

УДК 621.396.6.019.3+621.38.049.77

**Володимир Павлиш, Ігор Данчишин, Роман Корж, Дмитро Вишняков**

Національний університет «Львівська політехніка»,  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

## **ДІАГНОСТИКА ПОВЕРХНЕВОЇ ДЕФЕКТНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛАСТИН**

© Павлиш Володимир, Данчишин Ігор, Корж Роман, Вишняков Дмитро, 2001

**Запропоновано автоматизований метод та конструкцію пристрою для оптичного контролю поверхневої дефектності базових шарів ІС.**

**The automation technique and construction of the device for IC's basic layer surface defectivity optical control are proposed at present paper.**

Діагностика дефектності структур електронних засобів надзвичайно актуальна на сучасному етапі, оскільки значне зменшення розмірів елементів ІС з одночасним збільшенням площі кристала збільшує ймовірність появи на кристалі дефектів та забруднень, розміри яких близькі до розмірів елементів ІС. Існуючі методи контролю та боротьби із забрудненнями у вигляді сторонніх частинок і врахування чутливості виробничих процесів та виробів напівпровідникової мікроелектроніки до сторонніх частинок зводяться до:

- електричні дослідження напівпровідникових пластин після нанесення металізації;
- фізичні дослідження для оцінки кореляції електричних відмов та фактичних дефектів кожного конкретного типу напівпровідникових приладів та інтегральних схем;
- розробка різноманітних математичних моделей для оцінки ступеня впливу забруднень на вихід придатних приладів з виробництва для конкретних типів ІС;
- контроль за кількістю сторонніх частинок в рідинах, газах та напівфабрикатах, що використовуються у виробництві та оцінка їх впливу на вихід придатних.

Всі ці методи є недостатньо ефективними і дають можливість для кожного конкретного типу ІС лише оцінити вплив забруднень сторонніми частинками на вихід придатних (ВП). Численні методики для дослідження структурних дефектів, які базуються на вимірюванні ємності, опору, комбіновані (ємність/опір), електронно-променеві [1,2] та деякі інші [3] характеризуються значними затратами на спеціальне обладнання, різними часами тестування та роздільною здатністю і не завжди є достатньо ефективними. Тестові структури (ТС), як засіб контролю дефектності ІС, а також отримання інформації про параметри виробів, параметри їх структури, про закономірності розподілу цих параметрів та їх зміни залежно від технологічних, конструктивних та експлуатаційних факторів займають особливе місце у виробництві мікроелектронних РЕЗ. Це зумовлено, з одного боку, груповим характером обробки виробів на більшості операцій технологічного процесу, а з іншого – високою вартістю отримання інформації про якість та надійність ІС і факторів, що впливають на них. Проте для контролю дефектів матеріалів, структур та напівфабрикатів застосування тестових структур недостатньо ефективне, оскільки вимагає значної деталізації елементів ТС в області параметрів дефектності [4], а існуючі в теперішній час візуальні методи контролю зовнішнього вигляду ІС за допомогою мікроскопів типу МБС, ММУ та МІІ не гарантують 100%-го відбракування дефектних кристалів.

При постійному зменшенні топологічних норм з одночасним підвищенням степеня інтеграції елементів на кристалі можна з певністю прогнозувати падіння виходу придатних ІС при збереженні на досягнутому рівні умов чистоти виробництва. Дослідження взаємозв'язку між кількістю дефектів, які можна візуально спостерігати на напівпровідникових пластинах та ВП, що проводились на схемах електрично перепрограмованої пам'яті [5] після закінчення основних критичних операцій: нанесення композиту, полікремнію I, полікремнію II та металізації, показали наявність чіткої кореляційної залежності (рис.1). Мірою густини дефектів приймали суму густин дефектів по всіх чотирьох операціях, по яких проводили контроль. З практики відомо, що рентабельне виробництво ІС можливе тільки в тому випадку, якщо критичний розмір забруднюючих частинок не перевищує 0,5 – 0,6 мінімальної ширини ліній, які використовують у цьому класі ІС. Крім того, цей розмір залежить від характеру самої частинки і конкретної технологічної операції. З вищенаведеного випливає, що на передній план у забезпеченні високого рівня технологічності, а відповідно і рентабельності сучасних мікроелектронних РЕЗ, виступає проблема контролю дефектності виробів мікроелектроніки як під час технологічного процесу (експрес-контроль рівня якості нанесення базових шарів за результатами вимірювання параметрів тестових пластин), так і контроль параметрів ІС та оцінка рівня настроювання ТП в цілому по завершенні технологічного циклу (за результатами дослідження параметрів тестових структур або тестових пластин).

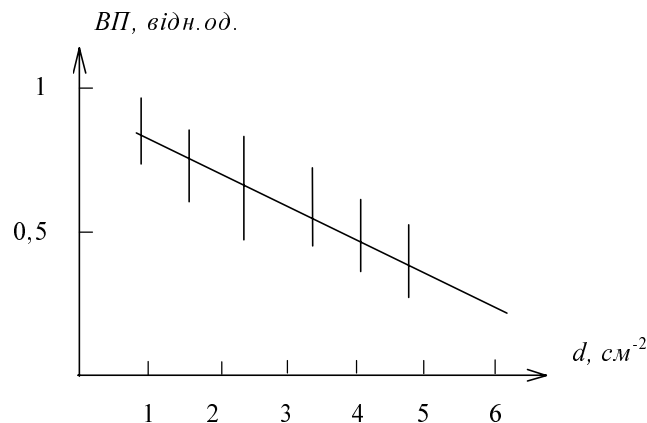


Рис. 1. Кореляційна залежність між виходом придатних та густиною дефектів [5]

Відомо, що оптичні системи мають обмеження з виявлення дефектів на поверхні пластини, зумовлені їх роздільною здатністю. Так, мінімальні розміри фізично розділених дефектів можуть бути порядку 0.1 мкм при використанні видимого світла або ближнього ультрафіолету. Проте, практично таку чутливість можна реалізувати лише на початкових стадіях процесу для частинок на планарній поверхні (підкладка, епітаксійний шар), коли «шумові» параметри поверхні мінімальні (нерівномірність структури пов'язана із нанесеним рисунком схеми). Надалі необхідно враховувати характер поверхні (зерниста металізація, діелектричні захисні покриття), що має нерівномірну структуру, співвимірну або і більшу за розміри дефекту.

Скануючі електронні мікроскопи (SEM) в режимі контрасту низьких напруг мають певні переваги перед оптичними системами, оскільки дають змогу проводити ідентифікацію дефектів структури в міжз'єднаннях та контактах, однак, вплив випромінювання може призвести до деградації останніх та до погіршення їх надійності і, як наслідок, вплинути на ВП ІС. Цей метод

не дозволяє також достатньо точно ідентифікувати дефекти під або в шарі окисної плівки. Крім того, вартість SEM-установок досить значна, що теж накладає певні обмеження на їх широке і ефективне використання.

При проведенні фотолітографії ідентифікація дефектів проводиться оператором візуально за допомогою мікроскопа. Це дозволяє ідентифікувати винятково грубі похибки процесу та аномальні дефекти.

Отже, розробка високопродуктивних автоматизованих методів ідентифікації дефектності структур мікроелектронних РЕЗ при порівняно невеликих затратах – актуальна проблема сучасного етапу розвитку мікроелектроніки.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано автоматизований метод оптичного контролю дефектності базових шарів ІС за допомогою спеціальної установки [6], блок-схему якої схематично зображено на рис. 2. Принцип дії установки полягає в наступному. Пластина з нанесеним шаром закріплюється на поворотному столику, який має два ступені вільності – обертання та радіальне переміщення (для пластин круглої форми), що дозволяє сканувати всю поверхню пластини та визначати координати дефекту. Оптична система розрахована так, що при попаданні в поле зору дефекту розмірами 0,2 – 0,5 мкм сила світла, яке попадає в приставку, змінюється приблизно на 5 – 15 %. Ця зміна фіксується фотоприймачем та через пристрій спряження подається в модуль обробки даних. При застосуванні мікропроцесорного управління установка дає можливість підрахувати кількість придатних та дефектних полів, розрахувати координати дефекту та провести попередню статистичну обробку результатів. Системою освітлення можна використати лазерне колімоване випромінювання, що дозволить підвищити роздільну здатність установки та точність визначення мікродефектів. Для попередньої підготовки пластин з нанесеними шарами до автоматизованого контролю дефектності можна використовувати різноманітні способи. Для напівпровідникових структур (підкладка, епітаксійний шар) найкраще підходить хімічне травлення у відповідних травниках, які дозволяють виявити дислокаційні та інші дефекти. Для діелектричних та провідникових шарів можна використати метод немагнічних рідких кристалів (НРК) [7].

На рис. 2 зображена структурна схема пристрою автоматизованого контролю дефектності напівпровідникових пластин, а на рис. 3 – варіант виконання  $n$ -канального світловода (а – вигляд зверху, б – вигляд збоку), де: 1 – перше джерело світла; 2 – друге джерело світла; 3 – перший переривач світла; 4 – другий переривач світла; 5 – перший пучок світла; 6 – другий пучок світла; 7 – система лінз; 8 – перша система діафрагм; 9 – вузол затримки прямого відбитого світла; 10 – система відхилення світла; 11 – об'єктив; 12 –  $n$ -канальний світловідвід; 12.1 – напівпрозорі дзеркала; 12.2 – непрозорі дзеркала; 13 – предметний столик, на якому закріплене тіло, поверхня якого контролюється; 14 – виконавчі пристрої; 15 – друга система діафрагм; 16 – фотодетектор; 17 – підсилювач сигналу; 18 – система аналізу; 19 – ЕОМ; 20 – система керування виконавчими пристроями; 21–23 – периферійні пристрої відображення інформації; 24 – система керування переривачами світла 3 та 4; 25 – лінзи; 26 – поверхня, що контролюється.

Переривачі світла 3 та 4 можна виконати електрооптичними, що забезпечить необхідну швидкодію пристрою.

Конструкція світловода забезпечує опромінення дефекту поверхні з  $n$  сторін з метою повного аналізу форми та структури дефекту. Варіант конструкції світловода при  $n=4$

зображений на рис 3 для випадку, коли він виконаний з  $n-1$  напівпрозорих дзеркал 12.1,  $n$  непрозорих дзеркал 12.2, які розміщені в площині, паралельній поверхні 26, що контролюється, а також  $n$  лінз 25, причому дзеркала зорієнтовані в просторі так, що частина світла проходить крізь напівпрозорі дзеркала, а частина відбивається від них і потрапляє на поверхню. Напівпрозорі дзеркала повинні бути виготовлені з різними коефіцієнтами пропускання та відбивання, з метою забезпечення однакових інтенсивностей всіх  $n$  пучків світла.

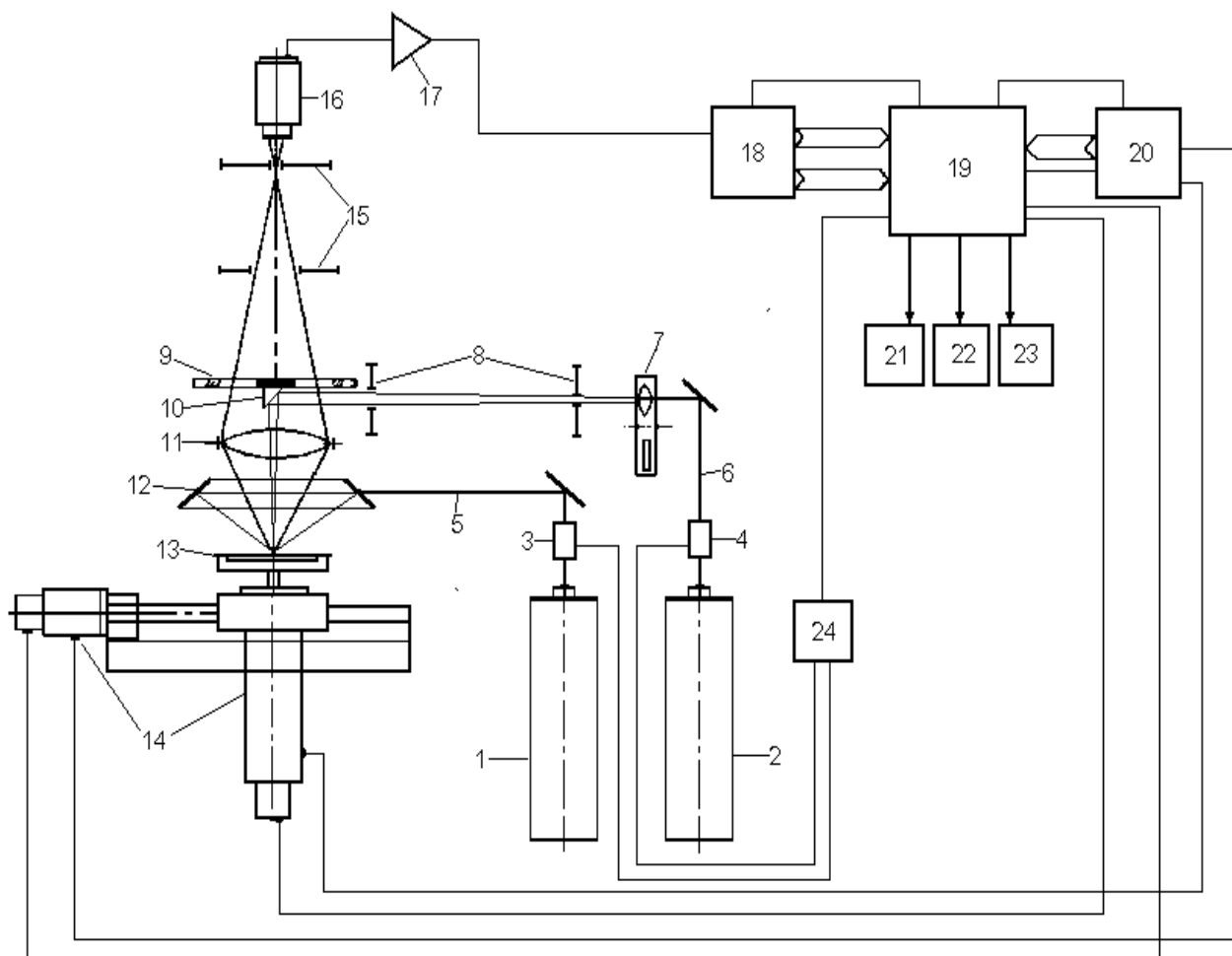


Рис. 2. Структурна схема пристрою автоматизованого контролю дефектності напівпровідникових пластин

Принцип роботи пристрою полягає в наступному. Світловий пучок 6 від джерела світла 2 проходить через переривач 4 і потрапляє на систему лінз 7, що призначена для забезпечення роботи пристрою в режимах сканування поверхні лінійним або точковим пучком і містить циліндричну та сферичну лінзи. У режимі сканування лінійним пучком встановлюється циліндрична лінза і світловий пучок, пройшовши першу систему діафрагм 8, потрапляє на систему відхилення світла 10, після якої через об'єктив 11 потрапляє строго перпендикулярно на поверхню 26 (рис. 3), що контролюється. Систему відхилення світла можна виконати у вигляді призми або дзеркала. Світло в цьому режимі опромінює значну частину поверхні, що дозволяє контролювати як лінійні дефекти, так і дефекти неплоскостності.

Розсіяне на дефектах світло утворює конусоподібний пучок, який проходить разом з прямим відбитим пучком через об'єктив 11 і потрапляє на вузол затримки 9, що затримує прямий пучок і пропускає розсіяний для забезпечення роботи пристрою в режимі темного

поля. Світло, що пройшло далі через другий набір діафрагм 15, потрапляє на фотодетектор 16, який реєструє сигнал від дефекту. Зареєстрований сигнал з виходу фотодетектора потрапляє на вхід підсилювача 17 і далі на вхід системи аналізу 18, підключеної до ЕОМ 19. До ЕОМ підключені периферійні пристрої, необхідні для відображення отриманої інформації.

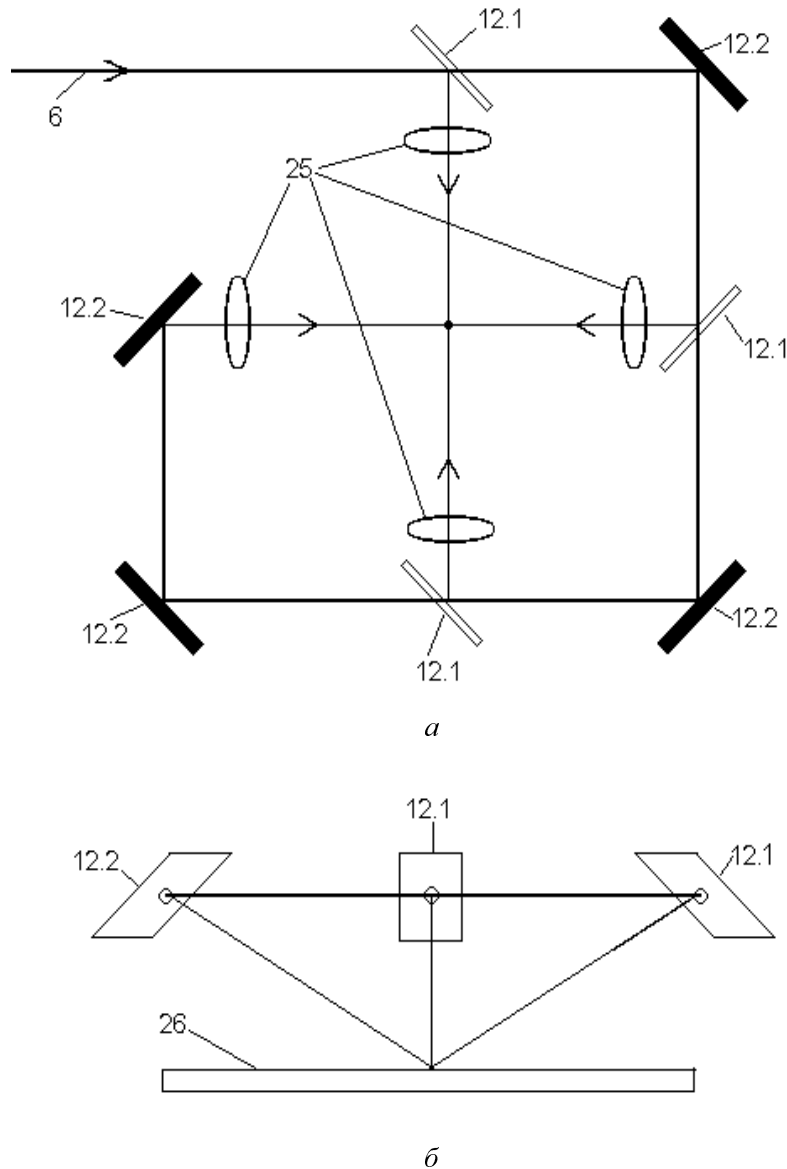


Рис. 3. Структурна схема світловода для опромінення бічної поверхні дефекту

Для забезпечення розгортки в режимі сканування використовується виконавчий механізм 14, яким можна використати електродвигуни для забезпечення переміщення предметного столика 13 (наприклад, поступового та обертового руху з метою отримання спіральної розгортки), підключені через систему управління 20 до ЕОМ. У цьому режимі перший переривач 4 пропускає світло, а другий переривач 3 не пропускає. В режимі сканування поверхні точковим пучком замість циліндричної лінзи встановлюється сферична лінза і далі процес відбувається аналогічно. При отриманні системою аналізу 18 сигналу про наявність дефекту ЕОМ виробляє сигнал для системи управління 24, яка переключує переривачі так, що закриває переривач 4 та відкриває переривач 3 і світловий пучок 5 від аналогічного джерела 1 потрапляє на світловод 12 та на поверхню 26 під кутом до нормалі.

Опромінення поверхні під кутом дає можливість сканувати бічну поверхню дефекту та отримати значно більший сигнал від нього у випадку, якщо дефект є тривимірним, ніж у випадку, коли він є поверхневий. Після отримання сигналу та його аналізу пристрій знову повертається у попередній стан, тобто режим сканування поверхні точковим пучком.

Пристрій забезпечує контроль якості поверхні тіл довільної форми, наприклад, круглих напівпровідникових пластин, що використовуються при виготовленні інтегральних схем.

Додаткова інформація про природу дефектів, що виникають в технологічному циклі, отримується після аналізу результатів контролю з використанням тестових структур та функціонального контролю параметрів ІС.

Застосування методу оптичного контролю дозволяє проводити попередній експрес-аналіз рівня якості настроювання основних технологічних операцій. Так, при частоті обертання поворотного столика 600 об/хв та діаметрі світлового пучка 5 мкм необхідний час сканування пластини діаметром 100 см становить приблизно 16 – 17 хв, а при діаметрі пучка 10 мкм – 8 хв. З врахуванням того, що установка дозволяє попередньо сканувати пластину широким пучком для визначення дефектних ділянок, які надалі скануються точковим пучком, реальний час сканування значно менший і певною мірою залежить від ступеня дефектності пластини.

1. Brunner M., Schmid R., Schmitt R., Sturn M., Gessner O. *Electron-Beam MCM Testing and Probing // IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol.* – Feb. 1994. – Vol. 17. – P. 62–68
2. Hopper A. et al. *A Feasibility Study for the Fabrication of Planar Silicon Multichip Modules Using Electron Beam Lithography for Precise Location and Interconnection of Chips // IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol.* - Feb. 1992. - Vol. 15. - P. 97-102.
3. Halperin A., DiStefano T.H., Chiang S. *Latent Open Testing of Electronic Packaging // Proc. IEEE Multi-Chip Module Conf.* - 1994. – P. 83– 88.
4. *Микро-электроника: Учебное пособие для вузов. В 9 кн. / Под ред. Л.А. Коледова. - М., 1987. - Кн.5. Козырь И.Я. Качество и надежность интегральных микросхем.* – 144 с.
5. Betel D. *Correlating Observable Defects and Yield // Semiconductor International.* – 1991. – Vol. 14. № 11. – P. 128–130.
6. Корж Р., Данчишин І., Данчишин Ір. *Автоматизований метод ідентифікації дефектів структур мікроелектронних РЕЗ // Електроніка і зв'язь: Тематический выпуск «Проблеми фізической і біомедицинской електроніки».* – К., 1998. – № 4. – Ч. 1. – С. 84-87.
7. Гриценко Н.И., Кучеев С.И. *Контроль дефектности поверхности кремния нематическими жидкими кристаллами // Микроэлектроника.* – 1997. – Т. 26. – № 5. – С. 389 – 392.