

РОЗДІЛ VI

НА ПЕРЕДНЬОМУ КРАЮ НАУКИ

УДК 621.382

Т. О. Кудикіна,
доктор фізико-математичних наук, професор,
В. О. Гончаренко,
студент,
І. В. Кузьмеико,
студент

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ У МІКРОСХЕМАХ

Проанализированы результаты исследования разогрева микросхем, резисторами, диодами, транзисторами в стационарном режиме. Показано, что наиболее безопасным является разогрев кристалла источником тепла сферической формы. Доказано также, что охлаждение вентиляторами (усиление конвекции вблизи поверхности) значительно эффективнее, чем применение теплоотводящих материалов.

The steady state heating of the integrated circuits by their resistors, diodes and transistors is investigated. It is shown (hat the safest heating is the heating by the spherical heat source. It is shown also that the cooling with fan is muck more effective than the use of the heat conductive materials.

При створенні електронної апаратури — і потужних силових перетворювачів, і високочастотних цифрових схем, і великих інтегральних схем — потрібно забезпечити ефективний відвід тепла для безпечної роботи приладу. Для цього використовують різні методи тепловідводу, створюють нові теплозахисні матеріали, спеціальні радіатори та вентилятори. Поверхню мікросхем покривають шаром тепловідвідного матеріалу.

Розігрів мікросхем виникає при проходженні струму через резистори й активні елементи — діоди, транзистори. Робота останніх має бути обмежена максимально допустимими температурами. Потужності, які розсіюються конденсаторами й індуктивностями, порівняно невеликі, а міжз'єднання мають не тільки велику електропровідність, але й значну теплопровідність і сприяють охолодженню мікросхеми. Сучасна тенденція розвитку електроніки до зменшення габаритів електронних пристроїв не тільки не зменшує проблему тепловідводу, а й, навпаки, стає дедалі гострішою при зростанні потужності пристрою та зменшенні його об'єму.

У даній роботі розглянуто математичну модель процесу теплоперенесення в мікросхемі. Розрахунки проведено для тришарової системи «покриття — джерело тепла — кристал». Аналізується вплив геометричної форми джерела тепла в мікросхемі на ефективність тепловідводу; співвідношення параметрів матеріалів і величина конвекції для ефективного охолодження мікросхеми.

Теплопередача за наявності джерела тепла

Існує три основні механізми теплопередачі: теплопровідність, конвекція і випромінювання. Останній вид теплопередачі ефективний лише за дуже високих температур (при яких напівпровідники вже не можуть функціонувати). Конвекція можлива в газах і рідинах. Вона також сприяє теплопередачі між поверхнею твердого тіла і навколишнім газоподібним середовищем. Для суцільних твердих тіл (наприклад, мікросхем, залитих компаундом) основним механізмом теплопередачі є теплопровідність.

У випадку ізотропних твердих тіл зміна теплового поля в часі та просторі визначається рівнянням теплопровідності, доповненим крайовими умовами:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{A(x, y, z, t)}{K}, \quad (1)$$

де K — коефіцієнт теплопровідності; $\kappa = \frac{K}{C_p}$ — коефіцієнт температуропровідності (або теплової дифузії); ρ — густина матеріалу; C — питома теплоємність; $A(x, y, z, t)$ — функція джерела тепла, яка залежить від координат (x, y, z) і часу t .

Крайові умови до рівняння (1) залежать від конкретної задачі і будуть обговорюватися далі. Для сталого режиму, коли $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ рівняння (1) перетворюється в рівняння Пуассона:

$$\Delta T = -\frac{A(x, y, z, t)}{K}.$$

У рівняннях (1) і (2) параметри матеріалу вважають константами. Мікросхема складається з областей, що мають різні параметри $K_i, C_i, \rho_i, \kappa_i, A_i$. Тому її можна розглядати як складне тіло, складене з кількох ізотропних областей. При цьому для кожної області потрібно розв'язувати відповідне рівняння, а на межі розділу областей (в одновимірному випадку при $x = a, b, \dots$) «зшивати» одержані розв'язки. Наприклад, для двох шарів у разі ідеального теплового контакту і без конвекції:

$$T_1(a) = T_2(a);$$

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_a = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_a.$$

У даній статті розглянуто загальний підхід до такої проблеми при дії джерел тепла; стаціонарна задача розігріву для тришарової системи за наявності конвекції; а також вплив форми джерел тепла на поширення тепла в мікросхемі.

Теплопровідність однорідної області

Розглянемо неоднорідне рівняння, що описує лінійний тепловий потік:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial v}{\partial t} = -f(x, t).$$

У загальному випадку в момент $t = 0$

$$v(x, t = 0) = \varphi(x).$$

На поверхні при $x = 0$

$$v(0, t) = \mu(t).$$

Тоді розв'язок рівняння (5) з крайовими умовами (6)–(7) буде сумою трьох функцій [1]:

$$v(x, t) = v_1(x, t) + v_2(x, t) + v_3(x, t), \quad (8)$$

$$\text{де } v_1(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\kappa t}} \int_0^{\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4\kappa t}\right) - \exp\left(-\frac{(x+\xi)^2}{4\kappa t}\right) \right\} \cdot \varphi(\xi) \cdot d\xi; \quad (9)$$

$$v_2(x, t) = \frac{\kappa}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{x}{[\kappa(t-\tau)]^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa(t-\tau)}\right) \cdot \mu(\tau) \cdot d\tau; \quad (10)$$

$$v_3(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{\kappa(t-\tau)}} \left\{ \exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4\kappa(t-\tau)}\right) - \exp\left(-\frac{(x+\xi)^2}{4\kappa(t-\tau)}\right) \right\} \cdot f(\xi, \tau) \cdot d\xi \cdot d\tau. \quad (11)$$

Сталий режим, одновимірна задача

Розглянемо математичну модель процесу теплоперенесення у випадку тришарової системи: 1 — теплопровідне покриття; 2 — активний елемент — джерело тепла; 3 — основа — кристал. Припускаємо ідеальний тепловий контакт між шарами. Температуру зовнішнього середовища T_c вважаємо сталою. Коефіцієнт тепловідводу h у зовнішнє середовище також вважаємо сталим. За таких умов процес теплопередачі реалізується переважно вздовж товщини досліджуваного об'єкта. Перетіканням тепла в поздовжньому та поперечному напрямках будемо нехтувати. Це дає змогу формулювати математичну модель теплопередачі в одновимірній постановці [2]. Перейдемо до безрозмірних температур v_1, v_2, v_3 , які відповідно дорівнюють $v_i = \frac{T_i}{T_c}$ (де T_c — температура навколишнього середовища); і безрозмірних коор. $x = \frac{x_1}{a}$, (a — розмір джерела тепла) та безрозмірних параметрів: $L = \frac{A \cdot a^2}{K_s}$; $h = \frac{h_1}{K_1}$. Потужність густини тепла A вважаємо незалежною від координати. Рівняння у трьох шарах мають вигляд:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} = 0; \dots \dots \dots -d/a < x < 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} = -L; \dots \dots \dots 0 < x < +1; \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} = 0; \dots \dots \dots +1 < x < H/a \quad (14)$$

Тут H — відстань до сусіднього пасивного елемента схеми.
Граничні умови мають вигляд:

$$v_1(x=0) = v_2(x=0); \quad (15)$$

$$\frac{dv_1}{dx} \Big|_{(x=-d/a)} = h \cdot v_0 \Big|_{(x=-d/a)}; \quad (16)$$

$$K_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \Big|_{(x=0)} = K_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \Big|_{(x=0)}; \quad (17)$$

$$v_2(x=1) = v_3(x=1); \quad (18)$$

$$K_3 \frac{\partial v_3}{\partial x} \Big|_{(x=1)} = K_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \Big|_{(x=1)}; \quad (19)$$

$$v_3(H/a) = (1 + \Delta), \quad (20)$$

де Δ — деяке перевищення температури в точці H над температурою середовища.

Розв'язок рівнянь (12)—(14) має вигляд:

$$v_1(x) = C_3 \cdot x + C_4; \quad (21)$$

$$v_2(x) = -\frac{L}{2} \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2; \quad (22)$$

$$v_3(x) = C_5 \cdot x + C_6. \quad (23)$$

Константи C_i були визначені з граничних умов (15)—(20). Результати розрахунку теплових полів описаної вище тришарової системи наведені на рис. 1 для різних значень співвідношення теплопровідностей другого (активного) і третього (кристал) шарів. Розрахунок теплових полів для різних величин конвекції наведений на рис. 2. Збільшення конвекції (теплового потоку на поверхні) сприяє охолодженню сильніше, ніж збільшення теплопровідності оточуючих джерело тепла шарів.

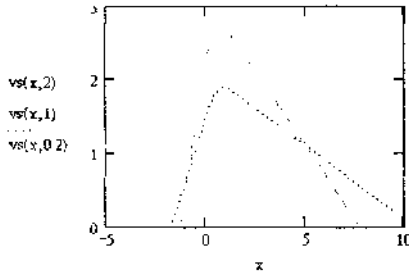


Рис. 1. Тришарова система: активний елемент при $0 < x < 1$, $-d/a < x < 0$ — теплопровідний шар, $1 < x < 10$ кристал ($\kappa_2/\kappa_3 = 2$, κ_2/κ_1 — у дужках)

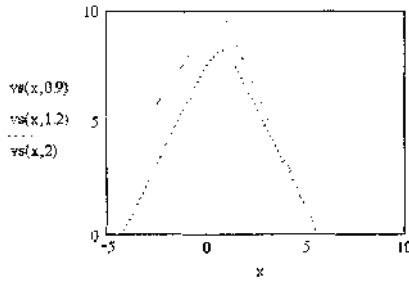


Рис. 2. Залежність теплопередачі від величини конвекції h

На рис. 3 наведені залежності температури кристала на різних відстанях від активного елемента від величини конвекції. Видно, що підсилення конвекції є найбільш дієвим способом запобігання перегріву кристала.

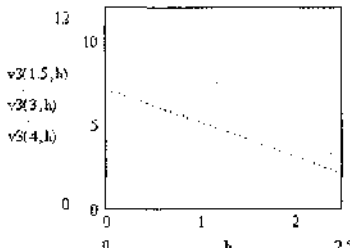


Рис. 3. Залежність температури третього шару (кристала) в точках $x = 1,5; 3; 4$ від величини конвекції

Залежність розігріву кристала від форми джерела тепла

Розглянемо вплив геометричної форми джерела тепла на розігрів кристала і зіставимо теплові поля, які виникають у разі трьох різних форм — сфери, циліндра та куба. Вважатимемо, що активні елементи — джерела тепла — мають ідеальний тепловий контакт із кристалом. Позначимо кристал — як область 1 і активний елемент — як область 2. На межі розділу областей теплові поля «зшиваємо», використовуючи граничні умови (3)–(4). Запишемо для стаціонарного випадку безрозмірні рівняння та їх розв'язок для трьох форм джерела тепла і порівняємо радіальні теплові поля.

Сфера.

$$\frac{d^2 v_1}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dv_1}{dr} = 0 \dots\dots\dots \frac{1}{2} < r < H/a \quad (24)$$

$$\frac{d^2 v_2}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dv_2}{dr} = -L \dots\dots\dots 0 < r < \frac{1}{2} \quad (25)$$

$$v(r) = v_2(r), \dots\dots\dots 0 < r < \frac{1}{2} \quad (26)$$

$$v(r) = v_1(r), \dots\dots\dots \frac{1}{2} < r < H/a.$$

Розв'язок має таку форму:

$$v_1(r) = -\frac{C_3}{r} + C_4; \quad v_2(r) = -\frac{L \cdot r^2}{6} + C_2. \quad (27)$$

Циліндр.

$$\frac{d^2 v_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dv_1}{dr} = 0 \dots\dots\dots \frac{1}{2} < r < H/a, \quad (28)$$

$$\frac{d^2 v_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dv_2}{dr} = -L \dots\dots\dots 0 < r < \frac{1}{2} \quad (29)$$

$$v(r) = v_2(r), \dots\dots\dots 0 < r < \frac{1}{2} \quad (30)$$

$$v(r) = v_1(r), \dots\dots\dots \frac{1}{2} < r < H/a.$$

Розв'язок має таку форму:

$$v_1(r) = C_3 \cdot \ln(r) + C_4; \quad v_2(r) = -\frac{L \cdot r^2}{4} + C_2. \quad (31)$$

Куб.

$$\frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} = -L; \dots\dots\dots 0 < x < +1/2; \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} = 0; \dots\dots\dots +1/2 < x < H/a \quad (33)$$

$$v(x) = v_2(x), \dots\dots\dots 0 < x < \frac{1}{2}; \quad (34)$$

$$v(x) = v_1(x), \dots\dots\dots \frac{1}{2} < x < H/a.$$

Розв'язок має таку форму:

$$v_1(x) = C_3 \cdot x + C_4; \quad v_2(x) = -\frac{L}{2} \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (35)$$

Константи інтегрування C_i знаходимо з граничних умов типу (3)–(4).

На рис. 4 для порівняння наведені радіальні теплові поля для розглянутих трьох геометричних форм

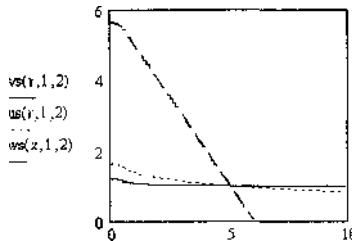


Рис. 4. Поширення тепла від сфери (vs), циліндру (us) та куба (ws) за однакових параметрів

Порівняння показує, що найсприятливіші умови охолодження має сферична форма джерела тепла.

Література

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1966.— 724 с.
2. Карату Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.— М.: Наука, 1964.— 487 с.

Ключові слова: розігрів, генерація тепла, тепловідвід, інтегральні мікросхеми.

Key words: heating, generated heat, heat-removing, integrated circuit, micro-circuit.