

УДК 621.317.39:621.38.032:621.382.8:416:621.382.017.001.24

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРАХ**

А.Л. Бурка, Ю.А. Невский

Непрерывное повышение требований к элементам вычислительных машин приводит к необходимости учитывать протекающие в них тепловые процессы [1]. При нестационарном режиме работы нагрев микроэлемента может происходить под действием либо одиночного импульса [2] электрического тока, либо серии m импульсов. В настоящей работе анализируются и экспериментально исследуются тепловые процессы в пленочных резисторах при прохождении через них серии m импульсов электрического тока.

Пленочный резистор можно рассматривать как импульсный поверхностный источник энергии. В теплофизическом отношении ему эквивалентен тепловой поток (см.рис.1) со следующими параметрами:

- m - количество импульсов,
- q_0 - плотность мощности,
- t_0 - длительность импульса,
- t_1 - период импульса,

который подводится к подложке (рис. 2) толщиной R через бесконечную полосу шириной $2x_0$. При такой постановке задача сводится к отысканию распределения температуры в подложке по координатам z и x для различных значений времени t с учетом параметров m, x_0, q_0, R, t_0, t_1 .

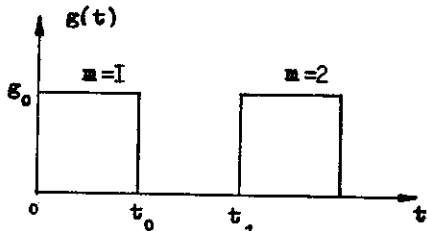


Рис. 1

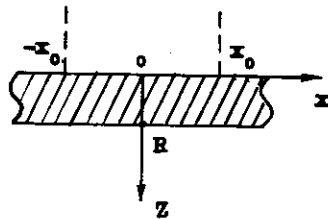


Рис. 2

Математически краевая задача формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (-\infty < x_1 < +\infty, 0 \leq z \leq R, \tau > 0),$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial z_1} \right)_{z_1=0} = \begin{cases} -q_1(\tau) & -x_{01} \leq x_1 \leq x_{01}, \\ 0 & x_{01} < x_1 < x_{01}, \end{cases} \quad (1)$$

$$q_1(\tau) = \begin{cases} q_{01} & (m-1)\tau_1 < \tau < (m-1)\tau_1 + \tau_0, \\ 0 & (m-1)\tau_1 + \tau_0 < \tau < m\tau_1, \quad (m=1, 2, 3, \dots, \infty), \end{cases}$$

$$\theta(1, x_1, \tau) = \theta_1, \quad \theta(z_1, x_1, 0) = \theta_0$$

$$\theta \Big|_{\substack{x_1 \rightarrow 0 \\ x_1 \rightarrow \pm \infty}} = 0 \quad (*)$$

Условие (*) не умаляет общности постановки задачи, от него можно легко избавиться при соответствующей замене переменных.

Решение уравнения (1), полученное путем преобразования Фурье, имеет вид:

$$\theta(z_1, x_1, \tau) = \theta_1 + \frac{4}{\pi} (\theta_0 - \theta_1) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos \frac{2n+1}{2} \pi z_1 e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 \tau}{4}} +$$

$$+ q_{01} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{2n+1}{2} \pi z_1 \sum_{s=1}^m \int_{s\tau_1}^{s\tau_1 + \tau_0} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 (m\tau_1 + \tau_0 - \varphi)}{4}} \times$$

$$\times \left[\Phi \left(\frac{x_1 + x_{01}}{2\sqrt{m\tau_1 + \tau_0 - \varphi}} \right) - \Phi \left(\frac{x_1 - x_{01}}{2\sqrt{m\tau_1 + \tau_0 - \varphi}} \right) \right] d\varphi. \quad (2)$$

Здесь

$\Phi \left(\frac{x_1 \pm x_{01}}{2\sqrt{m\tau_1 + \tau_0 - \varphi}} \right)$ - интеграл ошибок Гаусса;

$\theta_0 = \frac{T}{T_x}$ - безразмерная температура; T - искомая температура; T_x - температура окружающей среды; z_1, x_1, x_{01} - безразмерные координаты;

$$z_1 = \frac{z}{R}, \quad x_1 = \frac{x}{R}, \quad x_{01} = \frac{x_0}{R};$$

τ - безразмерное время;

$$\tau = \frac{at}{R^2}, \quad \tau_0 = \frac{at_0}{R^2}, \quad \tau_1 = \frac{at_1}{R^2},$$

$$\frac{\tau_1}{\tau_0} = \gamma - \text{скважность импульсов};$$

a - температуропроводность подложки;

λ - теплопроводность подложки;

q_{01} - безразмерная плотность мощности теплового потока;

$$q_{01} = q_0 \cdot \frac{R}{\lambda T_x}$$

Результаты расчетов ($z_1=0, \theta_0=\theta_1=1, \Delta\theta=\theta-\theta_1$) по формуле (2), выполненных на ЭВМ, представлены на рис. 3 - 6 в графическом виде (пунктирные линии).

Кривые на рис. 3 показывают распределение температуры на поверхности подложки к концу m -го импульса длительностью τ_0 . Видно, что импульсная тепловая топография подложки при пропускании через пленочный резистор импульсного тока существенно зависит от числа импульсов m и их скважности γ . Область нагрева на поверхности подложки увеличивается с ростом m и с уменьшением γ . Для количественной оценки этого явления можно ввести понятие относительного увеличения области нагрева

$$\mathcal{X} = \frac{x_1 - x_{01}}{x_{01}},$$

где x_1 удовлетворяет соотношению

$$\Delta \theta(x_1, \tau) = 0,1 \cdot \Delta \theta(0, \tau) \quad (3)$$

Значения \mathcal{X} для некоторых случаев приведены в таблице

τ_0	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
α	0,05	0,16	0,28	0,5

$$q_{01} = 1,36, \quad x_{01} = 0,37, \quad m = 1, \quad \gamma = \infty.$$

На рис. 4 показана зависимость тепловой топографии поверхности от длительности импульсов τ_0 . При относительно коротких импульсах ($\tau_0 \leq 3,9 \cdot 10^{-4}$) область нагрева практически повторяет геометрию пленочного резистора.

Представляет интерес также зависимость температуры поверхности от плотности мощности, подводимой к пленочному резистору (рис. 5).

Как видно из рис. 6, при относительно большом времени воздействия τ температура поверхности ($x_y = 0$) существенно зависит от ширины пленочных резисторов при одинаковой плотности мощности, подводимой к ним. При малом времени τ , когда нагрев участка поверхности подложки происходит практически только за счет мощности, передаваемой ему соответствующим участком пленочного резистора, эта

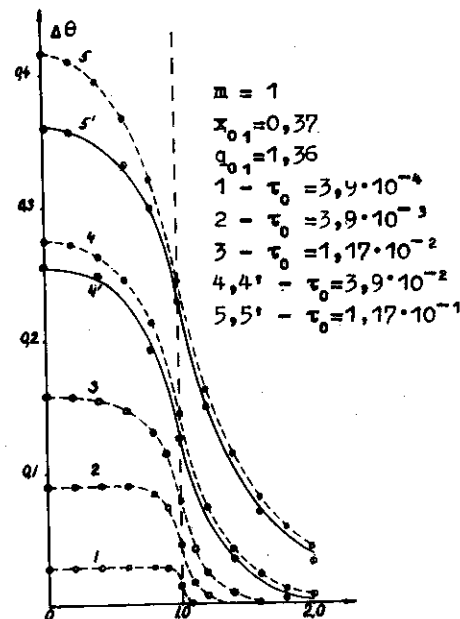


Рис. 4

зависимость незначительна.

Для экспериментального исследования тепловых процессов был применен инфракрасный (ИК) микроскоп, собранный по описанной ранее оптико-механической схеме [3], но усовершенствованной конструкции и с улучшенными характеристиками:

- 1) температурное разрешение — 1°C ,
- 2) геометрическое разрешение — 100 мкм,
- 3) частота модуляции теплового потока 1000 гц,

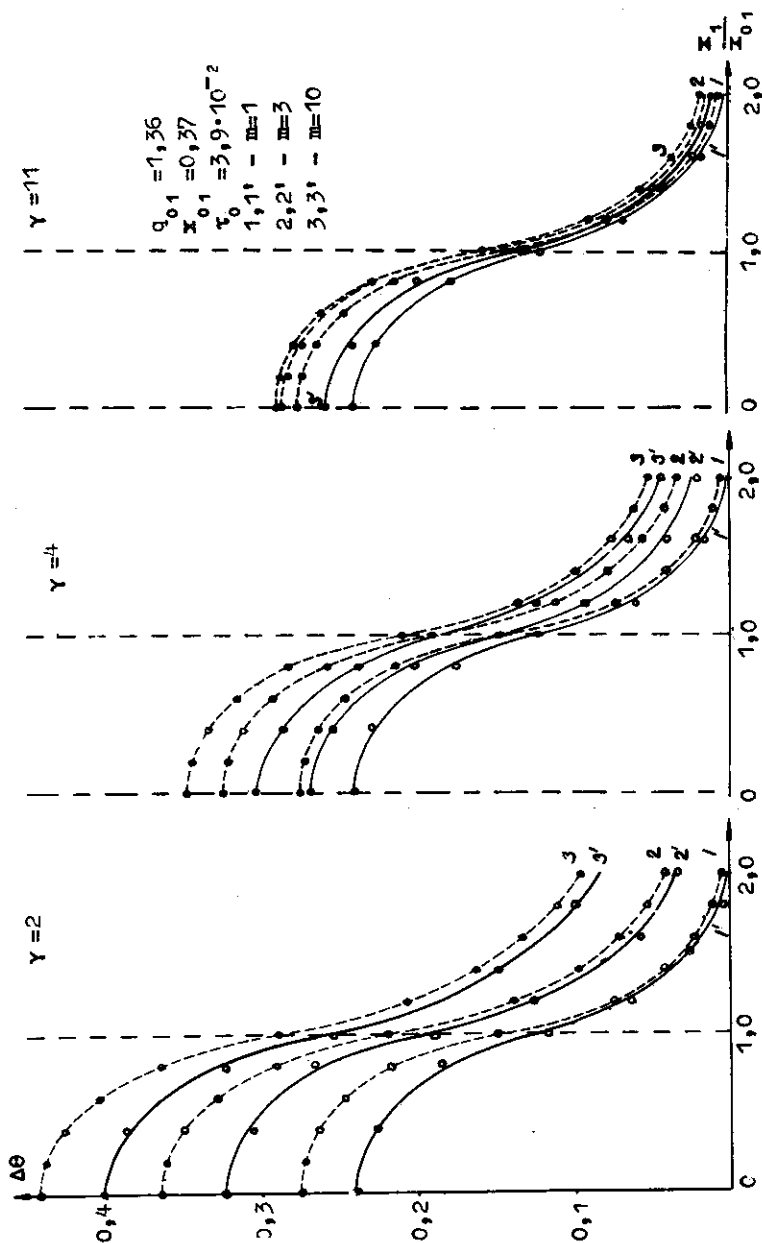


Рис. 3

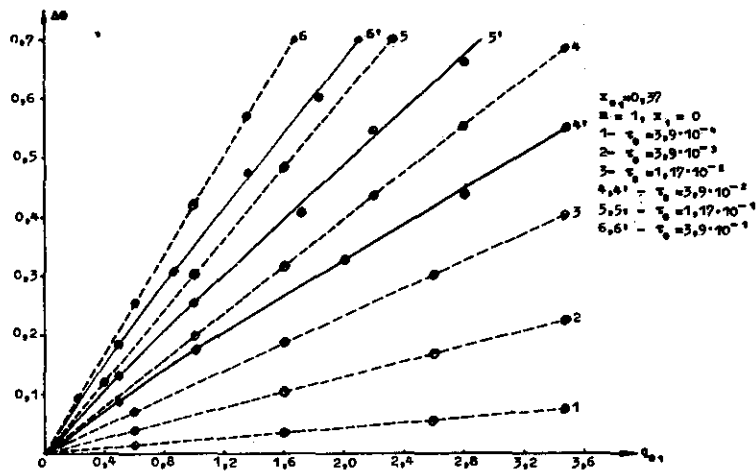


Рис. 5

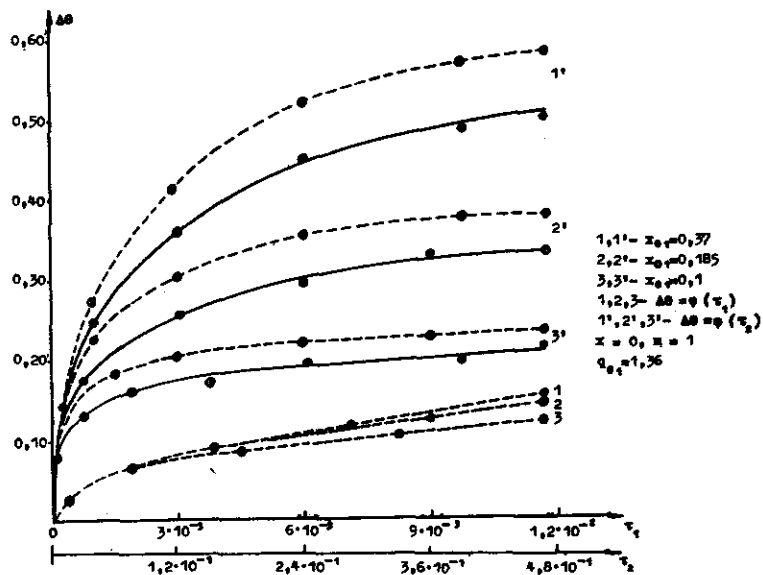


Рис. 6

4) погрешность измерения температуры не более $\pm (1 + 0,05 \Delta T)^\circ \text{C}$.

Объектом исследования в экспериментах были пленочные резисторы, представляющие собой титановые пленки в виде полосок, нанесенные в вакууме на стеклянные подложки ($\alpha = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$, $\lambda = 2,87 \cdot 10^{-3} \text{ кал./сек.см.град}$, $c = 0,17 \text{ кал./г.град}$, $\varepsilon = 0,135 \text{ см}$) методом термического испарения. Длина полосок 10 мм, $2x_0 = 0,27; 0,5; 1,0 \text{ мм}$; величины сопротивлений соответственно 123; 60,6; 28 ом. Приведенные значения теплофизических параметров подложки и величины сопротивлений являются средними в температурном диапазоне 20 – 100°C. При измерениях обеспечивался хороший тепловой контакт подложки с массивной медной пластиной, температура которой поддерживалась на уровне $T_x = 23^\circ \text{C}$.

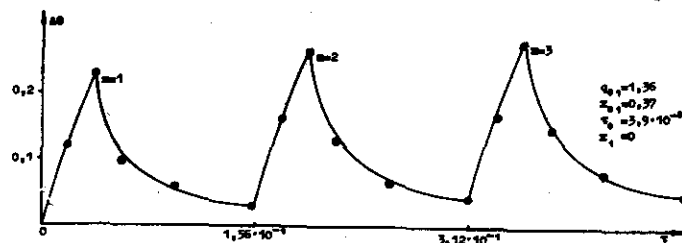


Рис. 7

Методика проведения эксперимента аналогична описанной ранее [2], за исключением того, что на пленочные резисторы подавались серии импульсов напряжения различной длительности, скважности и амплитуды.

Результаты экспериментов, приведенные к безразмерному виду, представлены на рис.3 – 6 (сплошные линии). Они удовлетворительно совпадают с расчетными данными.



Рис. 8

На рис. 7 показана динамика роста и спада температуры поверхности во время прохождения и после окончания импульсов тока, соответствующая приведенной на рис. 8 осциллограмме недетектированных сигналов с выхода ИК – микроскопа.

В заключение необходимо отметить, что результаты анализа могут быть использованы для предварительного расчета и конструирования пленочных микросхем, а также для расчета тепловых процессов в подложках при их обработке импульсными размерными потоками энергии (электронными, ионными и т.п.).

Ввиду сложности аналитического учета всех факторов, влияющих на точность расчета, и необходимости получения более точной информации о тепловых процессах, протекающих в микросхеме, целесообразно на этапе проектирования и отработки конструкции производить также экспериментальное исследование этих процессов рассмотренным выше бесконтактным способом.

Авторы выражают признательность И.П.Михайловскому за предоставленные образцы пленочных резисторов и консультации.

Л и т е р а т у р а

1. АЛЕКСЕЕВ В.Я., АЛЕКСЕЕВ Ю.Е. Контроль качества и надежности электронных микросхем по их тепловому излучению с помощью инфракрасной техники, Москва, 1969.

2. НЕВСКИЙ Ю.А., АРАДЖИОНИ В.А. Исследование переходных тепловых процессов в пленочных микросхемах. — "Вычислительные системы", Новосибирск, 1969, вып. 32, стр. 59-66.

3. АРАДЖИОНИ В.А., НЕВСКИЙ Ю.А., КОКОУЛИН В.И. Инфракрасный микроскоп для контроля локальных температур пленочных микросхем. — "Вычислительные системы", Новосибирск, 1969, вып. 32, стр. 47-52.

Поступила в ред.-изд.отд.

15 июня 1972 г.