УДК 536.24

В. Гавриш, А. Косач, Ю. Нога
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра програмного забезпечення

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У ТЕРМОЧУТЛИВОМУ ВУЗЛІ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Розглядається стаціонарна нелінійна задача теплопровідності для термочутливої смуги, яка нагрівається внутрішніми джерелами тепла і тепловим потоком. Отримано аналітичний розв'язок цієї задачі та виконано числовий аналіз для заданої залежності коефіцієнта теплопровідності матеріалу смуги від температури.

Ключові слова: температура, теплопровідність, стаціонарна, ізотропна, тепловий потік, термочутлива.

A steady state nonlinear thermal conductivity problem for thermosensitive strip, which is heated by internal heat sources and heat flow. The analytical solution of this problem has been obtained and the numerical analysis for a given dependence of thermal conductivity coefficient of the strip material on the temperature has been conducted.

Keywords: temperature, thermal conductivity, steady state, isotropic, heat flow, thermosensitive.

Вступ

Проблема достовірного визначення температурного стану елементів конструкції є однією з найважливіших у сучасній техніці. Розрахунки температурних полів, виконані на основі лінійних математичних моделей процесу теплопровідності, не завжди дають задовільні результати, особливо в тих випадках, коли температура змінюється в значному діапазоні. Тому для побудови найбільш адекватної до реального процесу математичної моделі, якої вимагають високі експлуатаційні параметри сучасних мікроелектронних пристроїв, необхідно врахувати залежність від температури теплофізичних характеристик матеріалів.

Оскільки експериментальні дослідження є неможливими через високі температури, то отримати достовірну інформацію про тепловий стан та температурні режими в окремих елементах та вузлах мікроелектронних пристроїв можна лише розрахунковим шляхом, що, своєю чергою, вимагає розв'язування складних граничних нелінійних задач теплопровідності, математичні моделі яких би максимально відображали найістотніші аспекти теплофізичних процесів у розглядуваних конструкціях.

Деякі дослідження температурних режимів для окремих елементів мікроелектронних пристроїв виконано раніше [1–4].

Нижче сформульовано граничну стаціонарну нелінійну задачу теплопровідності, побудовано аналітичний розв'язок та виконано числовий аналіз для вузла мікроелектронного пристрою, який описується термочутливою смугою (теплофізичні параметри залежать від температури), що нагрівається внутрішніми джерелами тепла і тепловим потоком. Наведено [5, 6] загальні рівняння теплопровідності для термочутливих тіл.

Формулювання задачі

Розглянемо термочутливу в сенсі теплофізичних характеристик ізотропну смугу, яка віднесена до декартової прямокутної системи координат (Oxy) і нагрівається: а) рівномірно розподіленими за площею скінченного прямокутника $4ab$ внутрішніми джерелами тепла з потужністю $q_0 = const$ (рис. 1а) ; б) тепловим потоком з такою самою потужністю, який падає на відрізок скінченної довжини $2l$ однієї з границь смуги (рис. 1б).

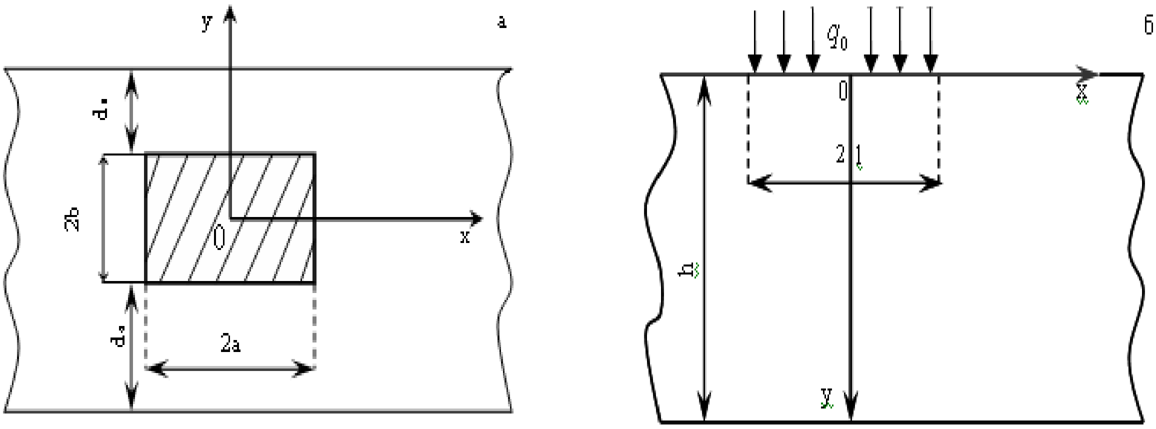

Рис. 1. Ізотропна термочутлива смуга, яка нагрівається внутрішніми джерелами тепла (а) і тепловим потоком (б)

Розподіл стаціонарного температурного поля $t(x,y)$ у розглядуваній системі отримаємо, розв’язавши нелінійне рівняння теплопровідності [5,6]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right]=F \qquad (1)$$

з граничними умовами

$$\lambda(t)\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=0} = -q_0 N(x,l) \quad (б), \quad \left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=h} = 0 \quad (б),$$
$$\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=-b-d_н} = \left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=b+d_в} = 0 \ (a), \ \left.t\right|_{|x|\to\infty} = \left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{|x|\to\infty} = 0, \qquad (2)$$

де $\lambda(t)$ −коефіцієнт теплопровідності смуги, $N(z\ )=S_-(z+z\ )-S_+(z-z\ )$; $z=(x;y),\ \ z\ =(l,a,b)$.

$$S_\pm(z\ )=\begin{cases}1, & z\ >0,\\ 0,5\mp 0,5, & z\ =0,\\ 0, & z\ <0.\end{cases} \quad - \text{ асиметричні одиничні функції [7];}$$

$$F=\begin{cases}0 & \text{для випадку } (б),\\ -q_0N(x,a)N(y,b) & \text{для випадку } (a).\end{cases}$$

Лінеаризована гранична задача

Розглянемо змінну Кірхгофа [8]

$$\vartheta=\frac{1}{\lambda^0}\int\limits_0^{t(x,y)}\lambda(\zeta)d\zeta, \qquad (3)$$

із використанням якої рівняння (1) та умови (2) запишуться у вигляді

$$\Delta\vartheta = \frac{F}{\lambda^0}, \tag{4}$$

$$\left.\frac{\partial\vartheta}{\partial y}\right|_{y=0} = -\frac{q_0}{\lambda^0} N(x,l) \ \ (б), \quad \left.\frac{\partial\vartheta}{\partial y}\right|_{y=h} = 0 \ \ (б),$$
$$\left.\frac{\partial\vartheta}{\partial y}\right|_{y=-b-d_н} = \left.\frac{\partial\vartheta}{\partial y}\right|_{z=b+d_в} = 0 \ \ (a), \quad \vartheta\big|_{|x|\to\infty} = \left.\frac{\partial\vartheta}{\partial r}\right|_{|x|\to\infty} = 0, \tag{5}$$

де λ^0 − опорний коефіцієнт теплопровідності смуги; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ − оператор Лапласа.

Тут враховано, що

$$\lambda^0 \frac{\partial\vartheta}{\partial x} = \lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}, \quad \lambda^0 \frac{\partial\vartheta}{\partial y} = \lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}.$$

Побудова аналітичного розв'язку задачі

Застосувавши інтегральне перетворення Фур'є за координатою x до граничної задачі (4), (5), отримуємо звичайне диференціальне рівняння зі сталими коефіцієнтами

$$\frac{d^2\overline{\vartheta}}{dy^2} - \xi^2\overline{\vartheta} = \frac{\overline{F}}{\lambda^0} \tag{6}$$

і граничні умови

$$\left.\frac{d\overline{\vartheta}}{dy}\right|_{y=0} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{q_0}{\lambda_0\xi}\sin\xi l \ \ (б), \quad \left.\frac{d\overline{\vartheta}}{dy}\right|_{y=h} = 0 \ (б), \quad \left.\frac{d\overline{\vartheta}}{dy}\right|_{y=b+d_в} = \left.\frac{d\overline{\vartheta}}{dy}\right|_{y=-b-d_н} = 0 \ (a), \tag{7}$$

де $\overline{\vartheta} = \int\limits_0^\infty e^{i\xi x}\vartheta d\xi$ − трансформанта функції ϑ; ξ − параметр інтегрального перетворення; $i = \sqrt{-1}$ − уявна одиниця;

$$\overline{F} = \begin{cases} -\sqrt{\dfrac{2}{p}}\dfrac{q_0}{x}\sin x a\, N(y,b) & \text{для випадку } (a), \\ 0 & \text{для випадку } (б). \end{cases}$$

Загальний розв'язок рівняння (6) запишемо у вигляді

$$\overline{\vartheta} = C_1 e^{\xi y} + C_2 e^{-\xi y} + \overline{F_ч}.$$

Тут C_1, C_2 − сталі інтегрування;

$$\overline{F_ч} = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{2}{p}}\dfrac{q_0}{l^0 x^3}\sin x a\left[N(y,b) - chx(y+b)S_-(y+b) + chx(y-b)S_+(y-b)\right] & \text{для випадку } (a), \\ 0 & \text{для випадку } (б). \end{cases}$$

Використавши граничні умови (7), отримаємо частковий розв'язок задачі (6), (7)

$$\overline{J} = \sqrt{\frac{2}{p}}\frac{q_0}{l^0 x^3}\overline{F_з}, \tag{8}$$

де

$$\overline{F_з} = \begin{cases} \sin xa \cdot \left\{\dfrac{chx(y+b+d_н)}{shx(2b+d_н+d_в)}\left[shx(2b+d_в) - shxd_в\right] + N(y,b) - chx(y+b)S_-(y+b) + chx(y-b)S_+(y-b)\right\} & \text{для випадку } (a), \\ \dfrac{xchx(y-h)}{shxh}\sin xl & \text{для випадку } (б). \end{cases}$$

Застосувавши обернене інтегральне перетворення Фур'є до співвідношення (8), знайдемо вираз для функції ϑ

$$\vartheta = \frac{2q_0}{\pi\lambda^0}\int_0^{\infty}\frac{\cos\xi x}{\xi^3}\overline{F_з}\,d\xi. \qquad (9)$$

Шукане температурне поле для нелінійної граничної задачі теплопровідності (1), (2) визначається з нелінійного алгебраїчного рівняння, отриманого з використанням співвідношень (3), (9), після підстановки в них конкретних виразів залежностей коефіцієнта теплопровідності матеріалу смуги від температури.

Частковий приклад та аналіз числових результатів

У багатьох практичних випадках існує така залежність коефіцієнта теплопровідності від температури [9,10]:

$$\lambda = \lambda^0(1-kt), \qquad (10)$$

де λ^0, k – опорний і температурний коефіцієнти теплопровідності.

Тоді із використанням виразів (3), (9) і (10) отримаємо формулу для визначення температури t у смузі

$$t = \frac{1-\sqrt{1-2k\vartheta}}{k}. \qquad (11)$$

Формулою (11) цілком описується розподіл температурного поля в термочутливій смузі.

Виконано числовий аналіз безрозмірної температури $T = kt$ за формулою

$$T = 1-\sqrt{1-2Ki\vartheta^*}$$

для критерію Кірпічова $Ki = \dfrac{q_0 a^2 k}{l^0}$ $(а)$, $Ki = \dfrac{q_0 l k}{l^0}$ $(б)$ і таких безрозмірних величин:

$$J^* = \frac{l^0}{q_0 a^2}J \quad (а), \qquad J^* = \frac{l^0}{q_0 l}J \quad (б).$$

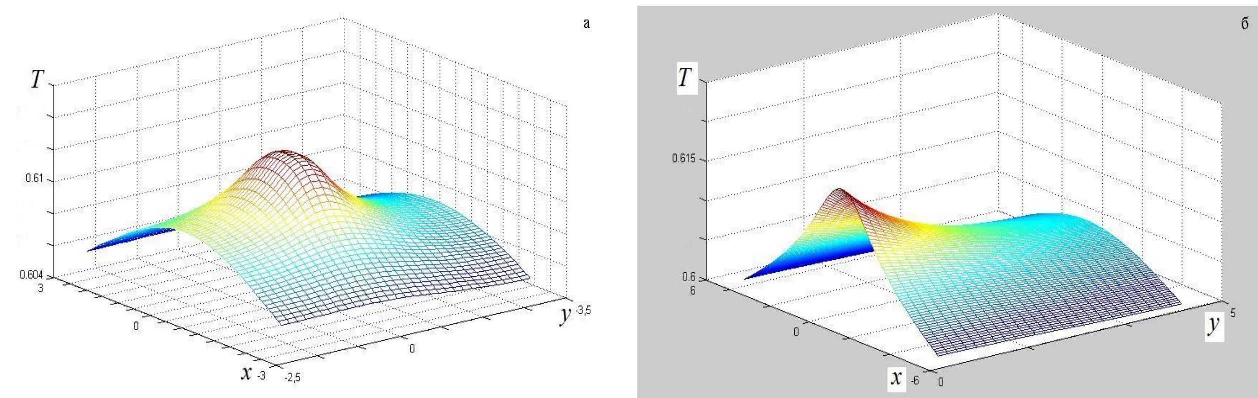

Рис. 2. Залежність безрозмірної температури T від безрозмірних координат X та Y для термо-чутливої смуги, яка нагрівається внутрішніми джерелами тепла (а) і тепловим потоком (б)

Побудовано (рис.2) залежність температури Т від безрозмірних координат $X = x/a$, $Y = y/a$ (а) *та* $X = x/l$, $Y = y/l$ (б) для значень критерію Кірпічова $Ki = 0,002$ і $D_н = d_н/a = 2$, $D_в = d_в/a = 3$, $B = b/a = 0,5$, $H = h/l$. Як бачимо, максимальної температури досягаємо в області дії рівномірно розподілених за площею скінченного прямокутника внутрішніх джерел тепла (а) і теплового потоку, який падає на скінченний відрізок границі термочутливої смуги (б).

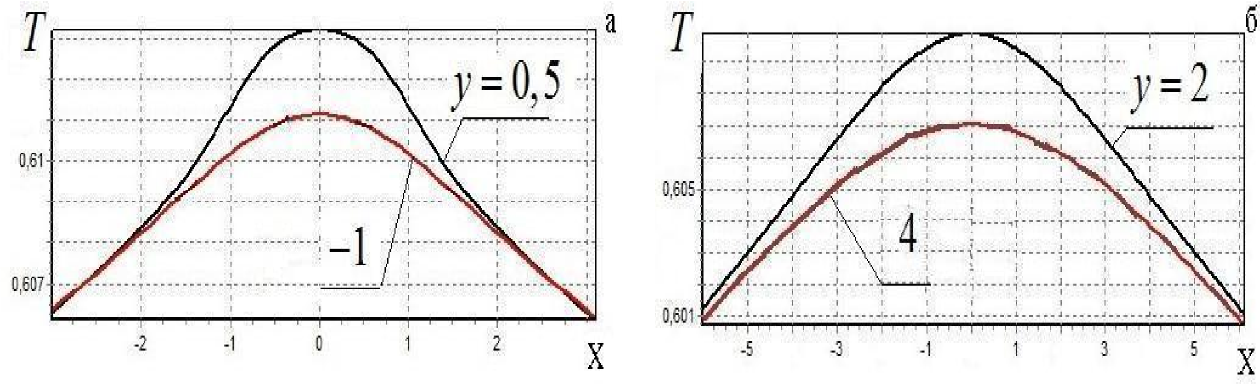

Рис.3. Залежність безрозмірної температури T від безрозмірної координати X

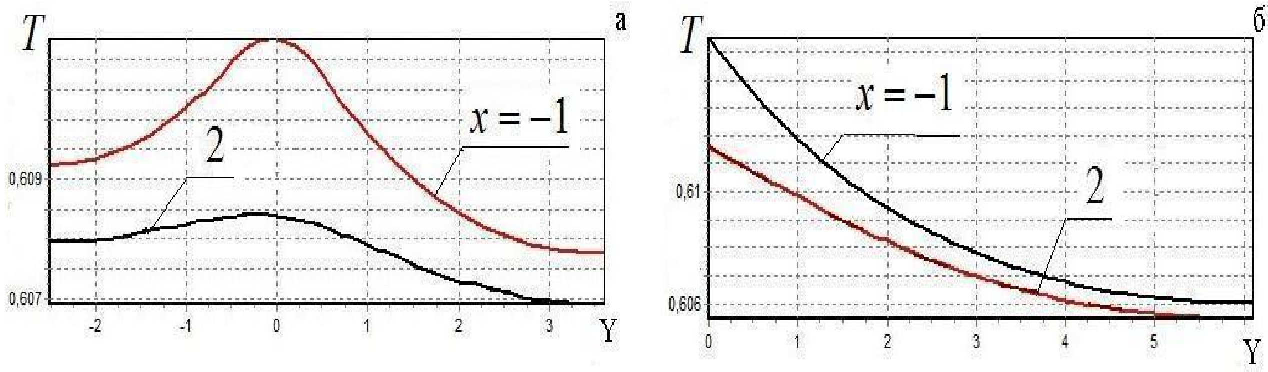

Рис.4. Залежність безрозмірної температури T від безрозмірної координати Y

Рис. 3 ілюструє зміну температури Т залежно від координати X , а рис. 4 – цю саму змінну від Y . На рис. 2–4 зображено поведінку температурного поля у розглядуваній системі,причому для наведених значень безрозмірних координат X та Y можна вказати значення безрозмірної температури T для довільної точки побудованих кривих. Графіки підтверджують адекватність математичної моделі здійснюваному фізичному процесові теплопровідності. Достовірність побудованого аналітичного розв'язку та правильність отриманих числових результатів підтверджується порівнянням їх із результатами, одержаними іншими методами для моделей, що є частковими випадками наведеної моделі.

Висновки

Із використанням змінної Кірхгофа (3) проведено лінеаризацію стаціонарної граничної задачі теплопровідності для термочутливої смуги, яка нагрівається внутрішніми джерелами тепла і тепловим потоком. Побудовано аналітичний розв'язок (9) для визначення змінної Кірхгофа. Розглянуто залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для термочутливої смуги у вигляді співвідношення (10). Встановлено, що врахування цієї залежності приводить до зменшення значень температури порівняно з нетермочутливою смугою (теплофізичні параметри не залежать від температури) на 5%.

1. Барвінський А.Ф. Нелінійна задача теплопровідності для неоднорідного шару з внутрішніми джерелами тепла / А.Ф. Барвінський, В.І. Гавриш // Проблемы машиностроения. – 2009. – 12, № 1. – С. 47–53. 2. Гавриш В.І. Метод розрахунку температурних полів для термочутливої кусково-однорідної смуги із чужорідним включенням / В.І. Гавриш, Д.В. Федасюк // Промышленная теплотехника. – 2010. – 32, № 5. – С. 18–25. 3. Гавриш В.І. Гранична задача теплопровідності для шару з чужорідним циліндричним включенням / В.І. Гавриш, Д.В. Федасюк, А.І. Косач // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – 46, №5. – С. 115–120. 4. Gavrysh V.I.

Thermal simulation of heterogeneous structural components in microelectronic devices / V.I.Gavrysh,D.V. Fedasyuk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2010. – 13, No. 4. – P. 439-443. 5. Подстригач Я.С. Термоупругость тел неоднородной структуры / Я.С. Подстригач, В.А. Ломакин, Ю.М. Коляно. – М.: Наука, 1984. – 386 с. 6. Коляно Ю.М. Методы теплопроводности и термоупругости неоднородного тела. – Киев: Наук. думка, 1992. – 280 с. 7. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Корн Г., Корн Т. – М.: Наука, 1977. – 720 с. 8. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. –229 с. 9. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 376 с. 10. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. – М.: Мир, 1979 . – 288 с.

УДК 004.738.5

В. Висоцька, Л. Чирун, Л. Чирун
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра інформаційних систем та мереж

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОПРАЦЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНТЕНТ-КОМЕРЦІЇ

Запропоновано модель життєвого циклу контенту в системах електронної комерції. Модель описує процеси опрацювання інформаційних ресурсів в системах електронної контент-комерції та спрощує технологію автоматизації формування, управління та реалізації контенту. Проаналізовано основні проблеми електронної комерції та функціональних сервісів управління контентом та запропоновано методи вирішення цих проблем.

Ключові слова: інформаційний ресурс, контент, система управління контентом, життєвий цикл контенту, система електронної контент-комерції.

The article proposed to model the content lifecycle in electronic commerce systems. The model describes the processes of information processing resources in the electronic content commerce systems and automation technology simplifies the formation, management and implementation of content. The paper analyzes the main problems of e-commerce and content management services function. The methods of solving these problems.

Keywords: information resources, content, content management system, content lifecycle, electronic content commerce system.

Вступ. Загальна постановка проблеми

Інформаційний ресурс (англ. Information resources) – це сукупність документів або масивів документів в інформаційних системах (бібліотеках, архівах, фондах, банках даних, депозиторіях, музейних сховищах тощо), яка є об'єктом дії системи електронної контент-комерції (СЕКК). *Контент* (англ. content) – це важлива рушійна сила економічного зростання та соціальних змін. *Контент* – це множина інформаційних ресурсів та продуктів, які збережені в середовищі комп'ютерної ІС і доступні для застосування користувачам цієї системи [1]. *Контент* – це дані без наперед визначеної структури наочного подання в протилежність структурованим даним, що зазвичай знаходяться під управлінням СУБД. Розвиток IT привів до того, що в сучасній світовій економіці контент став ключовим поняттям. Успішний розвиток Інтернету та зростання електронної контент-комерції в черговий раз довели, що інформаційний сектор економіки є най-динамічнішим і найприбутковішим. Існує три основні визначення поняття контенту [1]: