

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування факультету)
Кафедра інформаційної безпеки та наноелектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

_____ магістр _____

(ступінь вищої освіти)

на тему Аналіз технологічного процесу виробництва інтегральних мікросхем з

_____ метою підвищення їх надійності _____

(назва теми)

Виконав: студент ІІ курсу, групи БК-314м

Спеціальності 176 Мікро- та наносистемна техніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої

_____ СКИДАН О.І. _____

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник _____ СНИЖНОЙ Г.В. _____

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____ КУРБАЦЬКИЙ В.П. _____

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

| Розділ | ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------|-------------------------------------------|----------------|---------------------------|
| | | завдання видав | прийняв виконане завдання |
| 1-3 | СНІЖНОЙ Г.В., професор кафедри ІБтаН | 10.09.25 | 09.12.25 |
| Нормо-контроль | КОРОЛЬКОВ Р.Ю., доцент кафедри ІБтаН | 11.09.25 | 10.12.25 |

7. Дата видачі завдання «10» вересня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проєкту (роботи) | Строк виконання етапів проєкту (роботи) | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1 | Збір та аналіз інформації про технологічний процес виробництва інтегральних мікросхем. | 10.09.25-28.09.25 | виконано |
| 2 | Аналіз аспектів ефективності управління технологічним процесом. | 03.10.25-11.11.25 | виконано |
| 3 | Дослідження температурної нестабільності параметрів ІМС | 12.11.25-16.11.25 | виконано |
| 4 | Аналіз причин виходу зі строю ІМС | 18.11.25-20.11.25 | виконано |
| 5 | Оформлення звіту | 25.11.25-05.12.25 | виконано |

Студент(ка)

_____ Олександр СКИДАН _____

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Геннадій СНІЖНОЙ _____

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 60 с., 6 табл., 9 рис., 1 дод., 22 джерела.

ІНТЕГРАЛЬНА МІКРОСХЕМА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ, БРАК, МЕТАЛІЗАЦІЯ, ТЕРМОТРЕНУВАННЯ

Мета роботи: дослідження основних етапів та технологічних операцій виробництва інтегрованих мікросхем та визначити параметри, які дозволять підвищити надійність інтегральних мікросхем на етапі металізації.

Об'єкт та предмет дослідження: об'єктом дослідження є інтегральні мікросхеми; предметом дослідження є технологічний процес виготовлення інтегральних мікросхем.

Методи дослідження: експериментально-аналітичний, статистичний.

Результати: виявлено, що причиною відбракування ІМС було зменшення статичного коефіцієнту підсилення вихідного транзистора.

Рекомендації щодо впровадження: робота має прикладний характер, її результати можуть бути використані для оптимізації технологічного процесу виробництва інтегральних мікросхем. Виявлено, що негативні контакти кристалу з активними речовинами відбуваються після відмивки пластин після процесу травлення і на етапі збірки. Якість металізації залежить від складу атмосфери повітря і від якості виконання ключових технологічних операцій.

Практична цінність: визначені рекомендації по удосконаленню контролю та системи технологічного забезпечення якості інтегральних мікросхем.

Апробація результатів роботи: за результатами роботи планується підготувати наукову статтю.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 60 pages, 6 tables, 9 figures, 1 app., 22 sources.

INTEGRAL MICROSCRIPT, TECHNOLOGICAL PROCESS, STATISTICAL METHODS, DEFECT, METALLIZATION, ALUMINUM, THERMOTRAINING

The purpose of the work: study the main stages and technological operations of the development of integrated microcircuits and identify parameters that can improve the reliability of integrated circuits at the metallization stage.

Object and subject of research: object of investigation is integrated microcircuits; The subject of investigation is the technological process of manufacturing integrated circuits.

Research methods: experimental-analytical, statistical.

Results: reason for the rejection of the integrated circuit was a change in the static gain of the output transistor, obtained.

Recommendations for implementation: the work is of an applied nature, its results can be used to optimize the technological process of manufacturing integrated circuits. It was found that negative contacts of the crystal with active substances occur after washing the plates after the etching process and at the assembly stage. The quality of metallization depends on the composition of the air atmosphere and on the quality of key technological operations.

Practical value: recommendations for improving the control and technological quality assurance system of integrated circuits are determined.

Approbation of the results of the work: it is planned to prepare a scientific article based on the results of the work.

ЗМІСТ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | С. |
| Вступ | 8 |
| 1. Методи забезпечення надійності виробів мікроелектроніки | 10 |
| 1.1 Сучасні відомості про виробництво інтегральних мікросхем | 10 |
| 1.2 Аналіз основних етапів технології виготовлення інтегральних мікросхем | 19 |
| 1.3 Інноваційні технології виробництва інтегральних схем | 24 |
| 2. Технологічні методи оцінки та підвищення надійності ІМС | 27 |
| 2.1 Метод формування бічних виступів та використання клейового шару у вигляді гнучкої плівки | 29 |
| 2.2 Дослідження вплив температури на надійність з'єднання Al з кристалом | 27 |
| 2.3 Фізико-хімічні процеси під час металізації інтегральних мікросхем .. | 37 |
| 2.4 Визначення надійності ІМС методом відриву кристалів від основи корпусу | 40 |
| 2.5 Вплив вологості на інтенсивність відмов ІМС | 43 |
| 2.6 Контроль якості технологічних процесів виробництва ІМС з метою підвищення їх надійності | 48 |
| Висновки | 54 |
| Перелік джерел посилань | 57 |
| Додаток А. Схема технологічного процесу виготовлення інтегральних мікросхем | 60 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВЕТ – виробни електронної техніки;

ГІМ – гібридна інтегральна мікросхем;

ІК – інфрачервона сушка;

ІМС – інтегральна мікросхема;

КЗ – коротке замкнення;

МОН – метал-оксид-напівпровідник;

НІМ – напівпровідникова інтегральна мікросхем;

НПП – напівпровідникові прилади;

ТП – технологічний процес;

УЗЗ – ультразвукове зварювання;

УЗКС – ультразвукове зварювання коливальної системи;

УФ – ультрафіолетова обробка.

ВСТУП

Міністерство цифрової трансформації України у 2023 році запропонувало стратегію цифрового розвитку інновацій. Серед представлених пунктів було будівництво заводу з виробництва чіпів, яке мало вийти на виробничі потужності до 2030 року. 14 січня 2025 року Кабінет міністрів України затвердив цю стратегію.

Без напівпровідникових технологій неможливі багато інноваційних рішень, серед яких штучний інтелект, сховища даних типу датацентрів, мобільні пристрої, концепція мережі взаємопов'язаних фізичних об'єктів Інтернет речей (IoT, Internet of Things).

Усі розвинені держави наполегливо працює над створенням своєї 100% електроніки. Але це досить складний процес. І різниця у технологіях, що використовуються, величезна. Так, якщо Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) виготовляє 4-нанометрові чіпи, то китайські виробники використовують застарілі 14 нанометрові технології.

Слід зазначити, що точної інформації про кількість вироблених у світі мікросхем немає. Наведені в інтернеті цифри дуже великі. Тільки з Китаю обсяг експорту електроніки в 2023-2024 роках склав на суму більш ніж 700 мільярдів доларів. Однак можна відзначити, що здебільшого виробництво контролюється великими азіатськими гігантами (TSMC, Samsung) та американськими компаніями (Intel, Nvidia). При цьому попит перевищує пропозицію, як результат маємо дефіцит мікросхем та зростання цін. Лідером із виробництва мікросхем є Тайвань. У Тайвані виробляється 1/5 всіх напівпровідникових приладів (мікросхем). У грошах виходить величезна сума, оскільки тайванські мікрочіпи найдорожчі через використання передових технологій.

Особливо важливою є роль інтегральних мікросхем для оборонної галузі України. Зокрема, для виробництва дронів, систем РЕБ та управління вогнем танків та самохідних установок.

І що важливо, створення власного виробництва напівпровідникових приладів, а саме інтегральних мікросхем є елементом незалежності України.

Інтегровані мікросхеми (ІМС), це електронні схеми, в яких мільйони й навіть мільярди транзисторів, резисторів та інших елементів сформовані на одному кристалі напівпровідника, зазвичай кремнію. Таким чином ІМС є схемою, що складається з великої кількості резисторів, конденсаторів і транзисторів, з'єднаних між собою. Технологія їх виробництва є однією з найскладніших та найдорожчих у сучасній промисловості, але саме вона лежить в основі комп'ютерів, смартфонів, автомобільної електроніки, телекомунікаційного обладнання тощо.

Найважливішим компонентом сучасних ІМС є напівпровідники. Такі ІМС використовуються в різних галузях, включаючи телекомунікації, охорону здоров'я, обчислювальну техніку і транспорт. У 2021 році мікроелектронна промисловість виробила рекордні 1,15 трильйона напівпровідникових приладів для задоволення світового попиту. У зв'язку з появою проривних технологій і зростанням світового попиту на електронні пристрої очікується, що напівпровідникова промисловість, а саме виробництво мікросхем на їх основі, стрімко зростатиме в найближчі роки. Основна особливість ІМС – мініатюризація. Завдяки інтеграції декількох компонентів на одному кристалі цифрові пристрої компактні, що значно покращує характеристики портативних цифрових пристроїв, так стаціонарних систем.

Мета цієї дипломної роботи - надати огляд основних етапів та технологічних операцій виробництва інтегрованих мікросхем та визначити параметри, які дозволять підвищити надійність ІМС.

1 МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИРОБІВ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Сучасні відомості про виробництво інтегральних мікросхем

Виробництво інтегральних мікросхем здійснюється груповим методом, що передбачає одночасну обробку великої кількості напівпровідникових пластин. Такий підхід забезпечує високу економічну ефективність за рахунок значного виходу придатних кристалів з однієї пластини та зниження собівартості одиниці продукції. Відсутність внутрішніх монтажних з'єднань істотно підвищує загальну надійність мікросхем, зменшуючи ймовірність відмов.

Компактне компонування елементів інтегральних схем дозволяє досягати високих швидкодійних характеристик, зниженого енергоспоживання та стабільної якості сигналу. Уніфікація параметрів елементів у межах одного кристала сприяє підвищенню точності та відтворюваності електричних характеристик.

Функціональність мікросхем продовжує розвиватися, підвищуючи швидкість роботи та знижуючи енергоспоживання. Передові технології виробництва, а також менші розміри транзисторів та сучасна архітектура дозволяють розробляти електробезпечні та високопродуктивні мікросхеми, що відповідають вимогам сучасних корпусів.

Базова концепція виготовлення інтегральних мікросхем включає послідовність етапів: системне проектування, виробництво пластин, тестування, корпусування та фінальний контроль. Повний виробничий цикл може тривати декілька місяців і включає десятки складних технологічних операцій (рис. 1.1).

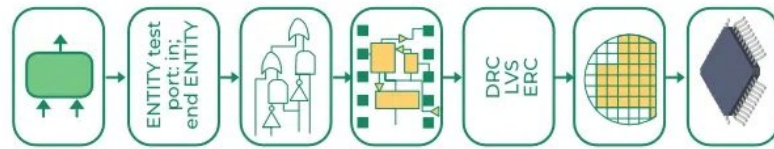


Рисунок 1.1 - Базова концепція виготовлення інтегральних мікросхем [1]

Типові мікросхеми мають різні характеристики. Напівпровідниковий кристал може містити мільйони транзисторів. Весь процес виготовлення може тривати кілька місяців. Виробництво ІМС включає такі етапи:

- ~ підготовка кремнієвої пластини;
- ~ іонна імплантація;
- ~ дифузія;
- ~ фотолітографія;
- ~ окислення;
- ~ хімічне осадження з парової фази;
- ~ металізація;
- ~ пакування.

Вихідний матеріал для ІМС є кремній та кремнієві пластини. Базою більшості ІМС є кремній високої чистоти (99,9999...%). Його отримують з діоксиду кремнію (піску), далі очищують і відрощують монокристалічний злиток (буля) за методом Чохральського (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 - Монокристалічний злиток кремнію, який був отриманий за методом Чохральського

Злиток має форму циліндра діаметром 150-300 мм. Злиток розрізають прецизійною пилкою на тонкі диски - кремнієві пластини (wafer) товщиною приблизно 0,5-1 мм (рис. 1.3).

Після різання їх шліфують і полірують до дзеркальної поверхні. Саме на цій поверхні і будуть формуватися всі елементи інтегрованих схем. Полірування пластини видаляє забруднення та подряпини, створюючи хорошу основу для виготовлення мікросхем. Цей етап є критично важливим, оскільки навіть незначне забруднення може призвести до дефектів виробу. Кремнієві пластини є основою для ІМС. Розміри кремнієвих пластин за датою випуску наведено в табл. 1.1.

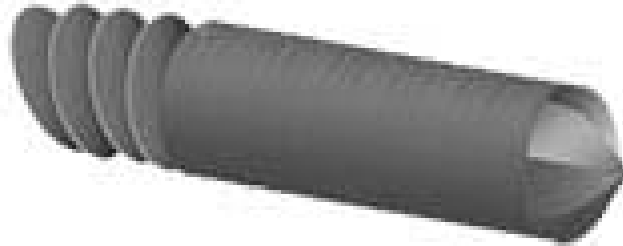


Рисунок 1.3 - Монокристалічний злиток кремнію після різання на пластини

Таблиця 1.1 - Розміри кремнієвих пластин

| № | Рік випуску | Розміри кремнієвих пластин, мм |
|---|-------------|--------------------------------|
| 1 | 1965 | 50 |
| 2 | 1975 | 100 |
| 3 | 1981 | 125 |
| 4 | 1987 | 150 |
| 5 | 1992 | 200 |
| 6 | 2000 | 300 |
| 7 | зараз | 450 |

Формування структури лежить на поверхні ІМС відбувається в такий спосіб. На кремнієвій пластині виготовляються десятки та сотні чіпів з ідентичними характеристиками. На рис. 1.4 показана кремнієва пластина, яка містить набір кристалів, з яких будуть отримані ІМС.

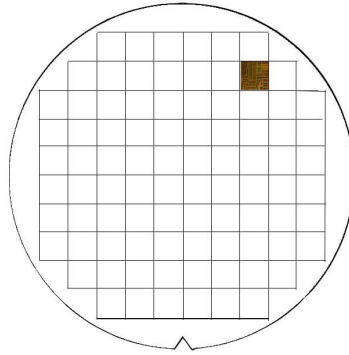
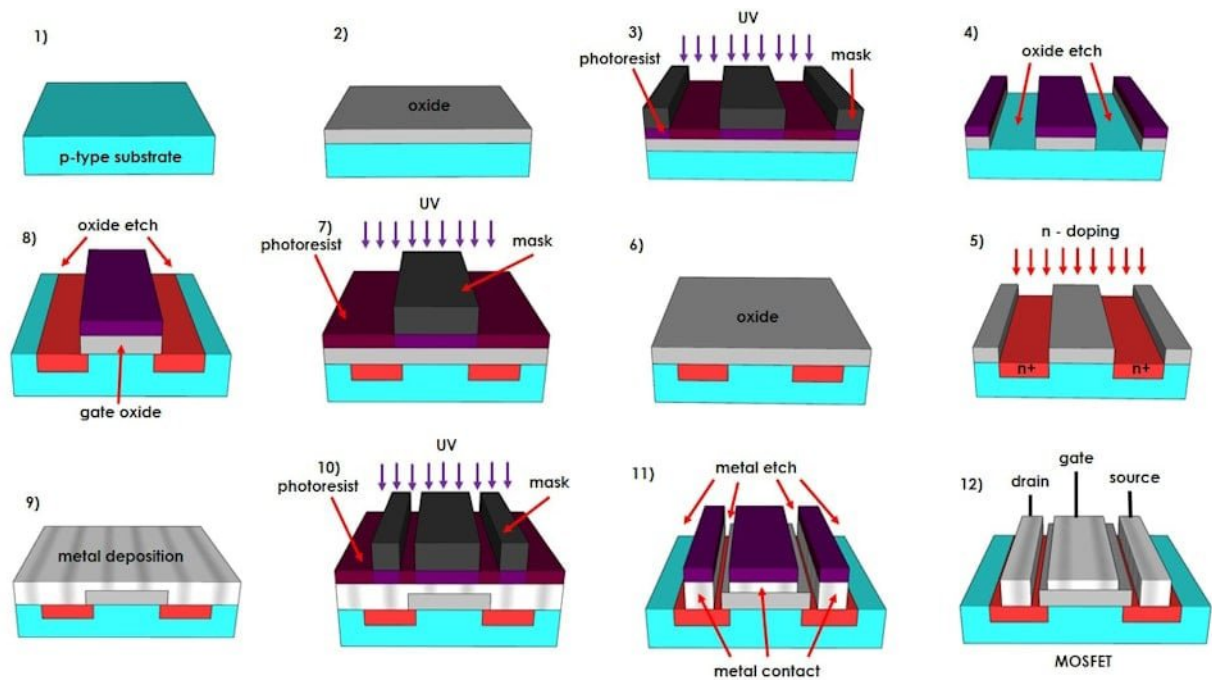


Рисунок 1.4 - Пластина, що містить набір кристалів [2]

Основні технологічні операції, які багаторазово повторюються у процеси виготовлення ІМС, а саме над кремнієвими пластинами, в різних комбінаціях:

- ~ термічне окиснення;
- ~ дифузія та іонна імплантація (легування);
- ~ осадження тонких плівок (CVD, PVD);
- ~ фотолітографія;
- ~ травлення (etching);
- ~ металізація;
- ~ пасивація та захисні шари.

Схематичне зображення основних етапів обробки при виготовленні напівпровідникового приладу наведено на рис. 1.4. Термічне окиснення (thermal oxidation) - це процес вирощування шару діоксиду кремнію SiO_2 на поверхні пластини при високій температурі (800 – 1100 °C) у кисневій або паровій атмосфері.



- 1 - пластина-підкладка р-типу, 2 - термічне окислення,
 3 - фотолітографія, 4 - травлення оксиду, 5 - імплантація іонів n+,
 6 - термічне окислення, 7 - осадження металу,
 10 - фотолітографія з металевим контактом,
 11 - травлення металу, 12 - готовий пристрій.

Рисунок 1.5 - Основні етапи обробки при виготовленні напівпровідникового пристрою [3]

Шар SiO_2 відіграє роль ізолятора, маски для дифузії іонів, а також діелектрика в транзисторних структурах МОН (метал-оксид-напівпровідник).

Для створення провідникових, діелектричних та бар'єрних шарів (осадження тонких плівок) застосовують методи:

~ CVD (Chemical Vapor Deposition) - хімічне осадження з газової фази (силіциди, діелектрики, полікремній);

~ PVD (Physical Vapor Deposition), зокрема sputtering - напилення металів (Al, Cu);

~ електрохімічне осадження (plating) для мідних інтерконектів у сучасних технологіях.

Щоб надати кремнію потрібних електричних властивостей, вводять домішки бор, фосфор, миш'як (процес легування: дифузія та іонна імплантація):

- ~ дифузія (домішка дифундує в кремній із поверхні при високій температурі);

- ~ іонна імплантація (іони прискорюють електричним полем і «вистрілюють» у кристал, задаючи точний профіль концентрації).

Після імплантації потрібен відпал (anneal) для відновлення кристалічної решітки.

Фотолітографія - центральний процес формування рисунку на пластині (рис. 1.6).

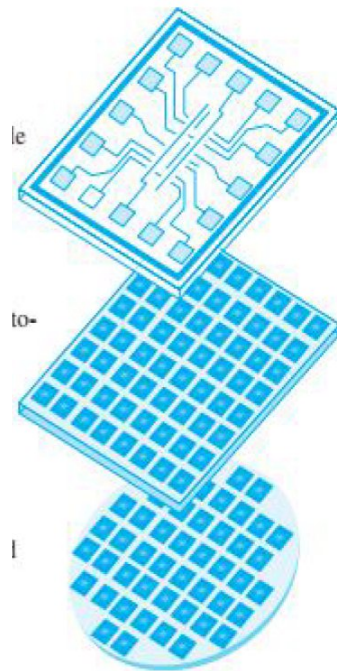


Рисунок 1.6 - Формування рисунку на пластині в процесі фотолітографії [4]

Типова послідовність процесу фотолітографії:

- ~ нанесення шару фоторезисту на поверхню пластини (spin coating);
- ~ вирівнювання пластини та експонування через фотошаблон (reticle) ультрафіолетовим випромінюванням;

~ проявлення (developing): освітлені/неосвітлені ділянки змиваються в залежності від типу фоторезисту (позитивний/негативний);

~ отриманий рисунок у фоторезисті служить маскою для подальшого травлення або легування.

У літографічній машині світ проходить через маску із зображенням схем, друкованих малюнків на пластині, покритих фоторезистивною плівкою. У процесі літографії можливе порушення світла і виникнення дефектів, тому необхідний строгий контроль якості.

Чим менша довжина хвилі світла та досконаліша оптика, тим менший розмір мінімальних структур (нанометрові технологічні норми).

Після фотолітографії небажані ділянки матеріалу видаляють. Застосовують:

~ мокре травлення (wet etching), хімічний розчин роз'їдає відкриті ділянки;

~ сухе травлення (dry etching, плазмове), плазма або іонний потік вибірково видаляють матеріал, забезпечуючи анізотропію (прямі стінки).

Травлення дозволяє сформувати вікна в оксиді, канали транзисторів, контактні отвори тощо.

Щоб з'єднати транзистори в схеми, на пластині формують металеві шари. Історично використовувався алюміній, у сучасних технологіях - мідь з бар'єрними прошарками. Процес включає: напилення металу, фотолітографію, травлення або «дамаскінський» процес із заповненням траншей міддю та подальшим поліруванням (CMP - Chemical Mechanical Planarization).

Фінальний крок виготовлення пластин (wafer fabrication) - нанесення захисного діелектричного шару (пасивація), який ізолює чутливі структури від вологи та механічних ушкоджень (рис. 1.7). У потрібних місцях відкриваються контактні площадки для майбутнього з'єднання з виводами корпусу.



Рисунок 1.7 - Кремнієва пластина зі сформованими кристалами [6]

Після завершення всіх шарів пластину тестують: спеціальна станція з мікрозондами підключається до контактних площадок кожного кристала. Несправні чипи позначаються або запам'ятовуються в базі даних.

Пластину розрізають алмазною пилкою або лазерним різакон уздовж доріжок-роздільників (scribe lines) (рис. 1.8).

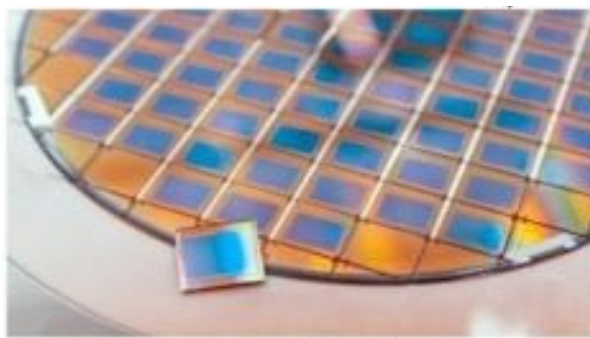


Рисунок 1.8 - Вигляд пластини, яку розрізали уздовж доріжок-роздільників (scribe lines) [6]

Окремий кристал (die) монтують на підкладку корпусу (lead frame або органічний субстрат) за допомогою клею чи припою.

Після встановлення кристала на підкладку виконується підключення виводів - електричне з'єднання контактних площадок кристала із зовнішніми виводами мікросхеми. Це роблять одним із двох основних способів.

1. Дротовий бондинг (wire bonding). Тонкі золоті, алюмінієві або мідні дроти ультразвуковим чи термокомпресійним методом приварюються між контактами кристала та корпусу. Метод дешевий і поширений у більшості мікросхем.

2. Flip-chip (перекинуте кріплення). Кристал повертають активною стороною вниз і встановлюють на кулькові контакти (bump). Такий варіант забезпечує менші індуктивності, кращу тепловіддачу й підходить для високошвидкісних чипів.

Після з'єднання виводів кристал закривають корпусом:

- ~ заливають епоксидним компаундом (molding);
- ~ запаюють у металокерамічний корпус.

На завершальному етапі здійснюється фінальне тестування та сортування виробів, кожна ІМС перевіряється на працездатність і відповідність характеристикам, маркується і пакується для продажу (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 - Готові ІМС перед пакуванням

1.2 Аналіз основних етапів технології виготовлення інтегральних мікросхем

Основні конструктивні елементи мікросхем наступні. Будь-яка інтегральна мікросхема складається з структури, зовнішнього корпусу та засобів складання, тобто деталей, що забезпечують з'єднання структури з корпусом та зовнішніми електричними висновками [7-9].

Структура є функціональною основою мікросхеми. Вона містить усі елементи (і компоненти чи кристали), міжелементні з'єднання та контактні майданчики. Застосовувати структури виготовлення апаратури не можна: вони крихкі, практично неможливо виконати монтаж структур і електричні приєднання, з їхньої параметри сильно впливають зовнішні впливи.

Корпус захищає структуру від механічних навантажень та впливів навколишнього середовища під час експлуатації мікросхеми, а також забезпечує зручний та надійний монтаж мікросхеми в апаратуру. Цю роль може виконувати не тільки спеціально виготовлений корпус (корпусні мікросхеми), а також склад, що герметизує, в який укладають структури (бескорпусні мікросхеми).

Засоби складання - це припойні прокладки, дротяні висновки, вивідні рамки (стрічки) та ін. Вони дозволяють міцно зміцнювати структури та приєднувати їх контактні майданчики до зовнішніх електричних висновків, що служать включення мікросхем в електронну апаратуру.

Класифікація мікросхем. За конструктивно-технологічним виконанням структур інтегральні мікросхеми поділяють на три групи: напівпровідникові, гібридні, інші (плівкові, вакуумні, керамічні та ін.).

Напівпровідникової (НІМ) називають мікросхему, всі елементи та міжелементні з'єднання якої виконані в обсязі та на поверхні напівпровідника; сформована на основі біполярних чи МОН-транзисторів [10].

Гібридною (ГІМ) називають мікросхему, що містить крім елементів, що являють собою нероздільне від діелектричної підкладки конструктивне ціле, компоненти та (або) кристали. Компонент ІМС, це частина ІМС, що реалізує функції будь-якого електрорадіоелементу, але яка, на відміну від елемента, може бути виділена як самостійний виріб з точки зору вимог до випробувань, приймання, постачання та експлуатації. Кристал - це частина напівпровідникової пластини, в обсязі та на поверхні якої сформовані елементи, міжелементні з'єднання та контактні майданчики однієї ГІМС.

Плівковою називають мікросхему, всі елементи, міжелементні з'єднання та контактні майданчики якої виконані у вигляді плівок. Приватними випадками ГІМ та плівкових ІМС є тонко-і товстоплівкові ГІМ або відповідно тонко-або товстоплівкові ІМС. Приватним випадком ГІМ є багатокристалні ІМС.

Залежно від зовнішнього конструктивного оформлення розрізняють корпусні, безкорпусні та комбіновані ІМС. Основним матеріалом для безкорпусної герметизації є пластмаса. Герметизовані в пластмасу ІМС мають точні зовнішню форму та габаритні розміри, мабуть, тому ці ІМ часто називають мікросхемами у пластмасових корпусах. При комбінованій герметизації арматура зі структурою поміщається у спеціально виготовлену кришку, і потім весь вільний простір усередині кришки заповнюється матеріалом, що герметизує [11-13].

Основні етапи технології виготовлення мікросхем. Вітчизняна та зарубіжна промисловість випускають різноманітні за функціональним призначенням та конструктивним оформленням мікросхеми. Разом з цим у технології виготовлення будь-якої мікросхеми можна виділити основні етапи, загальні для всіх мікросхем: виготовлення та очищення пластин або підкладок, виготовлення структур мікросхем, складання, випробування та вимірювання, заключні операції. Якщо мікросхему герметизують в корпус, то підготовчими для збирання є процеси виготовлення деталей і вузлів корпусів, для безкорпусних мікросхем перед виконанням збирання проводять процеси

підготовки герметизуючих складів і виготовлення арматури для приєднання структур (рамки, стрічки).

Процес виготовлення будь-якої мікросхеми супроводжується контрольними операціями та завершується випробуваннями. Після випробувань та вимірювання параметрів мікросхеми, що задовольняють вимогам, проходять заключні операції (забарвлення, лакування, маркування, упаковка), надходять на склад готової продукції для передачі замовнику - виробнику електронної апаратури.

Виготовлення пластин, підкладок. Напівпровідникові пластини та діелектричні підкладки є основними заготовками для виготовлення структур мікросхем, відповідно напівпровідникових та гібридних або плівкових. Напівпровідникові пластини застосовують також виготовлення навісних активних компонентів і кристалів для гібридних мікросхем. На діелектричних підкладках виготовляють пасивну частину структур гібридних мікросхем, плівкові мікросхеми. В даний час для промислового виготовлення більшості напівпровідникових мікросхем застосовують кремній. Це тим, що кремній проти також добре вивченим і освоєним напівпровідникової промисловістю германієм має низку переваг. Кремній має велику ширину забороненої зони, що забезпечує ширший інтервал робочих температур, менші зворотні струми переходів і меншу залежність від температури, а також дозволяє виготовляти резистори з великими значеннями опорів, що слабо залежать від струму витоку. Кремнієві переходи мають більшу пробивну напругу, їх пробою настає при великих температурах. Щільність кремнію приблизно 2 рази менше щільності германію.

Структура та властивості напівпровідників визначають параметри та характеристики мікросхем. Відповідно до вимог до параметрів мікросхем вибирають напівпровідниковий матеріал певної марки та певної кристалографічної орієнтації.

Для гібридних та плівкових мікросхем застосовують підкладки зі скла, ситалів, фотоситалів, керамік. Також застосовуються гнучкі полімерні

підкладки, переважно з поліїміду, а також металеві підкладки з діелектричним покриттям. Крім цього, застосовують моно-кристалічні діелектричні підкладки із сапфіру.

Виготовлення пластин та підкладок включає: механічну обробку напівпровідникових або діелектричних матеріалів та очищення поверхні отриманих заготовок.

Механічна обробка напівпровідників та діелектриків утруднена їх високими твердістю та крихкістю. Використовувати звичайні методи механічної обробки, що застосовуються в металообробній промисловості, такі, як прокатка, штампування, вирубка, не можна. Для виготовлення пластин і підкладок з монокристалічних злитків і з листових заготовок застосовують метод абразивної обробки, тобто обробки твердішим, але менш крихким, ніж оброблювана поверхня, матеріалом.

У монокристалічних зливків до початку абразивної обробки перевіряють кристалографічну орієнтацію, так як обладнання для вирощування злитків не забезпечує точного збігу геометричної осі зливка із заданим кристалографічним напрямком.

Очищення пластин, підкладок після абразивної обробки є обов'язковим, оскільки на їх поверхнях залишаються забруднення, які неприпустимі в подальшому технологічному процесі. Видалення забруднень до необхідного рівня чистоти є складним завданням, оскільки джерелами забруднень можуть бути самі технологічні обробки та навколишнє середовище. Саме тому очищення поверхні пластин і підкладок виконують кілька разів, як у процесі абразивної обробки при їх виготовленні, так і після, тобто безпосередньо перед операціями виготовлення структур.

У процесі механічної обробки та перед виготовленням структур очищення пластин та підкладок у промисловому виробництві в даний час виконують у різних рідких складах: органічних розчинниках, воді, сумішах на основі кислот, лугів, сильних окислювачів. Сухе очищення є фінішним і, як правило, поєднане з наступними операціями виготовлення структур.

Виготовлення структур. Цей етап полягає у формуванні елементів, міжелементних з'єднань і контактних майданчиків відповідно до топологічних креслень і вертикальних розрізів структур, тобто в отриманні елементів заданої конфігурації, розмірів, взаємного розташування в горизонтальній площині (поверхні) пластин або підкладок і заданих розмірів у вертикальному напрямку (товщин). Відповідно до цього всі методи виготовлення структур можна розділити на три групи: методи формування топології, методи отримання плівок, методи легування пластин та нарощування напівпровідникових шарів. Методи останньої групи стосуються лише процесів отримання напівпровідникових структур. Структури мікросхем виготовляють лише груповим методом. Одночасній обробці більшості операцій піддається партія пластин чи підкладок, і кожної з них формується не одна, а безліч структур.

Складання мікросхем. Загально прийнято під збиранням мати на увазі завершальний процес з'єднання деталей і складальних одиниць (вузлів), в результаті якого виходить готовий виріб. Для збирання корпусних ІМС паралельно з виготовленням структур виготовляють деталі і вузли корпусів, у ряді випадків - додаткову арматуру, наприклад, вивідні рамки, висновки на стрічкових носіях та ін. Складання ІМС включає під'єднання - монтаж структур до основ корпусів, вивідних рамок або додаткових підкладок, монтаж навісних кристалів, компонентів до плат, приєднання електродних висновків до контактних майданчиків та зовнішніх висновків ІМС, герметизацію. Начіпні кристали та компоненти виготовляють зазвичай в окремих процесах і постачають у вигляді комплектуючих виробів.

Випробування та вимірювання. Для відбраковування ІМ, що містять приховані дефекти після герметизації, проводять технологічні випробування та вимірювання параметрів. Технологічні випробування поділяються на кліматичні, механічні та електричні. При кліматичних випробуваннях ІМ перевіряють на термоциклювання, волого-, тепло- та холодостійкість. За допомогою механічних випробувань на удар та віброміцність перевіряють

механічну міцність конструкції та внутрішньосхемних сполук ІМ. У процесі електричних випробувань проводиться струмове тренування та перевірка ІМ на стабільність, а також вимірювання параметрів ІМ.

Заключні операції. До заключних операцій належать фарбування, лакування, гальванічні покриття, маркування, підготовка висновків для приєднання до апаратури, упаковка. Маркування, що містить умовне позначення ІМ, позначення першого висновку, рік і місяць випуску, товарний знак підприємства та тавро відділу технічного контролю, має бути на кожній мікросхемі, що випускається. Запаковані мікросхеми надходять складу готової продукції.

1.3 Інноваційні технології виробництва інтегральних схем

Сучасний розвиток мікроелектроніки характеризується стрімким переходом до інноваційних технологій, спрямованих на підвищення щільності інтеграції, зменшення габаритних розмірів та покращення електричних і теплових характеристик інтегральних схем. Ці тенденції обумовлені зростаючими вимогами до продуктивності, енергоефективності та функціональної складності електронних пристроїв.

Наразі в галузі мікроелектроніки спостерігаються тенденції переходу до інноваційних технологій, що забезпечують технологічну трансформацію кристалообробної промисловості, інноваційні мікросхеми та системи в одному корпусі, що поєднують різні процеси упаковки. У мікроелектроніці переважають дві технології складання кристалів у корпуси або багатокристалічні модулі: технологія дротяного з'єднання (wire bonding) та технологія фліп-чип (flip-chip).

Технологія flip-chip є сучасною альтернативою дротяному з'єднанню та забезпечує суттєве скорочення довжини міжз'єднань, зниження паразитних

індуктивностей і покращення тепловідведення. Завдяки можливості матричного розташування контактів ця технологія дозволяє значно збільшити кількість вхідних і вихідних з'єднань, що є важливим для багатofункціональних мікросхем.

Перспективним напрямом розвитку є створення багатокристалльних модулів та систем у корпусі (System-in-Package, SiP). Такі рішення дозволяють поєднувати в одному виробі кристали, виготовлені за різними технологіями, що спрощує інтеграцію складних електронних систем. Подальшим розвитком цієї концепції є технологія Package-on-Package (PoP), яка забезпечує вертикальну інтеграцію декількох корпусів та ефективне використання площі друкованої плати.

Перевага надається технології бондингу (bonding), яка базується на з'єднанні проводів корпусу з контактами, розташованими на краю кристала. Ця технологія перевірена, має розвинену інфраструктуру, високий рівень якості та певний відсоток придатних для використання кристалів. Однак цей метод упаковки має ряд недоліків, які пов'язані з тим, що ефект зварювання може призвести до прихованих дефектів у складних та крихких кристалах, а операція зварювання є послідовною процедурою, що знижує продуктивність праці. Крім того, неможливо зварювати контакти в робочій зоні кристала, що різко зменшує кількість вхідних/вихідних з'єднань на кристалі. Ці недоліки усуваються при використанні корпусів, виготовлених на основі технології фліп-хіп. У цьому випадку корпус забезпечує контакт з будь-якою точкою кристала та може мінімізувати перешкоди сигналу. Однією з переваг технології flip-chip також є можливість скріплення кристалів матричним розташуванням контактів. Серед проблем цієї технології – складність бази перемикача (бази) та низькі термомеханічні характеристики під час термоцикування. Тому наразі розробники використовують ці два методи упаковки (дротове з'єднання та flip-chip) для різних одно- та багатокристалльних збірок. Аналіз показав перспективи розробки гібридних технологічних рішень для багатокристалльних упаковок, які поєднують основні

методи дротяного з'єднання та монтажу flip-chip на одній підкладці. Гібридна технологія для систем у корпусі «SiP» дозволить використовувати кристали, виготовлені різними постачальниками для різних методів складання, в одному виробі. Основний принцип технології «PoP» («Package on Package») полягає в наступному: створення єдиного корпусу, що дозволяє з'єднувати кілька корпусів в один стек за допомогою класичного процесу поверхневого монтажу. Такі корпуси можуть вмістити будь-які кварцові резонатори: процесорні, пам'яті, цифрові та аналогові, включаючи системи на кристалі. Комбінуючи резонатори та використовуючи стандартні шинні з'єднання, можна отримати модулі з різною функціональністю. Ця технологія наразі є основною для виробництва високоінтегрованих рішень для електроніки та активно використовується такими компаніями, як APPLE, SAMSUNG та QUALCOMM.

Інноваційні технології виробництва інтегральних схем також включають застосування нових матеріалів, удосконалених методів літографії та багат шарових металізаційних систем. У сукупності ці підходи сприяють підвищенню надійності, продуктивності та довговічності мікросхем, що є визначальним чинником для розвитку сучасної електроніки.

2. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ІМС

2.1 Метод формування бічних виступів та використання клейового шару у вигляді гнучкої плівки

Проблему підвищення надійності та розширення функціональності 3D-багаточіпового модуля на друкованій платі (РСВ) можна вирішити за рахунок вищої щільності упаковки та точності складання, захисту гнучкої схеми від механічних та кліматичних впливів під час виробництва та експлуатації, а також покращених теплових умов та масштабованості щодо кількості та типу використовуваних мікрочіпів. Процес виготовлення цього модуля, який включає створення бічних виступів на гнучкій схемі з встановленими мікрочіпами, передбачає симетричне розташування двох монтажних виступів з контактними площадками для багаточіпового модуля на протилежних краях гнучкої схеми. Ці бічні виступи, які містять секції з'єднання та кріплення з однієї або обох сторін гнучкої схеми, розташовані перпендикулярно до центру схеми та співвісно вздовж тих самих країв. Обидві сторони гнучкої схеми, за винятком контактних площадок, покриті суцільним корозійностійким матеріалом. Модуль збирається послідовно у трьох вимірах. Бічні виступи з вбудованими мікрочіпами укладаються співвісно та скріплюються з центром гнучкої друкованої плати за допомогою клею. Центральна секція гнучкої друкованої плати (ГДП) потім складається, боки мікрочіпів з'єднуються без деформації, а монтажні виступи ГДП розташовуються на двох протилежних сторонах основи зібраного 3D-багаточіпового модуля. Для покращення терморегуляції 3D-багаточіпового модуля, перехідні отвори вбудовані в бічні виступи в центрі монтажних областей, в центральну секцію гнучкої друкованої плати в точках монтажу бічних виступів та між монтажними виступами гнучкої друкованої плати. Під час складання 3D-багаточіпового

модуля перехідні отвори укладаються співвісно, а потім герметизуються клеєм для забезпечення ефективного розсіювання тепла.

Цей технічний результат досягається завдяки використанню гнучкої плівкової основи з клейовим шаром, встановленої на жорсткій рамі з магнітними тримачами. Механічна стійкість досягається шляхом фіксації плівки до вакуумного столу машини для стоншування та натягу плівки за допомогою магнітних тримачів. Корпус виконаний у вигляді магазину з розпірними пластинами, між якими розташовані підкладки, утворюючи стопку підкладок. Бічні стінки складаються з напрямних кронштейнів, які виконують роль напрямних для друкованих пластин. Обмежувачі обмежують горизонтальне переміщення пластин та підкладок. Корпус має відкидну кришку з затискними гвинтами для кріплення верхньої друкованої пластини, а нижня друкована пластина має пружинне навантаження. Корпус інтегральної схеми містить керамічну основу з багатшаровою провідною структурою та матрицю колон зі ступінчастим отвором у центрі для розміщення інтегральної схеми. Ступінчастий отвір заглушений, а до його верхньої сходинки прикріплений обідок. Матриця виводів розташована на задній частині монтажної області, і кожен вивід складається з низькотемпературного паяного з'єднання, мідного спірального армованого паяного з'єднання або циліндричної мікропружини, виготовленої з берилієвої міді.

2.2 Дослідження впливу температури на надійність з'єднання алюмінієвого дроту з кристалом

Внутрішнє складання інтегральних мікросхем є одним із найбільш відповідальних етапів технологічного процесу, оскільки саме на цій стадії формуються електричні та механічні з'єднання між напівпровідниковим кристалом і зовнішніми виводами корпусу. Надійність цих з'єднань безпосередньо визначає довговічність, стабільність електричних параметрів та працездатність інтегральної мікросхеми протягом усього терміну експлуатації [18-19].

Як правило, внутрішні з'єднання виконуються з коефіцієнтом товщини, що в 100 разів перевищує товщину металевих деталей, що з'єднуються: дріт діаметром 50 мкм та фольга товщиною 0,5 мкм. Площа контакту розташована на ізолюючій або напівпровідниковій підкладці та вимірюється частками міліметра. Термокомпресійне зварювання є найпоширенішим методом створення таких з'єднань.

Одним із найпоширеніших методів формування внутрішніх з'єднань в інтегральних мікросхемах є термокомпресійне зварювання з використанням алюмінієвого дроту. Широке застосування цього методу зумовлене його відносною технологічною простотою, високою відтворюваністю результатів та добрими електрофізичними властивостями алюмінію. Алюмінієвий дріт характеризується низьким електричним опором, достатньою пластичністю та хорошою адгезією до алюмінієвих контактних майданчиків кристала. Цей процес включає деформацію в зоні з'єднання, яка витісняє адсорбовані гази та дуже тонкі шари мастила та оксиду, що призводить до з'єднання стиснутих поверхонь. Зони адгезії утворюються в областях, де можлива взаємодія вільних електронів між атомами тіл, що з'єднуються, та утворення міжатомних зв'язків. Це вимагає подолання енергетичного бар'єру шляхом збільшення атомної енергії.

Сутність термокомпресійного зварювання полягає в одночасному прикладанні механічного тиску та підвищеної температури до зони контакту. За таких умов відбувається руйнування тонких оксидних плівок на поверхні металів, активація атомів і формування міжатомних зв'язків. Якість сформованого з'єднання визначається сукупністю технологічних параметрів, серед яких основними є температура, прикладене зусилля та тривалість процесу зварювання.

Матеріали, що зварюються термокомпресійним зварюванням, поділяються на три групи: метали з хорошою взаємодифузійною здатністю у твердому стані та утворенням змішаних кристалів (найкраща зварюваність), матеріали, що утворюють між собою низькотемпературні евтектики (задовільна зварюваність), та метали, взаємодифузія яких призводить до утворення інтерметалевих сполук та евтектик (задовільна зварюваність лише за певних умов).

За температур вище температури рекристалізації уникають процеси, що відбуваються протягом однієї години - витримка, рекристалізація та дифузія. Ці три процеси відіграють вирішальну роль у формуванні термокомпресійного затвердіння, тому інтенсивність процесу зварювання впливає на значення затвердіння.

Металографічний аналіз зони хорошого термокомпресійного зварювання виявляє чіткий зазор між зварюваними металами без значної дифузії від одного металу до іншого. Процес дифузії відбувається у дуже малій, низькотемпературній області; температура в точці зварювання контактної зони становить до 50 мікрометрів, а тривалість - 1,5 секунди. Площа контактної зони ще більша. Наприклад, при зварному шві 25 мікрометрів площа повинна становити 150 x 30 мікрометрів.

Проколи можуть бути спричинені самим матеріалом. До матеріалів, які не плавляться під час зварювання, належать: твердий сплав, кераміка, оксид берилію та молібден. Процес термокомпресійного зварювання вимагає

ретельного контролю основних параметрів процесу: тиску, температури та часу варіння.

Якість зварного шва оцінюється на основі контрольної товщини, яка коливається від 0,3 до 2,5 г. Це забезпечує правильне вирівнювання осі шпинделя та запобігає скрипу. Наприклад, контрольне значення для скла діаметром 25 мікрометрів, з використанням того ж зовнішнього матеріалу, становить 0,5 г.

Контактне зварювання розрізним електродом також дозволяє проводити термокомпресійне зварювання. Різниця полягає в тому, що нагрівання генерується електричним струмом.

Ультразвукове зварювання не підходить для цих застосувань, коли плавлення деталей, що з'єднуються, несприятливе, а також під час зварювання металів з високою електро- та теплопровідністю або під час з'єднання металів з керамікою та струшкою.

Для складання виводів на мікросхемах використовуються ультразвукові генератори напругою приблизно 100 Вт, частотою 20 кГц та амплітудою коливань 10 мкм. Амплітуда коливань повинна бути вирівняна вздовж осі діапазону вимірювання, щоб мінімізувати вплив витоків.

Ультразвукове зварювання - це процес, при якому розплавлений метал генерується ультразвуковими молотками.

Три процеси, застосування ультразвукових молотків, збільшення площі контакту, руйнування оксидного розплаву та нагрівання металу в зоні зварювання призводять до герметизації з'єднання.

При додатковому тангенціальному навантаженні площа контакту ще більше збільшується. Напруження виникають у поперечних перерізах, паралельних площі контакту. Це призводить до того, що контактний елемент (мікровиступ поверхні) переходить у стан напруження згину під нормальним та тангенціальним напруженням розтягу. При тангенціальному ультразвуковому стимулюванні площа контакту збільшується в багато разів.

Значні деформації, спричинені механічним ударом, призводять до утворення численних точок тиску, які потім переростають у похилі вузли.

Механічні удари на ультразвуковій частоті викликає тертя на металевих поверхнях, що руйнує шари оксиду. Стружка проникає в проміжки між мікроставунами. Тертя також призводить до інтенсивного виділення тепла в зоні контакту. Під впливом цього тепла метал мікроповерхонь перетворюється на пластичну поверхню, яка переповнюється завдяки діючим нормальним та тангенціальним силам. Під зварювальною голівкою утворюється зона ущільнення.

Частота ультразвукових коливань для зварювання контактів з розплавленими мікросхемами становить максимум 50 кГц. Амплітуда коливань зонда обмежена кількома мікрометрами, щоб уникнути пошкодження контактної фольги. Однак це вимагає ретельного дотримання вибраного режиму, що є складним у виробництві. Тому ультразвукове зварювання переважно використовується в лабораторіях. Воно підходить для м'яких і пластичних металів, таких як золото, алюміній і мідно-марганцеві сплави, але не для ніхромів та танталу.

Найбільша проблема ультразвукового зварювання полягає в регулюванні контактної тиску зонда на контактній поверхні. Надмірний тиск може пошкодити вивідний дріт або пошкодити фольгу. Недостатній тиск не призведе до зварювання. Тому використання пневматичної системи для точного контролю тиску є вигідним. Невдачі зварювання при термокомпресійному, контактному та ультразвуковому зварюванні можна розділити на три групи:

- ~ хімічне розкладання через неправильно підібрані металеві пари вивідного дроту та контактної поверхні;

- ~ розтріскування металевої плівки при переході до товстішої контактної зони з подальшим прогаром через перегрів у цій точці під час протікання струму в режимі роботи з чіпом;

~ проникнення забруднюючих речовин у контактну зону та їх осадження, що призводить до локального перегріву та руйнування контактів з часом.

Для контактної зони інтегральної кремнієвої схеми алюмінієва плівка є кращою за золото, оскільки алюміній у контактній зоні відтягує кисень від кремнію під час осадження, забезпечуючи таким чином хороший омичний контакт. Це не стосується золота. Крім того, золото погано адгезійне до кремнію, що вимагає додаткового металевого шару. Це створює ризик корозії. Нарешті, золото демонструє занадто високу міграційну рухливість. Можливість використання вольфраму для контактних зон на кремнієвих та скляних підкладках вже була продемонстрована. Вольфрамова контактна зона має приблизно такий самий електричний опір, як і алюмінієва контактна зона, оскільки вольфрам, нанесений у вакуумі, має вищу щільність, ніж алюміній. Важливо зазначити, що теплове розширення вольфраму подібне до кремнію та скла, але його головна перевага полягає в його хімічній стійкості.

Для успішного виготовлення контактів з низьким опором на напівпровідниковій підкладці необхідно дотримуватися таких умов:

~ контактна поверхня напівпровідника повинна мати низький питомий опір (нижче 1 Ом/см);

~ напівпровідник необхідно нагріти до температури приблизно на 20 °С нижче евтектичної температури дроту та напівпровідникових сплавів;

~ до контакту необхідно прикладати тиск 10 кг/мм².

Рекомендується захистити зону зварювання захисною газовою атмосферою, щоб запобігти окисленню або забрудненню. Низькоомні контактні поверхні на кремнієвій підкладці можна виготовити або шляхом неглибокої дифузії (для досягнення високої концентрації легування на поверхні), або шляхом мікросплавлення тонких шарів алюмінію та золота з поверхнею.

Обидва методи можна використовувати одночасно. Матеріали слід вибирати таким чином, щоб запобігти утворенню випрямляючого контакту. Для цієї мети підходить золото, збагачене легуючими добавками n- або p-типу.

Вибираючи матеріал дроту та контактної поверхні, слід враховувати ризик так званого «фіолетового забарвлення» (або «знебарвлення»), яке виникає під час зварювання золота та алюмінію. Фіолетові забарвлення - це пористі інтерметалеві сполуки, збагачені алюмінієм або золотом, що утворюються при безпосередньому контакті між алюмінієм та золотом. Вони видно зовні як кільце навколо контактної поверхні та виникають внаслідок дифузії золота, яка відбувається повільно за кімнатної температури та швидко за інших температур.

У межах даного дослідження основну увагу було приділено аналізу впливу температури термообробки на надійність дротяних з'єднань. Для проведення експерименту використовувався алюмінієвий дріт діаметром 30 мкм з домішкою кремнію, який широко застосовується у промисловому виробництві інтегральних мікросхем. Наявність домішки кремнію сприяє підвищенню стабільності механічних властивостей дроту та зменшенню ризику деградації контактної зони в процесі термічних впливів.

Надійність з'єднання є важливим параметром ІМС. Зборка ІМС в корпус з передбачає використання Al дроту діаметром мкм. Зусилля на розрив з'єднання повинна складати до і після пакування в корпус (герметизація) 3 г і 2 г, відповідно.

Було використано Al-дрот, який містив домішку кремнію Al та мав діаметр 30 мкм. При цьому дріт мав міцність на розрив 15-20 г. Температура досліджень відповідала умовам виробництва ІМС при випробуванні. За умови $T = 100, 140, 190$ °C дослідні ІМС з різною тривалістю витримки (5 і 10 годин). Після завершення термообробки проводилися механічні випробування, спрямовані на визначення міцності дротяних з'єднань на розрив. Отримані експериментальні дані дозволили кількісно оцінити зміну надійності контактів залежно від температурних умов та часу витримки.

Аналіз отриманих результатів, а саме залежностей міцності з'єднання від термообробки свідчить про наступне. Вплив температури на з'єднання

дроту характеризується зменшення міцності дроту, і збільшення температури посилює цей ефект (табл. 2.1).

Результати досліджень показали, що зі зростанням температури термообробки спостерігається поступове зниження міцності дротяних з'єднань.

Таблиця 2.1 - Надійність з'єднання після термообробки

| № експерименту | Умови термообробки | Міцність дротяних перемичок, г |
|----------------|--------------------|--------------------------------|
| | | до термодії, 5 |
| 1 | 190 °С, 3 год. | 3,52 |
| | 140 °С, 3 год. | 4,53 |
| | 100 °С, 3 год. | 4,82 |
| 2 | 190 °С, 10 год. | 3,85 |
| | 140 °С, 10 год. | 4,46 |
| | 100 °С, 10 год. | 4,78 |
| 3 | 190 °С, 3 год. | 3,53 |
| | 140 °С, 3 год. | 4,53 |
| | 100 °С, 3 год. | 4,88 |
| 4 | 190 °С, 10 год. | 3,64 |
| | 140 °С, 10 год. | 4,41 |
| | 100 °С, 10 год. | 4,72 |
| 5 | 190 °С, 10 год. | 3,49 |
| | 140 °С, 10 год. | 4,47 |
| | 100 °С, 10 год. | 4,77 |

Найбільш суттєве погіршення характеристик було зафіксовано при температурі 190 °С, де зменшення міцності становило близько 10 %. Такий ефект пояснюється інтенсифікацією дифузійних процесів у зоні контакту, а

також можливим утворенням інтерметалевих фаз, які негативно впливають на механічну стабільність з'єднання.

Результати досліджень показали, що зі зростанням температури термообробки спостерігається поступове зниження міцності дротяних з'єднань. Найбільш суттєве погіршення характеристик було зафіксовано при температурі 190 °С, де зменшення міцності становило близько 10 %. Такий ефект пояснюється інтенсифікацією дифузійних процесів у зоні контакту, а також можливим утворенням інтерметалевих фаз, які негативно впливають на механічну стабільність з'єднання.

При температурі 140 °С зниження міцності мало значно менш виражений характер і перебувало в межах допустимих технологічних відхилень. Це свідчить про те, що за таких умов зберігається баланс між активацією контактної зони та відсутністю інтенсивних деградаційних процесів. Термообробка при температурі 100 °С практично не впливала на міцність з'єднань, однак у деяких випадках могла бути недостатньою для повної стабілізації структури контакту після зварювання.

Для алюмінієвого дроту діаметром 30 мкм були отримані аналогічні тенденції. Зокрема, міцність з'єднання знижується зі збільшенням температури і часу обробки. Вплив вищих температур, а саме від 200°C і вище може призвести до руйнування міцності деяких контактів, що небажано для виробництва ІМС. Таким чином, поліпшення надійності з'єднань перед герметезацією ІМС можна досягти відбраковуванням при температурі 190 тривалістю 3 години. Як альтернативу, можна використовувати в якості дроту матеріал золото, але це призведе до ураження продукції.

Отримані експериментальні результати дозволяють зробити висновок, що температура термообробки є одним із ключових факторів, які визначають довговічність і надійність дротяних з'єднань в інтегральних мікросхемах. Надмірне підвищення температури призводить до деградації контактної зони, тоді як оптимально підібраний температурний режим забезпечує необхідний рівень механічної міцності та стабільності електричних параметрів.

Таким чином, для алюмінієвого дроту діаметром 30 мкм оптимальним з точки зору надійності внутрішніх з'єднань є температурний режим термообробки до 140 °С. Використання вищих температур може бути доцільним лише за умови застосування додаткових технологічних заходів, спрямованих на обмеження дифузійних процесів та захист контактної зони.

2.3 Фізико-хімічні процеси під час металізації інтегральних мікросхем

Металізація є одним із ключових етапів технологічного процесу виготовлення інтегральних мікросхем, оскільки саме на цьому етапі формуються електричні з'єднання між окремими елементами схеми та забезпечується підключення кристала до зовнішніх виводів. Якість металізаційних шарів безпосередньо впливає на електричні параметри, надійність та довговічність інтегральних мікросхем. Металізація інтегральних схем у напівпровідниковій технології повинна забезпечувати наступне:

- ~ низькоомний контакт з кремнієвими електродами активних та пасивних елементів інтегральної схеми;
- ~ високу адгезію;
- ~ можливість виготовляти дуже вузькі металеві смуги за допомогою фотолітографії;
- ~ металургійну сумісність зі сплавами, що використовуються для підключення зовнішніх виводів та додаткових компонентів.

Основними вимогами до металізаційних шарів є низький питомий електричний опір, висока адгезія до напівпровідникової підкладки, стабільність властивостей у часі та сумісність із подальшими технологічними операціями. Крім того, металізація повинна зберігати свої характеристики в умовах підвищених температур, електричних навантажень та впливу навколишнього середовища. Найбільш поширеним матеріалом для металізації

інтегральних мікросхем є алюміній, що зумовлено його доброю електропровідністю, технологічністю та відносно низькою вартістю. Осадження алюмінієвих плівок здійснюється методами вакуумного випаровування або магнетронного розпилення. Після осадження металевих шарів формується необхідна топологія шляхом фотолітографії та селективного травлення.

Алюміній легко осаджується термічним вакуумним випаровуванням. Алюміній недорогий та легкодоступний у високій чистоті. Після шарового осадження (1 мкм) його фотолітографічно обробляють для створення потрібного малюнка. Алюміній легко травиться під час фотолітографії, і травильний агент не впливає ні на Si, ні на SiO₂. Заключним етапом є термічна обробка при 550 °C протягом кількох хвилин для створення низькоомних контактів з кремнієм. У багатошарових структурах на алюмінієву плівку наноситься діелектрична плівка. Це обробляється фотолітографічно для створення вікон у ділянках, де потрібен контакт з нижнім металевим шаром. Потім наноситься другий металевий шар.

Подальші високотемпературні процеси призводять до перекристалізації алюмінієвої плівки, зростання кристалітів та шорсткості поверхні, що може призвести до деформації.

Обидва фактори особливо важливі для багатошарових ІМС, оскільки ізоляційний шар, нанесений поверх такого шорсткого металевого малюнка, може утворювати тріщини та отвори в цих ділянках. Однак алюміній забезпечує хорошу адгезію плівки SiO₂, значною мірою усуваючи негативний вплив цього явища.

Під час подальших термічних обробок у металізаційних шарах відбуваються складні фізико-хімічні процеси, зокрема дифузія атомів, рекристалізація металу та утворення міжфазних границь. Ці процеси можуть як покращувати електричні характеристики контактів, так і призводити до деградації металізаційної системи за несприятливих умов.

Важче досягти хороших омичних контактів між контактними шарами металізації, оскільки на алюмінії утворюється плівка Al_2O_3 . Цей шкідливий проміжний шар може бути зруйнований термічною обробкою після нанесення другого алюмінієвого шару, якщо перекристалізація обох алюмінієвих плівок призводить до механічного руйнування тонкого оксидного шару.

Алюміній утворює низькоомний контакт з кремнієм. Кремній, присутній в алюмінії у вигляді твердого розчину, майже не знижує його електропровідність. І навпаки, кремній, кристалізований з алюмінію, містить високу частку алюмінію, який діє як акцепторна домішка і тому демонструє високу провідність. Контактні поверхні кремнію завжди покриті шаром природного оксиду SiO_2 . Однією з основних проблем металізації на основі алюмінію є утворення оксидної плівки Al_2O_3 на поверхні металу. Ця плівка має високий електричний опір і може погіршувати якість міжшарових контактів, особливо в багатошарових металізаційних структурах. Для зменшення негативного впливу оксидної плівки застосовуються оптимізовані режими термообробки, а також багатошарові металізаційні системи з використанням бар'єрних шарів.

Крім того, при підвищених температурах можливе явище електроміграції — спрямованого переміщення атомів металу під дією електричного струму. Електроміграція призводить до утворення порожнин і накопичення матеріалу в окремих ділянках провідників, що з часом може спричинити обриви або короткі замикання. Інтенсивність цього процесу значною мірою залежить від температури, густини струму та структури металізаційного шару. Алюміній реагує з SiO_2 , що призводить до контакту з низьким опором між кремнієм та алюмінієм за цих умов. Швидкість реакції та дифузії кремнію в алюмінії висока, тому процес завершується протягом кількох хвилин при $550\text{ }^\circ\text{C}$. Термічна обробка при нижчій температурі ($550\text{ }^\circ\text{C}$) не призводить до утворення рідкої фази, а до інтенсивної дифузії Si у тверду фазу Al. Під час охолодження відбувається деяка зворотна дифузія Si з Al, оскільки розчинність Si в Al у твердій фазі різко зменшується зі зниженням

температури. Це призводить до утворення шару рекристалізації під плівкою Al на межі розділу.

Таким чином, фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час металізації та подальших термічних впливів, відіграють вирішальну роль у формуванні надійних електричних з'єднань. Контроль складу, структури та режимів обробки металізаційних шарів є необхідною умовою забезпечення стабільних параметрів і тривалої експлуатації інтегральних мікросхем.

2.4 Визначення надійності ІМС методом відриву кристалів від основи корпусу

Одним із важливих показників надійності інтегральних мікросхем є міцність з'єднання напівпровідникового кристала з основою корпусу. Це з'єднання повинно забезпечувати надійну механічну фіксацію кристала, ефективний тепловідвід та стабільність положення активних елементів упродовж усього терміну експлуатації виробу.

Для оцінки адгезійної міцності з'єднання кристала з підкладкою корпусу широко застосовується метод відриву або зсуву кристала. Сутність цього методу полягає у прикладанні контрольованого механічного навантаження до кристала з метою визначення зусилля, при якому відбувається руйнування з'єднання. Отримане значення зусилля є кількісною характеристикою надійності монтажу.

Експериментальні дослідження проводилися на зразках інтегральних мікросхем, у яких кристали кріпилися до основи корпусу з використанням різних клейових матеріалів. Особлива увага приділялася впливу складу клею та режимів термічної обробки на міцність з'єднання. Встановлено, що використання клеїв із модифікуючими домішками дозволяє досягти вищих значень адгезійної міцності порівняно зі стандартними складами.

Під час випробувань зразки піддавалися термічній обробці при різних температурах, після чого проводилися вимірювання зусилля зсуву.

Метод відриву або метод зсуву кристала полягає у визначенні величини зусилля відриву кристала. Величина зміщення (відриву) кристала залежить від якості клею та температури експерименту.

Для проведення експерименту використовуємо 6 зразків ІМС, які вважатимемо вибіркою з промислової партії ІМС. Результати експерименту (сушка при кімнатної температурі) на зміщення кристала наведено у табл. 2.2. Клей 1 мав додаткові домішки, які забезпечили більшу надійність ІМС. Температурні залежності наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.2 – Зусилля на зсув кристалу

| № | Номер клею | Зусилля, Н |
|---|------------|------------|
| 1 | Клей 1 | 5,9 |
| 2 | Клей 1 | 8,2 |
| 3 | Клей 1 | 6,7 |
| 4 | Клей 2 | 3,5 |
| 5 | Клей 2 | 4,2 |
| | Клей 2 | 4,1 |

Збільшення температури сушіння клейового з'єднання призводить до поліпшення якості з'єднання кристала на підкладці. При цьому значення умов відриву при температурах 140 і 190 °С можна порівняти. Враховуючи негативний вплив високих температур (понад 200-250 °С) на виріб, рекомендується використовувати температуру сушіння 140 °С.

Таблиця 2.3 – Залежності сили зсуву (Н) від температури термічної обробки (сушки) з'єднання.

| № | Температура, °С |
|---|-----------------|
|---|-----------------|

| | | | |
|---|------|------|------|
| | 100 | 140 | 190 |
| 1 | 10,2 | 12,8 | 13,3 |
| 2 | 9,8 | 12,3 | 12,7 |
| 3 | 11,0 | 13,8 | 14,3 |
| 4 | 10,7 | 13,4 | 13,9 |
| 5 | 10,4 | 13,0 | 13,5 |

Результати показали, що підвищення температури сушіння клею до певного рівня сприяє зростанню міцності з'єднання за рахунок покращення змочування поверхні та завершення процесів полімеризації.

Разом з тим встановлено, що надмірне підвищення температури може призводити до небажаних ефектів, таких як деградація клейового шару або виникнення додаткових термомеханічних напружень. У ході дослідження було показано, що температура сушіння близько 140 °C є оптимальною з точки зору забезпечення високої адгезійної міцності без негативного впливу на матеріали інтегральної мікросхеми.

Отримані результати свідчать про те, що міцність з'єднання кристала з корпусом є важливим фактором, який визначає надійність інтегральних мікросхем, особливо в умовах вібраційних і температурних навантажень. Метод відриву кристала дозволяє ефективно оцінювати якість монтажу та є корисним інструментом для оптимізації технологічних режимів складання.

2.5 Вплив вологості на інтенсивність відмов ІМС

Надійність інтегральних мікросхем значною мірою визначається не лише конструктивними та технологічними рішеннями, але й умовами виробничого середовища. Особливу роль відіграють параметри мікроклімату, зокрема вологість повітря, чистота приміщень та наявність сторонніх домішок. Недотримання встановлених норм може призводити до зростання кількості дефектів і, як наслідок, до підвищення інтенсивності відмов готових виробів.

Підвищена вологість повітря є одним із найбільш небезпечних факторів для мікроелектронного виробництва. Наявність вологи на поверхні кристалів і металізаційних шарів сприяє розвитку корозійних процесів, особливо в зонах електричних контактів. Крім того, волога може призводити до утворення струмопровідних плівок між елементами схеми, що збільшує ймовірність витоків струму та коротких замикань.

Окрему небезпеку становить поєднання підвищеної вологості з наявністю пилових частинок і хімічних домішок. Частинки пилу можуть осідати на поверхні напівпровідникових пластин і виконувати роль центрів зародження дефектів. У процесі подальших технологічних операцій такі дефекти можуть трансформуватися у відмови, що проявляються вже на етапі експлуатації інтегральних мікросхем.

З метою мінімізації негативного впливу зовнішніх факторів виробництво інтегральних мікросхем здійснюється у спеціалізованих чистих приміщеннях. Такі приміщення обладнані багатоступеневими системами фільтрації повітря, що дозволяють підтримувати надзвичайно низький рівень запиленості. Крім того, у чистих приміщеннях забезпечується стабільний температурний режим і контрольована відносна вологість. На основі гігієнічних норм виробничі приміщення класифікуються на три категорії. Перша категорія включає так звані «закриті» приміщення, які ізольовані від

зовнішнього середовища. Ці приміщення без вікон розташовані в центрі виробничого приміщення. Вони мають вхід та герметично закриті аварійні двері. Аварійні двері використовуються для транспортування обладнання. Вхідні двері обладнані захисним тамбуром, який запобігає потраплянню зовнішнього повітря. Захисний тамбур служить для видалення пилу від працівників, які входять до приміщення. Стеля повинна бути пофарбована олійною фарбою, а стіни повинні бути покриті керамічною або пластиковою плиткою. Закриті приміщення без вікон дозволяють точно контролювати освітлення, опалення та повітрообмін, повністю виключаючи вплив нестабільних зовнішніх атмосферних факторів, таких як зовнішній пил, пори року та погода [16].

Штучний мікроклімат, створений для виробничого приміщення I категорії, характеризується температурою 20 ± 1 °C та відносною вологістю $55 \pm 5\%$. Згідно з правилами охорони праці, відносна вологість у робочій зоні не повинна падати нижче 40%, оскільки надмірно сухе повітря шкідливо для здоров'я та призводить до втоми. Максимально допустима концентрація пилу в таких приміщеннях становить 20–30 частинок/літр.

Для контролю концентрації пилу в повітрі використовуються прилади, що базуються на розсіюванні світла частинками пилу. При низьких концентраціях пилу розсіювання світла не відбувається, і фотопомножувач, орієнтований паралельно світловому променю, який приймає лише світло, відбите частинками пилу, реєструє темновий струм. Чим вища концентрація пилу, тим яскравіший світловий промінь і тим більший струм у фотопомножувачі. Прилади, засновані на цьому принципі, мають точність 20% і можуть виявляти кількість частинок пилу розміром не менше 1 мкм у кількостях від 10 до 50 000 частинок на літр повітря.

У закритих приміщеннях підтримується невеликий позитивний тиск, щоб запобігти потраплянню зовнішнього повітря. Це досягається шляхом відповідного регулювання припливного та витяжного повітря, що призводить до надлишку припливного повітря на 10–15%. Припливне повітря слід

спрямовувати вниз, щоб мінімізувати горизонтальний рух повітря та пов'язану з ним циркуляцію пилу. Швидкість повітря поблизу робочих місць не повинна перевищувати 20 см/с, а турбулентності слід уникати. Повітря зазвичай подається через балки перекриття, потрапляє через перфоровану стелю та виводиться через повітроводи, вбудовані в підлогу. Об'ємний потік свіжого повітря в таких приміщеннях розраховується на рівні 25 м³ на особу. На практиці об'єм припливного повітря протягом робочої зміни повинен бути в 20 разів більшим за об'єм приміщення.

Типовий рівень забруднення повітря в промислових зонах становить близько 15 мг/м³ на годину. Розміри частинок коливаються від 30 мкм до 0,05 мкм. Великі частинки більше 10 мкм, дрібні частинки – від 1 до 10 мкм, а наддрібні частинки (аерозолі) менше 1 мкм. Фільтри класифікуються за розміром частинок на попередні фільтри, фільтри тонкого очищення та аерозольні фільтри, які послідовно встановлюються у повітропроводі.

Попередній фільтр працює за принципом адсорбції та складається з металевих поверхонь, зволжених рідиною. Тонкий фільтр – це електростатичний фільтр, який спирається на колективний рух заряджених частинок в електростатичному полі. Аерозольний фільтр спрямовує повітря на очищення через фільтруючі прокладки.

Окрім зовнішніх джерел забруднюючих речовин та вологи, внутрішні джерела також становлять небезпеку. Значним джерелом пилу є підлога, яка піддається зносу від пішохідного руху. Тому підлогове покриття має бути стійким до стирання. Порівняно з лінолеумом, покриття з полімастики має високу зносостійкість та хімічну стійкість, а також низьке поглинання вологи. Джерелом вологи є людина, яка виділяє до 100 г води за робочу зміну через дихання та випаровування.

Щоб запобігти забрудненню деталей, завантаження систем слід проводити в хірургічних рукавичках та за допомогою пінцета та іншого обладнання. Обслуговуючий персонал повинен носити одяг з тканини без ворсу, такої як нейлон.

Весь цикл виробництва інтегральних схем, негативів та трафаретів здійснюється в герметичних приміщеннях I категорії. До II категорії належать «чисті» приміщення, де здійснюється попередня обробка пластин, перевірка продукції та інші процеси. Ці приміщення мають припливно-витяжну вентиляцію та системи пиловловлення, але вимоги до стабільності температури, вологості та запиленості в цих приміщеннях нижчі, ніж у герметичних приміщеннях. До III категорії належать допоміжні виробничі приміщення для ремонту обладнання, різання пластин та інші зони зі стандартною промисловою гігієною.

Оптимальними умовами для більшості технологічних операцій вважаються температура повітря близько 20 °C та відносна вологість у межах 40–60 %. Підтримання позитивного тиску в чистих приміщеннях запобігає проникненню забрудненого повітря ззовні, а суворе дотримання регламентів роботи персоналу знижує ризик випадкового занесення частинок.

Дослідження показують, що навіть короточасні відхилення параметрів мікроклімату можуть призводити до прихованих дефектів, які не виявляються під час вихідного контролю, але проявляються у процесі експлуатації. Саме тому контроль вологості, чистоти повітря та технологічної дисципліни є невід'ємною важливою складовою системи забезпечення надійності інтегральних мікросхем.

Таким чином, створення та підтримання оптимальних умов у чистих приміщеннях є необхідною умовою забезпечення високої якості та надійності напівпровідникових виробів. Дотримання встановлених норм дозволяє знизити інтенсивність відмов, підвищити вихід придатної продукції та забезпечити стабільність параметрів інтегральних мікросхем упродовж усього терміну їх експлуатації.

Суворе дотримання вимог вакуумної гігієни на всіх етапах процесу виготовлення інтегральних схем є незмінним законом цього виду виробництва, не суворішим, ніж у хірургічній операційній. Дешевше забезпечити точне виконання всіх цих вимог, ніж мати високий відсоток

дефектів. Отже кристал і металеві частини корпусу, тобто. ІМС зазнають впливу навколишнього середовища. Тому було досліджено вплив довкілля, саме вологості, на надійність ІМС (стійкість характеристик). Використовувалася вибірка з 5 мікросхем, кожної з яких було проведено струмове вимірювання. Результати кожної вибірки (усереднені) наведено у табл. 2.4. Зазначимо, що з нормальної вологості (30%) все мікросхеми були працюючими, вимірювався струм витоку.

Таким чином, вологість 80% є неприпустимим показниками довкілля для нормальної роботи приладу. При збільшенні вологості до критичної спостерігається значне збільшення величини поверхневого струму, що призводить до зростання швидкості корозії елементів металізації Al на кристалі та корпусних дротів.

Таблиця 2.4 – Відмови ІМС при різних значеннях вологості (%) і часу випробувань

| № | Час випробувань, год. | | Час випробувань, год. | |
|---|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | 5 год. | 10 год. | 5 год. | 10 год. |
| | вологість 40% | вологість 40% | вологість 70% | вологість 70% |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 2 |

Виходячи з вищесказаного слід, що якість ІМС на етапі зборки можна оцінити термообробкою (для вибірки з партії) при температурі 140 °С, а відбракування виробів можна виконати при температурі 100 °С. Рекомендується для приклеювання кристала на підкладку використовувати клей з кремнієвими добавками, що забезпечує більш високу надійність

зчеплення. Для перевірки надійності зчеплення рекомендується провести випробування для вибіркового виробів (вибірка) за температури 140 °С.

Середовище, при якій здійснюється технологічна операція складання мікросхеми, істотно впливає на працездатність і викликає збільшення струмів витоку при високій вологості.

2.6 Контроль якості технологічних процесів виробництва ІМС з метою підвищення їх надійності

Найефективнішими методами контролю якості з'єднань є випробування на механічну міцність та металографічні дослідження.

Для перевірки механічної міцності з'єднань доступні численні прилади, обладнання та процедури випробувань. Наприклад, під час випробування на зсув конструкція з підключеними выводами піддається розтягувальному напруженню силою, що діє паралельно поверхні підкладки.

Якщо міцність з'єднання становить щонайменше 70% від міцності використаного дроту, з'єднання вважається задовільним. Випробування з'єднань на відшаровування проводяться шляхом багаторазового згинання виводу під кутами 30°, 45° та 90° відносно поверхні підкладки.

Міцність адгезійних з'єднань визначається випробуваннями на розтяг. Міцність адгезійного з'єднання на розтяг повинна бути щонайменше $(125-150) \times 10^5$ Н/м². Металографічний аналіз досліджує поперечні або похилі перерізи паяних з'єднань та виявляє їхню внутрішню структуру. Цей процес виявляє ділянки, які не були змочені під час паяння, проникнення, мікротріщини, порожнини, пори, інтерметалеві включення та сліди дифузії припою на межах зерен.

Рентгенівський контроль розбіжним променем виявляє внутрішні дефекти та надає достатню інформацію про надійність з'єднань. На відміну від металографічного аналізу, цей метод є неруйнівним.

Візуальний контроль використовується для виявлення тріщин, коротких замикань, зміщень зони зварювання або паяння, пор, мікротріщин та деформацій. Відносна деформація з'єднуваного штифта визначається шириною плями зварювання. У хорошому паяному з'єднанні припій витікає із зазору між деталями, що з'єднуються, утворюючи чітко видимий та безперервний кутовий шов.

Моніторинг електричних параметрів мікросхем дозволяє оцінити правильність вибору способів кріплення. Під час процесу герметизації проводиться вхідний контроль матеріалів, напівфабрикатів, деталей та вузлів, контроль шва герметизації, контроль готових мікросхем та остаточний контроль.

Деталі візуально перевіряються після холодного формування. Найпоширеніші типи дефектів після холодного формування та їх причини наведено в таблиці 2.5. Розміри компонентів вимірюються за допомогою універсальних вимірювальних приладів: штангенциркулів, мікрометрів, індикаторів годинникового типу та оптичного приладу – інструментального мікроскопа.

Вигляд поверхонь компонентів перевіряється за допомогою щілинного тесту з лінійкою. Людське око може виявити зазор 0,003–0,004 мм.

Таблиця 2.5 – Найпоширеніші типи дефектів після холодного формування та їх причини.

| Вид браку | Причина |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Темний колір деталі. | Погане знежирення та відпал. |
| Ломкість матеріалу. | Неправильний відпал заготовки. |
| Задирки. | Неправильний зазор матриця пуансон; погане центрування; погане заточування ріжучих кромок пуансону та матриці. |
| Подряпини, поздовжні ризики. | Забруднення стрічки, недостатнє полірування витяжного штампу матриць та пуансонів. |
| Обрив країв деталей, утворення складок. | Слабкий притиск матеріалу у витяжному штампі. |
| Обрив дна деталі, утворення тріщин. | Надмірний притиск матеріалу у витяжному штампі. |
| Відхілення за розмірами. | Помилки у конструкції, у виготовленні чи ремонті штампу; знос робочих частин штампу; брак матеріалу за товщиною; порушення технологічного процесу |

Вузли перевіряються на точність розмірів, обробку поверхні, гальванічне покриття та якість паяння. Випробування на герметичність проводяться двічі: після виготовлення основи корпусу з ізолюваними виводами та після герметизації мікросхем. Герметичність паяного з'єднання між виводами та основним матеріалом, або герметичність мікросхеми всередині корпусу, характеризується швидкістю витоку гелію. Для готових мікросхем критерієм герметичності служить швидкість витоку гелію при різниці тисків між зовнішньою та внутрішньою сторонами корпусу. Високоякісні корпуси демонструють максимальну швидкість витоку 10^{-8} см³/с. Випробування на герметичність днища корпусу проводиться за

допомогою спеціалізованого обладнання, яке створює вакуумне ущільнення навколо випробуваного зразка.

Існує безліч методів випробувань на герметичність. Найпоширенішими є мас-спектрометрія, вакуумно-рідинний контроль та контроль вологості.

Метод мас-спектрометрії базується на виявленні атомів гелію, що витікають через нещільності в окремих компонентах або герметичних корпусах. Гелій використовується для виявлення витоків, оскільки він є найрухливішим газом і має високу проникаючу здатність. Гелій вводиться в корпус мікročіпа або під час процесу герметизації, або шляхом тривалої експозиції вже герметичних мікročіпів у спеціальних, герметично закритих барокамерах, заповнених гелієм під тиском $(3-5) \times 10^5$ Па після попередньої відкачування. Протягом часу експозиції (3–48 годин) у барокамері гелій проникає в корпуси мікročіпів з нещільностями. Мікročіпи виймаються з барокамери та поміщаються у випробувальну камеру, наприклад, напівавтоматичний пристрій з трипозиційною каруселлю. Обертання каруселі переміщує камеру в нове положення, стискає її та відкачує. Після відкачування камера автоматично перемикається на детектор витоків, який перетворює гелій, що витікає, на електричний сигнал. Якщо сигнал перевищує задане значення, мікročіп відхиляється.

Мас-спектрометричний метод є високочутливим. Його недоліками є низька пропускна здатність (100–200 одиниць/год.) та високі вимоги до обслуговування.

Вакуумно-рідинний метод базується на виявленні бульбашок повітря, що виходять через нещільності в корпусі в рідину під вакуумом приблизно 10–15 Па. Рідина (гас або уайт-спірит) спочатку вакуумується, тобто витримується під тиском 700 Па та температурою 70–120 °C протягом однієї години. Мікročіпи занурюються в рідину. Якщо в корпусі є витік, газ виходить у вигляді потоку дрібних бульбашок через різницю тиску між внутрішньою та зовнішньою частинами корпусу. Таким чином, витік можна виявити візуально. Цей метод простий, ефективний та більш продуктивний - до 700 одиниць/рік

- але менш чутливий і тому виявляє лише більші витоки. Він служить попереднім випробуванням для відбракування упаковок зі значними витоками перед остаточним мас-спектрометричним контролем.

Метод термічного стиснення є варіацією попереднього методу. Упаковки занурюють у нагріту, зневоднену силіконову олію. Нагрівання до 200 °С збільшує тиск всередині корпусу, тим самим підвищуючи чутливість методу.

Випробування на вологість є найпростішим і найнадійнішим методом, який дозволяє одночасно контролювати стійкість покриття корпусу до високої вологості, а також його герметичність. Мікросіпи зберігаються протягом кількох днів у кліматичних камерах з високою вологістю (95–98%) та температурою 40 ± 5 °С. Критерієм виключення є погіршення електричних параметрів через потрапляння вологи в корпуси. Однак у кліматичних камерах бракуються лише мікросхеми зі значними витоками. Крім того, камера не дозволяє швидко виявляти витоки в мікросхемах з добре захищеними конструкціями. Попадання вологи в корпус таких мікросхем виявляється лише набагато пізніше, коли відбувається поломка, наприклад, через корозію міжметалевих з'єднань.

Перед остаточним виготовленням після герметизації інтегральна схема (ІС) проходить кліматичні, електричні та механічні випробування. Ці випробування необхідні для виявлення прихованих дефектів, які можуть виникнути через конструктивні недоліки, використання невідповідних матеріалів або умови експлуатації, що не відповідають вимогам чи технічній документації. ІС з прихованими дефектами бракуються під час виробничих випробувань, щоб забезпечити надійність ІС в експлуатації. Після успішного завершення всіх виробничих випробувань та вимірювань параметрів відбувається остаточна виробнича обробка, і ІС може бути відправлена замовнику. Остаточна виробнича обробка включає обробку поверхні, яка захищає ІС від зовнішніх впливів, полегшує підключення до пристроїв та

надає інформацію про тип та зовнішній вигляд ІС. Для гальваніки часто використовуються електроліти олова та вісмуту. Гальваніка для ІС, що використовуються в суворих умовах експлуатації, зазвичай складається зі сплавів олова-кадмію або олова-нікелю. Для фарбування корпуси ретельно знежирюють у киплячих органічних розчинниках, а потім сушать до повного видалення розчинника. Спочатку наносять тонкий шар ґрунтовки, сушать, а потім фарбують. Іноді корпуси фарбують без ґрунтовки. Процес фарбування може здійснюватися пензлем, зануренням, розпиленням або повітряним розпиленням. Фарбування відбувається у спеціальних лотках, які маскують ділянки, що не підлягають фарбуванню, та механічно фіксують інтегральні схеми. Потім пофарбовані схеми сушать. Після висихання шар фарби має бути рівномірним та без патьоків, бульбашок, подряпин та сторонніх предметів. Відбраковані деталі повертаються на видалення фарби та перефарбування. Маркування наноситься на пофарбовану поверхню за допомогою ручних друкарських інструментів, напівавтоматичних або автоматичних машин. Маркування для мікросхем, інкапсульованих у пластик, створюється під час процесу інкапсуляції. Маркування наноситься тисненням на форми для пресування або лиття. Після висихання маркування корпуси лакують. Лак забезпечує додатковий захист від корозії та підвищує довговічність маркування. Для полегшення підключення інтегральної схеми до кінцевого пристрою корпуси випрямляють та лудять. Лудіння зазвичай проводиться шляхом занурення корпусу в припій після попередньої обробки в розчині каніфолі або хлориду цинку. Для лудіння переважно використовуються олов'яно-свинцеві припої. У масовому виробництві інтегральних схем лудіння автоматизовано за допомогою хвильового паяння. Готові до відправки інтегральні схеми упаковуються у спеціальні контейнери, що забезпечують їх захист під час транспортування. Зазвичай кожен чіп поміщається в окремий вкладиш або поліетиленовий клейкий пакет, а потім упаковується в пластикові або картонні коробки. Коробки запечатуються етикетками із зазначенням типу та кількості мікросхем.

ВИСНОВКИ

У межах даної дипломної роботи здійснено комплексне дослідження технологічних аспектів виготовлення інтегральних мікросхем та чинників, що визначають рівень їх надійності. Основну увагу приділено аналізу впливу конструктивних рішень, технологічних режимів і умов виробничого середовища на стабільність параметрів і довговічність напівпровідникових виробів.

У першому розділі роботи розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку технологій виробництва інтегральних мікросхем. Показано, що забезпечення надійності ІМС є багатофакторною задачею, яка формується на всіх етапах технологічного процесу — від підготовки матеріалів до складання та контролю готових виробів. Обґрунтовано важливість системного підходу до проєктування та виготовлення напівпровідникових структур.

Другий розділ присвячено дослідженню практичних методів підвищення надійності інтегральних мікросхем. Запропоновано конструктивно-технологічний підхід із використанням гнучких плівкових основ і клейових шарів, що дозволяє зменшити рівень механічних напружень у багаточіпових модулях та підвищити їх стійкість до зовнішніх впливів.

Особливу увагу було приділено якості контактів на етапі збирання кристала в корпус. Були проведені дослідження щодо впливу навколишнього середовища у приміщенні на якість складання. Виходячи з вищесказаного слід, що якість ІМС на етапі зборки можна оцінити термообробкою (для вибірки з партії) при температурі 140 °С, а відбракування виробів можна виконати при температурі 100 °С. Враховуючи негативний вплив високих температур (понад 200-250 °С) на виріб, ця рекомендація може мати інтерес з боку підприємств. Особливо з огляду на зменшення енерговитрат на термообробку. Рекомендується для приклеювання кристала на підкладку використовувати клей з кремнієвими добавками, що забезпечує більш високу

надійність зчеплення. Показано, що застосування температур до 140 °С забезпечує оптимальне поєднання механічної міцності з'єднань і стабільності їх електричних характеристик.

Введення додаткової очистки поверхні кристалу забезпечує надійний контакт та виключає відбракування приладів по дефектам зборки. Окрему увагу приділено впливу вологості та умов чистих приміщень на інтенсивність відмов інтегральних мікросхем. Показано, що дотримання норм мікроклімату та технологічної дисципліни є важливою складовою системи забезпечення надійності напівпровідникових виробів.

Розглянути фізико-хімічні процеси, які мають місце під час металізації інтегральних мікросхем. Металізація інтегральних схем у напівпровідниковій технології повинна забезпечувати низькоомний контакт з кремнієвими електродами активних та пасивних елементів інтегральної схеми, високу адгезію, можливість виготовляти дуже вузькі металеві смуги за допомогою фотолітографії, металургійну сумісність зі сплавами, що використовуються для підключення зовнішніх виводів та додаткових компонентів. Найменша міцність дротяної сполуки відповідає температурі 190 °С. Термообробки при високих температурах супроводжується зниження міцності дротяної сполуки на 10%. Для алюмінієвого дроту діаметром 30 мкм були отримані аналогічні тенденції. Зокрема, міцність з'єднання знижується зі збільшенням температури і часу обробки. Встановлено, що контроль структури й параметрів металізаційних шарів є необхідною умовою забезпечення надійної роботи інтегральних схем упродовж тривалого часу.

Також досліджено метод оцінки надійності інтегральних мікросхем шляхом визначення міцності з'єднання кристала з основою корпусу. Показано, що правильний вибір клейових матеріалів і режимів термічної обробки дозволяє суттєво підвищити адгезійну міцність монтажу без негативного впливу на конструкцію виробу.

Середовище, при якій здійснюється технологічна операція складання мікросхеми, істотно впливає на працездатність і викликає збільшення струмів

витоку при високій вологості. Окрему увагу приділено впливу вологості та умов чистих приміщень на інтенсивність відмов інтегральних мікросхем. Доведено, що дотримання регламентованих параметрів мікроклімату та технологічної дисципліни є важливою складовою системи забезпечення якості та надійності напівпровідникової продукції.

Узагальнюючи результати роботи, можна зробити висновок, що застосування комплексного підходу, який поєднує оптимізацію конструктивних рішень, технологічних процесів і умов виробництва, дозволяє підвищити надійність інтегральних мікросхем та забезпечити стабільність їх експлуатаційних характеристик.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. IC Fabrication Process. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/>
2. Integrated Circuit Fabrication. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.universitywafer.com/silicon-integrated-circuit-fabrication.html>
3. Semiconductor Device Manufacturing Process, Challenges and Opportunities. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.renesas.com/en/blogs/semiconductor-device-manufacturing-process-challenges-and-opportunities>.
4. Components of Electronic Circuit & Design. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://kdkce.edu.in/writereaddata/>.
5. Introduction to Fabrication. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.micron.com/content/dam/micron/educatorhub/fabrication/micron-intro-to-fabrication-presentation.pdf>
6. Маіру Optoelectronics [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.maroptics.com>.
7. Королевич, Л. М. Мікроелектроніка. Елементи напівпровідникових інтегральних мікросхем.: навч. посіб. для здобувачів за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка» спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка / Л. М. Королевич, О. В. Мачулянський, Г. В. Шевлякова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 93 с.
8. Бондаренко, І. М. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Бородин, В. П. Карнаушенко – Харків: ХНУРЕ. – 2018. – 177 с.
9. Дружинін, А. О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посіб. / А. О. Дружинін. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2009. – 328 с.

10. Прищеп, М. М. Мікроелектроніка: в 3 ч. Ч.1. Елементи мікроелектроніки : навч. посіб. / М. М. Прищеп, В. П. Погребняк. – К.: Вища шк., 2004. – 431 с.
11. Закалик, Л. І. Основи мікроелектроніки: Навчальний посібник / Л. І. Закалик, Р. А. Ткачук. — Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя , 1998 — 352 с.
12. Кузьмичев, А. І. Технологічні основи електроніки. Кн. 1 : Технологія виробництва мікросхем / А. І. Кузьмичев, Л. Д. Писаренко, Л. Ю. Цибульський. — Київ: КПІ, 2019. — 127 с.
13. Бурик, І. П. Технологічні основи виготовлення елементів напівпровідникових інтегральних мікросхем: навчальний посібник / І. П. Бурик. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 65 с.
14. Willoughby W. I. The Navy's Best Practices Approach to Reliability and Quality / W. I. Willoughby // IEEE Transactions on Reliability. 1987. – V.36. – N3. – P. 310-312.
15. Aksimentyeva O. Electronic Processes in the Porous Silicon-Conducting Polymer Heterostructures / O. Aksimentyeva, L. Monastyrskiy, V. Savchyn et al. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2007. – V.467. – N1. – P. 73-78.
16. Сівко, В. І. Безпека виготовлення та експлуатації радіоелектронної апаратури: Навчальний посібник / В. І. Сівко – Житомир: ЖИТИ, 2000 р. – 142 с.
17. Бондаренко, Я.С. Посібник до вивчення дисципліни “Статистичний аналіз даних” / Я. С. Бондаренко, С. В. Кравченко. – Д: Ліра, 2018. – 40 с.
18. Бондаренко, І. М. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: навчальний посібник. / І. М. Бондаренко, О. В. Бородин, В. П. Карнаушенко – Харків: ХНУРЕ. – 2018. – 177 с.
19. Павлов, С. М. Основи мікроелектроніки: навчальний посібник / С. М. Павлов. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 224 с.
20. Борисов, О. В. Твердотільна електроніка : підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 484 с.

21. Ghetti. Gate Oxide Reliability: Physical and Computational Models / A. Ghetti // Predictive Simulation of Semiconductor Processing, 2004. – P. 201–258. DOI: 10.1007/978-3-662-09432-7_6

22. Syed M Alam. Circuit-level reliability requirements for Cu metallization / Syed M Alam, Chee Lip Gan, Frank L Wei. // Device and Materials Reliability, IEEE Transactions. – 2005. – V.5. – N3. – P. 522–531.

Додаток А

Схема технологічного процесу виготовлення інтегральних мікросхем [1]

