

УДК 621.396.6.001.63

Михайло Лобур

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра САПР

СИСТЕМА НАСКРІЗНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ВБУДОВАНИХ ПРИСТРОЇВ

© Лобур Михайло, 2003

Запропоновано наскрізну систему проектування вбудованих систем, яка дозволяє значно прискорити процес проектування мікроелектромеханічних систем та зменшити їх вартість.

This paper present design system of build-in systems, which makes process of MEMS design more powerful and cost effective.

Вступ. Бурхливий розвиток мікроелектроніки та неухильне зростання кількості елементів на одному напівпровідниковому кристалі потребують нових ефективних засобів проектування мікроелектронних пристроїв. Відповідно до закону Мура [1, 2] кожні три роки розмір елементів (X) інтегральних схем (IC) зменшується за формулою $X = X \cdot 0.7$ (рис. 1), а площа напівпровідникової пластини (S) збільшується за формулою $S = S \cdot 1.5$ (рис. 2).

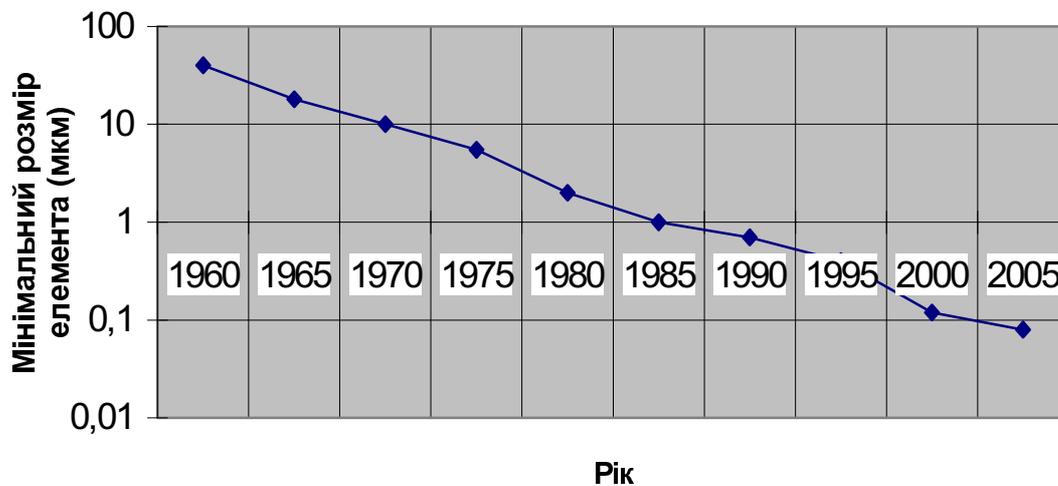


Рис. 1. Графік зменшення розмірів елементів

Отже, не важко спрогнозувати, що в 2005 році кількість елементів на одній пластині виросте до 0.5 – 0.7 млрд. Окрім цього, суттєво розширюється функціональне призначення спроектованих інтегральних схем. Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку мікроелектронних пристроїв є мікроелектромеханічні пристрої (МЕМП), які об'єднують електронну і механічну частини. За даними науковців [2, 3], в 2003 році бюджети провідних країн світу виділяють до 30 % коштів, призначених на розвиток мікроелектроніки, на проектування і розробку мікроелектромеханічних пристроїв, що становить сотні мільярдів доларів США. Разом з тим, необхідно зазначити, що у 2002 році прибуток від виробництва МЕМП становив тільки у США близько 50 млрд. доларів. Більшість існуючих систем

проектування скеровані на вирішення задач поетапного проектування сучасних мікроелектронних пристроїв. Ефективно вирішені задачі схемотехнічного, конструкторського, технологічного та інших етапів проектування [4, 5], але існуючі системи проектування не охоплюють процесів проектування МЕМП за єдиною технологією.

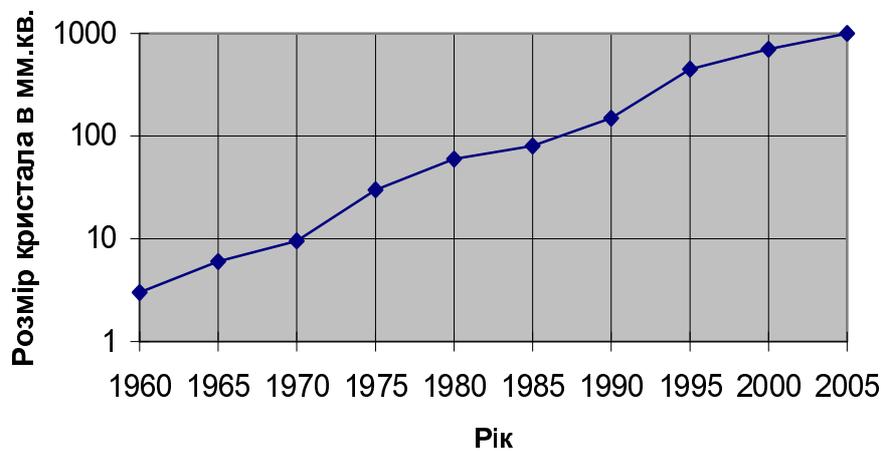


Рис. 2. Залежність збільшення розміру кристала

Аналіз сучасного стану проблематики. Сьогодні найбільш відомі системи проектування МЕМП: MEMSCAP фірми Mentor Graphics; підсистема Tanner Tools MEMS Pro фірми Tanner Research [3]; програма MEMCAD 4.5 Массачусетського технологічного інституту [4]; фірма CADENCE [5], основним недоліком яких є велика вартість даних програмних продуктів (200 – 300 тис. доларів США) та необхідність інсталяції на спеціальне технічне забезпечення (робочі станції), які теж є надзвичайно дорогими.

Постановка задачі. У роботі пропонується методологічний підхід до розробки системи наскрізного проектування вбудованих пристроїв, які виготовляються за спільною технологією.

Для розробки даної системи необхідно вирішити такі проблеми:

- розробити математичні моделі вхідних та виконуючих складових МЕМП;
- побудувати тривимірні математичні моделі технологічних процесів виготовлення МЕМП;
- розробити структуру системи наскрізного проектування вбудованих систем.

Математичні моделі МЕМП. Розглянуто ряд математичних моделей МЕМП, але ці моделі розроблені для використання в закритих системах проектування і не можуть бути використані в розроблювальних САПР. Для прикладу розглянемо мікромеханічну модель резонатора. Фільтр, який побудований на основі резонатора (рис. 3), може бути сконфігурований так, щоб мати поліпшену смугову характеристику за допомогою відповідного вибору резонаторів, сполучених пружинами і з'єднаннями, які зв'язують несуміжні резонатори. Отже, більш складні системи з багатьма з'єднаннями дають можливість синтезувати високоякісні смугові фільтри. Сигнали в формі струму або напруги, перетворені вхідним електромеханічним вимірювальним давачем в механічні коливання у фільтрі, проходять через послідовний фільтр і потім перетворюються зворотньо в електричні сигнали вихідним електромеханічним перетворювачем. Магнітострикційні, скінченні п'єзоелектричні

вимірювальні перетворювачі також використовуються в стандартних механічних фільтрах.

Динамічна маса m_{rc} , жорсткість k_{rc} , та затування c_{rc} в заданій точці с резонатора можуть бути описані, використовуючи закони збереження енергії і подані у вигляді таких рівнянь [25]:

$$m_{rc} = \frac{KE_{\max}}{(1/2)v_c^2}, \quad k_{rc} = \omega^2 m_{rc}, \quad c_{rc} = \frac{\omega_0 m_{rc}}{Q}, \quad (1)$$

де KE_{\max} – максимальне значення кінетичної енергії, отриманої системою; v_c – швидкість при резонансі в точці с резонатора; ω – частота резонансу.

Використовуючи вирази (1), основні параметри резонатора, а саме: ефективна динамічна маса та жорсткість запишуться так:

$$m_{rt} = m_{rc} (1 + \beta^3)^2, \quad k_{rt} = k_{rc} (1 + \beta^3)^2. \quad (2)$$

У свою чергу m_{rc} та k_{rc} можна переписати:

$$m_{rc} = M_s + \frac{M_t}{(1 + \beta^3)^2} + \frac{13}{35(1 + \beta^3)^2} M_{bi} + \left[\frac{1}{(1 + \beta^3)} + \frac{13}{35(1 + \beta^3)^2} \right] M_{bo} \quad (3)$$

та

$$k_{rc} = \omega^2 m_{rc} \quad (4)$$

Звідси

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{rs}}{m_{rs}}} = \left[\frac{4Eh(W / L_{bi})3}{(1 + \beta^3)m_{rs}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

де ω_0 – частота резонансу резонатора; E – модуль Юнга; h – товщина; M_s – статична маса затвору.

З (1) випливає, що взаємопов'язані динамічна маса та жорсткість можуть бути досягнені в областях, які знаходяться поблизу місць фіксації. Відповідно, щоби підвищити m_{rt} та k_{rt} , рама має бути розміщена якомога ближче до місця, яке жорстко закріплене. Очевидно, що m_{rt} та k_{rt} зменшуються зі зменшенням β . Рис. 4. відображає залежність жорсткості від коефіцієнта β .

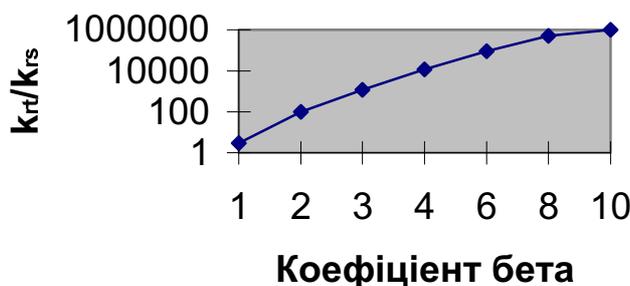


Рис. 4. Розподіл коефіцієнта жорсткості

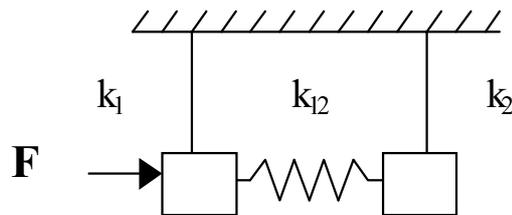


Рис. 3. Механічна модель резонатора

Електрична схема заміщення для цього пристрою може бути отримана, використовуючи принцип електромеханічних аналогій (таблиця). Насамперед треба ідентифікувати число входів і тип з'єднання входів, потім перевірити, чи забезпечує електрична схема кожного входу правильне моделювання його ефективного повного опору і його з'єднання з іншими входами. Ефективний повний опір для даного електричного входу мікромеханічного резонатора може бути змодельований паралельною комбінацією статичного конденсатора, що представляє зв'язок "електрод до резонатора"; ємність присутня, коли резонатор – нерухомий; і повна провідність, коли резонатор вібрує. Статичний конденсатор – це значною мірою ємність перекриття накладення, що може бути отримана через наближений аналіз, а для більш точного аналізу необхідно використовувати метод кінцевих елементів.

Показники відповідності електричних параметрів механічним

Механічна змінна	Електрична змінна
Загасання, c	Опір, R
Жорсткість, k	Ємність, C
Маса, m	Індуктивність, L
Сила, f	Напруга, V
Швидкість, v	Струм, I

Коли електричні та механічні параметри, які використовуються в механічних фільтрах, визначені, зазначимо можливість застосування електричних та механічних виходів до мікромеханічних резонаторів.

Отже, рухома повна провідність в даному електричному вході n визначається як:

$$Y_{xn}(j\omega) = \frac{I_{xn}(j\omega)}{V_n(j\omega)}. \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (1), отримаємо

$$Y_{xn} = -j\omega V_{pn} \frac{\partial C_n}{\partial x} \frac{X_s(j\omega)}{F_{dn}(j\omega)} \frac{F_{dn}(j\omega)}{V_n(j\omega)} \quad (7)$$

$$\frac{F_{dn}(j\omega)}{V_n(j\omega)} = -V_{pn} \frac{\partial C_n}{\partial x} \quad (8)$$

функція деформації дорівнює:

$$\frac{X_s(j\omega)}{F_{dn}(j\omega)} = \frac{k_{rs}^{-1}}{1 - (\omega / \omega_0)^2 + j(\omega / Q\omega_0)}, \quad (9)$$

де ω_0 – це частота резонансу; k_{rs} – жорсткість; Q – коефіцієнт добротності резонаторної системи.

Використовуючи (7), (8), (9), ми отримаємо вираз для рушійної сили на вході n

$$Y_{xn}(j\omega) = \frac{j\omega k_{rs}^{-1} V_{pn}^2 \left(\frac{\partial C_n}{\partial x} \right)^2}{1 - (\omega / \omega_0)^2 + j(\omega / Q\omega_0)}. \quad (10)$$

Вираз (10) визначає смугу пропускання, тому фільтр може бути змодельований за допомогою послідовних контурів LCR, величини елементів якого визначаються за поданими нижче формулами:

$$\begin{aligned}
 C_{xn} &= \frac{\eta_{en}^2}{k_{rs}} & R_m &= \frac{c_{rs}}{\eta_{en}^2} = \frac{\sqrt{k_{rs} m_{rs}}}{Q \eta_{en}^2} \\
 L_{xn} &= \frac{m_{rs}}{\eta_{en}^2} & \eta_{en} &= V_{Pn} \frac{\partial C_n}{\partial x}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Запропонована математична модель резонатора використовується при моделюванні мікроелектронних пристроїв в системі VHDL–AMS.

Тривимірні моделі технологічних процесів виготовлення МЕМП. Технології виготовлення мікроелектромеханічних пристроїв (МЕМП) розвиваються на основі науково-технологічного запасу мікроелектроніки у сфері групових прецензійних технологій виготовлення інтегральних схем [6, 7, 8, 9]. Разом з тим присутня певна специфіка для технології виготовлення сенсорних та актюаторних підсистем, яка полягає в наявності в інтегральній структурі об'єкта регулювання та яскраво виражена тривимірність конструкції нових інтегральних пристроїв, що потребує ряду абсолютно нових підходів до всіх складових циклу “проекування–виготовлення” МЕМП.

Зокрема, при проектуванні МЕМП виникають нові задачі, які пов'язані з необхідністю моделювання не тільки задач схемотехніки і логіки роботи пристрою, але й паралельного розв'язку сукупності задач з таких областей науки, як механіка твердого тіла, термонапруження в матеріалах, газо- та гідродинаміки та ін.

Незважаючи на те, що монокристалічний кремній є традиційним матеріалом мікроелектроніки і має низку унікальних властивостей, для виготовлення МЕМП необхідні інші матеріали з новими поєднаннями електро- та фізико-механічних властивостей.

Нові задачі слід вирішувати і при виготовленні МЕМП, оскільки технології виготовлення мікросистем пов'язані з найбільш характерними відмінностями між стандартними виробами мікроелектроніки і мікросистем: якщо перші по суті є двовимірні інтегральні пристрої і з точки зору механіки статичними, то мікросистеми – це реальні тривимірні структури, елементи яких дозволяють відносно механічне переміщення окремих складових МЕМП. Ці нові властивості потребують розвитку нових технологічних операцій, які мають забезпечувати тривимірне формоутворення.

Основними технологічними операціями, які використовуються при виготовленні МЕМП, є травлення, осадження, іонна імплантація, дифузія, епітаксія, окислення та інші [10, 11].

Тривимірні моделі дифузійних процесів базуються на рівнянні Фур'є [12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial N}{\partial z} \right) \pm \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(DN \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DN \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(DN \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right\} = \frac{\partial C}{\partial t},$$

де $\psi = \ln \left(\frac{n}{n_i} \right)$ – нормований електричний потенціал, N – концентрація електрично-активних домішкових центрів, C – загальна концентрація легуючої домішки, D – коефіцієнт дифузії.

Початкові та крайові умови визначаються, виходячи з особливостей кожної окремої дифузійної операції.

Для розв'язання тривимірних дифузійних задач необхідно використовувати числові методи, такі як метод скінченних різниць [13, 14] чи метод скінченних елементів [15], оскільки вони дозволяють врахувати нелінійність і нестационарність вище наведеного

дифузійного рівняння та цілу групу ефектів [6 – 10], які присутні в реальних тривимірних напівпровідникових структурах.

Особливості застосування числових методів до розв'язання тривимірних дифузійних задач наведено в роботах [16], а оцінка ефективності застосування методів скінченних різниць та методу скінченних елементів – в статті [17].

Сьогодні існує надзвичайно багато аналітичних моделей іонної імплантації, які дозволяють практично за частки секунди на ЕОМ розрахувати профілі легуючих домішок в тривимірних напівпровідникових структурах [18]. Разом з тим вони мають суттєві недоліки та обмеження при застосуванні. Зокрема аналітичні моделі, які базуються на використанні розподілу типу PEARSON та подвійно-спареної гауссіани, не дають інформації про рух іона в твердій мішені, дають великі похибки при малих дозах і енергіях та при моделюванні високоенергетичної іонної імплантації.

Вищезазначені недоліки відсутні у моделях імплантації, які базуються на методі Монте-Карло [19]. Дана модель враховує, що іон потрапляє в кристал у будь-який точці не маскованої області мішені під випадковим кутом. Після цього його шлях повністю визначається атомами решітки мішені. Іон взаємодіє як з ядрами, так і з електронами, які розміщені навколо ядер. Даний підхід дозволяє отримати профілі розподілу легуючої домішки та вакансій після проведення технологічної операції – імплантації.

Моделювання з використанням методу Монте-Карло потребує надзвичайно великих затрат часу центрального процесора ЕОМ, тому пропонується використовувати алгоритм [20], який передбачає рівність групи іонів до кожного окремо взятого випробування. Щоби похибка обчислень була меншою ніж похибка вхідних даних, мінімальна кількість випробувань має становити 450 – 500 разів.

Отже, тривимірна математична модель іонної імплантації з використанням методу Монте-Карло дозволяє підвищити точність моделювання вихідних параметрів, дослідити вплив атомів кристалічної чи аморфної решітки на профіль легуючої домішки, визначити дефектність поверхні напівпровідникової мішені та товщину стравленого шару мішені.

У процесі виготовлення МЕМП надзвичайно важливого значення набуває використання реактора для осадження при низькому тиску CVD (Chemical Vapor Deposition), а відповідна технологія має скорочену назву – LPCVD технологія. Вона гарантує виготовлення напівпровідникових шарів SiO₂ та Si₃N₄ з високою якістю і рівномірністю за товщиною плівок.

Модель осадження в реакторі при пониженому тиску передбачає розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса [21]. Для прикладу наведемо відповідну систему в стаціонарному вигляді, яка виражає в диференціальному вигляді закони збереження маси, імпульсу та енергії в декартових координатах має таку форму (для двовимірного варіанта) :

– рівняння неперервності:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 ;$$

– рівняння кількості руху:

$$\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} ;$$

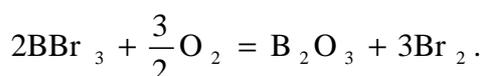
$$\rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} ;$$

– рівняння енергії :

$$C_p \left(\frac{\partial}{\partial x} (\rho u T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v T) \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

де ρ – густина газу (кг/м^3); u, v – складові швидкості (м/с); x, y – просторові координати (м); g – прискорення земного тяжіння (м/с^2); P – тиск (Па); η – динамічна в'язкість ($\text{Па}\cdot\text{с}$); C_p – питома теплоємність при постійному тиску ($\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$); T – температура (К); λ – теплопровідність ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$).

До наведеної системи диференціальних рівнянь слід додати моделі основних хімічних реакцій в області реактора та початкову і крайові умови, які визначаються конструкцією реактора. Так, модель росту плівки боросилікатного скла в реакторі згідно з формулою хімічної взаємодії реагентів газової суміші в проточному дифузійному горизонтальному реакторі виражається рівнянням



Для розрахунку швидкості осадження плівки G_{dep} з врахуванням хімічної взаємодії в газовій фазі пропонується такий аналітичний вираз

$$G_{\text{dep}}(x, y) = AK_s \left/ \left[\frac{1}{\sqrt{C_1(0)C_2(0)}} + \frac{xK_s}{u} \sqrt{a_1 a_2} \frac{R + (R_d^2/d)}{R^2 - R_d^2} + \frac{K_s}{d} \sqrt{\frac{a_1 a_2}{D_1 D_2}} (R_d^2 - y^2) \right] \right.,$$

де $C_1(0), C_2(0)$ – концентрації вихідних реагентів 1 (BBr_3) та 2 (O_2) в реакційній суміші на вході в зону осадження; K_s – константа швидкості реакції; R, R_d – внутрішній радіус реактора і радіус напівпровідникової пластини; a_1, a_2 – стехіометричні коефіцієнти в рівнянні хімічної реакції для реагентів 1 та 2; D_1, D_2 – коефіцієнти дифузії реагентів 1 та 2 в газовій фазі; d – відстань між напівпровідниковими пластинами; u – середня швидкість газового потоку в реакційній зоні між стінкою реактора та краями пластин; $A = \gamma M/\rho$; γ – безрозмірний коефіцієнт, більший за одиницю, який враховує можливість проходження паралельних реакцій на поверхні кремнієвої пластини; M та ρ – грам-молекулярна вага та густина плівкоутворюючої речовини; x – текуча координата вздовж осі дифузійного реактора; y – відстань від центра напівпровідникової пластини до краю.

Для отримання розв'язку поставленої задачі (швидкості росту плівки) слід використовувати числові методи [22].

Особливе значення при виготовленні МЕМП займає травлення [23, 24]. Для прикладу, при виготовленні МЕМП за MUMPs технологією досить широко використовується іонне травлення (ІТ). Для моделювання процесу ІТ багаточислової тривимірної структури досить зручно використовувати модель, яка базується на використанні методу Монте-Карло [19].

Основна ідея цієї моделі базується на обчисленні коефіцієнта розпилення мішені іонами:

$$S_{\text{розпил}} = \frac{K_{\text{іон}} \cdot \text{вибитих}}{\text{Сум} \cdot \text{кільк} \cdot \text{іонів} \cdot \text{променя}}.$$

Відповідно глибина травлення мішені визначається виразом:

$$H_{\text{трав}} = \text{time} \cdot V_{\text{трав}}(S_{\text{розпил}}).$$

Слід зауважити, що застосування методу Монте-Карло потребує значних затрат ресурсу ЕОМ, але цей недолік компенсується рядом переваг, а саме: висока точність вихід-

них результатів, можливість моделювання травлення для складних багат шарових структур та моделювання травлення багатокомпонентних матеріалів.

Структура наскрізної системи проектування МЕМП. При проектуванні МЕМП розробник стикається з проблемою необхідності автоматизації процесу проектування [27, 28] та перевірки адекватності запропонованих ним моделей, конструкції, матеріалів та ін. Тобто задача полягає в необхідності використання спеціальних програмних продуктів чи системи, які б дозволили ефективно, швидко та якісно виконувати процес проектування, розробки і моделювання МЕМП.

Запропонована система наскрізного проектування наведена на рис. 5. Вона містить дві програми CFD ACE+ та VHDL-AMS.

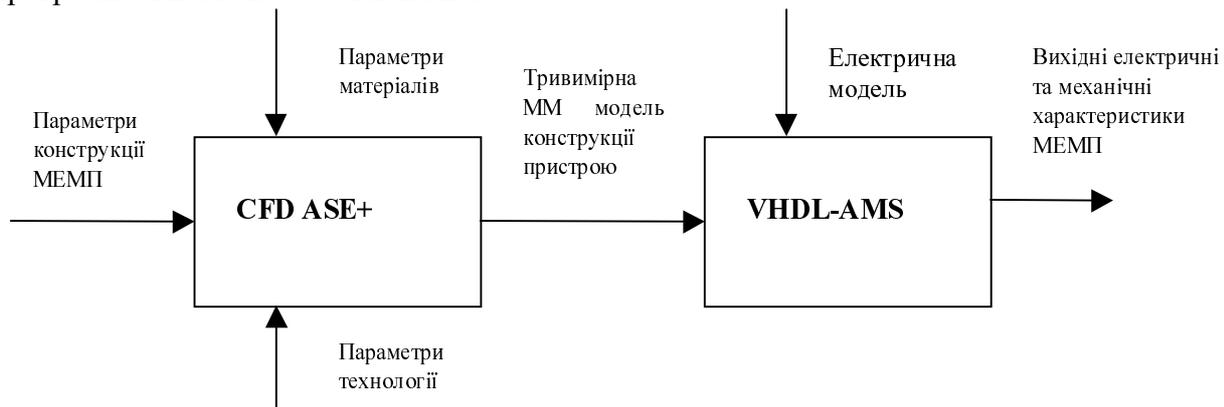


Рис. 5. Структура наскрізної системи для проектування МЕМП

За допомогою програми CFD ACE+ компанії CFDRC ми можемо спроектувати будь-яку геометрію структури вхідного чи виконуючого блоку МЕМП, побудувати його тривимірну модель, накласти граничні та крайові умови, провести числове моделювання та візуалізувати результати моделювання. Запропонований програмний продукт дозволяє на основі параметрів конструкції, технології його виготовлення і матеріалів побудувати тривимірну математичну модель конструкції МЕМП.

Наступний крок проектування МЕМП – це дослідження та оптимізація електричних характеристик пристрою. Для цього використовуємо пакет VHDL-AMS, який за допомогою мови VHDL дозволяє описати запропоновану тривимірну модель конструкції пристрою (результати попереднього моделювання в CFD ACE+) та електричної моделі, розрахувати вихідні електричні та механічні характеристики структури МЕМП.

Висновок. Розроблено структуру наскрізної системи для проектування МЕМП, що дозволяє значно прискорити процес проектування мікроелектромеханічних пристроїв та зменшити їх вартість.

1. <http://www.elvisti.com/2002/04/23/comp.shtml>.
2. <http://www.pcmag.ru>.
3. <http://www.tanner.com>.
4. <http://www.memcap.com>.
5. <http://www.cadence.com>.
6. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
7. Антонетти П., Антониадиса Д., Даттона Р., Оулдхем У. МОП – СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.
8. Бубенников А.Н., Садовников А.Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
9. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы. Материалы приборы изготовления. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 501 с.
10. Технология СБИС. В 2-х Кн. 1: Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
11. Технология СБИС. В 2-х Кн. 2: Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 456 с.

12. Теслюк В.М. Тривимірне моделювання дифузійних процесів виробництва ВІС // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1998. – № 327. 13. Тихонов А.Я., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с. 14. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973. – 400 с. 15. Норри Д., Ж де Фриз. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 303 с. 16. Теслюк В.М. Алгоритми для чисельного моделювання 3D дифузійних задач // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1998. – № 352. – С. 109–112. 17. Теслюк В.М., Гранат П.П., Корбецький О.Р. Дослідження точності та ефективності розв'язку дифузійних задач методами скінченних різниць та скінченних елементів // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2000. – № 398. – С. 42 – 49 с. 18. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. Дефекти структури в ионноимплантированном кремнии. – Мн.: Университетское, 1990. – 322 с. 19. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 80 с. 20. Теслюк В.М., Корбецький О.Р. Моделювання профілів розподілу домішкових іонів, вакансій та міжвузлових атомів у напівпровідниковому матеріалі при іонному легуванні // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя, 2001/ 1(5). – С. 22–27. 21. Патакар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с. 22. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 223 с. 23. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 267 с. 24. Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 492 с.

УДК 621.757:51.001.57

Францішек Марецкі

Вища школа інформатики та управління
(м. Бельско-Бяла, Польща)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МОНТАЖНОЇ ЛІНІЇ

© Марецкі Францішек, 2003

Запропоновано математичну модель монтажної лінії з промисловими роботами, які протягом кожного такту виконують задані їм операції. Модель дозволяє описати стан процесу монтажу та керування процесом монтажу, а також провести симуляцію цього процесу для різних керувань.

The mathematical model of the mounting line with industrial robots, which are performing the operations given to them during every cycle, has been proposed in this paper. The model allows to describe the state of the mounting process and control of this process, as well as to carry out the simulation of the mounting process for different monitoring.

1. Вступ

Технологічні процеси класифікують на неперервні та дискретні [1]. Дискретними є комплекси операцій, які виконують промислові роботи [7]. Оптимізація комплексів операцій є складною комбінаторною проблемою [2, 4]. Прикладами таких процесів є монтаж [6] та транспорт [5].

Керування дискретними технологічними процесами вимагає розроблення відповідних математичних моделей. У роботах [2, 5, 6] показано, що такі моделі мають вигляд логічно-