

МОДЕЛЮВАННЯ СУБМІКРОННОЇ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ ТЕСТОВИХ СТРУКТУР

С.П. Новосядлий
Доктор технічних наук, професор*

В.М. Вивчарук
Аспірант*

Контактний тел.: 8 (0342) 59-84-07, 8(067) 342-07-81
e-mail: vivov@bigmir.net

С.М. Вертепний
Аспірант*
e-mail: jimmy-sv@mail.ru

*Кафедра «Радіофізики та електроніки»
Прикарпатський національний університет ім. В.Стефаника
вул. Шевченко, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000

Розглянуто структуру тестового контролю (ТК) технологічного процесу формування структур великих інтегральних схем, сформувані задачі ТК, проведена класифікація тестових структур, наведені приклади тестових кристалів та способи їх застосування

1. Вступ

Підвищення степені інтеграції великих інтегральних схем (ВІС) вимагає удосконалення технології формування субмікронних та наноструктур, її операційного моделювання та автоматизованого контролю електрофізичних параметрів для визначення конструкторсько-технологічних обмежень (КТО) проектних норм. Це успішно може бути реалізовано з використанням тестових структур (ТС). Дана стаття визначає області застосування тестових структур, методи обробки і аналізу результатів тестового контролю, моделювання та оптимізацію технологічних процесів формування шаруватих структур. Вперше в колишньому СРСР тестовий контроль був реалізований на ВАТ "Родон", де в 1986 р. була організована галузева лабораторія тестового контролю структур інтегральних схем і були закладені основні положення ТК в електронній промисловості СРСР.

2. Застосування ТС для контролю технологічного процесу

Контроль на основі ТС може використовуватись на всіх етапах створення ВІС (проекування елемент-

ної бази і технологічних маршрутів, відпрацювання технологічних режимів і операцій, оцінка параметрів ВІС, організація операційного тестового контролю, встановлення кореляційних зв'язків, аналіз стійкості технологічного процесу, прогнозування надійності). У відповідності з цим можна виділити п'ять основних задач, що вирішують за допомогою тестового контролю, які приведені в табл.1. Тут також подано призначення ТС, які використовують для збору та обробки статистичних даних на етапах проектування, розробки і виготовлення ВІС.

На етапі топологічного проектування необхідно провести обґрунтування норм та допусків на розміри елементів, зазори між елементами, точність суміщених топологічних шарів, топологічне розміщення елементів та їх орієнтацію один відносно одного, оптимальний маршрут формування топології структури ВІС з режимами технологічних операцій.

На етапі схмотехнічного моделювання необхідно вже мати вихідні дані для розрахунку характеристик приладів і вузлів схеми, їх узгодження. Ця інформація може бути отримана за рахунок вимірювання характеристик і параметрів ТС, виготовлених в єдиному маршруті з використанням літографії і технологічних обробок в процесах, які є відповідальними за формування функціональної схеми (ФС) ВІС.

Таблица 1

Основні задачі тестового контролю

№ п/п	Етапи ТК	Призначення ТС, їх характеристики, параметри	Примітка
1.	Проектування топології великих інтегральних схем	-визначення електрофізичних параметрів матеріалу і елементів ВІС; -визначення проектних норм на електричні і топологічні параметри елементів ВІС; -вибір схемотехнічних рішень фрагментів ВІС; -встановлення КТО і допусків; -моделювання і дослідження окремих фізичних ефектів в структурах; -логічне проектування і моделювання ВІС; -визначення меж масштабування елементів структур ВІС;	використовується пакет програм TCAD, PSPICE, CADENCE, OTTO
2.	Проектування технологічного маршруту формування структур ВІС	-визначення електрофізичних параметрів ТС; -відпрацювання режимів окремих тех. операцій; -визначення оптимальних констр.-техн. норм; -аналіз основних дефектів ТС; -оцінка відтворюваності і стабільності тех. процесу формування структур і окремих операцій; -встановлення граничних можливостей тех. процесу формування структур; -встановлення критеріїв вибору ТС і проектування тестового модуля для фотонаблонів;	використовуються статистичні методи
3.	Автоматизований статистичний контроль тех. процесу з використанням тестерів	-контроль технологічних проектних норм; -поопераційний контроль ТО і їх критерії виконання; -оцінка характеристик роботи обладнання і операторів; -прогнозування виходу придатних і надійності за характеристиками ТК; -аналіз ТО та режимів формування структур; -співставлення виходу придатних структур ВІС з розподілом параметрів ТС; -статистична обробка параметрів (закон розподілу, дисперсія, середнє); -побудова графіків, гістограм, таблиць, кореляцій;	використовуються програма тестера
4.	Статистичний аналіз і регулювання тех. процесу формування структур	-встановлення кореляційних зв'язків параметрів ТС з характеристиками режимів ТО і виходом придатних; -визначення захованих механізмів формування множини вимірюваних параметрів; -дослідження групи параметрів ТС із стійкими статистичними зв'язками (кореляційні плеяди); -побудова регресивних моделей зв'язку параметрів ТС з вихідними параметрами ВІС; -графічне представлення статистичної інформації, її динаміки в часі та динамічного діапазону; -аналіз і прийняття рішень по корегуванню та управлінню тех. процесом формування структур ВІС; -аналіз і прийняття рішень по статистичному регулюванню тех. процесу для забезпечення як виходу придатних, так і надійності;	використовуються програма тестера
5.	Оцінка надійності структур ВІС та дослідження механізмів поопераційних відмов в технологічному маршруті	-дослідження, аналіз відмов, встановлення механізмів дефектів ТС; -співставлення всіх даних по параметрам ТС на різних операціях тех. маршруту; -побудова кругових діаграм розподілу основних видів дефектів; -визначення переважаючих дефектів на пластинах із структурами з мінімальним та максимальним виходом придатних; -прискорення випробувань на надійність і встановлення головних прискорюючих факторів; -розробка експресних методів оцінки надійності; -побудова статистичних моделей механізмів поопераційних відмов; -визначення вихідного приймального контролю за параметрами ТС; -оцінка впливу конструктивних, схемотехнічних рішень на показники надійності; -прогнозування надійності структур ВІС на основі ТС і встановлення часових критеріїв;	використовуються аналітичні фізико-хімічні методи аналізу

При моделюванні топологічних елементів та приладних структур результати контролю параметрів ТС використовуються для встановлення технологічних та схемотехнічних зв'язків між відхиленнями електрофізичних параметрів структури від заданих та зміною режимів технологічних операцій (ТО) для прогнозування виходу придатних і надійності.

Дані, отримані в результаті контролю параметрів ТС на етапі проектування, дозволяють відкорегувати проектні норми КТО, уточнити технологічний маршрут формування структури, оцінити необхідні характеристики і параметри спеціального технологічного обладнання.

На етапі проектування технологічного маршруту застосовують ТС, які дозволяють вимірювати параметри технологічних шарів, оцінити стабільність роботи технологічного обладнання та проводити аналіз надійності ще на стадії формування структур ВІС. На цьому етапі необхідний набір статистичних даних про відтворюваність параметрів ТС, розподіл дефектів ТС для оцінки впливу технологічних факторів на придатність вузлів ВІС. По мірі накопичення статистичної інформації та збільшення степені технологічності визначається об'єм контролю, його періодичність, а також встановлюються оптимальні значення параметрів ТС, при яких досягається максимальний вихід придатних та надійності.

Для формування вибірки великого об'єму, доцільно спочатку використати пластини, що містять тільки ТС, а потім вже пластини із структурами ВІС і ТС в одному фотолітографічному модулі. При такому підході забезпечується об'єм інформації, який дозволяє оптимізувати номенклатуру і виключити малоінформативні елементи ТС. Такі задачі можуть бути вирішені методом факторного планування експерименту; при цьому рівень налаштування і точність виконання ТО встановлюється за електрофізичними параметрами елементів ТС, а інтегральні показники якості ТП – за виходом придатних. Проектування технологічного процесу закінчується вибором таких елементів та параметрів ТС, підтримка яких у визначених межах забезпечує стабільну відтворюваність ТО.

На етапі статистичного контролю і аналізу ТП проводиться обробка міждіагностичного статистичного причинного аналізу взаємозв'язків досліджуваних параметрів ТС і структур ВІС в умовах низького, середнього і високого виходу придатних. Параметри ТС повинні характеризувати рівень налаштування і точність виконання окремих прецизійних ТО; розподіл дефектності по пластині і відображати їх статистичний взаємозв'язок з параметрами структури ВІС. На цьому етапі вирішуються також задачі визначення технологічних обмежень і норм для контролю точності кожної ТО, направлені на забезпечення високого виходу придатних і надійності.

В ролі інструмента дослідження використовується пластина-супутник, яка проходить весь технологічний цикл разом із робочою партією. На ній формуються ТК тільки з тестовими структурами, якими вона повністю заповнюється. Така пластина-супутник служить для оцінки тієї робочої партії, в складі якої вона пройшла весь технологічний маршрут (ТМ).

В умовах автоматизованого статистичного контролю і аналізу ТП в реальному масштабі часу найбільш

придатним варіантом є рівномірний друк 3-5 високоінформативних тестових кристалів, які містять сотні і тисячі різних тестових елементів в робочу пластину (так званий метод конверта). В цьому випадку зберігається кореляція між параметрами ТС і структурою ВІС; з'являється можливість оцінки однорідності розподілу параметрів ТС в межах робочої пластини і самої партії, а вимірювання їх параметрів проводяться одночасно із перевіркою параметрів і функціонування кристалів структур ВІС на одній багатозондовій установці.

Для вивчення технологічних маршрутів і окремих операцій запропоновано два типи ТС [1,2]. Перший призначений для оцінки стабільності, налаштування і аналізу дефектів, другий – для атестації технологічних процесів, дослідження обладнання, моделювання виходу придатних та аналізу операційної дефектності. На основі методології атестації технології і обладнання запропонований метод, для реалізації якого необхідно проведення експериментів, що представляється у вигляді матриці $\{K, p, o\}$, де K – критерій оцінки, p – технологічний режим, o – число одиниць обладнання. В основі аналізу покладено вивчення форм поверхневих відгуків і розривів на тій же поверхні, які пов'язані випадковими дефектами. При проведенні експериментів в роботу обладнання вносяться контролюючі відхилення. За результатами експерименту встановлюється оптимальна форма поверхні відгуку і вплив відхилень технології на її вигляд, визначаються вихідні дані для розробки моделі технологічного процесу формування структур ВІС [3,6].

Експерименти проводяться при виконанні наступних умов:

- в період проведення експерименту технологічне обладнання не повинно регулюватись;
- орієнтація пластин в об'ємі обладнання повинна бути строго визначеною;
- ТС повинна формуватись в єдиному технологічному циклі;
- ТЕ повинні імітувати особливості елементної бази структури ВІС;
- необхідна наявність 2-ох типів ТС: одиничні елементи і групи одиничних елементів, з'єднаних паралельно чи послідовно.

Задачі по оцінці надійності не пов'язані безпосередньо з управлінням ТП, і їх призначення полягає в пошуку ненадійних компонентів ВІС, отримання статистичної інформації про показник надійності та його часову динаміку і визначення оптимальних конструкторсько-технологічних норм проектування. ТС високої надійності будують на основі багатофакторного повторення фрагментів в структурних шарах ВІС з різними масштабними коефіцієнтами [1,3,9]. Конструкції ТС, їх розміри, взаємне розміщення повинні забезпечувати відображення критичних конструкторсько-технологічних характеристик елементів ВІС і ймовірність виникнення дефектів як і в реальних елементах схеми. На основі статистичних результатів прискорених випробувань на надійність та встановлення основних механізмів відмови може проводитись корегування і удосконалення елементної бази, конструкції, топології технологічних процесів формування структур ВІС.

За результатами контролю параметрів ТС можна визначати не тільки якість виготовлення ВІС, але і оптимальність режимів роботи обладнання, стабіль-

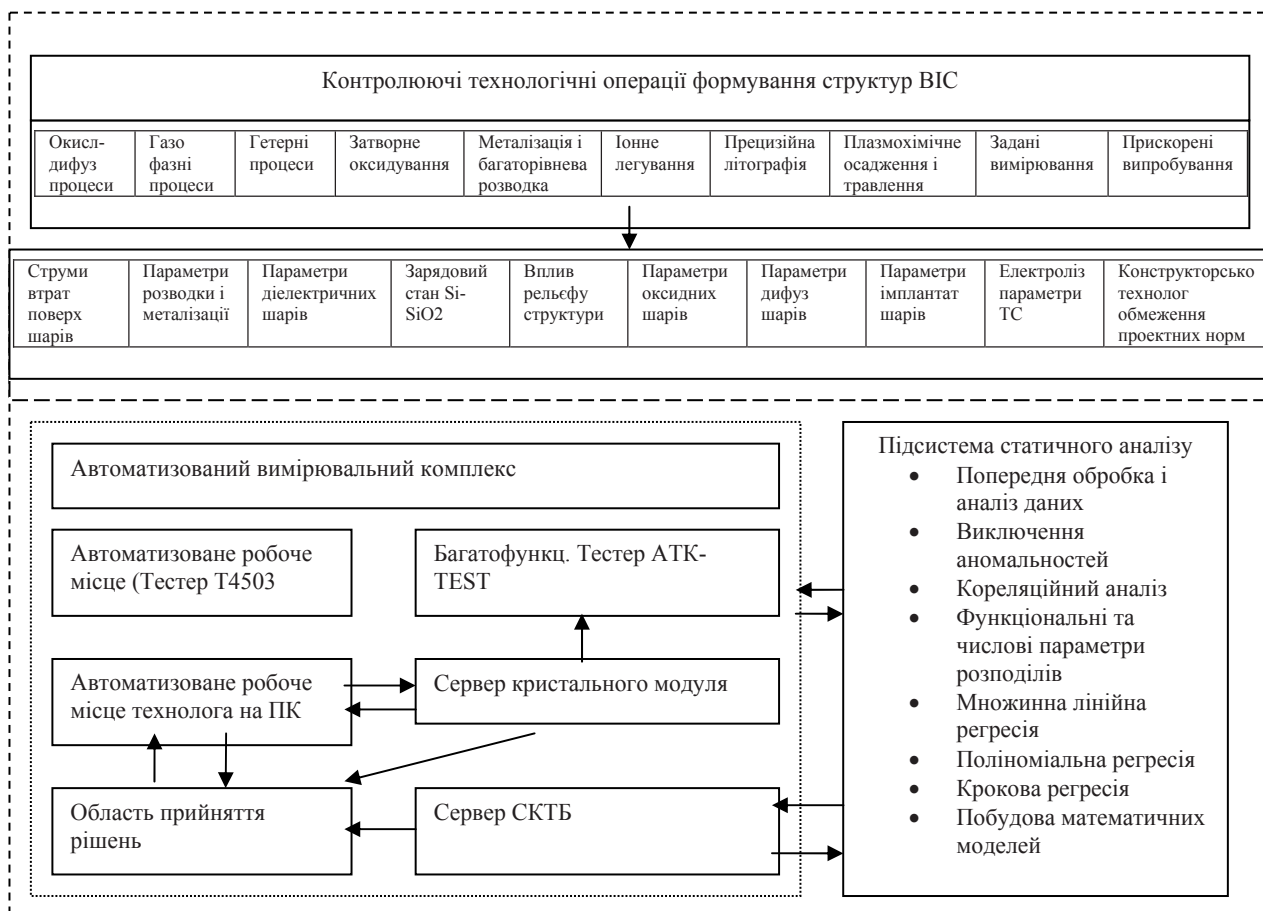


Рисунок 1 Організаційна структура тестового контролю технологічного процесу формування структур ВІС

ність ТО і мікроклімату. Після завершення технологічного циклу ТС також використовують для проведення випробувань на довговічність, кліматичну стабільність і радіаційну стійкість.

Для практичної реалізації вище перерахованих задач пропонується наступна організаційна структура контролю ТП на основі тестера, що керується ПК та пакету прикладних програм по статистичному аналізу (рис.1), яка побудована на основі результатів робіт [3,6,9].

Принципи роботи підсистеми статистичного аналізу в такій організаційній структурі наступні. На етапі міжопераційного і фінішного контролю ТС проводяться вимірювання параметрів ТС в заданій партії пластин із структурами ВІС і формування вихідних статистичних даних в пам'ять ПК. Потім спрацює підсистема статистичного аналізу і проводиться статистична обробка даних з видачею відповідного протоколу, який визначає необхідність корегування режимів технологічних операцій. Для виконання всіх процедур тестового контролю нами використовувались тестери Т-4503 та АУК-TEST та відповідне програмне забезпечення.

Такий автоматизований технологічний контроль з використанням ТС дозволив оперативного керувати технологічними процесами формування структур, що дало змогу вихід придатних збільшити у 2-3 рази, а надійність їх вивести на рівень (3-7) р.т.

3. Класифікація тестових структур субмікронної технології ВІС

ТС можна класифікувати за наступними характеристиками: призначення, тип впливів (електричні, оптичні, радіаційні, магнітні) число контролюючих параметрів, чутливість до окремих етапів ТМ, роздільна здатність літографії і плазмохімії.

За призначенням ТС поділяють на параметричні та функціональні, кожні із яких мають певне число своїх конструктивних, топологічних та схематичних реалізацій (табл.2).

3.1. Параметричні ТС призначені для дослідження фізичних параметрів ТС, які ідентифікують компоненти ВІС таких як геометричні розміри топологічних елементів, питомий поверхневий опір шарів, концентраційні профілі, опір розводки та металізації верхнього рівня, питомий опір силіцидних (поліцидних) контактів. Конструктивно вони можуть реалізовуватись у вигляді різних поверхневих резисторів, зустрічно-штиревих ліній, групових контактів.

3.2. Функціональні ТС призначені для дослідження функціональних властивостей компонентів ВІС або для контролю придатності окремих фрагментів ВІС після завершення технологічного циклу. Конструктивно вони виконуються у вигляді транзисторів різних конфігурацій з різними носіями зарядів, кільцевих генераторів, різних логічних елементів, дифе-

Таблиця 2

Класифікація тестових структур

№ п/п	Основні типи ТС	Призначення ТС
1	2	3
I. Параметричні ТС		
1.	Прості дифузійні резистори	Контроль якості дифузії, імплантації, фотолітографії
2.	Прості тонкоплівкові резистори	Контроль якості тонкоплівкових шарів
3.	Резистивні структури типу грецького хреста	Контроль якості формування провідних шарів
4.	Комбіновані резистивні структури типу хрест-міст	Контроль якості формування провідних шарів і фотолітографії на них
5.	Спеціальні резистивні структури для вимірювання розмірних відхилень	Контроль якості фотолітографії та розмірів тестових елементів
6.	Контактні хрести	Контроль якості формування контактних вікон, контактів і їх вскриття
7.	Ланки контактів типу меандрів	Контроль багаторозмірних контактів
8.	Резистори у вигляді довгих шин, що перетинають сходинок окислів, підшарів	Контроль дефектів фотолітографії, дифузії, імплантації та металізації
9.	МОН-конденсатори над різними областями	Контроль якості під затворного діелектрика, міжшарової ізоляції, зарядового стану Si-SiO ₂
10.	Матриця МОН-конденсаторів	Контроль дефектності і електричної міцності підзатворного діелектрика
11.	Структури для візуального контролю	Контроль дефектів окислення, дифузії, імплантації, фотолітографії, розміру елементів
12.	Спеціальні структури для аналітичного фізико-хімічного аналізу	Контроль концентрацій домішок, термомеханічних напружень, фазового складу шарів, оптичних параметрів
13.	Структури для визначення роздільної здатності фотошаблонів і фотолітографії, точності суміщення	Контроль конструкторсько-технологічних обмежень проектних норм
14.	Структура для контролю стану діелектричних шарів	Контроль зарядового стану поверхні шарів
II. Функціональні ТС		
1.	Біполярні транзистори різного типу та геометрії	Контроль якості основних технологічних операцій біполярної технології
2.	МОН-транзистори різного типу та геометрії	Контроль якості основних технологічних операцій МОН і К-МОН-технологій
3.	p-n-переходи та діоди Шотткі	Контроль генераційно-рекомбінаційних процесів, контроль інжекційних процесів
4.	Матриця МОН-транзисторів, диференціальні пари	Контроль випадкових дефектів, дрейф зарядового стану
5.	Матриця біполярних транзисторів, супер-бета-транзисторів, комплементарна пара, схема Дарлінгтона, струмове дзеркало	Контроль генераційно-рекомбінаційних процесів, контроль інжекційних процесів
6.	Ланка діодів різної геометрії	Контроль якості p-n-переходів, визначення m-фактора
7.	Кільцевий генератор	Контроль функціонування фрагментів ВІС (вузлів, каскадів)
8.	Ланки послідовного і паралельного з'єднання інверторів (схеми І-НЕ, АБО-НЕ), тригери	Швидкодія логічних елементів
9.	Транзистори вихідних каскадів (комплементарні пари)	Підсилювальні та імпульсні параметри
10.	МОН-транзистори з нанометровою товщиною підзатворного діелектрика	Порогова напруга, надпорогові тунельні струми
11.	Резонансно-тунельні діоди та транзистори	Параметри і характеристики
12.	Тестова структура Холла	Параметри та характеристики
13.	МОН-транзистори із поліSi та поліцидним затвором	Порогова напруга і крутизна

ренціальних та підсилювальних каскадів, тригерних схем і виконують роль тестових елементів для контролю рекомбінації та часу життя носіїв заряду, концентраційних профілів, динамічних характеристик.

З точки зору виконаних функцій вирішення задач тестового контролю виконується з використанням оптимальної кількості ТЕ: для визначення параметрів компонентів елементної бази структур ВІС, перевірки правильності визначення проектних норм КТО, аналізу характеристик ТО і ТП, аналізу структурних

дефектів, оцінки електрофізичних та електричних параметрів структур ВІС, оцінки та діагностування надійності.

3.3. ТС для визначення параметрів компонентів елементної бази ВІС використовується для фізико-технологічного моделювання, контролю електрофізичних параметрів (товщина окисла, рівні легування, поверхневий опір, пробивні напруги та струми втрат, густини поверхневих станів, зарядового рівня міжфазної межі), оцінки відтворюваності. Тут прикладами тестових структур є:

-тестові транзистори, на яких проводяться вимірювання порогової напруги, коефіцієнта підсилення, крутизни характеристик, пробивних напруг (рис.2).



Рисунок 2. ТС для оцінки пробивної напруги

Процес визначення параметрів передбачає побудову моделі транзисторів в лінійній області або в області насичення;

-резистори і конденсатори, вимірювання на яких дозволяє визначити характеристики металевих з'єднань: опору, ємності, струму, втрат, напруги пробою (рис.3).



Рисунок 3. ТС конденсатора для операційного підсилювача

-модифікація мостових резистивних схем (грецький хрест, квадратний хрест, скомпенсований квадратний хрест) для оцінки питомого поверхневого опору областей і просторової однорідності легування, провідних і епітаксійних шарів за емпіричною формулою Ван-дер-Пау (ВДП):

$$R_s = (\pi / \ln 2)(\Delta U / I) \quad (1)$$

Дану тестову структуру представляє рис.4.

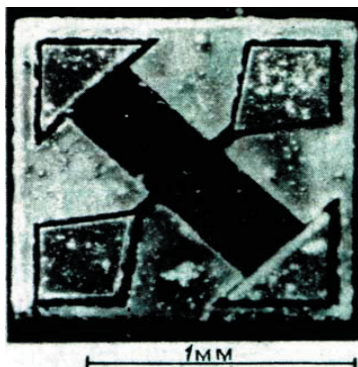
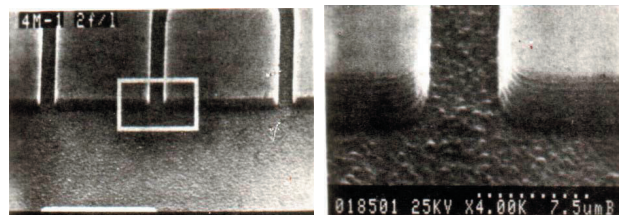


Рисунок 4. Скомпенсований квадратний хрест як ТС для оцінки однорідності дифузійного чи імплантаційного легування

3.4. ТС для перевірки правильності топологічних проектних норм використовують для контролю ширини ліній та перевірки якості суміщення топологічних шарів, а також для оцінки характеристик літографічного обладнання. Прикладами тестових структур цього типу можуть бути:

-хрестоподібні мостикові резистори, за допомогою яких вимірюється фізична ширина елементів і її відхилення від заданих розмірів, що представляє рис.5.



а) б)
Рисунок 5. ТС для оцінки (вимірювання) ширини лінії і зазору між елементами.

-ланки контактів або резисторів з гребінковою структурою, які використовують для вимірювання міжелементних зазорів (рис.6)

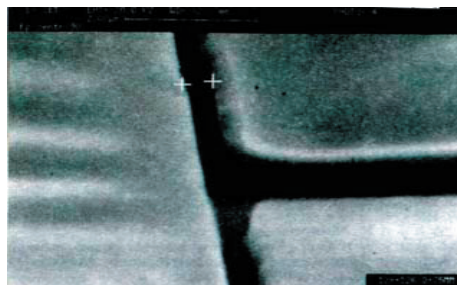


Рисунок 6. Зазор резистивної маски (L=0,3 мкм) субмікронної структури.

-спеціальні фігури для оптичного контролю роздільної здатності проекційної літографії (рис.7)

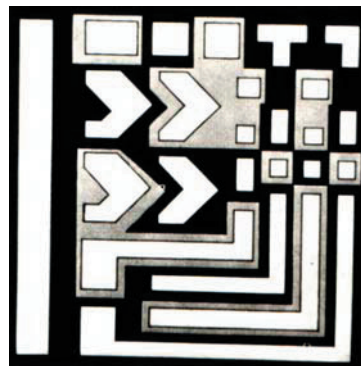


Рисунок 7. ТС для перевірки амплітудно-фазозсувних ПФО проекційної літографії

-якість фотолітографічних процесів є визначальною для отримання параметрів активних елементів і визначається роздільною здатністю фоторезисту та анізотропним проявленням і плазмохімічним травленням (рис.8);

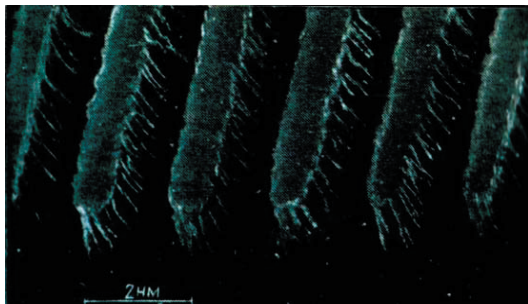


Рисунок 8. Позитивний рельєф в плівці позитивного речисту ФП-051МК, сформований кисневим плазмовим анізотропним проявленням

3.5. ТС для аналізу характеристик ТП використовується для контролю характеристик металевих, дифузійних і полікремнієвих шин, підзатворного діелектрика, міжшарової ізоляції, фотолітографії, дифузії, іонної імплантації, які дозволяють встановити взаємозв'язки між електрофізичними і конструктивними параметрами елементів ВІС та режимами ТО. Прикладами таких структур можуть бути:

- хрестоподібний мостиковий резистор для визначення поверхневого опору та ширини ліній;
- контактні резистори для визначення опору метал-кремній і метал-полікремній (поліцид);
- тестові елементи для оцінки якості вскриття міжшарової ізоляції, формування конформного осадження полікремнію (поліциду) та його окислення (рис.9);

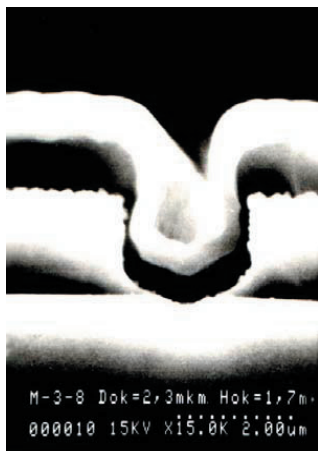


Рисунок 9. ТС для оцінки вскриття міжшарової ізоляції ФСС та формування в ній конформного полі кремнієвого контакту

- МОН-конденсатори для визначення товщини окисла, густини зарядових станів на межі Si-SiO₂, напруги плоских зон та рівня легування напівпровідника;
- тестові діоди різних конфігурацій, на яких вимірюють струми втрат і пробивні напруги;
- резистори спеціальної конструкції для оцінки точності міжшарового суміщення топологічних шарів структури (захований контакт);
- МОН-транзистори, за допомогою яких визначають профілі легування, порогову напругу і її дрейф, електричну міцність підзатворного діелектрика та рухливість носіїв заряду в каналі.

За допомогою ТС відпрацьовуються принципи масштабування для збільшення степені інтеграції та виходу придатних. Ця технологія була нами вперше реалізована на калькуляторних схемах серій с. КМ5 і дозволила за два прийоми масштабування довести вихід придатних структур ВІС до 65-75%, а розмір кристалу довести до рівня 2,8-3,2мм² на 15-ти варіантах калькуляторів.

В загальному вигляді вплив коефіцієнтів масштабування К на характеристики активних елементів і їх з'єднань подані в табл. 3[1].

Таблиця 3

Лінійне масштабування параметрів МОН-транзистора

№ п/п	Параметри	Коефіцієнт масштабування
1.	Розміри (W,L,TOU,xi,Wi,Hi,Li)	K
2.	Напруга живлення Uлж	K
3.	Електричне поле в приладі E	1
4.	Порогова напруга UТ	K
5.	Рівень легування Si-підкладки Np	K-1
6.	Струм живлення I	K
7.	Ємність затвора C	K
8.	Час переключення tE, τ	K
9.	Потужність розсіювання tE, P	K ²
10.	Густина виділяючої потужності P/Σ	K-1
11.	Опір струмопровідних доріжок $R = \rho Li / WiHi$	K-1
12.	Постійна затримки для струмових доріжок	1
13.	Густина струму в з'єднаннях	K-1

Проте, при переході в субмікронний діапазон топологічних розмірів структур ВІС лінійність масштабування порушується. Особливо це відноситься до металеві розводки верхнього рівня, яка відповідає всім вимогам непропорційного масштабування. Ефективність використання методу непропорційного масштабування в порівнянні з прямим приведена в табл. 4.

3.6. ТС для аналізу структурних дефектів використовується для виявлення випадкових фізичних дефектів на площі структури кристалу. Прикладом таких ТС можуть бути: меандроподібні резистори для аналізу суцільності металевих доріжок на рельєфній поверхні, гребінкові резистори для визначення закорочень і обривів та зазорів між провідниками, МОН-конденсатори і транзистори. На рис. 10 а і б подано структуру алюмінієвого сплаву АК-1(а) та силіциду (б), які використовують для металізації верхнього рівня розводки структур ВІС.

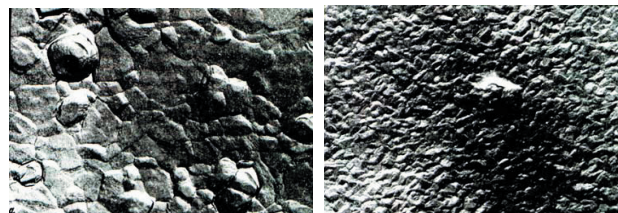


Рисунок 10. а) структура алюмінієвого сплаву АК-1; б) структура силіциду TiSi2.

Для контролю стійкості структур ВІС до параметричних відмов, оцінка неоднорідності розподілу дефектів по площі кристалу визначається за допомогою диференціальних ТС (ДТС). Для цього використовується будь-яка диференціальна пара транзисторів: біполярних чи польових.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика методів масштабування

Основні параметри		Межі зміни параметрів	
		Лінійне масштабування	Непропорційне масштабування
Елементи конструкції ВІС	-площа кристалу -довжина каналу	Зменшується в K^2 раз Зменшується в K раз	Зменшується в K^2 раз Зменшується вибірково в K раз Не змінюється
	-порогова напруга -розміри елементів	Зменшується в K раз Зменшується в K раз	Зменшується вибірково в K раз Практично не змінюється
	-товщина підзатворного діелектрика -опір комутаційних шин	Зменшується в K раз	Зменшується вибірково в K раз Не змінюється
	-концентрація домішки	Не змінюється	
Параметри структур ВІС	-елементна база	Нова схемотехніка	Практично не змінюється Збільшується в N раз
	-функціональна складність -продуктивність -напруга живлення -логічні рівні «і» -швидкодія -споживана потужність -завадостійкість -відношення сигнал/шум -застосування в стандартних засобах цифрової та аналогової техніки	Збільшується в N раз Збільшується в K^3 раз Зменшується в K раз Зменшується в K раз Збільшується в K раз Зменшується в K^2 раз Зменшується Зменшується Виключається	Збільшується в $4K$ раз Не змінюється Не змінюється Збільшується в $2K$ раз Зменшується в $2K$ раз Збільшується Збільшується Зберігається

3.7. ТС для оцінки електричних параметрів структур ВІС використовують для отримання інформації про придатність в статичному та динамічному режимах вузлів і блоків, які характеризують функціональну придатність ВІС та технологічність процесу формування структур в цілому.

Прикладами для таких ТС можуть бути: інвертори і логічні елементи, які використовуються для визначення порогу переключення, коефіцієнта підсилення, споживаної потужності; кільцеві генератори – для вимірювання частоти переключення та часу затримки, які визначають швидкодію; пристрої пам'яті для контролю випадкових дефектів на площі кристалу. Звичайно, як ТС вибирають найбільш важливий функціональний вузол (пристрій), що визначає швидкодію, завадостійкість, температурну стабільність.

3.8. ТС для аналізу надійності на стадії формування структур ВІС використовують для прогнозування кількісних показників надійності ВІС та встановлення основних механізмів відмов. Інформацію отримують шляхом фіксації і аналізу зміни параметрів ТС під дією таких впливів, як підвищена температура, напруга живлення, споживані струми, вологість та термоцикли і радіаційне опромінення (-частинками). Прикладами таких ТС можуть бути: гребінкові або меандрові резистори для аналізу корозійних та електроміграційних процесів; супер-бета-транзистори, які визначають рівень генераційно-рекомбінаційних процесів через m -фактор: МОН-транзистори, сформовані на різних товщинах діелектриків, які визначають тунельні та надпорогові струми; ТЕ для контролю стану поверхні діелектриків; ТЕ для визначення зарядового стану Si-SiO_2 на основі зсуву імпульсних CV -характеристик; ТЕ для визначення рухливості носіїв заряду в каналі МОН-транзисторів; вихідні каскади (вузли), які визначають тепловий опір ВІС; ТС для визначення

електричної міцності підзатворного діелектрика, що визначає радіаційну стійкість до -опромінення.

4. Тестові кристали як елементи статичного контролю і моделювання технологічних процесів формування структур ВІС

Тестовий контроль в колишньому СРСР вперше був реалізований на ВАТ «Родон» в 1986р. при проектуванні та виготовленні структур ІС, які виготовлялись за біполярною, p -МОН, r -МОН, K -МОН-технологіями. Кожен вид технології мав свій набір тестових компонентів, які об'єднувались в тестові кристали. Це дало змогу підвищити вихід придатних в 2-3 рази і досягти рівня 65-80%. Для організації та координації робіт по тестовому контролю у ВАТ «Родон» при відділі головного технолога організована галузева лабораторія тестового контролю, яка і визначала основні засади в електронній галузі колишнього СРСР.

Тестові кристали формувались на робочих пластинах паралельно з кристалами ВІС і включали в себе різні типи і конструкції ТС, які мають багато спільного з компонентами структур ВІС.

Вибір складу ТК визначає розробку набору ТС та об'єднання їх в групи за призначенням. Для контролю більшості параметрів ВІС та стандартних ТО розроблено множини типів ТС, тому визначення складу ТК можна звести до вибору оптимального набору ТС із ряду бібліотечних [1,3,9].

Топологію ТК слід розробляти, використовуючи модульний принцип конструювання. При цьому під модулем розуміють деяку область ТК, де є група ТС цільового призначення для вирішення однієї конкретної задачі.

Тестові кристали можуть бути універсальними (УТК), тобто включати повний набір ТС для контролю

технологічного процесу, або спеціалізовані (СТК) за визначеним типом параметрів технологічного процесу формування структур ВІС[3]. Спеціалізовані ТК можуть входити до складу УТК в ролі певних блоків. Так в УТК блочного типу NBS-16 для контролю К-МОН-технології входять 8 СТК, в тому числі один для контролю фізичних і оптичних досліджень (см.табл.5). Загальний розмір кристалу УТК К-МОН складає 6,35х6,35мм і має 143 контактні площадки та 28 типів тестових структур.

Даний тестовий кристал в різних варіаціях був нами використаний для тестового контролю структур ВІС серій КР1830ВЕ48, КР1830ВМ48, К564, К1564, К1554. В тестовій лабораторії було розроблено більше 10 тестових кристалів під різні технологічні процеси. Особливу увагу заслуговує кристал NBS-12, який містить 640 контактних площадок і 140 різних тестових структур, електрично-ізолюваних одна від одної, які розміщуються в так званих модулях, яких може бути 10-12. Це робить тестовий кристал гнучким до різних варіантів конструкцій і технологій структур ВІС.

При проектуванні тестових кристалів необхідно враховувати конструктивні вимоги і обмеження з точки зору автоматизації тестового контролю і ефективного використання ТС різного призначення, а саме:

1. Конструкція ТК повинна використовувати попарно-рядне розміщення контактних площадок. Це дозволяє згорнути ТС в бібліотечні елементи, які зберігаються в пам'яті сервера.

2. При розробці конструкцій структур кристалів ВІС і ТК необхідно використовувати одні і ті ж проектні норми (ТКО), щоб геометрія ТС була максимально наближена до геометрії елементної бази структури ВІС.

3. Конструкція ТС повинна бути такою, щоб тільки їх критичні елементи були чутливі до проектних топологічних норм.

4. В конструкції ТК необхідно виключати підключення різних ТС до загальних провідних шин. Попарно-рядкове розміщення контактних площадок якраз і дозволяє їх розмістити так, щоб не було впливу одна на одну.

5. Для вимірювання поверхневого опору і ширини ліній необхідно використовувати 4-х контактні резистори. Схема контактування Кельвіна при вимірюванні резисторів і передбачає використання чотири контактних резистори, в яких струм пропускається через одну пару контактів, а напруга знімається з другої пари. Це забезпечує дуже високу точність вимірювань.

6. При проектуванні ТК необхідно використовувати елементи, які запобігають виникненню паразитних поверхневих інверсійних каналів. В цьому випадку використовують процес легування, який запобігає інвертуванню поверхні.

7. При конструюванні ТК необхідно враховувати фактори, які можуть приводити до деградації ТС зовнішніми чи внутрішніми впливами.

8. Конструкція ТК повинна бути налаштована під контроль на пластині за допомогою багатофункціонального автоматичного тестера типу АUK-TEST.

9. Тестовий кристал повинен бути організований таким чином, щоб всі ТС могли бути виміряні одночасно без переналадки зондової головки. Самі зонди не повинні вносити похибки в результати вимірювань.

10. Тестові кристали повинні мати модульну структуру таку, щоб за допомогою топологічної інформації, яка знаходиться в пам'яті ЕОМ, можна було б легко

скомпонувати новий тестовий кристал під модернізований технологічний процес.

11. ТС повинні бути сконструйовані таким чином, щоб вони займали мінімальну площу на пластині, а самі ТК розміщувались на пластині методом конверта.

12. Вимірювання і статистична обробка даних повинна бути простою і здійснюватись в реальному масштабі часу з наростанням за місяць (розподіл, середнє значення параметра, дисперсія, дефектність і вихід придатних).

Тестовий кристал модульного типу (рис.11) містить 8 модулів (М1-М8) з однаковим розміщенням контактних площадок для контролю технологічного процесу виготовлення п-канальних МОН-структур (розмір кристалу 5,0х4,65мм², розмір модуля 1,1х2,1мм²).

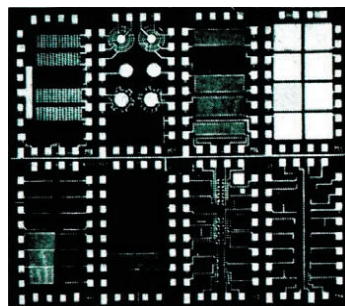


Рисунок 11. Тестовий кристал для моделювання п-канальної МОН-технології формування структур ВІС

Призначення кожного із модулів: М1 – контроль струмів втрат між провідними шарами в горизонтальній площині і контроль поверхневого опору провідних шарів; М2 – контроль поверхневого опору провідних шин; М3 – візуальний та електричний контроль відходу геометричних розмірів і роз суміщення технологічних шарів в процесі фотолітографічних операцій; М4 – контроль електрофізичних параметрів підкладки та МОН-транзисторів різного типу і конфігурацій; М5 – контроль зарядового стану діелектриків і меж розділу технологічних шарів, контроль дефектності діелектричних шарів на великій площі та великому периметрі; М6 – контроль дефектності діелектричних шарів на рельєфі шляхом вимірювання напруг між двома провідними шарами у вертикальній площині; М7 – контроль якості р-п-переходів за m-фактором та шляхом вимірювання пробивної напруги на великій площі і периметрі, контроль утворення «білої смуги» шляхом контролю порогової напруги і струмів втрат двох з'єднаних транзисторів з однаковим співвідношенням L ; М8 – контроль опору потрібних контактів, захищеного контакту, контакту Al-poli-Si; Al – дифузійні області, Al-TiN-Si; контроль часу життя носіїв заряду для оцінки ефективності гетерних областей. Для цього використовується 61 тестова структура. Дуже високу ефективність показав цей модуль при формуванні п-канальних схем пам'яті серій КР132РУ6,8,9.

Таким чином, задача конструювання тестового кристалу в загальному вигляді означає оптимізацію вибору номенклатури та числа інформаційних ТС, які дозволяють за результатами вимірювань електрофізичних, геометричних, структурних параметрів (функціональних шарів і елементів) проводити кількісну оцінку рівня всіх ТО даного маршруту формування структур ВІС. В табл.6 подані електрофізичні, геометричні і структурні параметри ТС та методи їх вимірювань (см.табл.6).

Таблиця 5

УТК для контролю К-МОН технологічного процесу

№, п/п	Позначення ТС	Призначення ТС і основні технологічні параметри
1СТК Структури для вимірювання опору і ширини ліній		
1	NRES, PRES	Опір і ширина p+ і n+-областей, шин полі-Si і р-кишені;
2	POLYPRES, POLYNRES	Опір квадратних площадок на p+ і n+-областях
3	POLYRES, PWELLRES-0,1	Для розрахунку числа квадратів по ширині і опору шин полі кремнію; р-кишені для вимірювання опору двох квадратних контактних площадок;
4	ALRES	Опір квадрата і ефективна ширина алюмінієвих шин;
5	CONTRES ALP-1,2,3	Опір контакту між алюмінієм і р+-шаром, розміри конт. вікон (КВ): 1x1, 3x3, 5x5, 7x7 мкм
6	CONTRESAL-R-1,2,3	Опір контакту між алюмінієм і n+-шаром, розміри конт. вікон (КВ): 1x1, 3x3, 5x5, 7x7 мкм
2СТК Структури для вимірювання опору контактів		
1	CONTRESAL POLY-1,2,3	Опір контакту між алюмінієм і полі-Si, розміри конт. вікон: 0,5x0,5, 3x3, 1x1 мкм
2	CONTRESAL POLY-P-1,2,3	Опір контакту між алюмінієм і полі-Si в р-МОН транзисторах. розміри конт. вікон: 0,5x0,5, 3x3, 1x1 мкм
3	CONTRESAL POLY-N-1,2,3	Опір контакту між алюмінієм і полі-Si в n-МОН транзисторах. розміри конт. вікон: 0,5x0,5, 3x3, 1x1 мкм
4	CONTRESAL PWELL	Опір контакту між алюмінієм і р-кишенею. Розміри конт. вікон: 0,5x0,5, 3x3, 1x1 мкм
5	ROWAL-N-105,103	Опір контакту між алюмінієм і n+-областю р-кишені (6 рядів конт. вікон 0,5x0,5, 3x3, 1x1 мкм)
6	ROWAL-P-105,103	Опір між алюмінієм і р+-областю на Si-підкладці (6 рядів конт. вікон 0,5x0,5, 1x1 мкм)
7	ROWAL-POLY-N-105,103	Опір між Al і n+полі-Si (6 рядів конт. вікон 0,5x0,5, 1x1 мкм)
3СТК Структури для вимірювання ємності та струмів втрат		
1	CAP-31	Струм втрат р-n-переходу і конденсаторної структури з окислом затвора і р-кишенею
2	CAP-32	Струм втрат конденсаторної структури між полі-Si окислом затвора і Si-підкладкою
3	CAP-33	Ємності n+p-переходів і вікна під n+p- і n-p- час життя неосновних носіїв заряду
4	CAP-34	Ємності p+n-переходів і вікна під p+n- час життя неосновних носіїв заряду.
5	MILLER CAP-N,P	Ємності n- і р-МОН-транзисторів
6	LEAKAL P	Струм втрат між Al і р-областю в р-МОН транзисторі;
7	LEAKAL SUB	Струм втрат між Al і n-областю в р-МОН транзисторі;
8	CAP-39	Ємність між Al і нелегованим каналом МОН-транзистора;
9	CAP-310	Ємність між Al і легованим полі-Si n+-типу
10	CAP-311	Ємність між Al і легованим полі-Si p+-типу
4СТК Структури для вимірювання плівок і відстані між легованими областями		
1	STEPCOV POLY-1,2,3	Опір полі-Si шин шириною 1,3 і 5 мкм;
2	STEPCOV ALL-1,2,3	Опір полі-Si шин на Al шириною 1,3 мкм;
3	SEEP	Відстань між р-кишенею і р+-областю ззовні кишені;
4	SERN	Відстань між р-кишенею і р+-областю всередині кишені;
5	SOI	Опір полі-Si на окислі SiO ₂
5СТК Транзисторні структури		
1	TRS-5111,51111	n-МОН-транзистори ($\omega/L=20/20, 5/5, 1/1$);
2	TRS-5211,52111	p-МОН-транзистори ($\omega/L=20/20, 5/5, 1/1$);
3	TRS-55	p- і n-МОН-транзистори з мінімальними проектними нормами $\omega/L=15/5, 5/1, 1/1$
4	TRS-54	p- і n-МОН-транзистори з охоронними кільцями $\omega/L=15/5, 5/1, 1/1$
5	TRS-56,510	Три p- і n-МОН-транзистори $\omega/L=15/80, 10/20, 1/80$
6	TRS-57,511	Три p- і n-МОН-транзистори $\omega/L=1/1, 4/4, 12/4$
7	TRS-508,512	Три p- і n-МОН-транзистори $\omega/L=80/1, 80/5, 80/10$
8	TRS-513 – 516	По два уніполярних обернені p- і n-МОН-транзистори $\omega/L=40/40, 40/10$;
9	TRS-517,518,ПНПЗ	Біполярні n-p-n- (два типи) і p+-n+p-транзистори
10	TRS-519,520	p- і n-МОН-транзистори $\omega/L=3/3, 1/1$,
6СТК Діодні структури		
1	ZENER-1,2	Зенерівські діоди на n+ і p+-областях кишені (ширина перекриття 2 і 1 мкм);
2	ZENER-3	Зенерівські діоди на областях n+ і полі-Si
3	TUNNEL-1	Тунельний діод на під затворному діелектрику

Продолжение таблицы 5

7СТК Динамічні структури		
1	611NV-1,2,3,4,5	p- і n-канальні інвертори $\omega/L=10/5, 5/5, 1/1$.
2	62RING	15-розрядний кільцевий генератор $\omega/L=15/5$ з двома буферними каскадами $\omega/L=27/5, 5/1$
3	63RING	15-розрядний кільцевий генератор $\omega/L=10/5$ з двома буферними каскадами $\omega/L=40/5, 8/1$;
4	64RING	15-розрядний кільцевий генератор $\omega/L=5/5$ з двома буферними каскадами $\omega/L=14/5, 36/5$;
5	65RING	15-розрядний кільцевий генератор $\omega/L=15/1$ з двома буферними каскадами $\omega/L=40/5, 8/1$;
6	3NOR, 3NAND	3-х входові логічні елементи НЕ, АБО-НН;
7	69TG	Передаючий ключ з двома p- і n-MOH-транзисторами $\omega/L=3/1$
8	613LU-1,2,3	Три p- і n-MOH-транзистори для вимірювання ефекту затухання
9	DYND-FF	Динамічний Д-триггер для динамічних і електричних характеристик
10	CCD-1,2,3	Дво та трифазні ПЗС-структури з 38 передаючими затворами для аналізу поверхневих станів межі Si-SiO ₂ ;
8СТК Структури для фізичних та оптичних радіаційних вимірювань		
1	COVMOK PO, COV NKO	Для пошарового суміщення шарів: окисел-полі-Si, контакти- полі-Si, Al- полі-Si р-кишення-p ⁺ -маска.
2	PERMISSION	Визначення роздільної здатності процесу літографії для 8,10,14-шарів
3	NEGREG-1 – 9	Мітки вирівнювання типу квадратів при збільшенні 1,2,3,4,5,6,7,8,9;
4	CONTACTS-1-18	Контактне вікно від 2х25 до 0,25х0,25 для визначення роздільної здатності
5	PROFILE	Інвертор для вимірювання технологічного профілю
6	ALTCN-1 – 5	Додаткові мітки вимірювання типу хрест-хрест по восьми, десяти шарам
7	MEANDR-1,2,3	Опір полі-Si, p ⁻ і p ⁺ -шарів типу меандра або (TAN)
8	LFET	p ⁻ -p ⁺ -p ⁺ - структура в кишені p-типу
9	CAP-411	Ємність для вимірювання концентраційного профілю за CV-характеристикою;
10	ELIPSOMETR-1,2,3	Структури для вимірювання показників заломлення SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Si _x O _y N _z

Таблиця 6

Параметри ТС і методи їх вимірювань

№, п/п	Параметри ТС	Діапазон вимірювань	Методи вимірювань
1	Електрофізичні параметри		
1.1	Шаровий опір дифузійних та імплантаційних областей, $\rho_s, \text{Ом}/\square$	1 – 2000	Горизонтальний, Ван-дер-Поу
1.2	Концентрація хімічного елемента в плівці $N(x), \text{см}^{-3}$	1016 – 1021	Оже-спектроскопія, вторинна мас-спектроскопія
1.3	Глибина залягання p-n-переходів, мкм	0,1 – 10	Пошарове травлення, імпульсні CV-характеристики, РЕМ, шар-шліф; інфрачервона спектроскопія
1.4	Концентраційний профіль легування $N_d(x), \text{см}^{-3}$	1014 – 1022	Опір розтікання, імпульсні CV-характеристики, вторинна мас-спектроскопія
1.5	Початковий струм втрат p-n-переходу, $i_0, \text{мкА}$	0,01 – 0,1	Вольтамперні характеристики
1.6	Струм втрат при заданій напрузі зміщення, $i_p, \text{мкА}$	0,001 – 0,1	Вольтамперні характеристики
1.7	Об'ємна і поверхнева складові струму втрат $i_{y0}, i_{yp}, \text{мкА}$	0,001 – 0,1	Вольтамперні характеристики
1.8	Напруга пробією p-n-переходу, $U_{пр}, \text{В}$	30 – 200	Вольтамперні характеристики
1.9	Початкова питома ємність p-n-переходу $C_{pn}(0), \text{пФ}/\text{мкм}^2$	0,1 – 3	Вольтфарадні характеристики
2.0	Динамічний опір p-n-переходу $r_d, \text{кОм}$	1,0 – 20	Вольтамперні характеристики
2.1	Шаровий опір полі-Si, $\rho_{\text{Sink}}, \text{Ом}/\square$	10 – 50	Чотиризондовий, ВДП
2.2	Питома ємність тонкого окисла $C_0, \text{Ф}/\text{см}^2$	(1-4)10 ⁻⁸	Вольтфарадні характеристики
2.3	Товщина тонкого окислу $d, \text{нм}$	10 – 1000	Вольтфарадні характеристики, еліпсометрія
2.4	Напруга пробією тонкого окислу $U_{пр}, \text{В}$	40 – 200	Вольтамперні характеристики
2.5	Густина початкового струму тонкого окисла $i_{y0}, \text{мкА}/\text{см}^2$	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁴	Вольтамперні характеристики
2.6	Потенціал плоских зон Si-SiO ₂ , $U_{FB}, \text{В}$	0,1 – 5	Вольтфарадні характеристики

Продолжение таблицы 6

2.7	Приведена густина вмонтованого заряду в $\text{SiO}_2, N_{\text{sd}}, \text{cm}^{-2}$	109 – 1013	Імпульсні вольтфарадні характеристики, динамічні ВАХ
2.8	Енергетичний спектр поверхневих станів на межі $\text{Si-SiO}_2, N_{\text{ss}}(E), \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$	1010 – 1013	Квазістатичні вольтфарадні характеристики
2.9	Швидкість поверхневої рекомбінації $S, \text{cm}/\text{c}$	102 – 106	Імпульсні вольтфарадні характеристики
3.0	Рухливість носіїв в каналі $M_n(p), \text{cm}^2/\text{Vs}$	50 – 1000	Ефект Холла
3.1	Питома ємність між шарового діелектрика $C_{\text{oo}}, \Phi/\text{cm}^2$	(0,5-1)10-8	Вольтфарадні характеристики
3.2	Шаровий опір металізації $\rho_{\text{sm}}, \text{Om}/\square$	0,01 – 10	Резистивні методи
3.3	Перехідний опір контакту, $R_{\text{к}}, \text{Om}$	1 – 100	Вольтамперні характеристики
3.4	Порогова напруга активного МОН-транзистора, $U_{\text{т}}, \text{V}$	0,2 – 5	Вольтамперні характеристики, Імпульсні вольтфарадні характеристики
3.5	Початковий струм транзистора (витік-стік) $i_{\text{т0}}, \text{мкА}$	0,01 – 1	Вольтамперні характеристики
3.6	Напруга відсічки транзистора із вмонтованим каналом, $U_{\text{відс}}, \text{V}$	0,1 – 1	Вольтамперні характеристики
3.7	Питома крутизна транзистора, $\beta, \text{мкА}/\text{V}^2$	5 – 50	Вольтамперні характеристики
3.8	Напруга змикання транзистора $U_{\text{зм}}, \text{V}$	10 – 100	Вольтамперні характеристики
3.9	Тунельний струм тонкого окисла $i_{\text{т}}, \text{мкА}$	0,001 – 0,1	Вольтамперні характеристики
4.0	Порогова напруга паразитного МОН-транзистора, $U_{\text{тн}}, \text{V}$	>10	Вольтамперні характеристики
Геометричні параметри			
2.1	Ширина провідної шини, $W, \text{мкм}$	1 – 10	Візуальний РЕМ, резистивний
2.2	Відхилення від розміру, $\Delta W, \text{мкм}$	0,01 – 1	Модифікований ВДП
2.3	Величина бічної розгонки дифузії dp^+	0,01 – 0,5	РЕМ, модифікований ВДП
2.4	Величина роз суміщення при ФЛ по x і по y	0,1 – 0,25	РЕМ, модифікований ВДП резистивний
2.5	Відстань між сусідніми шипами $l, \text{мкм}$	1 – 5	РЕМ, візуальний
2.6	Довжина каналу МОН-транзистора $L_{\text{к}}, \text{мкм}$	10 нм – 100 0,1 – 50	РЕМ, модифікований ВДП
2.7	Товщина шару, $t, \text{мкм}$ Напівпровідникового Металевого Діелектричного	0,1 – 20 0,01 – 1,5 0,001 – 2	Еліпсометрія, інтерферометрія, Фур'є-спектрометрія
2.8	Дефектність шару, см^{-2}	0,05 – 5	Дифрактометрія
2.9	Розмір зерна, нм	10 – 1000	РЕМ
3.0	Висота сходинок, спейсерів, мкм	0,01 – 1,5	Інтерферометрія
Структурні параметри			
3.1	Густина дефектів ФЛ даного типу $N_{\text{дт}}, \text{см}^{-2}$	>0,01	Візуальні, автоматизований аналізатор зображення
3.2	Число обривів провідних шин на сходинах рельєфу, $K_{\text{обр}}$	>1	вимірювання опору шин
3.3	Густина проколів в $\text{SiO}_2, N_{\text{пр}}, \text{см}^{-2}$	>10	Вимірювання початкової провідності SiO_2
3.4	Імовірність появи дефектного контакту	>10	Вимірювання опору контактних ланок
3.5	Прогин Si -пластин, мкм	1 – 5	Візуальний, інтерферометрія
3.6	Відхилення від площинності, мкм	± 10	інтерферометрія
3.7	Дислокації, кластери, преципітати	<10	Травлення та РЕМ
3.8	Моно або полі кристалічність	-	Рентгеноструктурний аналіз
3.9	Хіллокоутворення в металізації	<0,2	Рентгеноструктурний аналіз
4.0	Атомарно чиста поверхня	<10нм	Оже-спектрометрія

Висновки

1. Тестовий контроль технологічного процесу формування структур ВІС є аналітичним інструментом в управлінні суб- та нанотехнологією.

2. Розроблені пакети ПК для біполярної, n-МОН, р-МОН, К-МОН та суміщеної Ві-К-Д-МОН технологій формування структур ВІС.

3. ТК слід проектувати за певними правилами, які викладенні в статті.

4. Моделювання технологічного процесу формування структур ВІС ведеться на основі статистичних методів тестового контролю з використанням цільової функції виходу придатних.

Література

- Новосядлий С.П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС. Івано-Франківськ: Сімик – 200-3р – 351с.

2. Буденников А.Н., Садовников Н.Д. Проблемы физико-технологического моделирования субмикронных элементов СБИС// Зарубежная радиоэлектроника – 1987 - №3 – с18 – 24.
3. Новосядлий С.П. Технологічна САПР на основі тестових структур//Фізика і хімія твердого тіла – 2002 – Т3, №1 с179-189.
4. Герасимова А.С. Использование тестовых структур в производстве интегральных схем // Зарубежная радиоэлектроника – 1988 - №10 – с53-62.
5. C.Alcorn, D.Dvorak, W.Handad Kerf Test Structure Designs for Proces and Device Characterization//Solid St. Technology – 1985, №4- p229-235.
6. Новосядлий С.П. Математичне моделювання технологічних процесів формування структур ВІС та електрофізичне діагностування їх надійності // Вісник ДУ «Львівська політехніка» комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика.- 1999 - №373 – с58-62.
7. Новосядлий С.П. Електрофізичне діагностування надійності структур ВІС // Вісник ДУ «Львівська політехніка» №367 Радіоелектроніка та телекомунікації – 1999 – с.187-197.
8. Новосядлий С.П. Аналітичні фізико-хімічні методи аналізу і контролю в системній технології ВІС // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 1999 -№3 с.30-38.
9. Новосядлий С.П. Тестовий контроль електрофізичних параметрів структур в системній технології високого рівня // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 1999 - №2 – с. 58-64.
10. Новосядлий С.П., Запихляк Р.І., Мельник П.І. Прогнозування надійності структур ВІС за допомогою імпульсних нерівноважних вольт-фарадних характеристик // Фізика і хімія твердого тіла – 2005 – Т6 №2 с.153-160.
11. Мельник П.І., Новосядлий С.П., Бережанський В.П., Вівчарук В.М. Спектрометрія в субмікронній технології ВІС//Фізика і хімія твердого тіла – 2007 №4, т8 – с791-801.