti}}} \left(1 - \frac{t}{\tau_{Ti}}\right) = 0 \quad (9)$$

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

$$F(x) = e^{-x}(1-x) + \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \eta e^{-\eta x}(1-\eta x) + \frac{R_{T3}}{R_{T1}} \mu e^{-\mu x}(1-\mu x) = 0 \quad (10)$$

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

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, и ее надо умножать на $g_2(t) = t^2$.

Результаты подобного 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 рис. 5.

Выражение для функции, аппроксимирующей экспериментальную ПТХ выглядит как:

$$Z(t) = 2.97*(1-EXP(-t/0.48)) + 7.99*(1-EXP(-t/305)) + 5.6*(1 - EXP(-t/2832)) + 4.76*(1-EXP(-t/43200)) + 5.54*(1 - EXP(-t/349000)).$$

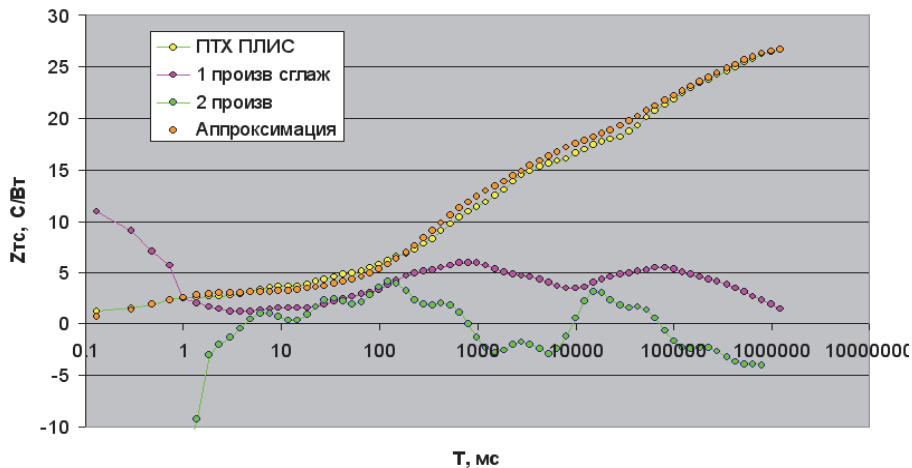


Рис. 5. Расчет ПТХ ПЛИС EPM240T100C5 фирмы Altera.

Тепловая модель, соответствующая этой формуле показана на рис. 6.

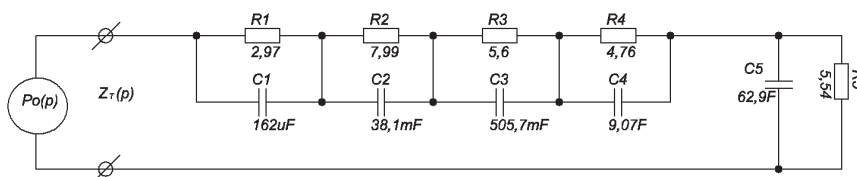


Рис. 6. 5-звенная ТЭМ для ПЛИС EPM240T100C5.

Результаты анализа ПТХ ПЛИС Lattice iM4A5-64/32 показаны на рис. 7 и рис. 8.

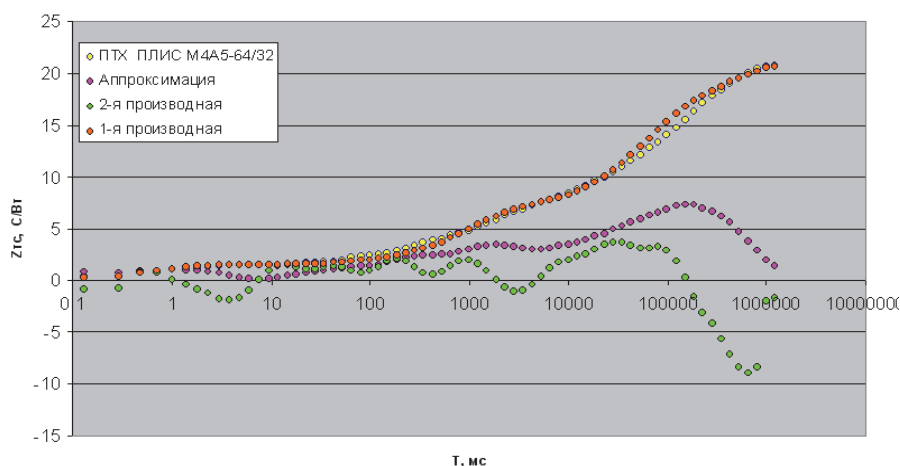


Рис. 7. Расчет ПТХ ПЛИС Lattice iM4A5-64/32.

Аппроксимирующая функция, описывающая четыре звена тепловой модели, выглядит как:

$$Z(t) = 1.51*(1 - EXP(-t/0.8)) + 5.16*(1 - EXP(-t/990)) + 8.96*(1 - EXP(-t/55000)) + 5.35*(1 - EXP(-t/403000)).$$

Тепловая модель, соответствующая этой формуле показана на рис. 8.

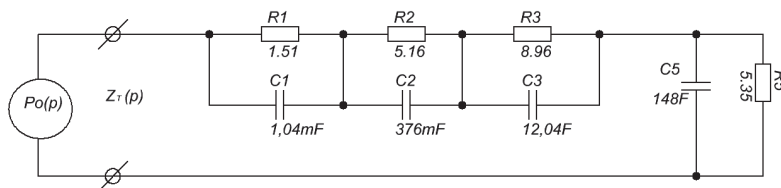


Рис. 8. 4-звенная ТЭМ для ПЛИС Lattice iM4A5-64/32.

Выводы

Предлагаемый способ измерения тепловых параметров ЦИС по изменению частоты КГ, построенного на ЛЭ ЦИС, в результате саморазогрева ЦИС потребляемой электрической мощностью, позволяет существенно упростить процедуру измерения и исключить ряд существенных недостатков известных способов с использованием в качестве ТЧП выходного напряжения логической единицы или логического нуля.

Основное преимущество способа – отсутствие необходимости переключения ЦИС из режима нагрева в режим измерения, что существенно упрощает реализацию способа, повышает его точность и быстродействие.

Достоинством предложенного способа является также высокая разрешающая способность - с учетом довольно высокой частоты генерации КГ на основе современных ЦИС время дискретизации при измерении ПТХ ЦИС можно установить 100 мкс и меньше. Это позволяет детально исследовать начальные участки ПТХ контролируемых ЦИС, а также участки, соответствующие переходным слоям конструкции ЦИС.

Экспериментальная проверка способа показала хорошее совпадение результатов измерения с результатами, полученными альтернативным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Закс Д.И.* Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. - М.: Радио и связь, 1983. - 128 с.
2. *Чернышев А.А.* Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.А. Чернышев. – М.: Радио, 1988. – 256 с.
3. *Зельдин Е.А.* Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат, 1986, с. 62-65.
4. *Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г.* Кольцевые генераторы: принципы построения, характеристики и применение // Успехи современной электроники – 2015 - №12. – С. 77-92.
5. Патент 2569922 Российская Федерация, МПК G01R31/28. Способ определения теплового сопротивления переход-корпус цифровых интегральных микросхем / Сергеев В.А., Тетенькин Я. Г., Юдин В.В.; Ульяновский гос.технический университет.- заявка № 2014134469/28, заявл. 22.08.2014, опубл. 10.12.2015, бюл. № 34.
6. *Сергеев В.А.* Определение тепловых параметров цифровых микросхем по температурным зависимостям времени задержки сигнала / В. А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин // Автоматизация процессов управления. – 2015. – №3. – С. 89-97.
7. EIA/JEDEC STANDARD. Integrated Circuits Thermal Measurement Method-Electrical Test Method (Single Semiconductor Device). EIA/JESD51-1. December 1995.
8. *Сергеев В.А.* Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная промышленность – 2004. – № 1. – С. 45-48.
9. *Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г.* Определение тепловых параметров цифровых микросхем по температурным зависимостям времени // Автоматизация процессов управления. - 2015. - № 3 (41). - С. 89-96
10. *Сергеев В.А., Тетенькин Я.Г.* Алгоритм определения тепловых параметров цифровых интегральных схем по переходным тепловым характеристикам // Автоматизация процессов управления. - 2016. - № 1 (43). - С. 112-119.