

Измерение теплового сопротивления цифровых интегральных схем по изменению частоты колебаний кольцевого генератора

В. А. СЕРГЕЕВ^{1,2}, Я. Г. ТЕТЕНЬКИН¹

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Для измерений теплового сопротивления цифровых интегральных схем предложено использовать время задержки сигнала логических элементов в качестве температурочувствительного параметра. Показано, что частота колебаний кольцевого генератора, построенного на логических элементах, обратно пропорциональна времени задержки сигнала и линейно уменьшается с ростом температуры. Описан способ измерения тепловых сопротивлений цифровой интегральной схемы в процессе её саморазогрева потребляемой электрической мощностью.

Ключевые слова: цифровые интегральные схемы, тепловое сопротивление, время задержки сигнала, кольцевой генератор, частота генерации, температурная зависимость.

It is offered to use a propagation delay time of logical elements of the digital integrated circuit as a temperature sensitive parameter for measurement of thermal resistance. It is shown that the frequency of oscillations of the ring generator constructed on logical elements of the digital integrated circuit inversely proportional logical elements signal delay time, linearly decreases with growth of temperature. A method for measuring thermal resistances of the digital integrated circuit, caused by self-heating of the digital integrated circuit of its consumption electric power is described.

Key words: digital integrated circuits, thermal resistance, propagation delay time, a ring oscillator, oscillation frequency, temperature dependence.

Тенденции развития цифровых интегральных схем (ЦИС) состоят в повышении предельных рабочих частот до десятков гигагерц, а также в увеличении количества логических элементов на чипе. Такие изменения приводят к тому, что плотность рассеиваемой в чипе мощности возрастает и, как следствие, увеличивается температура активной области кристалла ЦИС. Температура же активной области схемы во многом определяет её функциональную и физическую надёжность. Необходимо контролировать тепловые режимы работы ЦИС, особенно, когда схемы входят в электронные модули, функционирующие в широких температурных диапазонах, как например, ЦИС в составе бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

При наблюдениях за тепловыми параметрами руководствуются стандартом [1]. Один из способов контроля заключается в разогреве интегральной схемы импульсом, имеющим известные электрическую мощность и длительность $t_{\text{н}}$, и дальнейшем определении приращения температуры $\Delta\theta_{\text{н}}(t_{\text{н}})$ активной области ЦИС за время её саморазогрева. Необходимое приращение определяют по изменению некоторого температурочувствительного параметра (ТЧП) с заданным температурным коэффициентом. В качестве ТЧП рекомендуется рассматривать падение напряжения на одном из $p-n$ -переходов ЦИС при малом прямом токе. Измерения повторяют многократно для различных значений $t_{\text{н}}$. По полученным данным строят переходную тепловую характеристику, т. е. зависимость приращения температуры

$p-n$ -перехода от времени $\Delta\theta_{\text{н}}(t_{\text{н}})$. Затем определяют компоненты полного теплового сопротивления ЦИС, соответствующие отдельным слоям конструкции, например, методом структурных функций [2].

При использовании указанного способа возникают погрешности, обусловленные тепловыми и электрическими переходными процессами. Особенно такие процессы проявляются в начале нагрева ЦИС, когда необходимо фиксировать малые изменения ТЧП на уровне начальных (до нагрева) значений этого параметра и случайных помех за короткий период времени, пока температура активной области схемы не успела существенно измениться [3, 4]. При использовании в качестве ТЧП напряжения логического нуля или логической единицы на выходах логических элементов ЦИС в известных методах [5–7] определения теплового импеданса возникают погрешности, обусловленные сложно определяемым и трудно компенсируемым падением напряжения на внутренних шинах питания. Кроме того, режимы нагрева интегральных схем отличаются от режимов выделения теплоты в ЦИС в условиях эксплуатации. В данной статье авторы предлагают в качестве ТЧП при измерениях тепловых параметров ЦИС на основе комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП) использовать частоту кольцевого генератора (КГ), построенного на логических элементах ЦИС. Такое решение позволит преодолеть принципиальные сложности и недостатки существующих методов измерения тепловых параметров интегральных схем.

Частота генерации КГ определяется временем задержки $\tau_{\text{зад}}$ распространения сигналов логических элементов [8]. В большинстве современных ЦИС, изготовленных по различным технологиям, время задержки распространения сигнала составляет десятки, единицы, а иногда даже доли единиц наносекунд и возрастает с увеличением температуры в среднем на 0,2–0,5 %/К, что сравнимо с температурной чувствительностью электрических параметров цифровых схем [5, 9]. В качестве примера можно рассмотреть схему КГ, построенного на трёх логических элементах. Частота колебаний такого генератора близка к предельной рабочей частоте ЦИС и обратно пропорциональна времени задержки распространения сигнала логического элемента:

$$f_{\text{КГ}} = 1/(2m\tau_{\text{зад}}), \quad (1)$$

где m – количество логических элементов в КГ.

Мощность, поглощаемая КМОП ЦИС, прямо пропорциональна частоте переключения логических элементов интегральной схемы [8]. Такая мощность приводит к саморазогреву ЦИС и соответствующему уменьшению частоты генерации КГ. Заметим, что мощность, потребляемую ЦИС в режиме генерации, можно регулировать путём подбора нагрузки логических элементов.

Температурные зависимости частоты колебаний КГ. Экспериментальные температурные зависимости частоты колебаний КГ для пяти генераторов, собранных на ЦИС CD4011 (зарубежный аналог 561ЛА7), показаны в табл. 1.

При измерениях зависимости частоты колебаний генератор помещали в термостат, температуру которого контролировали с погрешностью не более 1 °С. Перед началом измерений частоты колебаний генератора интегральную схему выдерживали в термостате не менее 10 мин при каждом новом значении температуры. Экспериментальные температурные зависимости $f_{\text{КГ}}(\theta)$ можно аппроксимировать линейными функциями вида

$$f_{\text{КГ}}(\theta) = f_{\text{КГ}0} - K_f \theta,$$

где K_f – температурный коэффициент частоты колебаний КГ; $f_{\text{КГ}0}$ – частота колебаний КГ при температуре 0 °С.

В табл. 2. приведены параметры указанных функций и значения коэффициента детерминации R . Из табл. 2 следует, что точность аппроксимации температурных зависимостей $f_{\text{КГ}}(\theta)$ линейными функциями в диапазоне температур 20–100 °С (см. табл. 1) весьма высока (отклонение коэффициента детерминации R от единицы для всех образцов не превышает 10^{-4}).

Способ измерения тепловых параметров ЦИС. Для реализации предложенного способа нечётное число ($m > 1$) логических элементов контролируемой ЦИС соединяют по схеме КГ с ключом в цепи обратной связи, подключают к источнику питания с напряжением $E_{\text{пит}}$ и замыкают ключ. Затем измеряют потребляемый ток $I_{\text{пот}}$ и частоту $f_{\text{КГ}}$ сразу же после начала генерации (до разогрева активной области ЦИС), а также в определённые моменты времени t_i в процес-

Т а б л и ц а 1
Температурные зависимости частоты колебаний КГ

Температура θ , °С	Частота колебаний КГ $f_{\text{КГ}}$, кГц				
	КГ1	КГ2	КГ3	КГ4	КГ5
20	3992,5	4251,1	4133,1	4037,1	4088,2
30	3892,7	4132,0	4017,3	3932,1	3973,7
40	3787,6	4020,4	3908,8	3826,0	3870,4
50	3677,7	3895,8	3787,6	3718,8	3762,0
60	3567,4	3782,8	3677,8	3618,4	3652,9
70	3467,5	3669,3	3567,5	3513,5	3547,0
80	3356,6	3551,9	3453,3	3401,1	3430,0
90	3255,9	3441,8	3346,3	3299,0	3327,1
100	3154,9	3324,8	3232,5	3193,5	3217,3
110	3050,8	3205,1	3116,1	3088,1	3111,1
120	2947,1	3096,1	3010,2	2980,0	2999,1

Т а б л и ц а 2

Параметры линейных функций вида $f_{\text{КГ}}(\theta) = f_{\text{КГ}0} - K_f \theta$, аппроксимирующих температурные зависимости частоты КГ

Параметр линейной функции	Номер образца генератора				
	КГ1	КГ2	КГ3	КГ4	КГ5
$f_{\text{КГ}0}$, кГц	4203,1	4473,8	4354,5	4249,0	4303,9
K_f , кГц/°С	10,5	11,6	11,2	10,6	10,9
R	0,9999	0,9999	0,9999	1,000	0,9999

се работы КГ. По измеренным значениям $f_{\text{КГ}}(t_i)$ рассчитывают составляющие теплового сопротивления ЦИС [10]. Сущность способа поясняется эпюрами сигналов, представленными на рис. 1. При замыкании цепи обратной связи в момент времени t_0 генератор начинает генерировать импульсы (см. рис. 1, а) с частотой (1). При увеличении температуры активной области ЦИС в результате саморазогрева на $\Delta\theta_n(t)$ время задержки сигнала логического элемента схемы будет возрастать, а частота генерации КГ, соответственно, линейно уменьшаться:

$$f_{\text{КГ}}(t) = f_{\text{КГ}}(0) - K_f \Delta\theta_n(t).$$

По результатам изменений частот $f_{\text{КГ}}(0)$, $f_{\text{КГ}}(T_i)$ через время T_i после включения КГ (см. рис. 1, б) можно определить приращение температуры активной области ЦИС (см. рис. 1, в):

$$\Delta\theta_n(T_i) = [f_{\text{КГ}}(0) - f_{\text{КГ}}(T_i)] / K_f = [\Delta f_{\text{КГ}}(T_i)] / K_f. \quad (2)$$

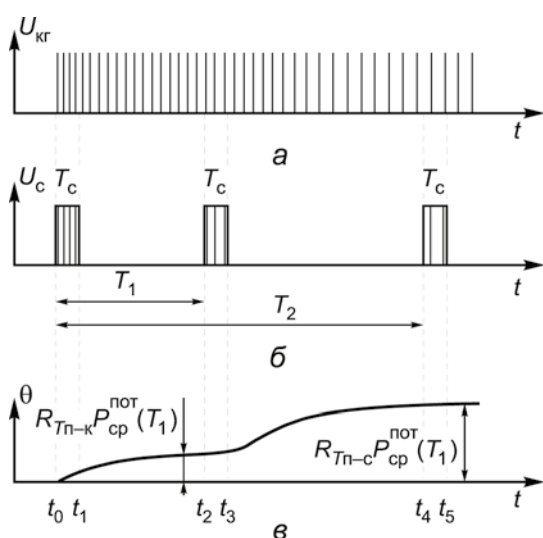


Рис. 1. Эпюры сигналов, поясняющие принцип измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем: а – импульсы на выходе кольцевого генератора; б – строб-импульсы, вырабатываемые генератором; в – изменение температуры перехода цифровой интегральной схемы

Наиболее распространённой тепловой моделью ЦИС является плоскостойкая система, состоящая из n однородных слоёв с заданными геометрическими размерами и теплофизическими параметрами материалов [3, 5]. Источники теплоты, как правило, располагаются вблизи рабочей поверхности кристалла ЦИС. Эквивалентная тепловая схема такой модели по Фостеру согласно принципу теплоэлектрической аналогии представляет собой несколько последовательно соединённых RC -звеньев с параметрами $\{R_{Ti}, C_{Ti}\}$, где R_{Ti} , C_{Ti} – тепловое сопротивление и теплоёмкость определённого слоя конструкции ЦИС, соответственно.

В практических приложениях наиболее широко применяется упрощённая тепловая схема ЦИС, содержащая два RC -звена: $R_{Tп-к}$, $C_{Tп-к}$ – тепловое сопротивление и теплоёмкость переход-корпус и $R_{Тк-с}$, $C_{Тк-с}$ – тепловое сопротивление и теплоёмкость корпуса ЦИС. В таких линейных тепловых моделях изменение температуры поверхности структуры $\Delta\theta_n(t)$ определяется законом изменения полной рассеиваемой мощности $P(t)$ и выражается через интеграл Дюамеля [11]:

$$\theta_n(t) = \theta_0 + \int_0^t h(t-t')P(t')dt', \quad (3)$$

где $h(t-t')$ – отклик температуры структуры на δ -подобный импульс мощности в момент времени t' .

В приближении двухзвенной тепловой схемы ЦИС функция отклика температуры имеет вид

$$h(t-t') = \frac{R_{Tп-к}}{\tau_{Tп-к}} e^{-(t-t')/\tau_{Tп-к}} + \frac{R_{Тк-с}}{\tau_{Тк-с}} e^{-(t-t')/\tau_{Тк-с}}, \quad (4)$$

где $\tau_{Tп-к} = R_{Tп-к}C_{Tп-к}$ – тепловая постоянная времени переход-корпус; $\tau_{Тк-с} = R_{Тк-с}C_{Тк-с}$ – тепловая постоянная времени корпус-среда.

Поскольку для КМОП ЦИС потребляемая мощность пропорциональна частоте колебаний, то в процессе разогрева эта мощность будет изменяться с тем же температурным коэффициентом, что и частота:

$$P(t') = P_0[1 - K_f \Delta\theta_n(t')],$$

где $P_0 \equiv P(0)$ – мощность, потребляемая ЦИС в начале нагрева.

Для более точного определения теплового сопротивления необходимо учесть изменения потребляемой мощности в процессе цикла измерений. Решение уравнения (3) с учётом выражения (4) для $h(t-t')$ и температурной зависимости потребляемой мощности с точностью до членов порядка $(K_f \Delta\theta_n)^2$ примет вид

$$\Delta\theta_n(t) = \Delta\theta_n^0(t) \left(1 - K_f \frac{\Delta\theta_n^0(t)}{2} \right), \quad (5)$$

где $\Delta\theta_n^0(t)$ – решение уравнения (3) в отсутствие температурной зависимости потребляемой мощности, т. е. при $P(t') = P_0 \equiv P(0) = \text{const}$;

$$\Delta\theta_n^0(t) = P_0 R_{Tп-к} [1 - e^{-t/\tau_{Tп-к}}] + P_0 R_{Тк-с} [1 - e^{-t/\tau_{Тк-с}}]. \quad (6)$$

Для большинства типов современных ЦИС выполняется условие $\tau_{Tп-к} \ll \tau_{Тк-с}$, что позволяет при выборе момента отсчёта частоты генерации КГ определять различные составляющие полного теплового сопротивления схемы. Через время T_1 после начала генерации, удовлетворяющее условию $\tau_{Tп-к} \ll T_1 \ll \tau_{Тк-с}$, вторым слагаемым в правой части (6) можно пренебречь. Тогда изменение температуры активной области ЦИС с точностью до членов порядка $\exp(-T_1/\tau_{Tп-к})$ можно представить следующим образом:

$$\Delta\theta(T_1) = P_0 R_{Tп-к} [1 - (K_f P_0 R_{Tп-к})/2]. \quad (7)$$

С учётом малости величины $K_f P_0 R_{Tп-к}$ из (7) получим выражение

$$R_{Tп-к} = \frac{\Delta\theta_n(T_1)}{[1 - K_f \Delta\theta_n(T_1)/2]P_0}. \quad (8)$$

Величина $[(1 - K_f \Delta\theta_n(T_1)/2)]P_0$ в знаменателе выражения (8) с точностью до членов $[K_f \Delta\theta_n(T_1)]^2$ равна средней мощности $P_{ср}^{пот}(T_1)$, потребляемой ЦИС за время T_1 . Величину $P_{ср}^{пот}(T_1) = I_{ср}^{пот}(T_1)E_{пит}$ при известном напряжении $E_{пит}$ источника питания можно определить, измерив средний ток $I_{ср}^{пот}(T_1)$, который потребляет ЦИС из источника питания за время нагрева T_1 . Для этого надо измерить напряжение U_R на токосъёмном резисторе R в цепи питания ЦИС в начале ($t \approx 0$) нагрева $U_R(0)$ и через время T_1 после начала нагрева $U_R(T_1)$:

$$I_{ср}^{пот}(T_1) = [U_R(0) + U_R(T_1)]/(2R).$$

Таким образом, определив частоту генерации КГ в момент времени T_1 и используя соотношение (2), можно рас-

считать тепловое сопротивление переход–корпус ЦИС по формуле

$$R_{Тп-к} = (\Delta f_{КГ}(T_1)) / (I_{ср}^{пот}(T_1) E_{пит} K_f). \quad (9)$$

Если время T_2 нагрева ЦИС будет в несколько (например, в 3–5) раз больше тепловой постоянной времени корпус–среда ($T_2 \gg \tau_{Тк-с}$), то из решения уравнения (5) с учётом (6) получим аналогичную (9) формулу для определения полного теплового сопротивления переход–среда ЦИС:

$$R_{Тп-с} = R_{Тп-к} + R_{Тк-с} = [\Delta f_{КГ}(T_2)] / [I_{ср}^{пот}(T_2) E_{пит} K_f]. \quad (10)$$

Достоинством предложенного способа является возможность определения температуры перехода ЦИС с высокой разрешающей способностью по времени, которая (при заданной погрешности) определяется длительностью T_c строб-импульса при измерениях частоты КГ методом дискретного счёта. Поскольку частота генерации КГ на основе логических элементов современных ЦИС довольно высока (порядка десятков и сотен мегагерц), то погрешность измерения частоты даже при $T_c \approx 100$ мкс и меньше не будет превышать долей процента. Это позволяет детально исследовать тепловые процессы в начале нагрева ЦИС, характерные времена которых определяются тепловой постоянной времени кристалла ЦИС и составляют сотни микросекунд.

На рис. 2 приведена структурная схема устройства, реализующего предложенный способ. Устройство содержит устройство управления 1, контролируемую ЦИС 2, источник питания 3, токосъёмный резистор 4, формирователь 5 строб-импульсов, цифровой вольтметр 6, схему 2И-НЕ 7, используемую для исключения влияния частотомера на частоту генерации, вычислитель 8, счётчики импульсов 9–11, цифровой коммутатор 12.

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии счётчики 9–11 обнулены. Устройство управления 1 формирует импульс цикла измерений T_u (на схеме не показан) который поступает на входы первого логического элемента КГ и контролируемой микросхемы 2, а также на вход внешнего запуска цифрового вольтметра 6 и формирователь 5 строб-импульсов. В момент времени t_0 КГ начинает генерировать импульсы $U_{КГ}$ с частотой следования $f_{КГ}$ (см. рис. 1, а), и ЦИС начинает нагреваться. Импульсы, генерируемые КГ, поступают на первый вход схемы 2И-НЕ 7. Падение напряжения на токосъёмном резисторе R , пропорциональное среднему току потребления ЦИС в интервалах времени t_0-t_1 , t_2-t_3 и t_4-t_5 (см. рис. 1, в) регистрируется вольтметром 6. Информационный выход цифрового вольтметра 7 соединён с входом вычислителя 8.

Формирователь 5 строб-импульсов формирует три строб-импульса длительностью T_c (см. рис. 1, б) в начале генерации и через время T_1 , T_2 . Строб-импульсы поступают на второй вход схемы 2И-НЕ 7 и управляют цифровым коммутатором 12, который разрешает поступление импульсов КГ с выхода схе-

мы 2И-НЕ 7 на соответствующий счётчик импульсов. В результате при поступлении первого строб-импульса на первый счётчик импульсов 9 поступит n_0 импульсов КГ, а при приходе второго и третьего строб-импульсов на счётчики импульсов 10, 11 поступит n_1 и n_2 импульсов КГ, соответственно (см. рис. 1, б). Число импульсов, поступивших на определённый счётчик, прямо пропорционально средней частоте генерации КГ за время действия соответствующего строб-импульса. На вычислитель 8 с цифрового вольтметра 6 поступает информация о величине тока потребления ЦИС в начале цикла измерений и через интервалы времени T_1 , T_2 . С источника питания 3 поступает информация о напряжении питания контролируемой ЦИС, а со счётчиков 9–11 – о частоте $f_{КГ}(0) = n_0 T_c$ в начале генерации КГ, а также о частотах $f_{КГ}(T_1) = n_1 T_c$, $f_{КГ}(T_2) = n_2 T_c$ через интервалы времени T_1 , T_2 , соответственно (см. рис. 1, в). Вычислитель 8 рассчитывает: изменение частоты генерации КГ в процессе саморазогрева ЦИС через интервалы времени T_1 , T_2 от моментов включения $\Delta f_{КГ}(T_1) = f_{КГ}(0) - f_{КГ}(T_1)$, $\Delta f_{КГ}(T_2) = f_{КГ}(0) - f_{КГ}(T_2)$, соответственно; средний ток потребления за эти же интервалы времени; значение соответствующего компонента теплового сопротивления ЦИС по формуле (9) или (10).

Оценка погрешности измерений теплового сопротивления ЦИС. При определении частоты с помощью электронно-счётного частотомера погрешность измерений определяется нестабильностью кварцевого генератора, которой можно пренебречь, и погрешностью дискретизации, определяемой из выражения [12]:

$$\delta_d = (f_{КГ} T_c)^{-1}. \quad (11)$$

В предложенном авторами варианте устройства наиболее существенной будет систематическая методическая погрешность, обусловленная изменением частоты из-за нагрева контролируемой ЦИС за время первого строб-импульса T_c

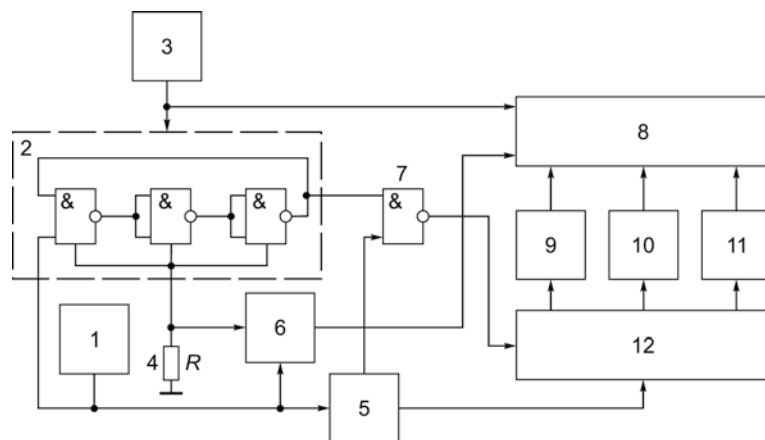


Рис. 2. Структурная схема устройства для измерений теплового сопротивления цифровых интегральных схем:

1 – устройство управления; 2 – контролируемая цифровая интегральная схема; 3 – источник питания; 4 – токосъёмный резистор; 5 – формирователь строб-импульсов; 6 – цифровой вольтметр; 7 – схема 2И-НЕ; 8 – вычислитель; 9–11 – счётчики импульсов; 12 – цифровой коммутатор

в начале цикла измерений. Приращение температуры через время T_1 нагрева можно определить как

$$\Delta\theta_n(T_1) \approx R_{Tn-k} P_{cp}^{pot}(T_1),$$

где $P_{cp}^{pot}(T_1) \approx [(1 - K_f \Delta\theta_n(T_1)/2)] P_0$ – средняя мощность, потребляемая ЦИС за время T_1 .

За время счёта T_c в начале нагрева приращение температуры можно записать следующим образом:

$$\Delta\theta_{сч} = R_{Tn-k} P_0 (1 - e^{-T_c/\tau_{Tn-k}}). \quad (12)$$

При выполнении неравенства $T_c \ll \tau_{Tn-k} \ll T_1$ относительная погрешность δ_T измерений частоты за время счёта T_c примет вид

$$\delta_T = \frac{\Delta\theta_{сч}}{\Delta\theta_n(T_1)} = \frac{P_0}{P_{cp}^{pot}(T_1)} (1 - e^{-T_c/\tau_{Tn-k}}) \approx \frac{P_0}{P_{cp}^{pot}(T_1)} \frac{T_c}{\tau_{Tn-k}}. \quad (13)$$

Из (11)–(13) следует, что суммарная погрешность измерений частоты за время счёта T_c в начале цикла измерений будет минимальной при

$$T_c = (\tau_{Tn-k}/f_{кг})^{1/2}.$$

При $f_{кг} \approx 10^7$ Гц и $\tau_{Tn-k} \approx 10^{-1}$ с время счёта $T_c \approx 100$ мкс, а суммарная погрешность измерений частоты в начале нагрева не превысит 1 %.

Проверка способа. Для проверки способа генератор, собранный по схеме на трёх логических элементах КМОП типа 561ЛА7 (см. рис. 2), был подключён к источнику питания напряжением 14 В. Частота генерации КГ определялась по числу импульсов на выходе схемы 2И-НЕ за время действия строб-импульсов длительностью 100 мкс. Строб-импульсы задавались генератором Г5-66 синхронизировано с запуском этого генератора, а число импульсов подсчитывалось электронно-счётным частотомером типа АСН 3010, включённым в режиме счёта импульсов по входу А. Падение напряжения на токоёмном резисторе R измерялось вольтметром В7-16.

Начальная частота КГ при комнатной температуре 23 °С составила 9,87 МГц. Затем наблюдалось монотонное уменьшение частоты и через 500 с наступила стабилизация частоты КГ на уровне 8,82 МГц. Ток, потребляемый КГ в начале и в конце нагрева, был равен 42 мА и 38 мА, соответственно, средняя за цикл измерения потребляемая мощность составила 560 мВт. Относительный температурный коэффициент частоты генерации для этого образца ЦИС был 0,32 %/К, т. е. изменения частоты генерации с 9,87 до 8,82 МГц соответствует приращению температуры активной области на 33,2 °С. Таким образом, тепловое сопротивление переход–среда данного образца ЦИС составило $R_{п-с} = 33,4/0,56 = 59,6$ К/Вт, что соответствует значениям теплового сопротивления переход–среда для данного типа ЦИС. Значение данного сопротивления $R_{п-с}$, найденное способом, изложенным в [7], составило 64 К/Вт. Разница полученных значений не превышает ожидаемого уровня, обусловленного различием вариантов нагрева ЦИС.

Частота генерации КГ, построенного на логических элементах современных ЦИС, может достигать сотен и даже тысяч мегагерц и для её определения необходимо либо применять электронно-счётные частотомеры с соответствующим диапазоном измерений частоты, либо использовать делители частоты.

Заключение. Предложенный способ определения тепловых сопротивлений ЦИС по изменению частоты КГ, построенного на логических элементах этой схемы, позволяет существенно упростить процедуру измерений, исключить ряд существенных недостатков и источников погрешностей известных способов с использованием в качестве ТЧП выходных напряжений логических единицы или нуля. Экспериментальная проверка способа показала достаточное совпадение результатов измерений с результатами, полученными альтернативным способом.

Л и т е р а т у р а

1. **IC Thermal Measurement Method.** Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard [Электрон. версия]: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>. (дата обращения 13.11.2017).
2. **Szekely V. A.** New evaluation method of thermal transient measurement results // J. Microelectron. 1997. V. 28. P. 277–292.
3. **Сергеев В. А.** Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная промышленность. 2004. № 1. С. 45–48.
4. **Сергеев В. А., Юдин В. В.** Измерение тепловых параметров полупроводниковых изделий с применением амплитудно-импульсной модуляции греющей мощности // Метрология. 2010. № 4. С. 37–47.
5. **Закс Д. И.** Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. М.: Радио и связь, 1983.
6. **Пат. 2504793 РФ.** МКП G01R 31/28. Способ определения теплового импеданса цифровых КМОП интегральных микросхем / В. А. Сергеев, Е. А. Панов, О. В. Урлапов, В. В. Юдин // Изобретения. Полезные модели. 2014. Бюл. № 2.
7. **Пат. 2327177 РФ.** G01R 31/317 Способ определения теплового сопротивления цифровых интегральных микросхем // В. В. Юдин, В. А. Сергеев // Изобретения. Полезные модели. 2008. Бюл. № 17.
8. **Зельдин Е. А.** Цифровые интегральные микросхемы в измерительной аппаратуре. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
9. **Медведев А. В., Чулков В. А.** Кольцевые генераторы на ПЛИС // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2009. № 12. С. 50–53.
10. **Пат. 2569922 РФ.** МПК G01R31/28. Способ определения теплового сопротивления переход–корпус цифровых интегральных микросхем / В. А. Сергеев, Я. Г. Тетенькин, В. В. Юдин // Изобретения. Полезные модели. 2015. Бюл. № 34.
11. **Давидов П. Д.** Анализ и расчёт тепловых режимов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1967.
12. **Нефёдов В. И., Сигов А. С., Битюгов В. К., Хахин В. И.** Метрология и радиоизмерения: учебное пособие. М.: Высшая школа, 2006.

Дата принятия: 13.11.2017.