

УДК 621.315.592

С.П. Новосядлий
Технологічний САПР ВІС на основі тестових структур

*Прикарпатський університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна*

Розроблено концепцію технологічного САПР на основі тестового контролю в субмікронній технології формування структур ВІС. В його основу покладена мінімізація багатофакторної цільової функції дефектності функціональних шарів.

Ключові слова: тестова структура, параметрична оптимізація, електрофізичні властивості, дефекти функціонального шару.

Стаття поступила до редакції 15.12.2002; прийнята до друку 12.03.2002.

Незважаючи на значні успіхи в області удосконалення розробки нових технологічних процесів, які дозволяють перейти в субмікронний діапазон топологічних розмірів структур ВІС (менше 1 мкм) неадекватне розуміння ролі технологічних факторів при формуванні електрофізичних параметрів елементів структур не забезпечує об'єктивного технологічного контролю при формуванні їх функціональних шарів [1]. Більш того, із зменшенням розмірів топологічних елементів, ростом ступені інтеграції і збільшенням площі кристалу технологічний контроль сильно ускладнюється і вже не може забезпечити реалізацію його в процесі виконання самого технологічного процесу.

Використання тестових структур (ТС) для організації автоматизованого параметричного тестового контролю (АПТК) разом із застосуванням методів статистичної обробки дозволяє організувати технологічний контроль в реальному масштабі часу і встановити залежність виходу придатних та надійності структур в залежності від цільової функції дефектності функціональних шарів шляхом побудови математичних моделей взаємозв'язку параметрів ТС з оптимальними режимами формування функ-

ціональних шарів структур ВІС.

Внаслідок того, що сучасний маршрут формування структур ВІС містить більше 250 технологічних операцій і вже є складною динамічною системою, то проблема організації надійного тестового контролю стає багатофакторною задачею [2]. Саме АПТК може встановити і забезпечити взаємозв'язок між елементами системної технології формування структур ВІС. При цьому, вихід придатних структур і їх надійність вже є інтегрованими параметрами густини дефектності функціональних шарів.

Саме перехід в субмікронний топологічний діапазон структур ВІС вимагає розроблення методології системного аналізу для управління технологічним процесом формування структур ВІС з метою забезпечення високого виходу придатних (> 85 %) та їх надійності (< 20-30 ppm) шляхом мінімізації багатофакторної цільової функції дефектності функціональних шарів. Тому тестовий контроль виконують на всіх етапах створення структур ВІС, від проектування до їх виготовлення. У відповідності до цього можна виділити основні задачі, які вирішуються з допомогою тестового контролю [1,3], а саме:

1. На етапі топологічного проектування обґрунтовуються проектні норми конструкторсько-технологічних обмежень (КТО) на розміри елементів, зазори між елементами, точність літографічного суміщення, розміщення і орієнтацію елементів один відносно одного, встановлюється роздільна здатність проекційної літографії на основі тестових структур. На етапі схемотехнічного моделювання і верифікації вже необхідно мати чіткі математичні моделі приладних структур і технологічних процесів формування функціональних шарів, які також визначаються на основі тестових структур.

Дані, отримані в результаті контролю електрофізичних параметрів ТС на етапі проектування топології структури ВІС дозволяють чітко визначити проектні норми КТО, вибрати оптимальний маршрут формування структур з мінімальною дефектністю функціональних шарів, оцінити внесиму дефектність та визначити ефективність гетерування домішок і дефектів у процесі формування структур ВІС [4]. Цей етап зв'язує топологічне і технологічне моделювання та формує протокол проектних норм КТО.

2. На етапі проектування технологічного маршруту формування структур ВІС використовують такі ТС, які дозволяють вимірювати електрофізичні параметри функціональних шарів, встановити зв'язки між елементами системної технології, замінити високотемпературні (дефектні) процеси на низькотемпературні (мало дефектні), оцінити ефективність гетерних обробок та за допомогою електрофізичного діагностування оцінити надійність структур ВІС. На цьому етапі необхідний набір статистичних даних по взаємозв'язку електрофізичних параметрів ТС, розподілу густини дефектності функціональних шарів для прогнозування виходу придатних по встановленим їх межах. Даний етап закінчується формуванням протоколу для норм параметрів ТС і розробкою конструкторсько-технологічних варіантів розміщення їх на кремнієвій пластині [4,5].

3. На етапах статистичного контролю і аналізу технологічного процесу формуван-

ня структур ВІС встановлюють границі для налаштування і точності технологічних процесів, розподілу густини дефектності функціональних шарів і цільової функції дефектності, яка інтегровано визначає вихід придатних, встановлюються критерії надійності, виходячи з термодіагностичних характеристик вибраних тестових структур. Даний етап закінчується вибором автоматичного тестера і розробки програми, за допомогою яких буде здійснюватись обробка та накопичення інформації тестового контролю.

В умовах автоматизованого статистичного контролю і аналізу системної технології формування структур ВІС в реальному масштабі часу найбільш доцільним варіантом є розміщення ТС на скрайберних доріжках або у виді конверта на кремнієвій пластині. В цьому випадку зберігається кореляція між параметрами ТЕ і структурою ВІС; появляється можливість оцінки розподілу параметрів ТС в межах пластини і партії; уточнюється тестова послідовність функціонування структур ВІС.

І на завершення технологічного циклу тестові структури служать для оцінки надійності окремих елементів ВІС, які корелюють з випробуваннями на безвідмовність та довговічність. На даному етапі уточнюються технологічні відбракувальні випробування та програми вимірювання електричних параметрів структур ВІС [5].

Таким чином, за допомогою тестового контролю здійснюється взаємозв'язок між елементами системної технології з метою мінімізації цільової функції дефектності для отримання максимального виходу придатних та високої надійності структур ВІС.

Тестові структури, які використовуються в тестовому технологічному контролі можна класифікувати за наступними характеристиками:

Параметричні ТС призначені для дослідження електрофізичних параметрів елементів структур ВІС: геометричних розмірів, питомих об'ємного і поверхневого опорів; часу життя і рухливості носіїв заряду; термодіагностичної стабільності міжфазої границі розділу; електричної міцності діелектриків; якості суміщення; контак-

тного опору; порогової напруги і електричної стабільності затворної системи.

Функціональні ТС призначені для дослідження функціональних властивостей компонентів ВІС для контролю працездатності ВІС після закінчення технологічного циклу їх формування. Конструктивно вони виконуються у виді конденсаторів, резисторів, діодів, транзисторів, кільцевих генераторів, різних логічних елементів і дозволяють контролювати параметри функціональних шарів: рухливість та час життя носіїв заряду в заданих областях; генераційно-рекомбінаційні процеси по m -фактору; концентраційні профілі розподілу домішок після дифузійних чи імплатаційних процесів; динамічні характеристики приладних структур, тощо.

З точки зору виконання функцій тестового контролю в склад тестового модуля можуть бути використані шість типів ТС: для визначення параметрів компонентів елементної бази структур ВІС; перевірки проектних норм КТО; аналізу технологічних параметрів процесу для його моделювання; аналізу структурних дефектів функціональних шарів; оцінки електричних параметрів структур ВІС по їх дисперсії, мінімальному, середньому, максимальному значеннях; оцінки прогнозованої надійності структур ВІС [5].

Висока ефективність системної технології формування структур ВІС досягається як за рахунок оптимальності структури, так і оптимальності технологічного процесу. А критерієм оптимальності в цьому випадку виступає багатofакторна цільова функція дефектності, на основі якої проводиться статистичний аналіз виходу придатних і надійності.

Звичайно, причини зниження виходу придатних структур ВІС поділяються на три категорії: технологічні фактори, фактори проектування, та дефектність функціональних шарів. Технологічні фактори визначають роздільну здатність на формування мінімального розміру топологічного елементу. Фактори проектування включають в себе проектні норми КТО, що визначаються технологічними допусками вибраної технології формування структур.

Перші дві категорії можуть бути мінімізовані оптимальним вибором маршруту проектування топології ВІС [4], який включає себе моделювання і верифікацію електричної схеми, екстракцію і верифікацію топології та контроль проектних норм КТО. Тому визначальним фактором виходу придатних і надійності залишається дефектність їх функціональних шарів. А мінімізація цільової функції дефектності з використанням тестового контролю стає основною задачею оптимізації. Ця задача і вирішується технологічним САПР, в основі якого лежить набір тестових структур і встановлених для них норм електрофізичних параметрів [1,5].

Вихід придатних структур ВІС, отриманих на кремнієвій пластині з неоднорідним розподілом дефектів D визначається співвідношенням:

$$Y = \int_0^{\infty} e^{-DA} f(D) dD, \quad (1)$$

де $f(D)$ – функція густини розподілу дефектності (цільова функція), A – площа структури, $D_0 = n/NA$ – густина дефектності, N – кількість придатних структур.

В залежності від того, яким законом визначається густина розподілу цільової функції дефектності $f(D)$ для чотирьох різних розподілів вихід придатних структур буде визначатись виразами:

для дельта-функції $f(D)=\delta(D-D_0)$:

$$Y_1 = e^{-D_0A}, \quad (2)$$

для трикутного розподілу:

$$Y_2 = \left[\frac{1 - e^{-D_0A}}{D_0A} \right]^2, \quad (3)$$

для прямокутного розподілу:

$$Y_3 = \frac{1 - e^{-2D_0A}}{2D_0A}, \quad (4)$$

для гамма-розподілу:

$$Y_4 = \frac{1}{(1 + SAD_0)^{1/S}}, \quad (5)$$

де $S = \text{var}(D)/D_0^2 = 1/\alpha$, $D_0 = \alpha\beta$, дисперсія D визначається як $\text{var}(D) = \alpha\beta^2$.

Гамма-функція виходу придатних в залежності від коефіцієнту форми S дуже тісно описує дефектність конкретних функціональних шарів в залежності від площі

структури кристалу ВІС та густини дефектності.

Використовуючи гамма-функцію виходу придатних для кожного функціонального шару (по видам дефектів) у вигляді

$$Y_n = \frac{1}{(1+S_n A_n D_{no})^{1/S_n}} \quad (6)$$

отримаємо такий вираз для виходу придатних структур через дефектність функціональних шарів:

$$Y = \prod_{n=1}^N Y_n = \prod_{n=1}^N (1+S_n A_n D_{no})^{-1/S_n}, \quad (7)$$

Враховуючи те, що для високоефективної технології $S_n A_n D_{no} \ll 1$, то

$$\ln Y = \sum_{n=1}^N -A_n D_{no}, \quad (8)$$

або через густину дефектів функціональних шарів:

$$Y = \exp \left[- \sum_{n=1}^N A_n D_{no} \right] = \exp \left(-A \bar{D} \right), \quad (9)$$

де $\bar{D} = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N A_n D_{no}$ – густина дефектності функціонального шару.

Тобто, для високоефективної системної технології ($Y = 0,85$) вихід придатних структур визначається експоненційно незалежними від форми дефектностями функціональних шарів. А густина дефектів кожного функціонального шару визначається типом схеми і його топологічною площею. Тобто, ми переходимо до декомпозиції багатofакторної цільової функції дефектності, а саме, до задачі оптимізації дефектності функціональних шарів структур ВІС, або до оптимізації технологічних процесів їх формування з метою мінімізації дефектності.

Відомо, що оптимізація технологічних процесів (ТП) реалізується у двох її видах: структурній і параметричній [6]. При структурній оптимізації для досягнення екстремальних значень цільової функції сам апарат оптимізації застосовують до самої структури ТП, тобто, змінюють методи (способи) їх виконання, послідовність переходів, склад і тип технологічного обладнання. Очевидно, що задачі структурної оптимізації виникають тільки на етапі про-

ектування чи модернізації ТП.

Частіше оптимізацію проводять вже при заданій (вибраній) структурі ТП, коли для досягнення екстремального (мінімального) значення цільової функції дефектності можна змінювати тільки його фізико-технологічні параметри. Тому таку оптимізацію ТП називають параметричною. Її можна подати у виді “чорного ящика” з набором вхідних та вихідних змінних (рис. 1): x – вектор вхідних управляючих

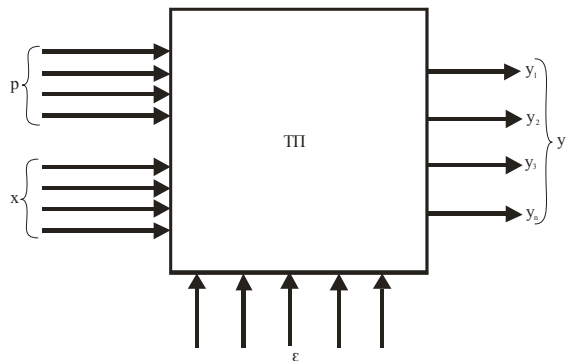


Рис. 1. Параметрична оптимізація технологічного процесу.

змінних, y – вектор вихідних змінних, p – вектор вхідних контролюючих, але не управляючих змінних, які називають факторами, ϵ -вектор випадкових збурень. В такому випадку параметрична оптимізація ТП полягає в знаходженні і реалізації таких способів варіації управляючих змінних $x_{opt}(t)$, при яких у рамках встановлених технологічних обмежень на змінні x і y забезпечується екстремум цільової функції, незважаючи на зміну контролюючих змінних p та впливу випадкових збурень ϵ .

Тепер вже вирішення поставленої задачі оптимізації має два етапи: 1) знаходження математичної моделі ТП; 2) розробка оптимального алгоритму управління для знаходження цільової функції на екстремальному рівні, незважаючи на дію не управляючих факторів p і випадкових збурень ϵ .

Специфіка виготовлення структур ВІС така, що ТП на формування їх функціональних шарів носить дискретний характер. В цьому випадку існує два підходи до побудови моделі дискретного ТП:

– **фізичний**, коли співвідношення між вхі-

дними і вихідними змінними визначають із аналізу фізико-хімічних процесів, що проходять в даній технологічній операції:

$$y_i = f_i(x_1, x_2 \dots x_n; p_1, p_2 \dots p_k) \quad i = \overline{1, m} \quad (10)$$

– **експериментально-статистичний**, який базується на статистичній обробці даних. Тоді $y = f(x_i)$ і таку функцію, яка зв'язує параметр оптимізації y з факторами x називають вже функцією відклику. Сьогодні для такої параметричної оптимізації використовують замість методу почергової зміни параметрів x_i (Гаусса-Зайделя) методи багатofакторного експерименту, коли одночасно змінюють всі фактори і проводиться оцінка багатомірної залежності:

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_k); x_1, x_2 \dots x_k = \text{var} \quad (11)$$

Аналіз формування структур ВІС по суміщених Ві-К-МОН і Д-МОН технологіях дозволяє зробити висновок, що така система технологія представляє собою дискретну послідовність технологічних опе-

рацій, які можна розбити на декілька характерних груп (рис. 2). Основними є операції перших трьох груп, бо вони формують внутрішню структуру ВІС.

Таким чином, для здійснення оптимізації ТП необхідно мати: модель ТП, це поперше, та ефективні методи оптимізації, по-друге. Останні включають в себе: 1) методи безумовної оптимізації; 2) методи математичного програмування; 3) методи статистичної оптимізації.

Сьогодні в мікроелектроніці велике поширення отримав третій метод (експериментально-статистичний) до вирішення задачі управління ТП. Він полягає в тому, що зв'язок між технологічними змінними процесу і вихідними параметрами ВІС розглядається не безпосередньо, а через її структуру, яка формується в результаті виконання певних операцій на створення функціональних шарів. Відповідно встановлюється такий зв'язок: фізика технології про-

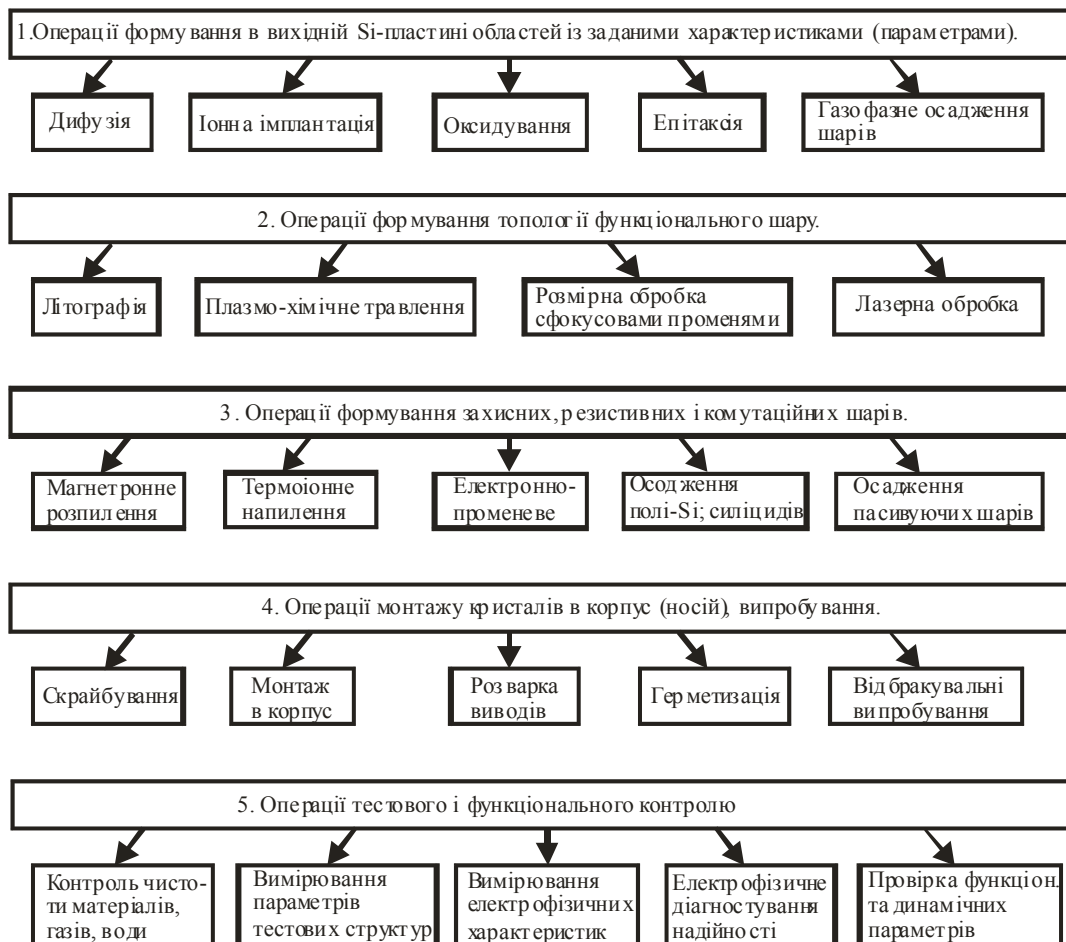


Рис. 2. Основні групи операцій технологічного процесу виготовлення ВІС.

цесу – сформована структура ВІС – вихідні параметри приладної структури. При цьому необхідно визначити: а) приладну структуру, яка може забезпечити задані вихідні характеристики; б) способи отримання такої структури. Тому тестова структура і є тією ланкою, через яку здійснюється такий зв'язок [1,6]. Крім цього ТС дозволяє в повній мірі реалізувати методи статистичної оптимізації на всіх етапах ВІС (від розробки до виготовлення і випробування) з використанням як фізичних, так і математичних моделей.

Тестовий контроль використовує три групи фізичних моделей. Перша група – це моделі, які встановлюють зв'язок між структурою і вихідними характеристиками ВІС. Моделі цієї групи отримують при розгляді фізики роботи елементів приладних структур. Друга група фізичних моделей – це моделі, що забезпечують зв'язок між фізичними змінними ТП і параметрами структури ВІС. Такі моделі використовують для управління процесом формування приладної структури ВІС. Третя група фізичних моделей – це моделі, які дозволяють встановити зв'язок вже між характеристиками фізичних величин ТП під час його проведення. Ця вже модель використовується для управління ходом ТП.

Всі фізичні моделі об'єднуює математична модель ТП, яка забезпечує високоточні характеристики приладних структур та враховує проектні норми КТО. При переході в субмікронний діапазон для забезпе-

чення високої адекватності вже використовують дво- та тривимірні моделі.

Як згадувалось вище, оптимізація технологічного процесу включає в себе два етапи: 1) опис ТП з допомогою математичної моделі; 2) проведення параметричної оптимізації багатofакторної цільової функції.

Методи направлено пошуку оптимальної області цільової функції існували і до розробки наукових положень багатofакторних експериментів. Найбільш старим є метод Гаусса-Зайделя, що описує однофакторний експеримент. Він вимагає проведення великої кількості експериментів і розрахунків. Сьогодні, їм на зміну прийшли методи багатofакторного експерименту, які дозволяють при малій кількості експериментів визначити оптимальне значення цільової функції. До таких методів відноситься метод Бокса-Вільсона (градієнтний метод), коли рух до оптимальної області проходить коротким шляхом – по градієнту з одночасною зміною значень всіх факторів. Цей метод особливо ефективний при використанні тестового контролю. При цьому алгоритм Бокса-Вільсона стає таким:

- 1) побудова багатofакторного експерименту для певної цільової функції;
- 2) опис поверхні відгуку з допомогою математичної моделі;
- 3) обчислення градієнтів функції по результатам експерименту і математичної моделі;

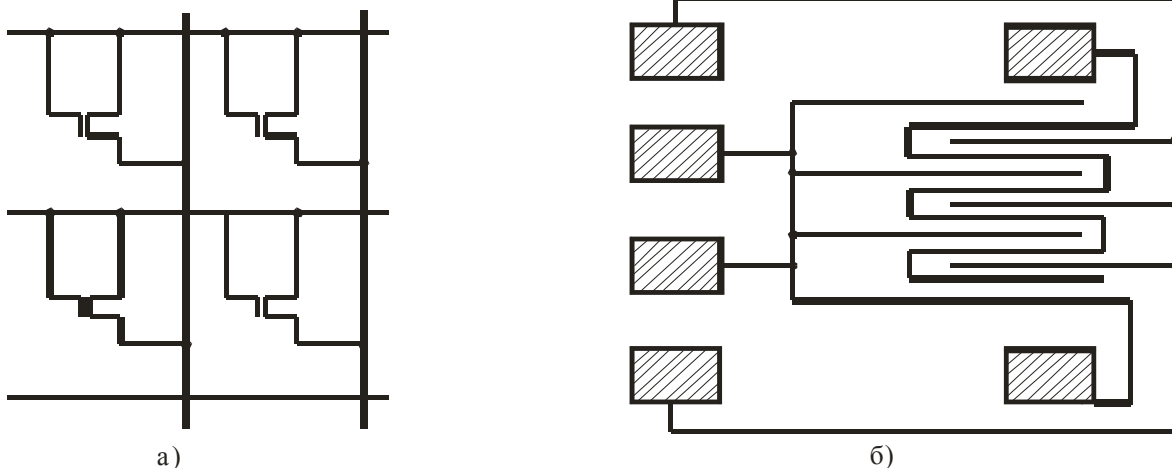


Рис. 3. Тестові структури для оцінки дефектності: а) діелектричних шарів; б) провідних шарів.

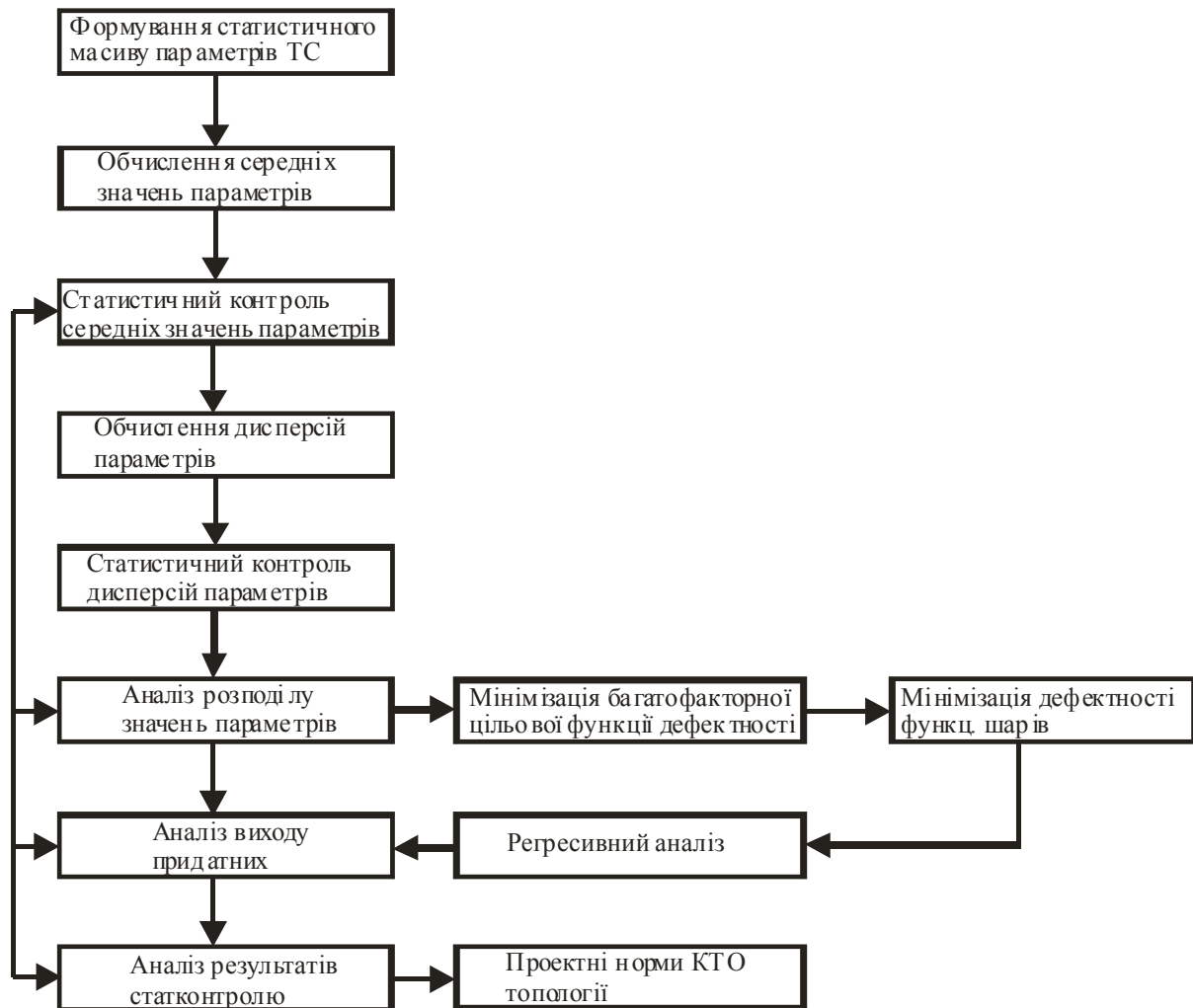


Рис. 4. Структурна схема тестового контролю технологічного процесу формування структур ВІС.

4) рух в напрямі градієнта цільової функції до її оптимального значення;

5) знаходження екстремуму (мінімізації) цільової функції в градієнтному напрямі.

Для мінімізації багатофакторної цільової функції дефектності функціональних шарів використовують при цьому ТС для оцінки густини дефектів [1,3], які показані на рис. 3. Сучасний розвиток системної технології ВІС вимагає не тільки удосконалення технології формування структур, але і удосконалення методів вимірювання і оптимізації параметрів ТС. Сьогодні технологія виготовлення структур кристалів ВІС включає в себе суміщену технологію формування ВІ-К-МОН і Д-МОН транзисторів. А це вже потребує нового пакету тестових структур для такої технології.

Для визначення дефектності функціональних шарів структур ВІС використовують

відповідно автоматизовані комп'ютерні системи. Найбільш відомими зарубіжними системами ТК є Accutest, Keithly System, Lomas, які базуються на автоматизованих вимірювачах пластин HP-1000 та спеціалізовані на базі персональних комп'ютерів HP-9830 [6,7]. Заслугують уваги тестера Т-4503 та АИК-ТЕСТ (ІСТ-205С), які дозволяють провести автоматизовану обробку накопиченої інформації по заданому алгоритму. При визначенні густини дефектності функціональних шарів необхідно встановити дефектність самого монокремнію та дефектність маскувальної плівки фоторезисту. Для цього використовують спеціалізовані вимірювачі ТС: Surfscan, MPV-SP, MPV-SD.

Для аналізу результатів статистичної інформації у задачах тестового контролю використовують три режими роботи тестерів: автоматичний, інтерактивний і діало-

говий. В автоматичному режимі система виконує процедуру статистичного контролю ТП на основі параметричної оптимізації, яка проводиться шляхом пакетного вимірювання та оцінки параметрів ТС і включає:

- первинну статистичну обробку вимірюваних параметрів та їх параметричну оптимізацію;
- контроль виходу за допустимі границі статистичних характеристик, що мають заданий інтервал змін;
- визначення законів розподілу параметрів і дефектів;
- виключає аномальність результатів вимірювань;
- прогнозування виходу придатних як по рівню дефектності, так і по рівню електрофізичних параметрів.

Структурна схема тестового контролю ТП приведена на рис. 4. і дозволяє працювати в трьох режимах роботи. При встановленому технологічному процесі формування структур ВІС їх якість і надійність визначаються в першу чергу стабільністю відтворення параметрів всіх функціональних шарів та мінімізованою їх дефектністю. Тому основною задачею тестового контролю в цій області є отримання максимальної інформації про параметри кожного технологічного шару, а вирішення цієї задачі повинно бути завершено ще на етапі проектування ВІС, коли закладаються проектні норми КТО.

Велика площа кристала ВІС (60-1000 мм²), висока щільність пакування елементів висувають підвищені вимоги до допустимого розкиду параметрів шарів не тільки по пластині, але і на кристалі. Реальне розміщення ТС на кристалі, статистична обробка результатів вимірювань, побудова моделей ідентифікації процесів та приладних структур дозволяє провести аналіз взаємозв'язку вихідних параметрів, що визначають якість, з характеристиками функціональних шарів, встановити і вибрати оптимальні їх значення для забезпе-

чення високого виходу придатних (> 85 %) і надійності (< 20-30 ppm).

В технологічному САПРі на основі тестового контролю нами використовується уніфікований тестовий кристал модульної структури, кожний із восьми модулів якого складається із ТС певного цільового призначення:

- 1 – структури для вимірювання опорів і ширини ліній;
- 2 – структури для вимірювання опорів контактів;
- 3 – структури для вимірювання ємностей і струмів втрат;
- 4 – структури для вимірювання параметрів плівок функціональних шарів і віддалей між легованими областями;
- 5 – транзисторні структури всіх видів: біполярних, К-МОН, Д-МОН;
- 6 – діодні структури зенерівських р-п-переходів і стабілітронів;
- 7 – динамічні структури та структури пам'яті;
- 8 – структури для фізичних і оптичних вимірювань, в тому числі кремнієві епітаксійні структури.

Організаційна структура тестового контролю ТП суміщених Ві-К-МОН і Д-МОН технологій подана на рис. 5. Якість проведення технологічного процесу оцінювалась по виходу придатних. Однорідність дисперсій є показником стаціонарності ТП і оцінювалась по критерію Фішера. Оцінка однорідностей дисперсій за окремими параметрами для прецизійних ВІС показує, що відповідальними як за вихід придатних, так і температурну стабільність параметрів є стан міжфазної границі розділу Si-SiO₂. Така стабільність повинна визначатись зміною зарядового стану в інтервалі температур за одиницю часу. А за це вже відповідає технологія оксидування, яка повинна забезпечити не тільки малу густину дефектів, але і мале значення дрейфу зарядового стану Si-SiO₂ при високій його щільності.

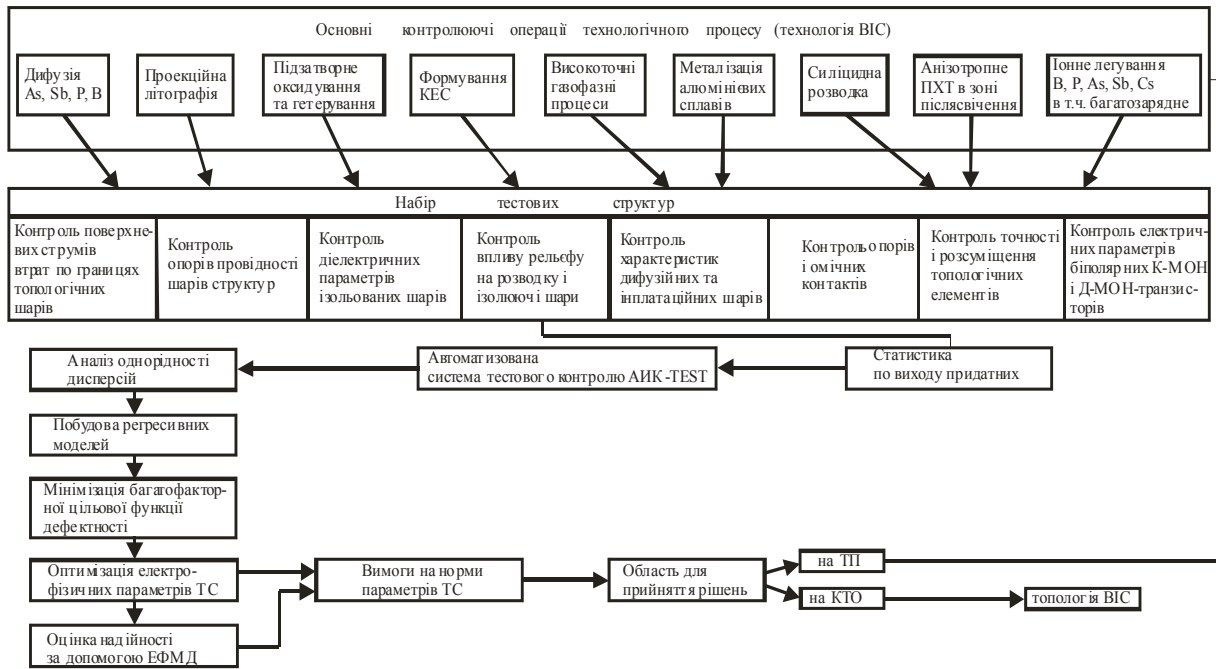


Рис. 5. Організаційна структура автоматизованого тестового контролю структур ВІС.

Проектні норми конструкторсько-технологічних обмежень топології ВІС задаються точністю літографії та плазмохімічних процесів травлення функціональних шарів і тісно зв'язані з ТП проектування бездефектної топології [4]. Вони включають в себе норми на електрофізичні параметри в залежності від типу кремнієвих пластин, на топологічні розміри елементів і їх розкиди на літографії та плазмохімії, допуски на суміщення топологічних (функціональних) шарів і перекриття областей. Після екстракції електричної схеми із топологічної проводиться повторне її моделювання і верифікація з перевіркою реальних норм КТО топології у відповідності з проектними.

При параметричній оптимізації якість ВІС в системній технології мікроелектроніки досягають тільки в тому випадку, коли її проводять на стадії:

- конструкторсько-технологічної оптимізації структури кристала;
- оптимізації технологічного процесу формування структур;
- оптимізації об'єму і тривалості відбракувальних технологічних випробувань.

Очевидно, що технологічні відбракувальні випробування ВІС не тільки збільшують цикл їх виготовлення, але і зменшують

ресурс їх роботи та не дають достовірної інформації про надійність та довговічність, бо, як правило, всі методи випробувань є руйнівними. Тому для функціонально складних ВІС така методологія оцінки надійності вже недопустима. Сюди приходять неруйнівні методи електрофізичного діагностування (МЕФД) [5], що базуються на тестових структурах, які несуть об'єктивну інформацію про часову зміну їх електрофізичних параметрів в реальному масштабі часу.

Існує два основних діаметрально протилежних напрями, що дозволяють скоротити технологічні відбракувальні випробування – перший зв'язаний з прогнозованою зміною електрофізичних параметрів ТС, а другий – з організацією форсованих випробувань, коли зовнішні впливи більші допустимих. Ясно, що в другому напрямку дуже суттєво знижується ресурс ВІС, а також необхідне високонадійне випробувальне обладнання, коли мова йде про багатофункціональні ВІС. Тому при рості ступеня інтеграції необхідно здійснити перехід до електрофізичних методів діагностування надійності структур, бо вони дозволяють його проводити ще на стадіях формування функціональних шарів.

Залежно від способу реєстрації розріз-

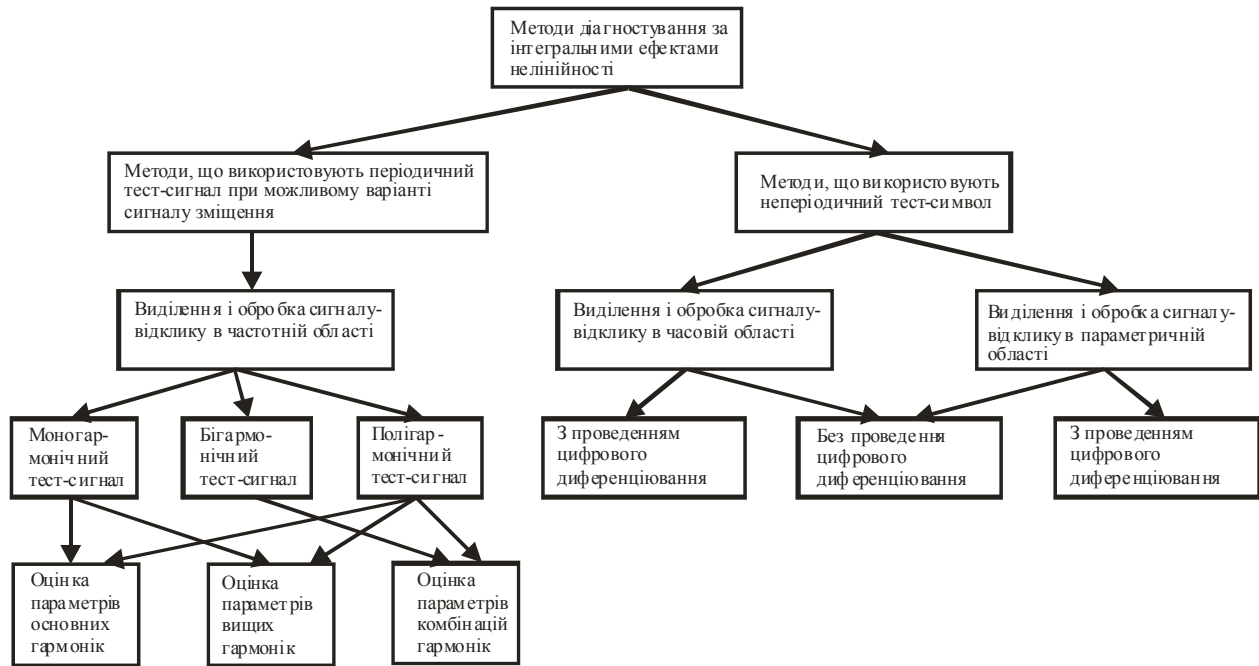


Рис. 6. Класифікація електрофізичного діагностування надійності за інтегральними ефектами нелінійності електрофізичних параметрів ТС.

няють три основні групи МЕФД за інтегрованими електрофізичними параметрами: 1) розсіювання або дисипації енергії всередині системи і в зовнішнє середовище, 2) внутрішніх флуктуацій, 3) не лінійностей функціональних характеристик.

Для тестового контролю особливо актуальною є третя група. Класифікація електрофізичних методів діагностування за інтегрованими ознаками не лінійності залежно від способу отримання інформації подана на рис. 6. До цієї групи відносять такі методи: вольтамперометрії, аналогового та цифрового диференціювання ВАХ, імпульсно-модульованих і динамічних ВАХ, динамічних і статичних ВФХ, диференціальної провідності (ДДП), вищих гармонік (МВГ), методи другої і третьої гармоніки (МДТГ), нульових биттів (МНБ), різницевої частоти (МРЧ).

Відповідно такі методи діагностування потребують своїх тестових структур і для них розроблених методик електрофізичного контролю. Наприклад, стабільність згенерованих поверхневих станів на границі розділу Si-SiO₂ визначається із співвідно-

шення:

$$\Delta N_{ss} = \frac{C_{ox}}{q} \Delta (U_T - U_{FB}),$$

$$\frac{dN_{ss}}{dt} = \frac{C_{ox}}{q} \frac{d(U_T - U_{FB})}{dt}, \quad (12)$$

де C_{ox} – питома ємність підзатворного діелектрика, U_T , U_{FB} – порогова напруга і напруга плоских зон МОН-структури.

Така густина станів віднесена на одиницю площі оксиду при зміні температури і часу є новим носієм інформації про надійність МОН-ВІС.

Таким чином, використовуючи технологічний САПР у вигляді тестового контролю електрофізичних параметрів структур ВІС забезпечується їх високоефективне кристалльне виробництво як по виходу придатних (> 85 %), так і їх надійності (< 20-30 ppm). Його висока ефективність досягнута на ІС серій К140, К564, К1564, К580, К132, К1830, К1816, К1008.

С.П. Новосядлий – к.т.н., професор кафедри радіофізики і електроніки.

- [1] С.П. Новосядлий. Тестовий контроль електрофізичних параметрів структур ВІС в системній технології високого рівня // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, **2**, сс. 58-64 (1999).
- [2] С.С. Булгаков, Д.Б. Десятов, С.А. Яремин, В.В. Сысоев. *Автоматизированный тестовый контроль производства БИС*. Радио и связь, М. 191 с (1992).
- [3] С.М. Кузин, В.Н. Панасюк, В.Г. Мокеров, В.В. Исаев. Электрический тестовый контроль на этапах создания ИС // *М.ЦНИИ "Электроника". Обзоры по электронной технике. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания*, **8**, 32 с (1989).
- [4] С.П. Новосядлий. Сучасні комп'ютерні системи автоматизованого проектування топології ВІС // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології*, **386**, сс. 29-38 (1999).
- [5] С.П. Новосядлий. Електрофізичне діагностування надійності ВІС в технології високого рівня // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, **367**, сс. 187-197 (1999).
- [6] P.H. Singler. Analyzing parametric test structures // *Semicond.Int.*, **10**(7), pp. 74-79 (1987).
- [7] R.C. Fink, W.J. Giles. Process monitoring and evaluation // *Solid State Technol.*, **25**(11), pp. 107-111 (1982).

S.P. Novosyadly

Technological CAD System a LSI Circuit on the Basis of Test Structures

*Precarpathian University named by V.Stefanyk, 76005,
Ivano-Frankivsk, 57, Shevchenko St.*

It has been developed the concept of technological automated design engineering (ADE) system on the basis of test control in the submicron technology of large-scale integrated (LSI) circuits structures engineering. Its background is a minimization of multifactorial target function of functional layers presence defects.