

Інтерфейс програми є нескладним та не викликає у користувача труднощів його розуміння. Використання пакета MatLab для роботи програми дає можливість проводити гнучку модернізацію програмного комплексу згідно з вимогами замовників.

5. Висновки

1. Векторно – аналітична інтерпретація оптимального параметричного синтезу компонентів є основою для розроблення методів і програмних засобів забезпечення безвідмовності радіоелектронних пристроїв на стадіях їх проектування та серійного виготовлення.

2. Показано, що внутрішньодопускова область працездатності характеризує якість підбору компонентів з врахуванням точнісних характеристик їх стикувальних параметрів, надійності, вартості та інших техніко-економічних показників. Чим більшою є ця область порівняно з допусковою при мінімумі вартості компонентів, тим якіснішим є варіант запропонованої схеми і пристрою загалом. Область позадопускової працездатності є характеристикою живучості, оскільки характеризує властивість виробу протистояти розвитку критичних відмов при будь-яких умовах експлуатації.

3. Наведені формалізації прямої та зворотної задач оптимізації параметричного синтезу систем компонентів, що сумісно працюють, визначають можливі шляхи підвищення його ефективності. Проаналізовано варіанти моделей забезпечення безвідмовності систем компонентів, що сумісно працюють.

4. Розроблено програмне забезпечення для вирішення завдань параметричного синтезу з врахуванням моделей забезпечення безвідмовності.

1. Бобало Ю., Лазько О., Недоступ Л. *Формалізація ефективності параметричного синтезу компонентів // Вісник НУ "Львівська політехніка". ~ Львів, 2002. – № 440. – С. 76 – 82.* 2. Лазько О., Недоступ Л., Бобало Ю. *Моделювання розподілів рядами Грама-Шарльє та їх застосування у технологічних САПР // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". ~ Львів, 2000. – № 387. – С. 59 – 65.* 3. Лазько О., Недоступ Л., Бобало Ю. *Оцінка безвідмовності сумісної роботи компонентів радіоелектронних пристроїв // Вісник НУ "Львівська політехніка". ~ Львів, 2001. – № 415. – С. 204 – 210.* 4. www.assonika.ru. 5. www.reliasoft.com.

УДК 638.235.231

Сергій Івчук, Іван Костюк

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювання,
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

РОЗПОДІЛ ТЕПЛА В ТОНКОПЛІВКОВОМУ ПРОВІДНИКУ

© Івчук Сергій, Костюк Іван, 2003

Наведено підхід для розрахунку теплового режиму тонкоплівкового провідника з врахуванням нерівномірно розподіленого внутрішнього джерела теплоти.

In this paper we present the approach to calculation of the mode of thin-film conductor with taking into account the unevenly distributed internal heat source.

Вступ. У проектуванні сучасних ВІС спостерігається тенденція до зростання потужностей розсіювання на одиницю площі кристала підвищення швидкості перемикачів та

зменшення поперечного перерізу провідних доріжок. Тому виникає потреба в розробці методів прогнозування надійності функціонування ВІС та багатокристалічних модулів (БКМ). З аналізу відмов мікроелектронних виробів відомо, що більш ніж 25 ідентифікованих відмов становлять відмови провідної системи. Домінуючою відмовою тонкоплівкової металізації ВІС є дифузія матеріалу під дією зовнішнього електричного поля, тобто електроміграції [1].

Електроміграція в провідних системах з Al обумовлена структурними неоднорідностями тонких плівок та залежністю характеристик тонких плівок від товщини (розмірний ефект). Полікристалічна структура тонких плівок визначає домінуючою пограничну електродифузію, тобто перенесення матеріалу по границях зерен.

Однією з особливостей електродифузії в тонких плівках, на відміну від масивних матеріалів, є перенесення речовини, що призводить до обриву тонкоплівкового провідника або нагромадження речовини на певній ділянці, що викликає руйнування ізоляційного шару та коротке замикання [2].

Тому для визначення характеристик надійності ВІС та БКМ на етапі проектування необхідна розробка фізико-математичних моделей електродифузійного руйнування провідних систем виробів мікроелектроніки.

У роботах зарубіжних та вітчизняних авторів достатньо широко досліджувався вплив структурної неоднорідності плівки, геометричних розмірів провідної доріжки та величини струму на довговічність тонкоплівкових провідників. Однак недостатньо розглянуто питання впливу температури на електродифузію.

У роботі розглянуто виділення та розподіл тепла при проходженні електричного струму та розроблено модель розподілу теплового поля в провідній доріжці для моделювання електродифузійного руйнування тонкоплівкового провідника.

При дослідженні електродифузії в тонких плівках необхідно враховувати розподіл температури за довжиною провідної доріжки, тому що температура провідника суттєво впливає на швидкість електроміграції.

У тонкоплівкових провідниках струм досягає величин $1 - 100 \cdot 10^5$ А/см² завдяки ефективній передачі тепла через границю метал-підкладка. В існуючих моделях недостатньо уваги приділялось стягуванню струму, яке спричиняє локальне зростання густини струму, викликане зміною геометрії провідника або ростом пустот та тріщин.

Формування моделі. Запропонована теплова модель тонкоплівкового провідника дозволяє враховувати ефект стягування струму, тобто вплив росту тріщин або пустот і базується на статистичній моделі [3] (рис. 1). Під впливом електроміграції відбувається перенесення матеріалу тонкоплівкового провідника, що викликає накопичення пустот на границях зерен і, відповідно, ріст тріщин. У результаті ширина провідної доріжки на різних ділянках зменшується, що призводить до локального стягування струму. В свою чергу, локальна концентрація струму викликає локальний ріст джоулевого тепловиділення та збільшення локальної температури. Ці процеси створюють ланку додатного зворотного зв'язку.

Надалі вважаємо, що тріщина розповсюджується вздовж границь зерен.

У загальному випадку тонкоплівковий провідник можна розглядати як ізотропну пластину з внутрішнім розподіленим джерелом тепловиділення [4].

Для стаціонарного режиму ізотропної пластини з розмірами L, W, H та внутрішнім джерелом рівняння теплопровідності набуває вигляду

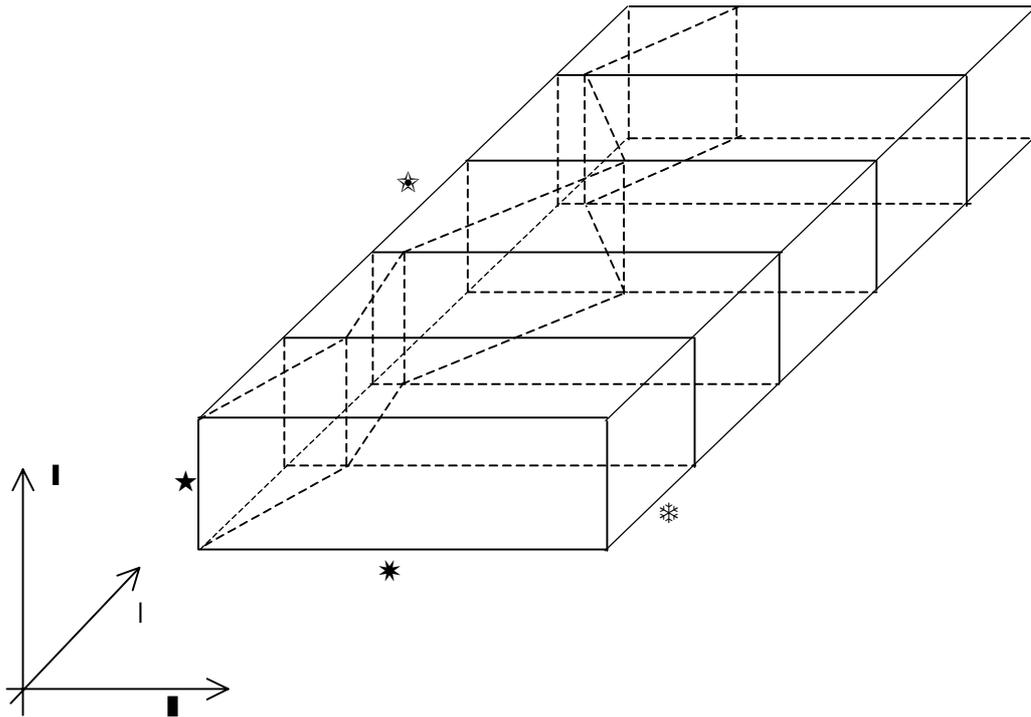


Рис. 1. Модель провідної доріжки для розрахунку теплових характеристик, де L, W, H – довжина, ширина та висота провідника; d – ширина елементарної ділянки провідної доріжки

$$\lambda \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) + Q = 0, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Q – питома потужність внутрішнього джерела тепла.

Оскільки поперечні розміри тонкоплівкового провідника є значно меншими від його довжини, а теплопровідність провідникового матеріалу є достатньо високою, градієнт температури в поперечних напрямках буде, очевидно, незначним. Враховуючи вищевказані передумови, будемо розглядати дану задачу в одномірній постановці. Звідки рівняння теплопровідності запишемо так

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{Q}{\lambda} = 0. \quad (2)$$

Нехтуючи теплообміном бокових граней тонкоплівкового провідника, граничні умови теплообміну можна записати у вигляді

$$y = 0, y = H \quad -\lambda(dT/dy) = \alpha(T - T_n).$$

Вважаючи симетричними умови теплообміну на верхній і нижній поверхнях тонкоплівкового провідника, рівняння теплопровідності набуває вигляду

$$-\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{Q}{\lambda} - \frac{2\alpha}{H}(T - T_n), \quad (3)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі між плівкою та підкладкою; T_n – температура підкладки; H – товщина плівки.

Оскільки підкладка контактує з навколишнім середовищем, то теплообмін підкладки визначаємо з рівняння

$$T_{\Pi} = T_a + P_d R_{\Pi-a}, \quad (4)$$

де T_a – температура навколишнього середовища, P_d – потужність, що розсіюється в доріжці, $R_{\Pi-a}$ – тепловий опір між плівкою та підкладкою.

Для розв'язання рівняння теплопровідності (3), тобто для знаходження розподілу температури в провідній доріжці використаємо розбиття провідної доріжки на елементарні ділянки з розмірами d, W, H – відповідно довжина, ширина та висота елементарної ділянки.

Питома потужність тепловиділення елементарної ділянки розраховується з виразу

$$Q_i = j^2 \cdot R_i. \quad (5)$$

Враховуючи геометричні розміри елементарної ділянки, визначаємо Q_i так

$$Q_i = \frac{j^2}{S^2} \cdot \frac{S^2}{V} \cdot R_i = j^2 \cdot \frac{(W \cdot H)^2}{W \cdot H \cdot d} \cdot R_i \quad (6)$$

$$Q_i = j^2 \cdot \frac{W \cdot H}{d} \cdot R_i,$$

де j – густина струму, R_i – опір ділянки.

Опір елементарної ділянки визначаємо з геометричних розмірів

$$R_i = \rho \cdot \frac{d}{S} \cdot (1 + \alpha_t (T - T_a)), \quad (7)$$

де α_t – температурний коефіцієнт опору; ρ – питомий опір.

Оскільки поперечний переріз елементарної ділянки змінюється за координатою X , розрахуємо опір елементарної ділянки

$$\begin{aligned} dR &= \rho \cdot \frac{d}{S(x)} \\ S(x) &= H \cdot \left[W - l_{i-1} + \frac{x}{d} \cdot (W - l_i - W + l_{i-1}) \right] = H \cdot \left[W - l_{i-1} + \frac{x}{d} \cdot (l_{i-1} - l_i) \right] \\ dR &= \frac{\rho}{H} \cdot \frac{d \cdot \left[W - l_{i-1} + \frac{x}{d} \cdot (l_{i-1} - l_i) \right]}{W - l_{i-1} + \frac{x}{d} \cdot (l_{i-1} - l_i)} \end{aligned}$$

Після інтегрування отримуємо вираз

$$R = \rho \cdot \frac{d}{H \cdot (l_{i-1} - l_i)} \cdot \ln \left(\frac{W - l_i}{W + l_{i-1}} \right)$$

Враховуючи, що питомий опір провідника залежить від температури, повна формула розрахунку опору елементарної ділянки має вигляд

$$R = \rho \cdot [1 + \alpha_t \cdot (T - T_a)] \cdot \frac{d}{H \cdot (l_{i-1} - l_i)} \cdot \ln \left(\frac{W - l_i}{W + l_{i-1}} \right). \quad (8)$$

Диференціальне рівняння (4) розв'язуємо за допомогою методу кінцевих різниць. Для цього проводимо заміну похідної другого порядку відповідною різницею

$$\frac{d^2 T}{dx^2} \approx \frac{T_{i-1} - 2 \cdot T_i + T_{i+1}}{\Delta x^2}.$$

Підставивши цю різницю в рівняння (4) та провівши перегрупування членів рівняння, отримаємо вираз, зручний для формування системи рівнянь розрахунку температури тонкоплівкової провідної доріжки

$$-T_{i-1} + T_i \left(2 + \frac{\alpha \cdot \Delta x^2}{H} \right) - T_{i+1} = \Delta x^2 \left(\frac{Q_i}{\lambda} + \frac{\alpha \cdot T_S}{H} \right). \quad (9)$$

Висновки. Запропонована модель теплообміну в провідній тонкоплівковій доріжці дозволяє розрахувати температуру довільної ділянки з врахуванням нерівномірного внутрішнього тепловиділення, а також розраховувати критичні режими функціонування тонкоплівкового провідника з урахуванням деградаційних процесів, які в ньому відбуваються.

1. *Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакция / Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Майер. – М., 1982. – С. 259 – 262.* 2. *Колешко В.М., Белицкий В.Ф. Массоперенос в тонких пленках. – Минск, 1980. – С. 151 – 154.* 3. *Івчук С.С., Яськов О.В. Моделирование электромиграции в струмопровідних системах мікросхем та мікроборок // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 1998. – № 352. – С. 207 – 211.* 4. *Писаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М., 1969. – С. 57 – 59.*

УКД 621.319

Михайло Матвійків

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ НА ШЛЯХУ ВІД МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ ДО НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

© Матвійків Михайло, 2003

Розглядаються перспективи еволюційного переходу мікроелектроніки в наноелектроніку. Проводиться аналіз та дослідження проблем перехідного періоду.

In a paper outlook of evolution conversion microelektronic to the nanoelektronic is searched. Is making analysis and exploring of a transition period problem.

Сьогодні зберігається тенденція до зменшення геометричних розмірів елементів, оскільки це збільшує ступінь інтеграції, підвищує щільність компоновки елементів і як результат цього – досягнуто нових якісних показників. За період існування ери інтегрованих мікросхем (ІМС) (з 1959 р і донині) розміри окремих елементів зменшилися більше ніж на два порядки. Сучасні напівпровідникові ІМС мають мікрометрові розміри елементів, нижня границя яких становить величину $\approx 0,1$ мкм, а верхня – десятки мікрометрів [1].

Дослідження показують, що подальше зменшення розмірів елементів наштовкується на проблеми погіршення їх параметрів і зниження виходу придатних. Причиною цього є не труднощі технологічного характеру, хоч вони теж існують, а проблеми принципового порядку [2, 10].

Першу проблему, пов’язану з погіршенням параметрів елементів при подальшому зменшенні їх геометричних розмірів стосовно МОН-структур, дослідив автор роботи [3]. Він назвав її проявом короткоканальних ефектів. Вона полягає в тому, що при зменшенні