УДК 621.3.049

В. Н. БЫКОВ, канд. техн. наук, *А. С. ВИЛЬЧИНСКИЙ*,
Н. Г. ЛОТОХ, канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ МИКРОСХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

В работе [1] предложен неразрушающий метод контроля интегральных микросхем (ИС), основанный на периодическом нагреве основания корпуса ИС под кристаллом и измерении разности фаз $\Delta\psi$ между колебаниями (в квазиустановившемся режиме) температур кристалла и основания корпуса ИС. При этом изменения температуры кристалла контролруются с помощью температурночувствительного параметра ИС, например, прямого падения напряжения на одном из $p-n$ переходов микросхемы.

С целью оценки влияния параметров источника нагрева, конструкции ИС и дефектов сборки на измеряемую разность фаз $\Delta\psi$, рассмотрим приближенную модель нестационарного теплопереноса в конструкции микросхемы при периодическом нагреве ее корпуса.

При математической постановке задачи сделаем ряд допущений: тепловой поток, распространяющийся от основания корпуса в кристалл ИС, одномерный; теплофизические характеристики материалов, входящих в расчетную модель ИС, изотропны и постоянны в исследуемом диапазоне температур; влиянием выводов ИС на температурное поле микросхемы можно пренебречь.

В этом случае расчетная модель ИС представляет собой трехслойную стенку, состоящую из разнородных элементов M_i, $i = 1, 2, 3$, каждый из которых характеризуется толщиной слоя d_i и определенными теплофизическими параметрами: теплопроводностью λ_i, теплоемкостью c_i, плотостью ρ_i и температуропроводностью $a_i = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i}$. Значения этих параметров для расчетной модели ИС сведены в табл. 1

Таблица 1

Характеристика слоев Номер слоя	d, мм	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot °C}$	$c, \frac{Дж}{кг \cdot °C}$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$a, \frac{м^2}{с}$
1	0,15	18,2	460	8300	$4{,}4 \cdot 10^{-6}$
2	$6 \cdot 10^{-3}$	150	130	18760	$6{,}15 \cdot 10^{-5}$
3	0,4	120	745	2330	$7{,}17 \cdot 10^{-6}$

и соответствуют ИС 133 ЛБ1. Принимая, что отвод тепла от кристалла к крышке ИС и далее в теплоотвод осуществляется конвекцией с коэффициентом α, зададим на правой стенке расчетной модели ИС при $x = x_3$ граничные условия третьего рода

С учетом сделанных допущений процесс теплопереноса в расчетной модели ИС при периодическом нагреве ее корпуса описывается системой дифференциальных уравнений [2]:

$$a_i \frac{\partial^2 T_i(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t} \tag{1}$$

при $t > 0$ и $0 < x < x_1$; $x_1 < x < x_2$; $x_2 < x < x_3$, где $i = 1, 2, 3$ — номер слоя.

В местах соединения разнородных материалов (M , $i = 1, 2, 3$) выполняются граничные условия четвертого рода

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, t)}{\partial x}; \tag{2}$$

при

$$t > 0 \text{ и } x = x_1;\ x = x_2;\ T_i(x, t) = T_{i+1}(x, t);\ i = 1, 2.$$

На внешних поверхностях основания корпуса и кристалла ИС граничные условия формулируются в виде

$$T_1(0, t) = T_0 \cos \omega t,\ x = 0 \text{ и } t > 0; \tag{3}$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(x, t)}{\partial x} = \alpha [T_3(x, t) - T_c],\ x = x_3 \text{ и } t > 0,$$

где $T_0 = \mathrm{const}$; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота колебаний температуры основания корпуса ИС; $T_{ср}$ — температура окружающей среды.

Начальное распределение температуры в расчетной модели ИС принимается равномерным $T(x, 0) = T_{ср}$; $0 \leqslant x \leqslant x_3$ и $t = 0$ (5).

Краевая задача теплопроводности (1) — (5), моделирующая процесс контроля ИС методом тепловых волн, может быть решена различными способами. Однако, исходя из необходимости получить зависимости, связывающие разность фаз колебаний температур граничных точек расчетной модели ($x = 0$ и $x = x_3$) с теплофизическими характеристиками и геометрическими размерами материалов, данную задачу целесообразно решать путем моделирования на электрических сетках с сосредоточенными параметрами. Возможность такого моделирования основана на факте аналогичности уравнения Кирхгофа для разветвленной электрической цепи и уравнения теплопроводности в конечно-разностной форме [2].

Представляя каждый из трех слоев расчетной конструкции ИС в виде участка электрической цепи приходим к RC схеме (рис. 1). Электрическое сопротивление R_4 (см. рис. 1) моделирует термическое сопротивление поверхности кристалла при $x = x_3$.

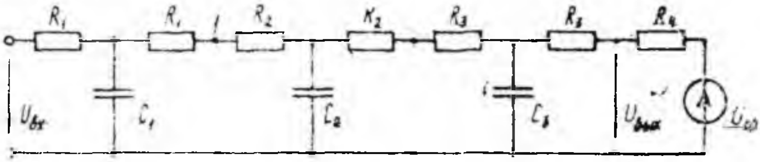

Рис. 1

На основании первого закона Кирхгофа для узла j запишем

$$i_c = c\frac{\partial u_j}{\partial t_э} = i_{вх} - i_{вых} = \frac{u_{j-1} - u_j}{R} - \frac{u_j - u_{j+1}}{R} = \frac{1}{R}(u_{j+1} - 2u_j + u_{j-1}). \tag{6}$$

Здесь $t_э$ — время протекания электрического процесса. Обозначая $u = m_u \cdot \varepsilon$, $t_э = m_{tэ} \cdot \tau_э$, где m_u и $m_{tэ}$ — масштабные коэффициенты, имеющие размерность потенциала и времени, ε — относительная (безразмерная) величина электрического потенциала, а $\tau_э$ — относительная (безразмерная) величина времени электрического процесса, получим

$$\frac{\partial \varepsilon_j}{\partial \tau_э} = \frac{m_{tэ}}{RC}(\varepsilon_{j+1} - 2\varepsilon_j + \varepsilon_{j-1}). \tag{7}$$

Аппроксимируя частную производную второго порядка по координате в узле j разностным отношением [2], преобразуем уравнения (1) к виду

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{a}{h^2}(T_{j+1} - 2T_j + T_{j-1}), \tag{8}$$

где $2h$ — толщина i-го слоя; $i = 1, 2, 3$. Обозначая $T = m_T \cdot \theta$ и $t = m_t \cdot \tau$, где m_T и m_t масштабные коэффициенты, имеющие размерность температуры и времени; θ — относительная величина температуры; τ — относительная величина времени теплового процесса, представим уравнение теплопроводности в безразмерной форме

$$\frac{\partial\theta_j}{\partial\tau} = \frac{m_t \cdot a}{h^2}(\theta_{j+1} - 2\theta_j + \theta_{j-}). \qquad (9)$$

Чтобы RC звено адекватно моделировало одномерный процесс теплопереноса в твердом теле, в соответствии с теорией подобия [2], необходимо выполнить условие равенства коэффициентов в (7) и (9)

$$\frac{m_{t э}}{RC} = \frac{m_t \cdot a}{h^2}. \qquad (10)$$

Полагая $m_{tэ} = m_t$, получаем

$$RC = \frac{h^2}{a}. \qquad (11)$$

Аналогичным образом из граничного условия (4) найдем соотношение для величины сопротивления резистора R_4 (см. рис. 1)

$$R_4 = \frac{\lambda}{\alpha \cdot h} \cdot R_3. \qquad (12)$$

Граничное условие первого рода (3) эквивалентно для схемы на рис. 1 заданию входного напряжения $u_{вх} = u_0 \cos\omega t$ (13). Преобразуем схему на рис. 1 к виду, представленному на рис. 2, учитывая, что

$$r_1 = R_1;\ r_2 = R_1 + R_2;\ r_3 = R_2 + R_3;\ r_4 = R_3;\ r_5 = R_4. \qquad (14)$$

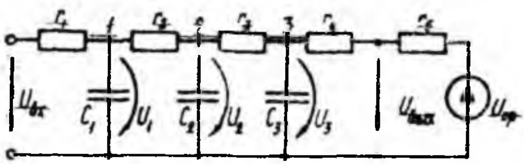

Рис. 2

Величины r, C можно определить по известным теплофизическим характеристикам расчетной модели ИС, используя данные табл. 1 и формулы пересчета (11), (12), (14).

Положив $A_1 = \omega C_1$; $A_2 = \omega C_2$; $A_3 = \omega C_3$ и учитывая, что $r_5 \gg r_1, r_2, r_3, r_4$ методом узловых напряжений [3[получим выражение для комплексного коэффициента передачи rC схемы по напряжению

$$\dot{K} = \{[1 - A_1A_2r_1r_2 - A_1A_3r_1(r_2 + r_3) - A_2A_3r_3(r_1 + r_2)] +$$
$$+ j\,[A_1r_1 + A_2(r_1 + r_2) + A_3(r_1 + r_2 + r_3) - A_1A_2A_3r_1r_2r_3]\}^{-1}. \qquad (15)$$

Отсюда найдем выражение для тангенса сдвига фаз выходного напряжения относительно входного

$$\operatorname{tg}\varphi_u = \frac{A_1A_2A_3r_1r_2r_3 - A_1r_1 - A_2(r_1 + r_2) - A_3(r_1 + r_2 + r_3)}{1 - A_1A_2r_1r_2 - A_1A_3r_1(r_2 + r_3) - A_2A_3r_3(r_1 + r_2)}; \qquad (16)$$

и модуля комплексного коэффициента передачи rC схемы по напряжению

$$K = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = \{[1 - A_1A_2r_1r_2 - A_1A_3r_1)r_2 + r_3) - A_2A_3r_3(r_1 + r_2)]^2 +$$

$$+ [A_1r_1 + A_2(r_1 + r_2) + A_3(r_1 + r_2 + r_3) - A_1A_2A_3r_1r_2r_3]^2\}^{-\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Из (15) определим частоты входного сигнала f, на которых $\varphi_и$ равен 90 и 180°. Приравнивая по очереди вещественную и мнимую части выражения (15) нулю, имеем

$$f_{90^\circ} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{[C_1C_2r_1r_2 + C_1C_3r_1(r_2 + r_3) + C_2C_3r_3(r_1 + r_2)]^{+1}}; \quad (18)$$

$$f_{180^\circ} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_1r_1 + C_2(r_1 + r_2) + C_3(r_1 + r_2 + r_3)}{C_1C_2C_3r_1r_2r_3}}. \quad (19)$$

Представляет интерес анализ полученных выражений (16) — (19) в зависимости от наличия и характера дефектов сборки ИС, ухудшающих внутреннее тепловое сопротивление R_{nk} микросхемы. Величина R_{nk} для расчетной модели ИС определяется суммой термических сопротивлений ее слоев [2]

$$R_{nk} = \sum_{i=1}^{3}\frac{d_i}{\lambda_i}, \quad (20)$$

где толщины d_i и теплопроводности λ_i слоев приведены в табл. 1. Исходя из этого, наличие дефектов сборки ИС, ухудшающих внутреннее тепловое сопротивление, можно моделировать уменьшая одновременно λ_i всех трех слоев расчетной модели ИС, что учитывая (12), эквивалентно такому же увеличению R_1, R_2, R_3 или C_1, C_2, C_3 в RC цепи, изображенной на рис. 1. Средняя величина R_{nk} для бездефектной ИС 133ЛБI, как показали измерения, равна 10 °С/Вт.

Моделируя таким образом дефекты сборки микросхем, по формулам (18), (19) вычислим частоты, на которых сдвиг фаз $\varphi_и$ выходного напряжения относительно входного равен 90 и 180°. Расчетные значения $\varphi_и$ при заданных величинах f и R_{nk} приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\varphi_и$ \ R_{nk}	10 °С/Вт	20 °С/Вт	30 °С/Вт	40 °С/Вт	50 °С/Вт
90° 180°	30 Гц 13,2 кГц	15 Гц 6,6 кГц	10 Гц 4,4 кГц	7,5 Гц 3,3 кГц	6 Гц 2,6 кГц

Зависимости коэффициента передачи rC цепи (см. рис. 2) от частоты f, рассчитанные по формуле (17) для различных R_{nk}, пред-

…ены на рис. 3. Из этих графиков применительно к контролю …схем следует, что с увеличением частоты f нагрева корпуса амплитуды колебаний температуры кристалла резко умень-

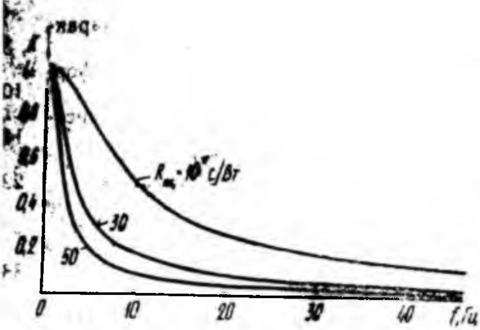

Рис. 3

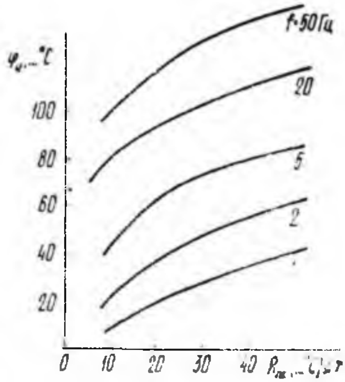

Рис. 4

шается, особенно для дефектных образцов. На рис. 4 приведены зависимости разности фаз $\psi_{н}$ от величины R_{nk} при различных частотах f. Расчеты выполнялись по формуле (16).

Список литературы: 1. *А. с. 1012161 (СССР),* МКИ[3] G01R31/26. Способ контроля качества соединений элементов конструкции полупроводниковых приборов / Н. С. Данилин, Ю. И. Загоровский, В. Ф. Кравченко и др. // Открытия, изобретения. 1983. 2. *Ильченко О. Т.* Расчеты теплового состояния конструкций. 1979. 168 с. 3. *Бессонов Л. А.* Основы электротехники. М., 1967. 776 с.

Поступила в редколлегию 19.05.89