

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.382.8.017.7

В.А. Сергеев, Я.Г. Тетенькин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ МИКРОСХЕМ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА¹

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 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].

Тетенькин Ярослав Геннадьевич, 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].

Аннотация

Рассмотрены известные методы измерения тепловых параметров цифровых интегральных схем (ЦИС). Показана возможность использования времени задержки сигнала логических элементов ЦИС в качестве температурочувствительного параметра (ТЧП) при измерении тепловых параметров ЦИС. Это позволяет преодолеть ряд сложностей и недостатков известных методов измерения тепловых параметров ЦИС с использованием в качестве ТЧП электрических параметров ЦИС и упростить автоматизацию процесса измерения. Предложен способ измерения тепловых параметров ЦИС по изменению частоты кольцевого генератора (КГ), построенного на логических инверторах ЦИС, при саморазогреве ЦИС потребляемой электрической мощностью. Приведена оценка точности измерений компонент теплового сопротивления КМОП ЦИС с использованием предложенного способа.

Описан автоматизированный аппаратно-программный комплекс для исследования переходных тепловых характеристик КМОП ЦИС, позволяющий существенно повысить точность и разрешающую способность измерений тепловых параметров.

Ключевые слова: цифровые интегральные схемы, тепловые параметры, измерение, время задержки сигнала, кольцевой генератор, частота генерации, температурная зависимость.

DETERMINATION OF DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS THERMAL PARAMETERS WITH THE USE OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF SIGNAL DELAY TIME

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State Technical University; Head of Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания №2014/232 Минобрнауки РФ.

and Electronics (IRE) of RAS; Head of the Department of Radioengineering, Opto and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University at Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov IRE; an author of monographs, inventions, and articles in the field of researching and simulating semiconductor device and integrated circuit performance, and measuring their thermal characteristics. e-mail: sva@ulstu.ru.

Iaroslav Gennadievich Tetenkin, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Lead Engineer of Ulyanovsk Branch of 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 device and integrated circuit and measuring their thermal characteristics. e-mail: ufire@mv.ru.

Abstract

This article examines the well-known methods for measuring thermal parameters of digital integrated circuits (DIC). The opportunity to use DIC signal delay time as a temperature-sensitive parameter (TSP) in the process of measuring DIC thermal parameters is also proposed. It allows to overcome some of the current complexities and disadvantages of the well-known methods of measuring DIC thermal parameters with the use of DIC electrical parameters as TSP and to simplify the measurement process automation. The method of measuring DIC thermal parameters on the basis of measuring the frequency of the ring oscillator that consists of DIC inverters in the process of DIC self-heating with electric power consumed is considered in the article. The estimation of measurement accuracy of CMOS DIC thermal resistance component using the current method is also demonstrated.

The automated software-hardware complex for researching CMOS DIC indicial thermal parameters that can significantly improve the accuracy of thermal parameters resolution capability is described.

Keywords: digital integrated circuits, thermal parameters, measurement, signal delay time, ring oscillator, oscillator frequency, temperature dependence.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что температура активной области кристалла цифровых интегральных схем (ИС) во многом определяет функциональную и физическую надежность ЦИС [1–3]. Особенно важно контролировать тепловые режимы работы ЦИС в составе электронных модулей, работающих в широких температурных диапазонах, например, в составе бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Температура активной области кристалла ЦИС определяется ее тепловыми параметрами (ТП) и мощностью, рассеиваемой ЦИС в режиме эксплуатации. Мощность, потребляемая ЦИС в различных режимах работы, при заданном напряжении питания довольно легко определяется по величине тока, потребляемого ЦИС от источника питания (с учетом мощности, выделяющейся в нагрузке ЦИС). Измерение же ТП ЦИС является нетривиальной задачей, на решение которой направлены усилия как отечественных, так и зарубежных специалистов [1–6].

За рубежом для целей измерения ТП интегральных схем разработан стандарт JE5D51-1 (Integrated Circuits Thermal Measurement Method – Electrical Test Method) [1], который заключается в нагреве ИС ступенькой электрической мощности известного уровня и в измерении температуры активной области ИС по изменению температурочувствительного параметра с известным температурным коэффициентом. В качестве ТЧП указанным стандартом рекомендовано напряжение на одном из диодов (*p-n*-переходов) в составе ИС при малом прямом токе. В процессе нагрева ИС, вплоть до достижения установившегося теплового режима, через определенные интервалы времени измеряется ТЧП, рассчитывается приращение

температуры $\Delta\theta_n$ перехода, и по измеренным значениям строится переходная тепловая характеристика (ПТХ) ИС, то есть зависимость приращения температуры $\Delta\theta_n(t)$ от времени. По ПТХ далее определяют компоненты полного теплового сопротивления ИС, соответствующие отдельным слоям конструкции ИС. Недостатком указанного способа являются тепловые и электрические переходные процессы [2, 3], искажающие результат измерения, что особенно сильно проявляется в начале нагрева ИС, когда длительность между соседними отсчетами ТЧП составляет менее 1 мс.

В известных российских способах измерения ТП ЦИС в качестве ТЧП используются напряжение логического нуля или логической единицы на выходе логических элементов (ЛЭ) ЦИС [4–6]. При этом возникают значительные погрешности, связанные с неопределенным и трудно компенсируемым падением напряжения на внутренних шинах питания.

В данной статье в качестве ТЧП при измерении ТП ЦИС предлагается использовать время задержки сигнала ЛЭ ЦИС, что позволяет исключить недостатки известных методов и облегчить автоматизацию процедуры измерения ТП ЦИС. Время задержки распространения сигнала относится к основным динамическим параметрам ЦИС и у большинства типов современных ЦИС, изготовленных по различным технологиям, составляет десятки и единицы наносекунд, а у современных быстродействующих ЦИС и процессоров достигает десятков пикосекунд. Известно, что время задержки распространения сигнала ЦИС растет с увеличением температуры на 0,2–0,4%/К [7], что вполне сравнимо с температурной чувствительностью электрических параметров ЦИС [2, 3]. Температурная зависимость времени задержки распространения сигнала ЛЭ ЦИС про-

является в температурной зависимости частоты кольцевых генераторов, построенных на ЛЭ ЦИС [8].

1 ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ КГ

КГ является наиболее распространенным видом генераторов, построенных на ЛЭ ЦИС. В простейшем случае такой генератор состоит из трех, соединенных кольцом, инверторов. Частота колебаний КГ определяется технологическими параметрами ЛЭ (при заданных напряжении питания и температуре) и обратно пропорциональна времени задержки распространения сигнала ЛЭ, входящих в состав КГ.

Экспериментальные температурные зависимости частоты колебаний пяти экземпляров КГ, собранных на ИС CD4011 (аналог ЦИС 561ЛА7), приведены в таблице 1, а соответствующие им графики – на рисунке 1. Для измерений образцы КГ помещались в термостат и при каждом значении температуры термостата выдерживались не ме-

нее 10 минут, так что температура θ_K корпуса ЦИС принимала равновесное значение, равное температуре термостата.

На рисунке 1 приведены также 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.

2 СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИС

Для реализации способа нечетное число ($n > 1$) ЛЭ контролируемой ЦИС соединяют по схеме КГ с ключом в цепи питания и подключают ЦИС к источнику питания с напряжением E_{num} . Сущность способа поясняется эпюрами сигналов на рисунке 2.

Таблица 1

Температурные зависимости частоты колебаний образцов КГ $f_{КГ}(\theta)$, кГц

Температура $\theta_{K^{\circ}}$	Номера образцов КГ				
	Образец КГ1	Образец КГ2	Образец КГ3	Образец КГ4	Образец 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

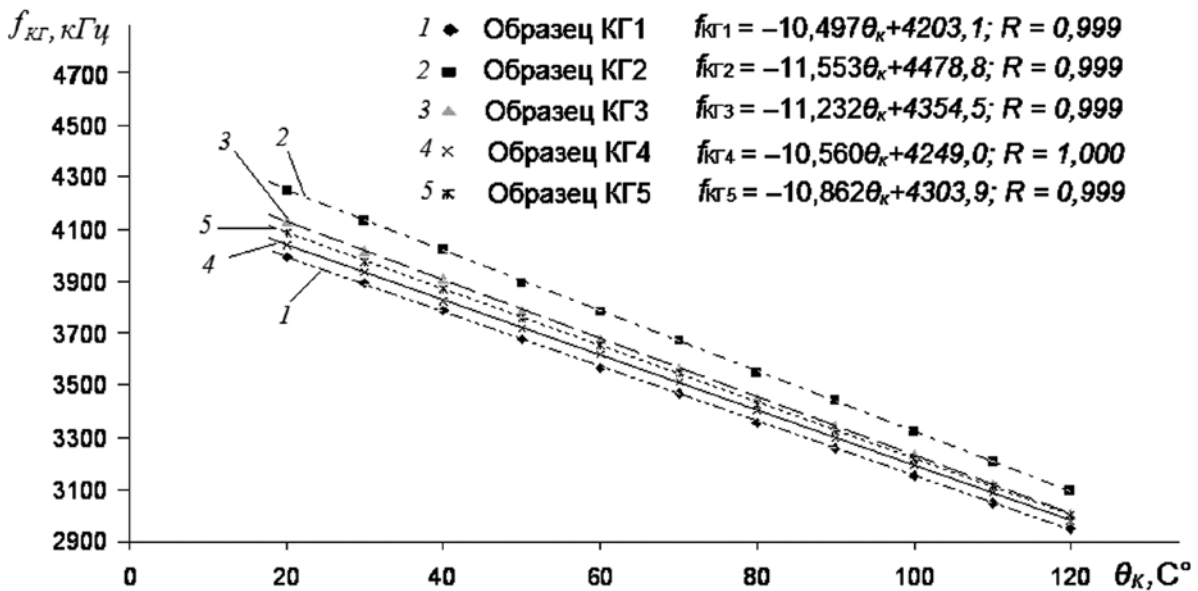


Рис. 1. Зависимости частоты колебаний образцов КГ от температуры корпуса ЦИС

При замыкании цепи питания КГ на время $T_{Ц}$ цикла измерения в момент времени t_0 (рис. 2, а) КГ начинает генерировать импульсы (рис. 2, б) с частотой следования

$$f_{КГ} = 1/2 n \tau_{зад}$$

где $\tau_{зад}$ – время задержки сигнала одного ЛЭ ЦИС,

n – количество ЛЭ в КГ.

Мощность, потребляемая ЦИС в режиме генерации, приводит к саморазогреву ЦИС. При увеличении температуры активной области ЦИС на величину $\Delta\theta_n(t)$ (рис. 2, г) время задержки сигнала ЛЭ ЦИС будет возрастать, а частота генерации КГ, соответственно, уменьшаться линейно с ростом температуры:

$$f_{КГ}(t) = f_{КГ}(0) [1 - K_f \Delta\theta_n(t)],$$

где K_f – относительный температурный коэффициент частоты колебаний КГ,

$f_{КГ}(0)$ – частота генерации в начале нагрева (в момент времени t_0).

По результатам измерения частоты генерации КГ (например, путем подсчета числа импульсов за время действия короткого строб-импульса длительностью T_C) в начале нагрева и в заданные моменты времени t_i после включения КГ (рис. 2, в) легко рассчитать приращение температуры активной области ЦИС в заданные моменты времени:

$$\Delta\theta_n(t_i) = \frac{f_{КГ}(0) - f_{КГ}(t_i)}{K_f} = \frac{\Delta f_{КГ}(t_i)}{K_f}. \quad (1)$$

По этим приращениям, используя те или иные модельные приближения, и определяют тепловые параметры ЦИС.

3 ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ И ТЕПЛОВАЯ СХЕМА ЦИС

На рисунке 3 показана упрощенная конструкция ЦИС с односторонним отводом тепла, в которой полупроводниковый кристалл на кристаллодержателе монтируется на основание корпуса, источники тепла распределены в тонком слое активной области вблизи рабочей поверхности кристалла и тепловой поток направлен от рабочей поверхности кристалла к корпусу ЦИС и далее в окружающую среду. Согласно принципу теплоэлектрической аналогии тепловая схема такой конструкции (если пренебречь отводом тепла от боковых граней кристалла и считать тепловой поток одномерным) представляет собой цепь последовательно соединенных RC-звеньев (рис. 3, б). Каждое RC-звено соответствует определенному слою конструкции ЦИС. В линейных тепловых моделях изменение температуры поверхности структуры $\theta_n(t)$ определяется законом изменения рассеиваемой мощности $P(t)$ и выражается интегралом Дюамеля [9]:

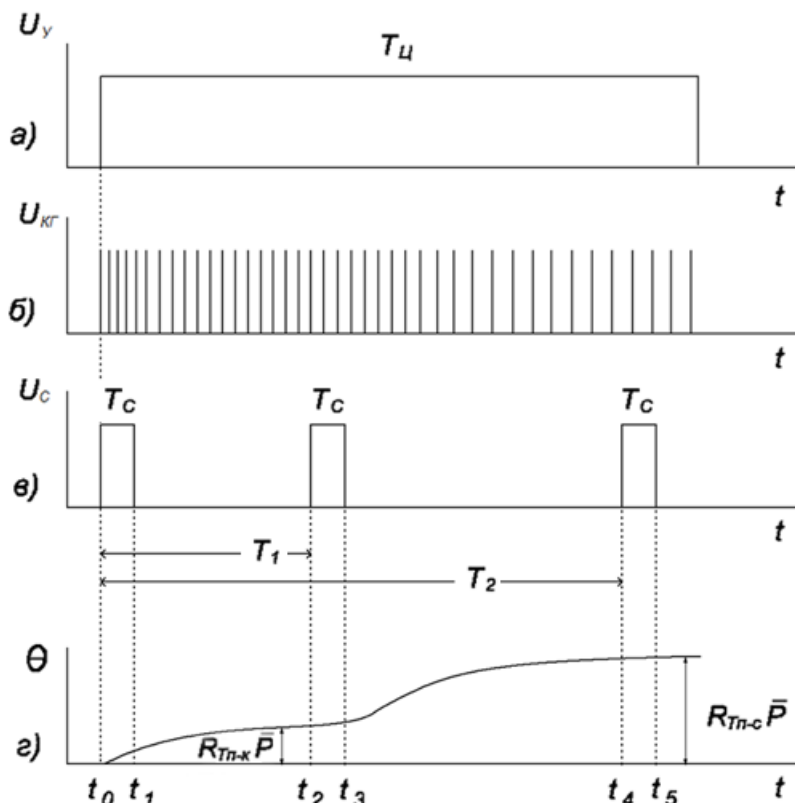


Рис. 2. Эпюры сигналов, поясняющие принцип измерения тепловых параметров ЦИС

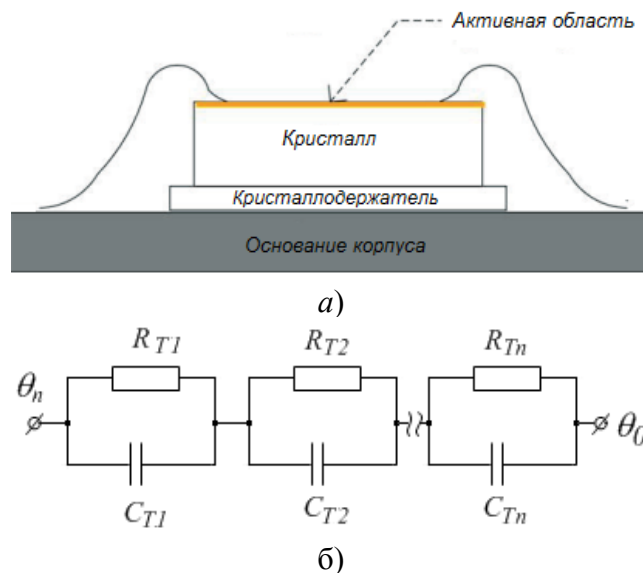


Рис. 3. Конструкция ЦИС схематично (а), без части корпуса, и ее тепловая схема (б)

$$\Delta\theta_n(t) = \theta_n(t) - \theta_0 = \int h(t-t') \cdot P(t') dt', \quad (2)$$

где θ_0 – температура окружающей среды,

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

$P(t')$ – изменение потребляемой греющей мощности в процессе нагрева.

Для тепловой схемы, состоящей из n RC-цепочек, функция $h(t-t')$ имеет вид:

$$h(t-t') = \sum_{i=1}^n \frac{R_{T_i}}{\tau_{T_i}} \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_{T_i}}\right), \quad (3)$$

где $\tau_{T_i} = R_{T_i} C_{T_i}$ – тепловая постоянная времени i -го слоя конструкции.

В практических приложениях для описания тепловых свойств ЦИС широко используется тепловая схема, содержащая два RC-звена: тепловое сопротивление переход-корпус $R_{T_{n-k}}$ и теплоемкость переход-корпус $C_{T_{n-k}}$; тепловое сопротивление корпус-среда $R_{T_{k-c}}$ и теплоемкость корпуса прибора $C_{T_{k-c}}$. В приближении двухэлементной тепловой схемы функция отклика температуры имеет вид:

$$h(t-t') = \frac{R_{T_{n-k}}}{\tau_{T_{n-k}}} e^{-\frac{t-t'}{\tau_{T_{n-k}}}} + \frac{R_{T_{k-c}}}{\tau_{T_{k-c}}} e^{-\frac{t-t'}{\tau_{T_{k-c}}}}, \quad (4)$$

где $\tau_{T_{n-k}} = R_{T_{n-k}} C_{T_{n-k}}$ – тепловая постоянная времени переход-корпус,

$\tau_{T_{k-c}} = R_{T_{k-c}} C_{T_{k-c}}$ – тепловая постоянная времени корпус-среда.

Заметим, что для КМОП ЦИС потребляемая мощность пропорциональна частоте греющих импульсов и в процессе разогрева 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 точного измерения тепловых параметров ЦИС необходимо учесть изменение греющей мощности в процессе измерения. Решение уравнения (1) с учетом температурной зависимости греющей мощности с точностью до членов порядка $(K_f \Delta\theta_n)^2$ имеет 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 (1) в отсутствие температурной зависимости греющей мощности, то есть при $P(t') = P_0 \equiv P(0) = const$:

$$\Delta\theta_n^0(t) = P_0 R_{T_{n-k}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T_{n-k}}}}\right) + P_0 R_{T_{k-c}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T_{k-c}}}}\right). \quad (6)$$

Для большинства типов современных ЦИС выполняется условие $\tau_{T_{n-k}} \ll \tau_{T_{k-c}}$, что позволяет путем выбора моментов времени отсчета частоты генерации КГ определять различные составляющие теплового сопротивления ЦИС.

Через время $t = T_1$ после включения КГ, удовлетворяющее условию $\tau_{T_{n-k}} \ll T_1 \ll \tau_{T_{k-c}}$, вторым слагаемым в правой части (6) можно пренебречь и изменение температуры активной области ЦИС с точностью до членов по-

рядка $\exp(-T_1/\tau_{T_{n-k}})$ будет равно:

$$\Delta\theta(T_1) = P_0 R_{T_{n-k}} \left[1 - \frac{K_f P_0 R_{T_{n-k}}}{2}\right], \quad (7)$$

откуда, с учетом малости величины $K_f P_0 R_{T_{n-k}}$ для $R_{T_{n-k}}$ получим следующее выражение:

$$R_{T_{n-k}} = \frac{\Delta\theta_n(T_1)}{(1 - K_f \Delta\theta_n(T_1)/2)P_0}. \quad (8)$$

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 $P_{cp}^{nom}(T_1)$, потребляемой ЦИС за время T_1 . Определить величину $P_{cp}^{nom}(T_1) = I_{cp}^{nom}(T_1) E_{num}$ при известном напряжении E_{num} источника питания можно, измерив средний ток $I_{cp}^{nom}(T_1)$, потребляемый ЦИС из источника питания за время T_1 . Например, путем измерения напряжения UR на токосъемном резисторе R в цепи питания ЦИС в начале нагрева и через время T_1 после начала нагрева: $I_{cp}^{nom}(T_1) = (U_R(0) + U_R(T_1))/2R$. Таким образом, измерив частоту генерации КГ в момент времени T_1 , тепловое сопротивление переход-корпус ЦИС можно рассчитать по формуле:

$$R_{T_{n-k}} = \frac{\Delta f_{КГ}(T_1)}{I_{cp}^{nom}(T_1) \cdot E_{num} \cdot K_f}. \quad (9)$$

Если время $t = T_2$ нагрева ЦИС будет в 3–5 раз больше тепловой постоянной времени корпус-среда ($T_2 \gg \tau_{T_{k-c}}$), то из выражения (5) с учетом (6) получим аналогичную формулу (9) для определения теплового сопротивления переход-среда ЦИС:

$$R_{T_{n-c}} = R_{T_{n-k}} + R_{T_{k-c}} = \frac{\Delta f_{КГ}(T_2)}{I_{cp}^{nom}(T_2) \cdot E_{num} \cdot K_f}. \quad (10)$$

В предложенном способе наиболее существенной является методическая погрешность, обусловленная изменением частоты КГ за время строб-импульса T_c (рис. 2, г) в начале цикла измерения в результате нагрева ЦИС. Приращение температуры за время T_1 нагрева составит $\Delta\theta_n(T_1) \approx R_{T_{n-k}} P$, а за время счета T_c в начале нагрева определяется выражением:

$$\Delta\theta_c(T_c) = R_{T_{n-k}} P \left(1 - e^{-\frac{T_c}{\tau_{T_{n-k}}}}\right). \quad (11)$$

При выполнении неравенства $T_c \ll \tau_{T_{n-k}} \ll T_1$ относительная погрешность δ_T измерения частоты за время счета T_c будет равна:

$$\delta_T = \frac{\Delta\theta_c(T_c)}{\Delta\theta_n(T_1)} = 1 - e^{-\frac{T_c}{\tau_{T_{n-k}}}} \approx \frac{T_c}{\tau_{T_{n-k}}}. \quad (12)$$

С другой стороны, погрешность дискретизации при измерении частоты КГ таким способом обратно пропорциональна T_c [10]:

$$\delta_D = \frac{1}{T_c \cdot f_{КГ}}. \quad (13)$$

Из (12) и (13) следует, что суммарная погрешность измерения частоты за время счета T_c в начале цикла измерения будет минимальной при $T_c^{opt} = \sqrt{\tau_{Тн-к} / f_{КГ}}$. При $f_{КГ} \approx 10^7 \text{ Гц}$ и $\tau_{Тн-к} \approx 10^{-1} \text{ с}$ получим $T_c^{opt} = 100 \text{ мкс}$ и суммарная погрешность измерения частоты в начале нагрева не будет превышать 1%.

4 Аппаратно-программный комплекс для измерения тепловых параметров КМОП ЦИС

Структурная схема аппаратно-программного комплекса для измерения тепловых параметров КМОП ЦИС приведена на рисунке 4. Комплекс включает в себя блоки питания 1 и 2, контролируемую ЦИС 3, включаемую по схеме КГ, температурные датчики 4 и 13, умножитель частоты 5, делитель частоты 6, электронный ключ 7, фильтр низких частот 8, усилитель постоянного тока 9, преобразователь USB/UART 10, микроконтроллер 11, жидкокристаллический (ЖК) дисплей 12 и компьютер 14. Комплекс может использоваться как автономно, так и с персональным компьютером, что позволяет проводить дополнительные виды математической обработки характеристик исследуемых ЦИС.

Комплекс работает следующим образом. В исходном состоянии ключ 7 разомкнут и питание на КГ 3 не подается. На индикаторе 12 отображается только значение напряжения блока питания 1, которое может устанавливаться в диапазоне от 9 до 18 В, и температура датчика 4

(температура корпуса тестируемой ЦИС КГ 3) и датчика 13 (температура окружающей среды). Нажатием кнопки S3 «Старт/Стоп» запускается режим «Измерение» – микроконтроллер открывает ключ 7 (рис. 2, а), переводя КГ в режим генерации (рис. 2, б), и переходит в режим сбора и накопления данных (частота КГ, ток КГ) с частотой 10 кГц. Режим накопления (линейный, логарифмический, пользовательский) выбирается с помощью кнопки S2 перед началом процесса измерения. Данные накапливаются в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) микроконтроллера и, после накопления результатов 100 измерений, пересылаются в компьютер. При работе с компьютером процесс сбора и накопления данных повторяется; при работе в автономном режиме процесс измерения останавливается. С интервалом в 1 секунду производится также измерение температуры окружающей среды (датчик 13) и температуры корпуса ЦИС КГ (датчик 4).

Для повышения разрешающей способности частота КГ утраивается с помощью умножителя частоты 5 и подается на вход делителя частоты 6, выполненного на ИС 1533ИЕ10. Использование такого делителя позволяет расширить диапазон измеряемых микроконтроллером частот с 6–7 МГц (определяется частотой тактового генератора микроконтроллера, равной в данном случае 16 МГц) до 50 МГц (определяется скоростью работы 1533ИЕ10). При использовании более быстродействующего делителя максимальную измеряемую частоту можно увеличить до 100 МГц. Чтобы сохранить точность измерения частоты, выходы делителя подключены к микроконтроллеру и учитываются (как 4 младших разряда) при окончании каждого строб-импульса T_c (рис. 2, в), равного 100 мкс.

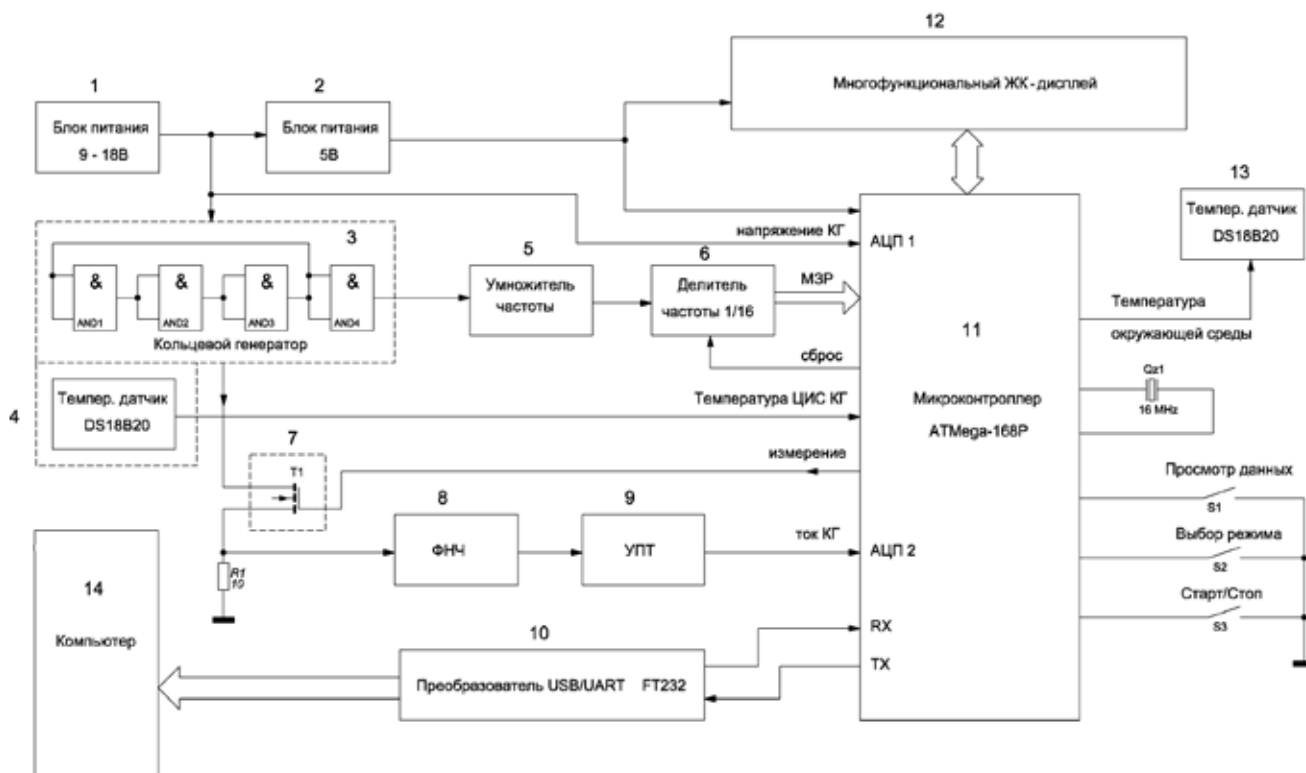


Рис. 4. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Напряжение на резисторе R1, пропорциональное току потребления ЦИС, через ФНЧ 8 поступает на усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления, равным 10, после чего подается на вход АЦП2 микроконтроллера, где производится его измерение, обработка и размещение в массиве данных.

Как уже отмечалось, прибор имеет несколько режимов измерения: линейный, логарифмический, логарифмический с усреднением, пользовательский и режим просмотра накопленных данных. Рассмотрим их подробнее.

Линейный режим. Это самый простой и информационно-избыточный режим. Сбор и запоминание данных происходит с частотой 10 кГц, пока не будут выполнены первые 100 измерений. Затем, если устройство работает совместно с персональным компьютером, данные пересылаются в компьютер, и начинается новый цикл накопления результатов следующих 100 измерений, передача их в компьютер, и так до тех пор, пока не будет еще раз нажата кнопка S2 «Старт/Стоп» или пока процесс измерения не остановится автоматически через 1000 секунд.

Ход процесса измерения можно контролировать с помощью ЖК-индикатора измерительного модуля (рис. 5). Верхняя строка индикатора показывает утроенное (после множителя) начальное значение частоты КГ (в первые 100 мкс после включения), равное 28,62 МГц, и напряжения питания КГ. Вторая строка показывает значение частоты, равное 26,05 МГц через время T , в данном случае

равное 10 минутам. В третьей строке показаны начальное и конечное (через 10 минут) значения температуры корпуса ЦИС КГ. В четвертой строке отображаются начальное и конечное значения потребляемой мощности КГ. Обновление данных на дисплее происходит раз в секунду.

Если комплекс работает автономно, то процесс измерения занимает 10 мс (100 измерений по 100 мкс каждое) и на ЖК-дисплей будут выведены данные, аналогичные показанным на рисунке 5, только при времени измерения $T_{из} = 10$ мс. Нажимая кнопку S1, можно последовательно просмотреть значения всех, хранящихся в памяти ОЗУ, 100 измерений.

Логарифмический режим. С практической точки зрения является наиболее удобным и информационно-достаточным режимом. Алгоритм его достаточно прост: первые 10 измерений выполняются с интервалом 100 мкс, следующие 10 – с интервалом 1 мс и так далее. То есть интервал каждых последующих 10 измерений увеличивается на порядок по сравнению с предыдущим. Для измерения ПТХ за 1000 секунд достаточно 70 измерений.

Пользовательский режим. Этот режим возможен только при подсоединении к персональному компьютеру. Пользователь может сам составить нужный ему временной порядок проведения измерений и передать его в устройство.

Просмотр данных. В этом режиме устройство находится все время, пока не включен один из режимов измерения. Если нет сохраненных данных, на индикаторе

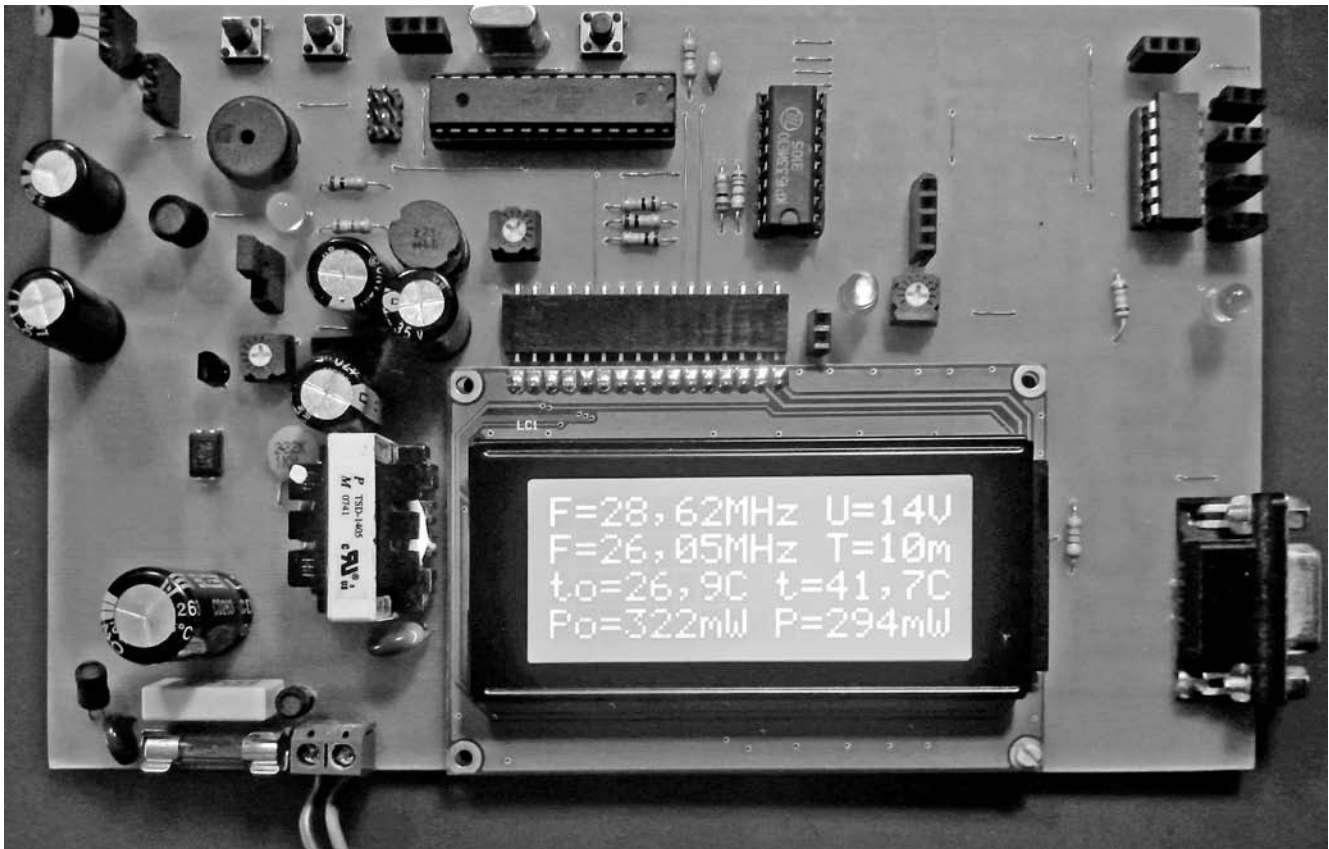


Рис. 5 Фотография измерительного модуля (без корпуса) аппаратно-программного комплекса в работе

высвечиваются две строки, показывающие параметры текущего режима: напряжение питания КГ, температура окружающей среды и температура корпуса ЦИС КГ, например:

**Idle U=14V
to=26,5C t=27,1C**

Если в ОЗУ есть сохраненные данные, то появляются дополнительные строчки:

**View data –
press the button S1**

После нажатия кнопки S1 «Просмотр данных» начинается последовательный показ данных, начиная с первого измерения. Информация на дисплее в этом режиме подобна той, что показана на рисунке 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 автоматизацию процесса измерения, повышает его точность и быстродействие.

Достоинством предложенного способа и разработанного аппаратно-программного комплекса, реализующего способ, является также высокая разрешающая способность, которая ограничивается временем измерения частоты КГ, то есть длительностью T_c строб-импульса. С учетом довольно высокой частоты генерации КГ на основе современных ЦИС длительность строб-импульса T_c 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. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard/ www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf.
2. Закс Д.-И. Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. – М.: Радио и связь, 1983. – 128 с.
3. Сергеев В.А. Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная промышленность. – 2004. – №1. – С. 45–48.
4. Пат. 2172493 РФ, G01R 31/28 Способ измерения теплового сопротивления переход-корпус цифровых ин-

тегральных микросхем / Сергеев В.А.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – №2000108119/09; заявл. 31.03.2000; опубл. 20.08.2001, Бюл. №23.

5. А.с. 1310754 СССР, МПК G01R 31/28. Способ измерения теплового сопротивления переход-корпус цифровых интегральных микросхем / Сергеев В.А., Афанасьев Г.Ф., Романов Б.Н., Юдин В.В.; заявитель Ульяновский политехнический институт. – №3912623; заявл. 17.06.85; опубл. 15.05.87, Бюл. № 18.

6. Пат. 2504793 РФ, МКП G01R 31/28. Способ определения теплового импеданса цифровых КМОП интегральных микросхем / Сергеев В.А., Панов Е.А., Урлапов О.В., Юдин В.В.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – 2012126732/28; заявл. 26.06.2012; – опубл. 20.01.2014, Бюл. №2.

7. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 280 с.

8. Hajimiri A. and Lee T. H. The Design of Low Noise Oscillators, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

9. Давидов П.Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. – М.: «Энергия», 1967. – 144 с.

10. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электро-радиоизмерения: учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов / под ред. В.И. Винокурова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк, 1986. – С. 148–151.

REFERENCES

1. 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.
2. Zaks D.I. Parametry teplovogo rezhima poluprovodnikovyx mikroskhem [Parameters of Thermal Conditions for Semiconductor Integrated Circuits]. Modcow, Radio i sviaz Publ., 1983. 128 p.
3. Sergeev V.A. Metody i sredstva izmereniia teplovykh parametrov poluprovodnikovyx priborov i integralnykh skhem [Measurement Methods and Instruments for Thermal Parameters of Semiconductor Devices and Integrated Circuits]. Elektronnaia promyshlennost [Electronic Industry], 2004, no. 1, pp. 45–48.
4. Russian Federation Patent 2172493 RF, Int.Cl.: G01R 31/28. Sposob izmereniia teplovogo soprotivleniia perekhod-korpus tsifrovyykh integralnykh mikroskhem [Method of the Junction-to-Case Thermal Resistance Measurement of Digital Integrated Circuits]. Inventor: Sergeev V.A.; Applicant and proprietor: Ulyanovsk State Technical University. Application: 2000108119/09; Date of filing. March, 31, 2000. Date of publication: August, 20, 2001. Bull. no. 23.
5. USSR Inventor's Certificate 1310754, Int.Cl.: G01R 31/28. Sposob izmereniia teplovogo soprotivleniia perekhod-korpus tsifrovyykh integralnykh mikroskhem [Method of the Junction-to-Case Thermal Resistance Measurement of Digital

Integrated Circuits]. Inventors: Sergeev V.A., Afanasiev G.F., Romanov B.N., Yudin V.V. Applicant: Ulyanovsk Polytechnic Institute. Application: no. 3912623; Date of filing: June, 17, 1985. Date of publication: May, 15, 1987. Bull. no. 18.

6. Russian Federation Patent 2504793, Int.Cl.: G01R 31/28. *Sposob opredeleniia teplovogo impedansa tsifrovyykh KMOP integralnykh mikroskhem* [Method of Determining Thermal Impedance of Digital CMOS of Integrated Circuits]. Inventors: Sergeev V.A., Panov E.A., Uralpov O.V., Yudin V.V.; Applicant and proprietor: Ulyanovsk State Technical University. Application: 2012126732/28. Date of filing: June, 26, 2012. Date of publication: January, 20, 2014. Bull. no. 2.

7. Zeldin E.A. *Tsifrovye integralnye mikroskhemyy v izmeritelnoi apparature* [Digital Integrated Circuits in

Measuring Equipment]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 280 p.

8. Hajimiri A. and Lee T. H. *The Design of Low Noise Oscillators*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1999.

9. Davidov P.D. *Analiz i raschet teplovykh rezhimov poluprovodnikovyykh priborov* [Thermal Conditions Analysis and Calculation for Semiconductor Devices]. Moscow, Energiia Publ., 1967. 144 p.

10. Vinokurov V.I., Kaplin S.I., Petelin I.G. *Elektroradioizmereniia: ucheb. posobie dlia radiotekhnich. spets. vuzov*. pod red. V.I. Vinokurova. 2-e izd. pererab. i dop [Electroradiomeasuring. Textbook for Colleges and Universities of Radioengineering, ed. by V.I. Vinokurov, 2nd Revised and Corrected Edition]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. pp. 148–151.