

1. Гарсія-Діас А., Філіпс Д. Методи аналізу мереж. -М.: Мир, 1984.
2. С.С. Гайсарян. Объектно-ориентированные технологии проектирования прикладных программных систем. //Центр информационных технологий. <http://www.citforum.ru>
3. Бузов С.В., Бузова О.Я. Моделирование событий в процессе проектирования распределенных систем// Вісник ДУ "Львівська політехніка", N 330, 1998.

УДК 621.382.002

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАРШРУТІВ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ КРИСТАЛА ІС

© Петро Гранат, Андрій Назар, Василь Теслюк

НУ "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12

Запропоновано опис та алгоритми розв'язання задачі структурно-параметричного синтезу технологічного маршруту формування структури кристала ІС.

Offered description and settlement algorithms of task of synthesis of technological structure forming itinerary to crystal.

Проектування складних виробів пов'язано з розв'язанням задач структурного синтезу четвертого рівнів складностей [1]. Згідно з проведеною декомпозицією задачі синтезу проектування, проблему автоматизації пропонується формалізувати в такій послідовності: генерація варіантів структурних рішень, визначення параметрів варіантів структур ТП на основі комбінованих логіко-алгебраїчних моделей, оцінки та вибору найкращого проектного рішення.

Розглянемо засоби побудови множини варіантів структур технологічних процесів (ТП). Першим етапом синтезу структури є його представлення у вигляді графа, що описує топологію структури - структурні особливості побудови системи, які можна виявити, розглядаючи процес синтезу як сукупність конструкторсько-технологічних перетворень (КТП):

$$\begin{cases} P = P(m_1, \dots, m_j, \dots, m_J) \\ m = m(t_1, \dots, t_k, \dots, t_K) \\ t = t(w_1, \dots, w_l, \dots, w_L) \end{cases} \quad (1)$$

де $P = \{p_i\}, i = \overline{1, I}$ – множина елементів; $M = \{m_j\}, j = \overline{1, J}$ – множина методів технології; $T = \{t_k\}, k = \overline{1, K}$ – множина ТО; $W = \{w_l\}, l = \overline{1, L}$ – множина переходів.

Тоді множина КТП представляється у вигляді графа з вершинами, які відображають методи формування структури, множини груп ТО, допустимі послідовності використання ТО, переходів і множин конструкцій елементів схеми на їх базі, та ребрами, які відображають відношення елементів.

Функція КТП параметра p виражається як композиція відношень [2]:

$$F : R_{pm}(p_i) \circ R_{mt} \circ R_{tw}, \quad (2)$$

де R_{pm}, R_{mt}, R_{tw} – бінарні відношення між елементами множин P і M , M і T , T і W відповідно. При цьому $R_{pm} \in (P \times M)$, $R_{mt} \in (M \times T)$, $R_{tw} \in (T \times W)$, $p_i \in P$.

Бінарне відношення R_{pm} між множинами P і M означає – бути методом виготовлення структури виробу, бінарне відношення R_{mt} між множинами M і T – бути ТО деякого методу технології, бінарне відношення R_{tw} між множинами T і W – бути переходом ТО.

Оскільки кожний критичний елемент схеми може бути реалізований декількома методами технології, то підмножина $M_p \subseteq M$, з яким P_i знаходиться у відношенні R_{pm} , є зрізом через елемент P_i :

$$R_{pm}(p_i) = \forall m_j \exists p_i \mid p_i \in P \cap (p_i, m_j) \in R_{pm} \mid m_j \in M_p, \quad (3)$$

де пара (p_i, m_j) – елементи бінарного відношення R_{pm} .

Підмножина ТО реалізації елемента P являє собою множину впорядкованих пар (p, t) , що для них існує елемент множини M , з яким P знаходиться у відношенні R_{pt} , а сам він вступає у відношення R_{pt} з елементом множини T . Ця підмножина визначається композиціями $R_{pt} = R_{pm} \circ R_{mt}$. Тоді цей вираз можна розглядати як функцію реалізації i -го елемента при виконанні ТО. У випадку, якщо $w_l, l = \overline{1, L}$ не є термінальним переходом, то опис може бути продовжений і мати N ієрархічних рівнів. При цьому n -й рівень опису ($n = \overline{1, N}$) представляється аналогічно, а міжрівневе зв'язки визначаються операцією конкатенації.

Кількість варіантів реалізації деякого елемента схеми визначається методами комбінаторики, однак з врахуванням технологічної несумісності методів і ТО та відповідних обмежень кількість варіантів реалізації значно зменшується. Відношення несумісності між методами технології R_{nm} і ТО представляються як підмножини $[M \times M]$ і $[T \times T]$ декартового добутку

$$R_{nm} = M \times M \text{ і } R_{tt} = T \times T, \text{ при } R_{m_n} t_{j_1} \neq R_{m_n} t_{j_2}, \quad (4)$$

Це дозволяє модифікувати (2) з врахуванням відношень несумісності:

$$R_{pt} = (R_{pm} \cap R_{nm}) \circ (R_{mt} \cap R_{tt}), \quad (5)$$

Викладений метод представлення КТП має мінімальну надлишковість опису

формування повної множини варіантів перетворень.

Специфіка виробництва полягає в необхідності реалізації елементів схеми на базі базової структури кристала, що потребує адекватного відображення в процедурі проектування. Такі обмеження вимагають розв'язання задачі синтезу раціонального ТП для множини критичних елементів схеми [1]. На основі наведеної моделі технології виробництва МЕП створено процедуру генерації варіантів структур ТП за такою схемою:

1. Задати множину критичних елементів виробу $P = \{p_i\}, i = \overline{1, I}$.
2. Для p_1 визначити відображення зрізу композиції бінарних відношень R_{p_1} і підмножини елементів $W_{p_1} \subseteq W$. Отримуємо:

$$s_{p_1}^1 = \{(p_1, m_j, t_k, w_l), \dots, (p_1, m_j, t_k, w_l)\}, \quad (6)$$

зафіксуємо четвірки, в яких W_1 - термінальний.

3. Утворити конкатенацію множини s на себе.

3.1. Для отримання впорядкованих вісімок: $s_{p_1}^{*2} = s_{p_1}^1 * s_{p_1}^2$, зафіксувати ребра довжиною 2, які мають термінальні переходи.

3.2. Повторити п.3.1 для $n = \overline{3, N}$, зафіксувати ребра довжини n , утворити підмножину $s = \{s_{p_1}^{*n}\}, n = \overline{2, N}$, в результаті отримаємо перерахування всіх добуток ребер графа від 2-ї до N -ї довжини без пропусків і повторень.

4. Якщо $i = I$, перейти до п.2, в іншому випадку - для p_i до п.5.

5. Записати набори впорядкованих $n - k$: $s_{p_i}, n = \overline{1, N}, i = \overline{1, I}$, які утворюють під-

множини s_{p_i} , сформувати множини: $S_p = \bigcup_{n=1}^N S_{p_i}^{*n}$. Множини наборів S_p , є пере-

рахуваннями шляхів в графі і характеризують способи фізичної реалізації $p_i \in P$ елемента схеми. Множина $S_p \in S$ є повною, охоплюючи як відомі, так і концептуально можливі альтернативні варіанти технологічних перетворень.

6. Отримати переріз підмножин:

$$S_D = \bigcap_{S_{p_i} \in S_p} S_{p_i} = \langle S_{p_1}, \dots, S_{p_i}, \dots, S_{p_I} \rangle, \quad (7)$$

Кожний набір виду $\langle S_{p_1}, \dots, S_{p_i}, \dots, S_{p_I} \rangle$ являє собою один можливий варіант ТП.

7. Побудувати граф $G^D(V, \Gamma)$ ТП як об'єднання графів $\langle S_{p_1}, \dots, S_{p_i}, \dots, S_{p_I} \rangle$. В ньому

вершинами є об'єднання вершин вихідних графів $V = \bigcup_{i=1}^I v_i, v_i \in \{t_k, w_l\}$, а відображення для кожної вершини графа отримують об'єднанням відображень цієї вершини для вихідних графів:

$$\forall v_i \in V [\Gamma v_i = \Gamma_n v_i \cup \Gamma_{n+1} v_i], n = \overline{1, N}. \quad (8)$$

8. Побудувати графи для наступних варіантів ТП, виконавши п.7.

У результаті виконання п.п. 1-8 отримуємо множину згенерованих варіантів структур ТП та методів їх реалізації, представлених графами. Кожний граф відображає послідовність технологічних шарів, групових операцій, найменувань ТО і переходів, призначених для реалізації варіанта структури кристала для всього виробу загалом. У разі необхідності згенерована множина варіантів може бути значно скорочена за допомогою попереднього вибору раціональних варіантів за відповідними критеріями. Таке формулювання задачі потребує локалізації множини критеріїв та цільових функцій на різних рівнях декомпозиції опису структури і методів її формування та відображення результатів оцінки в структурі графа.

Визначення раціонального варіанта структури ТП, який задовольняє комплексний критерій оптимальності, пов'язано з розв'язанням задачі транзитивного замикання відношення на множині V . Відношення однозначно представляє орієнтований граф $G^* = (V, E)$, $G^* \subseteq G_D$, в якому кожній дузі ставимо у відповідність вагу $C_{ij}\{C^u\}$, а транзитивне замикання визначається $(v_p, v_l) \in E \Leftrightarrow G_{pw} \angle \alpha$. Цю задачу розв'язують з використанням адаптованих алгоритмів пошуку шляху на графі на базі методу гілок і границь, який володіє відповідною комплексною оцінкою [2].

Далі потрібно розв'язати задачу визначення параметрів варіантів ТП і вибору найбільш придатних. Для визначення параметрів згенерованих варіантів ТП пропонується використати логіко-аналітичні моделі ТП (1), які дозволяють представити параметри ТО через вихідні параметри виробу. Наведений підхід до побудови моделей визначення характеристик ТП може бути реалізований тільки в тому випадку, якщо зв'язок між параметрами ТО і вихідними параметрами виробу розглядається не безпосередньо, а через структуру виробу, яка формується в результаті проведення ТО. У зв'язку з тим пропонується така схема визначення параметрів ТО:

1. Визначення параметрів легованих областей (ЛО) структури кристала

$Y_l^{S_j}(y_1, \dots, y_k), j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}$ (профілю розподілу домішок, поверхневої концентрації, глибини залягання p - n переходу, питомого та поверхневого опорів) як функції від електричних параметрів елемента:

$$y_k = F_{\text{анал}}(Z, S_j) \cup F_{\text{лог}}(Z, S_j), \quad (9)$$

де $F_{\text{анал}}$ - аналітичні моделі визначення конструктивних параметрів ЛО як функції від структури виробу S_j та вектора електричних параметрів схеми Z ; $F_{\text{лог}}$ - апіорні значення, отримані на базі досвіду розробки таких виробів.

2. Вибір ЛО $Y_l^{S_j}$, яка знаходиться найближче до робочої поверхні ІС.

3. Визначення параметрів ТО для вибраної ЛО:

3.1. Задання параметрів $X_{\text{Add}}^{Y_l^{S_j}} \{X_{\text{Im}}, X_{\text{time}}, X_{\text{Temp}}, X_1, \dots, X_N\}$ ТО впровадження домішки чи формування ЛО (дифузія - загонка, іонна імплантація, епітаксія).

3.2. Задання параметрів $X_{\text{Cor}}^{Y_l^{S_j}} \{X_{\text{Im}}, X_{\text{time}}, X_{\text{Temp}}, X_1, \dots, X_N\}$ ТО, необхідних для усунення дефектів, спричинених введенням домішки.

3.3. Задання допустимих параметрів $X_{Pro}^{Y_j^{Sj}} \{X_{Im}, X_{time}, X_{Temp}, X_1, \dots, X_N\}$ ТО пасивації ЛО (окислення, нарощування нітридних плівок) з метою захисту їх при введенні домішки для формування наступного шару.

3.4. Прогнозування конструктивних параметрів напівпровідникової структури - профілю розподілу домішок з врахуванням високотемпературних операцій для ЛО, які знаходяться між вибраним шаром і робочою поверхнею:

$$\widehat{Y}_l^{Sj} = F_{Simulation} \left(X_{Add}^{Y_l^{Sj}}, X_{Cor}^{Y_l^{Sj}}, X_{Pro}^{Y_l^{Sj}} \right) + F_{Simulation}^{Re distribution} \left(\widehat{Y}_l^{Sj}, X_{Add}^{Y_m^{Sj}}, X_{Cor}^{Y_m^{Sj}}, X_{Pro}^{Y_m^{Sj}}, \widehat{X}_{Cor}^{Y_m^{Sj}} \right), \quad (10)$$

де $F_{Simulation}$ - процедура аналізу параметрів Y_l^{Sj} за характеристиками ТП:

$X_{Add}^{Y_l^{Sj}}, X_{Cor}^{Y_l^{Sj}}, X_{Pro}^{Y_l^{Sj}}$; $F_{Simulation}^{Re distribution}$ - процедура аналізу перерозподілу домішок.

3.5. Визначення, якщо необхідно, параметрів додаткових ТО для досягнення заданих конструктивних параметрів для ЛО:

$$\left(Y_l^{Sj} - \widehat{Y}_l^{Sj} \right) > 0 \rightarrow \exists \widehat{X}_{Cor}^{Y_l^{Sj}} : \check{Y}_l^{Sj} \approx Y_l^{Sj}, \check{Y}_l^{Sj} = F_{Simulation}^{Re distribution} \left(\widehat{Y}_l^{Sj}, \widehat{X}_{Cor}^{Y_l^{Sj}} \right), \quad (11)$$

4. Перехід на п.3 при існуванні ЛО, для яких не визначені параметри ТО.

Запропонована схема синтезу характеристик ТП дозволяє достатньо точно задати необхідні параметри з урахуванням специфіки виготовлення та структури виробу, що дозволяє підвищити достовірність отримання очікуваних фізико-технологічних характеристик структури за скінченну кількість кроків та істотно зменшити загальну кількість ітерацій оптимізації.

Враховуючи наявність неможливості альтернатив на множині допустимих варіантів рішень, розроблена така схема ПР:

1. Синтез структури допустимих ТП $S_j, j = \overline{1, J}$, які підлягають оцінці та вибору за критеріями оптимальності.

2. Вибір підмножини критеріїв оцінки $U^k(X), k = \overline{1, K}$.

3. Вибір структури переваг: виду цільової функції $F(\{U^k(X)\})$, обмежень на значення критеріїв $U_{min}^k \leq U^k(X) \leq U_{max}^k$, де U_{min}^k, U_{max}^k - граничні значення.

4. Вибір технологічних параметрів для структури S_j і визначення границь змін технологічних параметрів X^i , які мають вигляд $X_{min}^i \leq X^i \leq X_{max}^i, i = \overline{1, I}$.

5. Генерація варіантів альтернатив шляхом встановлення залежностей критеріїв від технологічних параметрів $U^k(X) = f_k(X^i), k = \overline{1, K}, i = \overline{1, I}$.

6. Формування допустимої множини варіантів альтернатив параметрів структури $S_j, j = \overline{1, J}$ відповідно до з п.5. Отримуємо $S^o \subseteq S$, де S і S^o - множини можливих та допустимих альтернатив відповідно.

7. Визначення множини допустимих варіантів структур S_j , непокрощуваних, тобто $S^II \subseteq S^o$, де S^II - множина непокрощуваних варіантів.

8. Якщо S^{η} невелика, то перехід, в іншому випадку, до п.9.
9. Вибір на основі рекомендацій, закладених в базі знань, наступної стратегії ПР на основі лексикографічного методу.
10. Визначення підмножини домінуючих альтернатив $S^{\eta} \subseteq S^{\eta}$ з вибраним відношенням домінування на множині S^{η} .

Гнучкість, відсутність принципової складності в реалізації та прозорість запропонованого підходу до фактичної алгоритмізації процесу побудови структури об'єкта, синтезу множини його допустимих параметрів та вибору раціонального варіанта, дозволяє з успіхом використати універсальність представленого апарату для організації процесу одно- та багатоваріантного аналізу чи оптимізації за умови відповідної їх адаптації.

1. Бубеников А.Н., Садовников А.Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. -М.: Радио и связь, 1991. - 288с.
2. Фролов В.Н. Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭА. М.: Радио и связь, 1991. - 200 с.

УДК 681.325

СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩ З ОБ'ЄМНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ

© Наталія Павич

НУ "Львівська політехніка", м. Львів, вул. С.Бандери, 12.

Запропоновано структурну схему системи для дослідження процесів ультразвукового контролю пружних середовищ з об'ємними неоднорідностями. Використана концепція "відкритої системи", що ґрунтується на компонентах високого ступеня готовності з орієнтацією на розширення паралелізму в роботі комп'ютерних засобів.

System block scheme for ultrasonic control processes investigation of elastic medium with volume inhomogenities is offered. "Open system" conception to highly readiness components with orientation on extended parallelism in computer equipment operation is used.