

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Трикіло А. І.

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни

### **«Технологічні основи електроніки»**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня

зі спеціальностей:

**153 Мікро- та наносистемна техніка,**

**171 Електроніка,**

очної та заочної форм навчання

**Затверджено**

Редакційно-видавничою секцією

науково-методичної ради ДДТУ

«\_19\_» \_09\_ 2019 рік

протокол № \_7\_

Кам'янське

2019

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу  
Дніпровського державного технічного університету заборонено

Конспект лекцій з дисципліни «Технологічні основи електроніки» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальностей: 153 «Мікро- та наносистемна техніка», 171 «Електроніка» / Укл.: Трикіло А.І. – Кам'янське: ДДТУ, 2019.– 93 с.

Укладач: , к.т.н., доцент Трикіло А.І.

Рецензент: к.т.н., доцент Багрій В.В.

Відповідальний за випуск: завідувач кафедри електроніки,  
докт. тех. наук, проф. Мещанінов С.К.

Затверджено  
на засіданні кафедри електроніки  
від «\_30\_» \_08\_ 2019 року  
протокол № \_8\_

Наведений теоретичний матеріал відповідно до програми дисципліни «Технологічні основи електроніки», для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальностей: 153 «Мікро- та наносистемна техніка», 171 «Електроніка»,

## Зміст

Тема 1. МИКРОЕЛЕКТРОНИКА. ИНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ.....	4
1.1. Класифікація мікросхем.....	4
1.2. Основні етапи виготовлення мікросхем.....	5
Питання для самоконтролю .....	8
Тема 2. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР МІКРОСХЕМ.....	9
Питання для самоконтролю .....	12
Тема 3. ВИГОТОВЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ ПЛАСТИН І ПІДКЛАДОК.....	12
3.1. Загальні відомості.....	12
3.2. Маршрути виготовлення пластин і підкладок.....	18
3.3. Електронна гігієна .....	21
3.4. Рідинне очищення поверхні пластин.....	26
3.5. Сухе очищення і труїння .....	27
Питання для самоконтролю .....	28
Тема 4. МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ МІКРОСХЕМ.....	29
4.1. Загальні відомості.....	29
4.2. Оптична літографія (фотолітографія).....	32
Питання для самоконтролю .....	41
Тема 5. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК.....	41
5.1. Термовакуумне напилення.....	41
5.2. Розпилювання іонним бомбардуванням .....	45
5.3. Термічне оксидування.....	49
5.4. Хімічне осадження плівок з розчинів .....	51
Питання для самоконтролю .....	52
Тема 6. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ШАРІВ І ПЕРЕХОДІВ.....	52
6.1. Загальні відомості.....	52
6.2. Епітаксія кремнієвих шарів .....	55
6.3. Дифузійне легування.....	59
6.4. Іонне легування .....	63
Питання для самоконтролю .....	67
Тема 7. ТИПОВІ МАРШРУТИ ВИГОТОВЛЕННЯ СТРУКТУР МІКРОСХЕМ ...	67
7.1. Виготовлення біполярних структур.....	67
7.2. Виготовлення МОП-структур.....	69
7.3. Типові маршрути технології тонкоплівкових структур.....	71
7.4. Типовий маршрут технології товстоплівкових структур.....	74
Питання для самоконтролю .....	79
Тема 8. ЗБІРКА МІКРОСХЕМ.....	80
8.1. Розділення пластин і підкладок.....	81
8.2. Методи збірки.....	83
8.3. Монтаж кристалів і платні.....	86
8.4. Під'єднування електродних виводів .....	88
8.5. Збірка НИМ на стрічкових носіях.....	88
8.6. Герметизація мікросхем в корпусі.....	89
8.7. Завершальні операції виготовлення мікросхем.....	91
Питання для самоконтролю .....	91
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	92

## Тема 1. МІКРОЕЛЕКТРОНІКА. ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

Мікроелектроніка є сучасним напрямом електроніки, що дозволяє за допомогою складного комплексу фізичних, хімічних, схемотехнічних, технологічних і інших методів і прийомів розв'язати проблему створення високонадійних і економічних мініатюрних схем і пристроїв.

Високонадійні мікроелектронні пристрої можуть бути одержані виключенням ненадійних елементів, вдосконаленням технологічних методів виготовлення елементів і з'єднань, зниженням робочих потужностей і зменшенням критичності режимів роботи, використанням нових схем, а також побудовою елементів і пристроїв на нових фізичних принципах. Зниження вартості пристроїв може бути досягнуте виключенням нераціональних операцій, скороченням числа з'єднань, виключенням роздільної герметизації елементів і переходом до герметизації схем, вузлів і цілих блоків.

### 1.1 Класифікація мікросхем

По конструктивно-технологічному виконанню структур інтегральні мікросхеми підрозділяють на дві основні групи (Рис. 1): напівпровідникові і гібридні, інші (плівкові, вакуумні, керамічні і ін.).

Напівпровідникової (ПІМ) називають мікросхему, всі елементи і між елементні з'єднання якої виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідникової пластини; формується на основі біполярних або МОП-транзисторів.

Плівкової називають мікросхему, всі елементи, між елементні з'єднання і контактні майданчики якої виконані на діелектричній підкладці у вигляді плівок. Окремим випадком ГІМ є багато кристальні Ім.

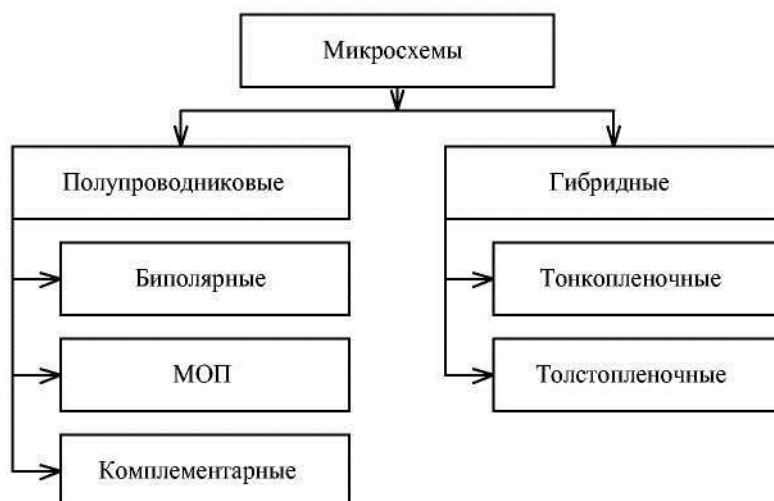


Рис. 1. Класифікація мікросхем по конструктивно-технологічному виконанню структур

Гібридної (ГІМ) називають мікросхему, що містить окрім елементів, що є нероздільне від діелектричної підкладки конструктивне ціле, компоненти і (або) кристали.

Компонент НІМ - частина НІМ, реалізуючи функція якого-небудь електронного елементу, але яка, на відміну від елементу, може бути виділена як самостійний виріб з погляду вимог до випробувань, приймання, поставки і експлуатації.

Кристал - частина напівпровідникової пластини, в об'ємі і на поверхні якої сформовані елементи, між елементні з'єднання і контактні майданчики однієї ПІМ.

**Основні конструктивні елементи мікросхем.** Будь-яка інтегральна мікросхема складається із структури, зовнішнього корпусу і засобів збірки, тобто деталей, що забезпечують з'єднання структури з корпусом і із зовнішніми електричними висновками.

Структура є функціональною основою мікросхеми. Вона містить всі елементи (і компоненти або кристали), між елементні з'єднання і контактні майданчики. Застосовувати структури для виготовлення апаратури не можна: вони крихкі, практично неможливо виконати монтаж структур і електричні під'єднання, на їх параметри сильно впливають зовнішні дії.

Корпус оберігає структуру від механічних навантажень і впливів навколишнього середовища при експлуатації мікросхеми, а також забезпечує зручний і надійний монтаж мікросхеми в апаратуру. Цю роль може виконувати не тільки спеціально виготовлений корпус (корпусні мікросхеми), а також герметизуючий склад, в який укладають структури (без корпусні мікросхеми).

## 1.2 Основні етапи виготовлення мікросхем

Засоби збірки – прокладки, припої, дротяні виводи, вивідні рамки (стрічки) і ін. Вони дозволяють міцно укріплювати структури і під'єднувати їх контактні майданчики до зовнішніх електричних висновків, що служать для включення мікросхем в електронну апаратуру.



Рис. 2. Етапи виготовлення мікросхем

Залежно від зовнішнього конструктивного оформлення розрізняють корпусні, безкорпусні і комбіновані ІМ. Основним матеріалом для безкорпусної герметизації є пластмаса. Що герметизуються в пластмасу ІМ мають точні зовнішню форму і габаритні розміри. Ці НІМ часто називають мікросхемами в пластмасових корпусах. При комбінованій герметизації арматура із структурою поміщається в спеціально виготовлену кришку, і потім весь вільний простір усередині кришки заповнюється герметиком. У технології виготовлення будь-якої мікросхеми можна віді-

лити основні етапи (Рис. 2), загальні для всіх мікросхем: виготовлення і очищення пластин або підкладок, формування структур мікросхем, збірка, випробування і вимірювання, завершальні операції. Якщо мікросхему герметизують в корпус, то підготовчими для збірки є процеси виготовлення деталей і вузлів, корпусів; для без корпусних мікросхем перед виконанням складки проводять процеси підготовки герметизуючих складів і процеси виготовлення арматури для під'єднування структур (вивідні рамки, стрічки і ін.).

Процес виготовлення будь-якої мікросхеми супроводжується контрольними операціями і завершується випробуваннями. Після випробувань і вимірювання параметрів задовольняючі вимогам мікросхеми проходять завершальні операції (забарвлення, лакування, маркування, упаковка), поступають на склад готової продукції виготовника електронної апаратури для передачі замовнику .

### ***Виготовлення пластин і підкладок***

Напівпровідникові пластини і діелектричні підкладки є груповими заготівками для виготовлення структур мікросхем. Напівпровідникові пластини застосовують також для виготовлення навісних активних компонентів і кристалів для гібридних мікросхем.

На діелектричних підкладках виготовляють пасивну частину структур гібридних мікросхем, а також плівкові мікросхеми. В даний час для промислового виготовлення напівпровідникових мікросхем застосовують кремній (Si). Окрім кремнію для напівпровідникових мікросхем і навісних активних компонентів і кристалів для мікросхем застосовують арсенід галію (GaAs) і інші напівпровідникові з'єднання.

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

Для гібридних і плівкових мікросхем застосовують підкладки із скла, ситалів, фото ситалів, керамік. Порівняно недавно почали застосовувати гнучкі полімерні підкладки, в основному з поліаміду, а також металеві підкладки з діелектричним покриттям (A1-A12 O3). Окрім цього, застосовують монокристалічні діелектричні підкладки з сапфіра.

Виготовлення пластин і підкладок включає: механічну обробку напівпровідникових або діелектричних матеріалів і очищення поверхні одержаних заготівок.

Механічна обробка напівпровідників і діелектриків утруднена їх високими твердістю і крихкістю. Не рекомендується використовувати звичні методи механічної обробки, вживані в металообробній промисловості, такі, наприклад, як плющення, штампування, вирубка. Для виготовлення пластин і підкладок з монокристалічних злитків і з листових заготівок застосовують метод абразивної обробки, тобто обробки твердішим, але менш крихким, ніж оброблювана поверхня, матеріалом.

У монокристалічних злитків до початку абразивної обробки перевіряють кристалографічну орієнтацію, оскільки устаткування для вирощування злитків не забезпечує точного збігу геометричної осі злитка із заданим кристалографічним напрямом.

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

В процесі механічної обробки і перед виготовленням структур очищення пластин і підкладок в промисловому виробництві, в даний час, виконують в різних рідких складах: органічних розчинниках, воді, сумішах на основі кислот, лугів, сильних окиснювачів. Сухе очищення є фінішним і, як правило, суміщена з подальшими операціями виготовлення структур. Формування структур мікросхем

Цей етап полягає у формуванні елементів, між елементних 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 напрямі (товщина плівок, глибини легування). Відповідно до цього всі методи виготовлення структур можна розділити на три групи: методи формування топології, методи отримання плівок, методи легування пластин і нарощування напівпровідникових шарів. Методи останньої групи відносяться тільки до процесів отримання напівпровідникових структур. Структури мікросхем виготовляють тільки груповим методом. Одночасній обробці на більшості операцій піддається партія пластин або підкладок, і на кожній з них формується не одна, а безліч структур.

### ***Збірка і герметизація мікросхем***

Загально прийнято під збіркою мати на увазі завершальний процес з'єднання деталей і складальних одиниць (вузлів), в результаті якого виходить готовий виріб. Для збірки корпусних ІМ паралельно виготовляють деталі і вузли корпусів, у ряді випадків - додаткову арматуру, наприклад, вивідні рамки, висновки на стрічкових носіях і ін. Для збірки без корпусних ІМ готують герметизуючі склади і виготовляють арматуру для під'єднання структур. Збірка ІМ включає під'єднання і монтаж структур до підстав корпусів, вивідних рамок або додаткових підкладок, монтаж навісних кристалів, компонентів до платні, під'єднання електродних висновків до контактних майданчиків і зовнішніх висновків НІМ, герметизацію. Навісні криста-

ли і компоненти виготовляють звичайно в окремих процесах і поставляють у вигляді комплектуючих виробів.

### ***Випробування і вимірювання***

Для відбраковки НІМ, що містять приховані дефекти, після герметизації проводять технологічні випробування і вимірювання параметрів. Технологічні випробування діляться на кліматичні, механічні і електричні. При кліматичних випробуваннях ІМ перевіряють на термоциклічність, волого-, тепло- і холодостійкість. За допомогою механічних випробувань на удар і віброміцність перевіряють механічну міцність конструкції і внутрішньо схемних з'єднань ІМ. В процесі електричних випробувань проводиться струмове тренування і перевірка НІМ на стабільність, а також вимірювання параметрів Ім.

### ***Завершальні операції***

До завершальних операцій відносяться забарвлення, лакування, гальванічні покриття, маркування, підготовка висновків для під'єднання в апаратуру, упаковка. Маркування, що містить умовне позначення ІМ, позначення першого висновку, рік і місяць випуску, товарний знак підприємства і клеймо відділу технічного контролю, повинна бути на кожній мікросхемі, що випускається. Упаковані мікросхеми поступають на склад готової продукції.

### **Питання для самоконтролю**

1. Наведіть класифікацію мікросхем.
2. Назвіть основні конструктивні елементи мікросхем.
3. Назвіть основні етапи виготовлення мікросхем.
4. Навіщо виготовляють пластини і підкладки ?
5. Наведіть структуру і властивості напівпровідників.
6. Навіщо виконують очищення пластин і підкладок?
7. Що мають на увазі під збіркою та герметизацією мікросхем?
8. Навіщо виконують випробування і вимірювання ?
9. Які операції відносяться до завершальних ?



## Тема 2. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР МІКРОСХЕМ

Взаємозв'язок проектування конструкції і технології. На відміну від традиційних електронних схем та електронних елементів, проектування яких практично мало залежить від подальшої технології, для мікросхем проектування найтіснішим чином пов'язане з технологією їх виготовлення. Це пояснюється тим, що НІМ є єдиним конструктивним цілим з вельми великою кількістю елементів малих розмірів. Параметри кожного елементу і робочі характеристики мікросхем в цілому визначаються не тільки точністю топології, але і вибором оптимальних матеріалів і технології. При цьому необхідно врахувати чинники, що впливають на точність процесів формування топології. Навіть незначні відхилення від заданих технологічних режимів приводять до відхилень від необхідної топології. Окрім цього, між елементами мікросхем завжди існують небажані взаємодії і паразитні ефекти, які також необхідно враховувати і зводити до мінімуму.

Завдяки взаємозалежності конструкції і технології при проектуванні НІМ початковими даними, разом із зовнішніми конструктивними, електричними і експлуатаційними, є дані, що відображають можливості і обмеження технології. Саме вони визначають оптимальну конструкцію ІМ.

Таким чином, для мікросхем поняття проектування конструкції і технології тісно взаємозв'язані, при цьому технології належить визначальна роль.

Основні принципи інтегральної технології. При виготовленні структур мікросхем керуються певними принципами, які обумовлені взаємозв'язком проектування конструкції ІМ і технології їх виготовлення і в рівній мірі відносяться до них обом.

Принцип сумісності елементів витікає з конструктивної єдності інтегральних мікросхем. Кожен елемент мікросхеми на відміну від електрорадіоелементів традиційних електронних схем виготовляють не в окремому технологічному процесі, а в єдиному зі всіма іншими елементами. Для мікросхеми - маємо справу не тільки з конструктивною, але і з технологічною інтеграцією, при якій в одному технологічному процесі одночасно виготовляються різні елементи (наприклад, транзистори, діоди, резистори, конденсатори). Саме тому при виборі типів і конструкції елементів, що входять до складу мікросхеми, необхідно оцінити практичну можливість їх сумісного формування в єдиному технологічному процесі. Крім того, при проектуванні необхідно врахувати, що для напівпровідникових мікросхем параметри елементів також взаємозалежними і визначаються властивостями і параметрами матеріалу напівпровідникових пластин, на яких виготовляється мікросхема.

Для практичного здійснення принципу сумісності елементів за основу беруть найскладніший елемент (транзистор). Конструкції інших елементів складаються тільки з таких областей, як і ті, на основі яких побудований транзистор. Характер технологічних обробок і їх послідовність визначаються конструкцією транзистора. Технологія виготовлення мікросхеми проектується так, що попутно одночасно з

транзисторами формується вся решта елементів. Наприклад, в біполярних мікросхемах резистори виходять одночасно з отриманням базових областей транзисторів, конденсаторами можуть бути зворотньоозміщеними р-п-переходи. Порушення принципу сумісності елементів приводить до технологічної неможливості створення мікросхеми або до необхідності введення в технологічний процес додаткових операцій.

Принцип локальності технологічних обробок позначає те, що при одночасному формуванні безлічі активних, пасивних елементів і між елементних з'єднань НІМ разом з процесами, в яких обробляється вся поверхня пластин або підкладок, в більшості процесів технологічній дії піддається не вся поверхня, а лише її окремі локальні ділянки. Форма, розміри і взаємне розташування цих ділянок на поверхні пластин (або підкладок) відповідає топологічному кресленню для даної обробки (для даного топологічного шару).

Практична реалізація цього принципу здійснюється за допомогою екранування ділянок, які не підлягають обробці, або за допомогою локалізації самих засобів обробки (Рис. 3).

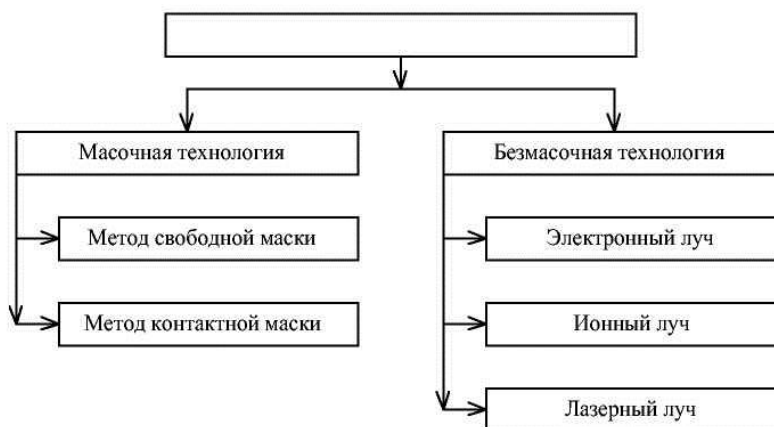


Рис. 3. Методи локалізації технологічних обробок при виготовленні структур НІМ до одиниць мікрметра, що забезпечує в порівнянні з вільними масками велику точність при менших розмірах топологічного малюнка

У першому випадку маємо справу з масочною технологією, в другому - з безмасочною. Масочна технологія заснована на екрануванні потрібних ділянок поверхні пластин (підкладок) за допомогою вільних або контактних масок. Вільні або, інакше, знімні маски застосовуються при формуванні тонко- і товсто плівкових мікросхем, елементів гібридних і плівкових ІМ. В товсто плівковій технології їх за традицією звичайно називають трафаретами.

Вільна маска - пластина з отворами, конфігурації, розміри і взаємне розташування яких відповідають топологічному кресленню формованого плівкового шару. Вільні маски виготовляються в самостійному технологічному процесі (допоміжне виробництво) і є технологічним інструментом багаторазового використання. Їх можна закріплювати, приводячи в контакт з поверхнею підкладок, а після нанесення

плівок знімати і потім знову використовувати. Товщина вільних масок близько 80-100 мкм.

Контактні маски - універсальні, їх можна застосовувати в процесах виготовлення будь-яких мікросхем, прецизійних вільних масок, вивідних рамок (стрічок) і ін. Контактна маска у вигляді плівки з отворами призначена для одноразового використання.

Контактні маски дозволяють формувати топологію і пряму, і зворотну щодо малюнка маски. У першому випадку спочатку наносять плівку, в якій необхідно одержати малюнок, потім зверху формують маску і через вікна в масці зайві ділянки плівки видаляють тим, що труїть. У другому випадку спочатку формують маску, потім зверху наносять плівку. Топологія в плівці формується в процесі видалення контактної маски.

Локальна обробка без використання масок може виконуватися гостро сфокусованим електронним, іонним або лазерним промінням, включенням, виключенням і переміщенням яких за заданою програмою управляють за допомогою ЕОМ. Принцип пошарового формування елементів мікросхем (принцип пошарової): при виготовленні структур мікросхем локальні обробки виконують багато разів, тобто елементи формують поступово, як би технологічними шарами. Наприклад, при виготовленні біполярної ІМ, сегмент розрізу кристала якої показаний на Рис. 4, локальну обробку проводять п'ять разів. Роль контактної маски кожного разу виконує плівка діоксиду кремнію з вікнами, відповідними топології формованого шару.

Число таких технологічних обробок рівне числу топологічних креслень на дану Ім. При виготовленні тонко плівкових НІМ або пасивної частини тонко плівкових х ГІМ елементи також формують пошарово - спочатку резистори, провідники, контактні майданчики, нижні обкладання конденсаторів, потім діелектрик конденсаторів і після цього верхні обкладання конденсаторів. Пошарово також формують і товсто плівкові структури.

Необхідною умовою при дотриманні пошарового принципу є точне поєднання кожного подальшого технологічного шару з попереднім.

На практиці при масочній технології поєднання шарів забезпечується наявністю комплекту суміщених один з одним вільних масок або комплекту суміщених шаблонів, за допомогою яких на поверхні пластин або підкладок формують контактні маски. У останньому випадку малюнок кожного подальшого шару (шаблону) поєднується з малюнком попереднього шару (на пластині) за допомогою спеціальних міток поєднання.

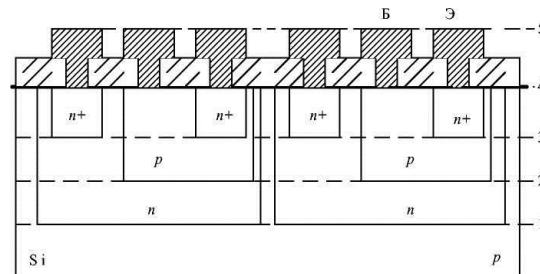


Рис.4. Фрагмент перетину структури НІМ на біполярних транзисторах: 1- перший технологічний шар - формування ізолюючих переходів; 2 - другий технологічний шар - формування переходів "база-колектор"; 3 - третій технологічний шар - формування переходів "емітер-база" і приконтактних  $n^+$  - областей; 4 - четвертий технологічний шар - нанесення шаруючи металізації; 5 - п'ятий технологічний шар - отримання топології контактів, провідних доріжок, контактних майданчиків.

### Питання для самоконтролю

1. Чим в цілому визначаються елементи і робочі характеристики мікросхем ?
2. Назвіть основні принципи інтегральних технологій ?
3. Як проектується технології виготовлення мікросхем ?
4. У чому позначається принцип локальності технологічних обробок?
5. Наведіть методи локалізації технологічних обробок при виготовленні структур НІМ.
6. Навіщо потрібні контактні маски ?
7. Покажіть фрагмент перетину структури НІМ на біполярних транзисторах.

## Тема 3. ВИГОТОВЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ ПЛАСТИН І ПІДКЛАДОК

### 3.1 Загальні відомості

Вимоги до пластин і підкладок. Технологія сучасних мікросхем пред'являє жорсткі вимоги до заготовок під структури мікросхем, і особливо, до напівпровідникових пластин. Ці вимоги відносяться до електрофізичних характеристик напівпровідника, а також до геометричних параметрів і якості поверхні пластин.

Електрофізичні характеристики монокристалічних напівпровідникових пластин і їх кристалографічна орієнтація повинні забезпечувати отримання мікросхем із заданими властивостями. Виходячи з цього, на етапі проектування вибирають необхідну орієнтацію і марку напівпровідникового матеріалу, а в процесі виготовлення пластин виконують контроль кристалографічної орієнтації і основних електрофізичних параметрів. У разі потреби пластини класифікують по значеннях електрофізичних параметрів.

Основні геометричні параметри пластин: діаметр і товщина.

Діаметр пластин визначається розмірами напівпровідникового злитка. Стандартними діаметрами найпоширеніших напівпровідників є 60, 76 і 100 мм. На пла-

стинах більшого діаметру можна виготовити більшу кількість кристалів мікросхем (табл.1).

Товщина пластин визначається не тільки їх стійкістю до механічних навантажень при маніпулюванні в технологічних процесах, але і здатністю зберігати форму. Із збільшенням діаметру без зміни товщини пластини при подальших термічних обробках збільшуються краєві сколи. У пластин великого діаметру тому необхідно збільшувати товщину, а це здорожує одиницю площі пластин.

Таблиця 1 Залежність кількості кристалів від діаметру пластин

Розмір кристала, мм	Площина кристала, мм <sup>2</sup>	Кількість кристалів на пластині	
		діаметр,	товщина, мкм
		76(450)	100(600)
1 x1	1	4214	7598
2x2	4	1018	1846
4x4	16	236	434
6x6	36	95	184

Якість поверхні характеризується завглибшки механічно порушеного шару, шорсткістю і якістю очищення від забруднень.

Механічно порушений шар складається з трьох частин (Рис. 5): зовнішній рельєфний шар має хаотично розташовані виступи, тріщини, виколювання; тріщинуватий шар має одиночні невикрошившіся виколювання і мікротріщини, що йдуть углиб; деформований шар має скупчення дислокацій, продовження мікротріщин і розташовані навколо них зони механічних напруг.

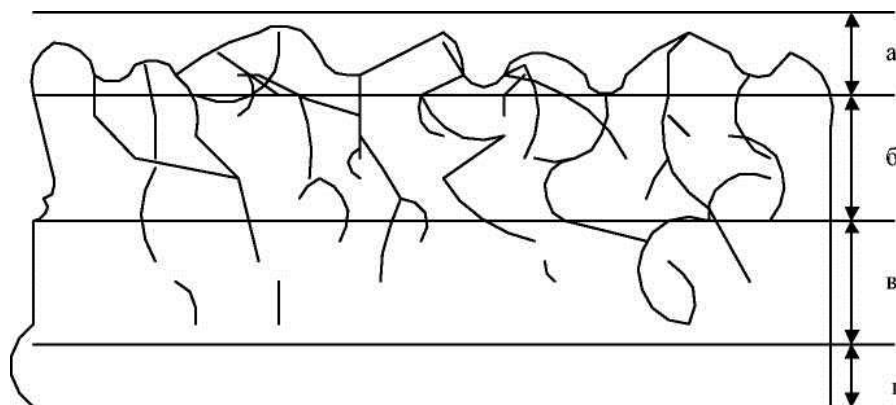


Рис. 5. Механічно порушений шар поверхні пластини:

а — рельєфний шар; б — тріщинуватий шар; в — деформований шар;  
г — не порушена структура пластини.

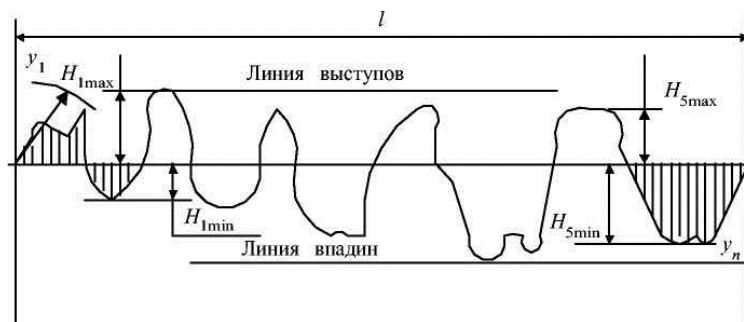


Рис. 6 . Профіль шорсткої поверхні підкладки

або висотою нерівностей профілю  $R_z$  по десяти крапкам:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 H_{i \max} - \sum_{i=1}^5 H_{i \min} \right).$$

Шорсткість (Рис. 6) може оцінюватися середнім арифметичним відхиленням профілю  $R_0$ , тобто середнім арифметичним абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини. /

Залежно від значень параметрів  $R_0$  і  $R_z$  якість обробки поверхні оцінюється відповідним класом шорсткості.

Шорсткість поверхні пластин в більшості випадків повинна бути не нижчою 13-14-го класів, що відповідає висоті мікронерівностей від 0,100 до 0,025 мкм.

Якість очищення пластин оцінюється: наявністю механічних і хімічно пов'язаних з поверхнею забруднень; кількістю адсорбованих атомів, іонів домішки, що доводяться на одиницю площі поверхні пластини, або числом моношарів адсорбованих домішкових молекул. Ідеально чисту поверхню в умовах виробництва мікросхем одержати не можна, оскільки повністю захистити пластини від адсорбції домішок неможливо. Під чистою поверхнею мають на увазі технологічно чисту поверхню, яка має концентрацію домішок, не перешкоджаючи відтворному отриманню заданих значень і стабільності параметрів мікросхем. Номінальні значення параметрів пластин і допустимих відхилень регламентовані технічною документацією для кожного конкретного випадку.

Підкладки гібридних і плівкових мікросхем не є складовою частиною елементів, вони виконують конструктивну роль підтримуючої плівкові і навісні елементи підстави, а також служать для електричної ізоляції елементів і між елементних з'єднань. Перш за все, вони повинні володіти хорошими ізоляційними і механічними властивостями. Підкладки виготовляють з діелектричних матеріалів з високим питомим електроопором, низькими діелектричною проникністю і тангенсом кута діелектричних втрат, високої електричної, а також механічною міцністю. Для ефективною передачі тепла від елементів матеріал підкладок повинен мати високу

теплопровідність. Необхідно, щоб матеріал підкладок був сумісний з матеріалами плівок, що наносяться. Матеріали вважаються сумісними, якщо в процесі технологічних операцій, при зберіганні і експлуатації готових мікросхем вони не вступають в небажані взаємодії один з одним або з навколишнім середовищем.

Матеріал підкладок повинен бути стійким до технологічних обробок, необхідних для виготовлення структур мікросхем, не погіршувати якість проведення технологічного процесу: не виділяти гази при нанесенні плівок у вакуумі, бути інертним до травильних рідин, вживаним при формуванні топології і структур, термостійким і ін.

Ідеальних матеріалів, що задовольняють всім вимогам, що пред'являються, не існує. Найбільшою мірою основним вимогам відповідають підкладки з скла, ситалів, кераміки, полієміда.

Основні недоліки підкладок з скла: низькі теплопровідність і механічна міцність. Підкладки з кераміки мають порівняно велику шорсткість поверхні, до якої чутливі параметри тонко плівкових резисторів, конденсаторів і між елементних з'єднань. Для тонко плівкових структур застосовують у порядку зростання потужності мікросхем: стекла С41-1, С48-3, ситали і кераміку (полікор, берилієву). Високо глиноземисту кераміку 22ХС застосовують тільки для товсто плівкових структур, оскільки вона має значну шорсткість поверхні. Глазурування шаром без лугового скла для зменшення шорсткості істотно зменшує теплопровідність кераміки. Для товсто плівкових структур застосовують також полікор і берилієву кераміку.

Гнучкі підкладки з полімеру (полієміда) відрізняються можливістю двостороннього нанесення тонких плівок. Вони здатні приймати різну форму при герметизації мікросхем, мають ряд інших переваг. Перспективними вважають метало діелектричних підкладки. Для тонко плівкових структур: алюмінієва основа з покриттям з оксиду алюмінію. Для товсто плівкових структур: основа з жаростійких сталей 20Х13, 15Х25Т або титана з покриттям (50-1080 мкм) з скла системи ВаО - MgO - В2О3 - SiO2. Такі підкладки мають низьку вартість, володіють хорошою теплопровідністю, стійкістю до механічних і термічних дій. Мікросхеми, виготовлені на них, можуть працювати в умовах, які неприйнятні для інших підкладок.

Вимоги до геометричних параметрів і якості поверхні діелектричних підкладок у принципі аналогічні вимогам до напівпровідникових пластин і відрізняються лише значеннями деяких встановлених норм і допусків. Габаритні розміри діелектричних підкладок стандартизовані, для більшості матеріалів вони складають 48 x 60 мм, при товщині від 0,5 до 1,6 мм. На ці розміри орієнтоване технологічне устаткування і нормалізований ряд типорозмірів плат мікросхем. Непаралельність сторін не перевищує 0,05 мм. Для тонко плівкових структур з товщиною плівок до 100 нм допустима висота мікро нерівності  $R < 25$  нм, що відповідає 14-му класу шорсткості поверхні. Підкладки для товсто плівкових структур можуть мати мікро нерівності висотою до 2 мкм, тобто клас шорсткості поверхні повинен бути не нижчим 8; під-

кладки розміром більше 60 x 48 мм не застосовують через викривлення при термообробці паст.

Особливе місце серед діелектричних підкладок займають підкладки з монокристалічного корунду, званого сапфіром. Сапфір володіє високими ізоляційними властивостями. На поверхні сапфіра можна нарощувати монокристалічні шари кремнію і на одержаних структурах кремній на сапфірі (КНС) виготовляти мікросхеми, відмінні хорошою ізоляцією елементів один від одного.

Механічна обробка напівпровідникових і діелектричних матеріалів. Напівпровідникові матеріали і монокристалічний діелектрик сапфір поступають на механічну виробничу ділянку у вигляді злитків; аморфні і інші діелектричні матеріали (скло, ситал, полікор, кераміка) у вигляді листових заготовок. Як вже наголошувалося, механічна обробка при виготовленні пластин і підкладок виконується за допомогою абразивів. Термін абразив від латинського *abrasio* (зіскоблювання) з'явився в 40-х роках нашого сторіччя.

Синтетичні абразивні матеріали, використовувані у виробництві мікросхем: алмази, карбід кремнію, електрокорунд, оксиди кремнію, хрому, цирконію, цеоліти.

Алмази синтетичні по механічних властивостях не поступаються природним. Алмаз - найтвердіший зі всіх відомих матеріалів. Твердість алмазу за шкалою Мооса рівна 10. Серед абразивних матеріалів алмаз виділяють в особливий клас.

Карбід кремнію (карборунд  $\text{SiC}$ ) залежно від кількості домішок має різний колір - від ясно-зеленого до чорного. У виробництві найчастіше застосовується карбід кремнію зелений. Твердість карбиду кремнію за шкалою Мооса рівна 9,5-9,7.

Електрокорунд білий - кристалічний оксид алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з різними домішками (0,5-1,5%). По твердості електрокорунд поступається карбиду кремнію, але міцність електрокорунду вища. Твердість за шкалою Мооса рівна 9-9,2.

Абразивні матеріали використовуються у вигляді порошків. Залежно від розмірів зерен абразивні порошки діляться на чотири групи: шліф зерно, шліф порошки, мікро порошки і тонкі порошки. У виробництві ІМ застосовуються порошки трьох останніх груп. Алмазні порошки за розміром зерен діляться на шліф зерно і мікро порошки, у виробництві ІМ застосовуються мікро порошки.

У позначення абразивного або алмазного порошку входить марка матеріалу і номер зернистості. Наприклад, ЕБМ14 електрокорунд білий, мікро порошок з розміром зерна основної фракції від 14 до 10 мкм; АСМ10/7 - алмаз синтетичний, мікро порошок з розміром зерна основної фракції від 10 до 7 мкм.

Суть абразивної обробки полягає в механічній дії твердішого і менш крихкого абразиву на менш твердий і крихкий матеріал. Абразивні порошки використовуються у вільному і зв'язаному вигляді.

Обробка вільним абразивом, тобто абразивним порошком у складі суспензії або пасти, виконується за допомогою ріжучих дисків, полотен, шліфувальних кругів, які при русі з великою швидкістю повідомляють зернам абразиву енергію.



Останні, ударяючись об поверхню оброблюваного матеріалу, виробляють локальні мікро руйнування. Частинки, що викришили, віддаляються із зони обробки рідкою частиною суспензії.

Обробка зв'язаним абразивом виробляється інструментом (диском, кругом) із закріпленими на його робочій частині за допомогою спеціальної зв'язки зернами абразиву, головним чином алмазу. Стійкість дисків і кругів залежить від їх габаритних розмірів, типу алмазного порошку, його концентрації і режимів обробки. Зв'язка, що закріплює алмазні зерна на ріжучій частині, повинна забезпечувати само заточувальний інструментів, тобто вона повинна утримувати алмазні зерна і в той же час не заважати видаленню з алмазовмістовного шару затуплених зерен. Для видалення частинок зруйнованого матеріалу при обробці зв'язаним абразивом застосовують спеціальні мастильні-охолоджуючі рідини, що складаються з води, поверхнево-активної речовини, що мастить речовини і сповільнювача корозії металевих деталей устаткування. Забруднення на поверхні пластин і підкладок утримуються унаслідок адсорбції.

Фізична адсорбція - результат міжмолекулярної (сили Ван-дер-Ваальса) і електростатичної кулонівської взаємодії. Адсорбовані частинки, скоюючи теплові рухи, можуть подолати сили зв'язку і відірватися (десорбція) від поверхні, тобто фізична адсорбція процес оборотний. Фізично адсорбовані забруднення розташовуються на поверхні в декілька шарів і порівняно легко віддаляються чистим розчинником, відпалом (випаровуванням) у вакуумі.

Хімічна адсорбція - необоротний процес, оскільки між забрудненнями і поверхнею утворюються міцні хімічні зв'язки. Забруднення закріплюються тільки одним шаром (моношар), видалення їх складніше.

Джерела забруднень - не тільки оператори, повітря виробничих приміщень, оснащення, технологічне устаткування, але і самі технологічні обробки. Цим пояснюється багатократність операцій очищення. Ступінь і склад забруднень різні при різних обробках, також різні вимоги до чистоти поверхні перед проведенням кожної операції.

На поверхні пластин і підкладок одночасно можуть бути присутнім багато видів забруднень. Найбільш трудно видимими є органічні і деякі хімічно пов'язані з поверхнею забруднення. З фізичних забруднень найважче віддаляються дрібні зерна абразиву, упродовжені в поверхневий шар. З розчинних у воді полярних забруднень складно віддаляються рухомі іони металів, що змінюють електропровідність поверхні, що викликають дрейф струму і появу інверсійних напівпровідникових шарів і тим самим роблять шкідливий вплив на стабільність параметрів ІМ.

***Відповідно до вживаних засобів очищення ділять на рідинну і суху.*** Рідинне очищення виконується органічними розчинниками; різноманітними складами, що містять луги, кислоти, пероксид, і інші реактиви, а також водою. Підібрати рідкий

засіб, що одночасно видаляє всі можливі поверхневі забруднення, вельми складно, тому рідинне очищення включає ряд послідовних операцій. Нерозчинні у воді органічні жирові забруднення роблять поверхню гідрофобної, тобто погано змочуваною водою і більшістю розчинів. Для рівномірного очищення поверхню підкладок (пластин) необхідно перевести в гідрофільне, тобто добре змочуване водою, стан. Операція видалення жирових забруднень, супроводжувана переключенням поверхні з гідрофобного стану в гідрофільний, називається знежиренням.

Знежирення - перша операція при рідинному очищенні.

Суше очищення застосовується на етапі формування елементів і між елементних з'єднань мікросхем і, як правило, виконується безпосередньо перед проведенням відповідальних технологічних процесів (напилення плівок, літографія) або суміщена, тобто проводиться в одному устаткуванні, з подальшою обробкою (наприклад, з отриманням термічного оксиду, з епітаксимальним нарощуванням напівпровідникових шарів).

Методи сухого очищення виключають необхідність застосування дорогих і небезпечних в роботі рідких реактивів, а також проблеми між операційного зберігання пластин і підкладок і очищення стічних вод, які є важливими при використуванні рідких засобів очищення. Крім того, процеси сухого очищення більш керовані і легше піддаються автоматизації.

З погляду механізму процесів всі методи очищення можна умовно розділити на фізичні і хімічні.

При фізичних методах забруднення віддаляються простим розчиненням, відпалом, обробкою поверхні прискореними до великих енергій іонами інертних газів. У тих випадках, коли забруднення не можна видалити фізичними методами, застосовують хімічні методи, при яких забруднення видаляють їх заміщенням, речовинами, що легко видаляються, переключенням в легко розчинні комплексні з'єднання або труїть пластин (підкладок). Той, що труїть супроводжується видаленням поверхневого шару разом із забрудненнями, що є на поверхні.

У технології мікросхем той, що труїть не завжди має на меті очищення. Воно застосовується для розмірної обробки, видалення шаруючи з порушеної механічними обробками структури, локального видалення шарів різних матеріалів при формуванні топології мікросхем, виявлення поверхневих дефектів напівпровідників і ін.

### **3.2 Маршрути виготовлення пластин і підкладок**

Маршрут виготовлення пластин кремнію. Перерахуємо операції маршрутного технологічного процесу і відзначимо призначення деяких з них.

1. Той, що труїть злитка проводиться для очищення поверхні і виявлення дефектів. Калібрування виконується для додання злитку строго циліндрової форми з діаметром, рівним діаметру стандартних пластин, на які розраховано вживане у виробництві устаткування. Той, що труїть злитка необхідний для видалення шару з

порушеною в процесі калібрування структурою кристала.

2. Орієнтація торця злитка - визначення роз орієнтації (кута відхилення) площини торця злитка від головної кристал графічної площини. Це необхідно, щоб перед різанням на пластини злиток закріпити у верстаті щодо ріжучого інструменту з урахуванням цієї роз орієнтації. Тоді поверхні всіх відрізуваних пластин будуть однаково орієнтовані, тобто виключиться або зведеться до мінімуму розкид параметрів мікросхем, пов'язаний з анізотропією властивостей напівпровідника.

3. Орієнтація напряму базового зрізу необхідна для однакової орієнтації пластин в технологічних установках.

4. Отримання додаткових зрізів необхідне для виконання сортування пластин у випадку, якщо їх випадково перемішують.

5. Наклеювання злитка для закріплення у верстаті різкі.

6. Різання злитка на пластини.

7. Очищення пластин для видалення забруднень на попередніх операціях.

8. Шліфування пластин для зменшення розкиду значень товщини, поліпшення площинної і паралелі сторін пластин, зменшення шорсткості їх поверхні.

9. Очищення пластин від забруднень.

10. Зняття фаски з периферійної частини поверхні пластин зменшує вірогідність освітлення сколів, тріщин, а в подальших високотемпературних процесах формування структур, появи дислокацій і механічних напружень, які приводять до збільшення густини дефектів, зниженню відсотка виходу годних, а іноді і до руйнування пластин.

11. Труїть пластин для видалення механічно порушеного поверхневого шару і очищення пластин.

12. Полірування пластин - операція доведення після шліфування і зняття фаски, виконується для поліпшення точності і якості обробки поверхні, для отримання дзеркально-гладкої поверхні з класом шорсткості 14 і вище. Слово полірування походить від латинського *polio* - роблю гладким.

13. Очищення поверхні пластин, сушка.

14. Контроль пластин на відповідність геометричних, електрофізичних параметрів і якості поверхні встановленим нормам.

15. Упаковка пластин в тару для зберігання, транспортування в цех виготовлення структур мікросхем.

Весь маршрут технології виготовлення пластин кремнію можна умовно розділити на три етапи: підготовка злитків до механічної обробки і різка на пластини, попередня обробка пластин (шліфування), остаточна обробка пластин (полірування). Кожний з цих етапів закінчується контролем пластин.

Маршрут виготовлення підкладок з скла, ситалу, кераміки. Нагадаємо, що скла є аморфними речовинами. Ситали - склокристалеві матеріали з високою, на відміну від скла, механічною міцністю і теплопровідністю, хімічно стійкі до

лугів і кислот. У складі кераміки присутні кристалічна, склоподібна і газова фази (гази в закритих порах). Всі ці матеріали відповідно їх структурі не потребують кристало графічеської орієнтації. Крім того, число механічних обробок в технологічних маршрутах виготовлення підкладок менше, ніж при виготовленні напівпровідникових або сапфірових пластин, оскільки початковим матеріалом є не злитки, а листові заготовки. Процес виготовлення підкладок спрощується ще і тим, що для них немає необхідності одержувати фаску на торцях.

Розглянемо основні операції технологічного процесу і їх призначення.

1. Одностороннє шліфування без приклеювання виконується для видалення основного припусків ситалових заготовок і отримання на даному етапі зразків заданих товщини і площини.

2. Склеювання заготовок в пакет для групової обробки на наступній операції.

3. Шліфування торців заготовок виконується для отримання підкладок заданих габаритних розмірів з прямокутним профілем периферії.

4. Розклеювання пакету.

5. Контроль габаритних розмірів підкладок.

6. Наклеювання підкладок неробочою стороною на диски-супутники для подальших операцій шліфування і полірування.

7. Шліфування виконується для поліпшення класу шорсткості поверхні і геометрії підкладок.

8. Полірування виконується для доведення робочої поверхні підкладок до заданого класу шорсткості.

9. Відклеювання підкладок.

10. Очищення поверхні підкладок для видалення забруднень в процесах механічних обробок.

11. Контроль готових підкладок на відповідність геометричних (довжина, ширина, товщина підкладок, не перпендикулярність торців), електрофізичних параметрів і якості поверхні (шорсткість робочої і зворотної сторін, відповідність зразкам зовнішнього вигляду по наявності тріщин, сколів, подряпин, раковин, плям, пір, якість очищення від слідів абразивної суспензії, скліючого складу, вологи і інших забруднень) встановленим нормам.

12. Упаковка підкладок в цигарковий або конденсаторний папір поштучно і потім пачками. Пачки підкладок ставлять на ребро в коробку, викладену ватою або еластичним матеріалом.

### 3.3 Електронна гігієна

Дотримання електронної гігієни - один з основних моментів забезпечення надійності технологічних процесів і якості мікросхем.

Електронна гігієна - система способів, засобів і умов, мікросхем, що виключають або зменшують забруднення, на всіх стадіях їх виготовлення.

Електронна гігієна регламентує: проектування технологій, оброблюваних об'єктів, що виключають або зменшують забруднення; забезпечення у виробничих приміщеннях чистої повітряної атмосфери; застосування в технологічних процесах чистих і надчистих газових і рідких середовищ; вміст виробничих приміщень і устаткування в чистоті; особисту гігієну обслуговуючого персоналу.

Чистота повітряного середовища характеризується наявністю пилу, вологи, сторонніх газів.

Запорошена повітряного середовища істотно погіршує якість і знижує відсоток виходу годних мікросхем (особливо мікросхем високого ступеня інтеграції). Механічні частинки приводять до подряпин, розривів між елементних з'єднань, електричним закороченням елементів, погіршують адгезію плівок, є причиною тріщин, кризних пір, нерівномірної товщини плівок і т.п.

Якщо розміри елементів мікросхеми близькі до розмірів порошинок, а кількість елементів велика, то запорошену повітря оцінюють кількістю порошинок в одиниці об'єму повітря. Відповідно до встановленого стандарту запорошену повітряного середовища виробничих приміщень підприємств мікроелектроніки оцінюють кількістю частинок розміром не менше 0,5 мкм в одному літрі повітря. Відповідно до цього виробничі приміщення діляться на 8 класів чистоти (табл. 2).

Запорошена повітряного середовища зменшується: 1) виключенням попадання мікрочастинок пилу у виробниче приміщення (розміщення підприємств оддалік крупних промислових міст в зелених зонах; забезпечення герметичності приміщень і робочих об'ємів устаткування; надмірний тиск в приміщеннях і в робочих об'ємах; багатоступінчата фільтрація поступаючого в приміщення повітря; контроль входу і виходу); 2) виключенням появи мікрочастинок (використовування в конструкціях і в обробці промислових будівель і приміщень зносостійких і пиловідштовхуючих матеріалів; приховані проводки; застосування пристроїв і одягу, які не утворюють і не притягають пил; місцева вентиляція для операцій з виділенням пилових частинок; дотримання працюючими правил електронної гігієни); 3) видаленням мікрочастинок (застосування вискоєфективних систем вентиляції і кондиціонування повітря, прибирання приміщень, устаткування, постійне і періодичне очищення оснащення, внутрішніх стінок і пристроїв робочих камер промислових установок).

Температура і вогкість повітряного середовища роблять значний вплив на якість і відтворність технологічних процесів. Коливання температури змінюють лінійні розміри оснащення і оброблюваних об'єктів, швидкості хімічних реакцій, швид-

кості випаровування вживаних матеріалів, свідчення контрольно-вимірювальних приладів, параметри структур і готових ІМ. Саме тому для кожної чутливої до коливань температури технологічної операції встановлюються норми допусків на відхилення від оптимальної температури повітряного середовища.

Таблиця 2. Розділення виробничих приміщень або робочих об'ємів по запрошеній повітряного середовища

Клас чистоти	Максимальне число частинок розміром > 0,5 мкм в 1 л повітря	Вид робочого об'єму або приміщення
1	0	Пило захисті камери
2	5	Те ж
3	35	Те ж
4	350	Чисті кімнати
5	1000	Те ж
6	3500	Чисті приміщення
7	10000	Зона обслуговування
8	35000	Те ж

Наприклад, для отримання топологічного малюнка з шириною лінії 1 мкм і менш необхідно підтримувати температуру з точністю  $+ 0,1^{\circ} \text{З}$ .

Вологе середовище небажане при проведенні практично всіх технологічних операцій. Адсорбуючись на різних поверхнях, волога і розчинені в ній речовини приводять до утворення небажаних оксидів і важко розчинних з'єднань. При термічних обробках на таких поверхнях можуть утворитися нерівності (ерозія), що приводять до погіршення параметрів. Вогкість повітря виробничих приміщень підтримують мінімальною, але не нижче за санітарну норму для працюючих.

Відповідно до вимог до умов виробництва НІМ приміщення розділяють на три категорії, норму температури і відносну вогкість для яких приведені в Табл. 3.

Чисті приміщення, кімнати і локальні об'єми дозволяють проводити прецизійні технологічні процеси. Для успішного проведення всього технологічного процесу в одному виробничому приміщенні параметри повітряного середовища повинні підтримуватися на рівні, що вимагається для виконання найвідчутнішої до цих параметрів операції. Забезпечення високої якості середовища всього виробничого приміщення пов'язане з великими економічними витратами

Таблиця 3. Розділення виробничих приміщень по температуро-вологісним параметрах повітряного середовища

Категорія мікроклі- мату	Температура, °З		Відносна вогкість, %
	влітку	взимку	
I	22 ±	22 ±	45 ±5
II	20 ±	23 ± 1	50 ±5
III	20	23 ±2	50 ± 10

. Технологічний процес тому ділять на групи операцій, що вимагають близьких значень параметрів повітряного середовища. Відповідно до цього виробництво ділять на ряд технологічних ділянок, що займають окремі приміщення.

Відповідальні операції виконують в чистих кімнатах, приміщеннях обмеженого об'єму з класами чистоти 4 і 5, задовольняючих вимогам по температуро-вологісним і іншим параметрам. Класи чистоти 4 і 5 одержують в чистих приміщеннях - виробничих приміщеннях класу чистоти 6, призначених для розміщення групи чистих кімнат. Вищі класи чистоти одержують в локальних робочих об'ємах (пило захищених кабінах та камерах), що служать для виконання прецизійних процесів. Пило захищені кабіни призначені для розміщення технологічного устаткування, оброблюваних об'єктів і оператора, коли немає виділень забруднюючих речовин. Пило захищені камери відповідають жорсткішим вимогам, вони призначені для знепилювання устаткування і оброблюваних об'єктів і запобігання винесенню забруднюючих речовин з камери в зону дихання оператора. Допустимі коливання температури в них не більш  $\pm 0,2$  °З.

До локальних робочих об'ємів відносяться також хімічні скафандри для прецизійних операцій, в процесі проведення яких виділяються забруднюючі речовини. Герметизація таких скафандрів знижує продуктивність праці через незручність роботи у висновках рукавичок; використання захисної повітряної завіси перед відкритим робочим отвором вирішує проблему захисту оператора від шкідливих виділень, не знижуючи продуктивність виконання операції. Чистота повітряного середовища в локальних робочих об'ємах досягається за рахунок безперервної подачі потоку очищеного повітря.

Модульні чисті кімнати є найпрогресивнішими. Модульні кімнати, диференційовані по класах чистоти, складаються із стандартних елементів: фільтруюча стеля, фільтруючі стіни, перфоровану підлогу, двері, клапани для видалення диму, фільтруючі блоки і ін. У свою чергу, варіантні поєднання різних чистих кімнат, що зв'язаних між собою чистим прохідним коридором і чергуються із зонами обслуговування, дозволяють одержувати чисті приміщення різних плануваль. Чисті примі-

щення модульного типу відрізняються гнучкістю зміни планувань відповідно до необхідної зміни технології.

Чистота води є одним з чинників, що впливають на якість проведення технологічних процесів. У виробництві мікросхем вода застосовується у великих кількостях для складання різних розчинів, промивок, а також як реагент і захисне середовище. Природна вода містить велику кількість механічних частинок (гідрозолей), розчинених мінеральних солей, домішок міді, срібло, золото, бактерій і т.п. У виробництві ІМ застосовують воду, очищену від забруднень. Показником ступеня чистоти води є її питомий опір. Опір води сильно залежить від температури, тому прийнято указувати значення питомого опору при 20 °С. Власний питомий опір ідеально чистої води рівний 25 МОм.

У виробництві мікросхем розрізняють перший, другий і третій ступінь чистоти води, яким відповідають значення питомого опору 18, 10 і 1 МОм (вода мазкий А, Би і У відповідно).

Окрім питомого опору, визначають вміст у воді кремнієвої кислоти, мікрочастинок, мікроорганізмів, міді, заліза і т.п. Для виробництва мікросхем воду піддають попередньому, остаточному і фінішному очищенню.

Попереднє очищення води від зважених і колоїдно-розчинених частинок виконують методами дистиляції, сорбції за допомогою спеціальних фільтрів, реагентної коагуляції, електрокоагуляції і ін. Заздалегідь очищена вода має розчинні солі і інші домішки.

Для остаточного очищення води від розчинних речовин в даний час застосовують очищення іонно-обмінними смолами (деіонізацію) і метод зворотного осмосу. Фінішне очищення виконують безпосередньо на робочому місці перед використанням води.

Чистота устаткування, приміщення і особиста гігієна працюючих - найважливіша складова частина електронної гігієни. Необхідність зменшення забруднень від устаткування враховується, починаючи з його проектування (вибір матеріалів, конструкцій, рельєфу поверхонь і ін.) і кінчаючи регламентацією очищення зовнішніх і внутрішніх частин устаткування. У чистих кімнатах для збереження лапідарності чистого потоку повітря, устаткування розміщується так, щоб відстані між робочими місцями були не менше 1—1,2 м, а відстані від стін до устаткування - не менше 0,5-0,8 м. Для зменшення впливу тепла, що виділяється устаткуванням, на конвективне переміщення частинок пилу устаткування вбудовується в стінні панелі.

Така розстановка дозволяє проводити профілактичне очищення устаткування ззовні чистої кімнати.

В повітрі чистих кімнат є частинки розмірами від сотих до декількох десятих часток мікрометра, які не уловлюються фільтрами установок очищення і не контролюються при аналізі запоорошеної. Ці частинки можуть осідати і накопичуватися в



приміщенні. Для їх видалення необхідне періодичне вологе прибирання, іноді з додаванням 5% гліцерину, щоб пил не зривався з поверхонь.

Вода для вологого прибирання полов, стін, стель повинна бути чистою, краще деіонізованою з питомим опором не менше 0,5 МОм-см.

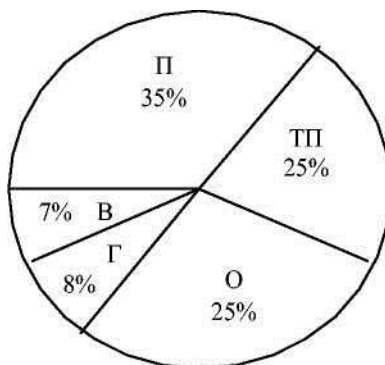


Рис. 7. Основні джерела мікрочастинок пилу: П— обслуговуючий персонал; ТП- технологічний процес; Про - устаткування, оснастка, засоби автоматизації; Г— гази і хімікати; У — повітряне середовище.

Як видно з Рис. 7, основним джерелом мікрочастинок пилу є працюючий персонал. Повне управління станом повітряного середовища у виробничих приміщеннях, необхідне, для прецизійної технології виробництва мікросхем можливе лише за умови створення повністю автоматизованих ліній із заміною людини роботом. Проте на думку фахівців, зараз тільки близько 40% виробничих процесів можуть бути роботизовані, і найближчими роками не вдасться повністю виключити людину з виробництва. Саме тому обслуговуючий персонал повинен дотримувати правила особистої електронної гігієни.

Джерелами забруднень від працюючого персоналу є, головним чином, шкіра людини і одяг. Через шкіру людини виділяються пари води, солей, жиру і інших речовин. В результаті постійного оновлення верхнього покриву шкіри відбувається відшаровування віджилх частинок. Залежно від виду діяльності число частинок пилу, відокремлюваного від одягу людини, може мінятися в широких межах.

З цих причин роботи в чистих кімнатах ведуться в спеціальному робочому одязі, виготовленому з матеріалу з мінімальним пило видаленням. Перш ніж потрапити в чисте приміщення, працівники проходять проміжне приміщення, вбиральні, обдуваючи шлюзи. На підприємствах мікроелектроніки також проводиться постійний контроль умов праці.

Служби електронної гігієни, охорони праці, оточуючої середовища і протипожежній безпеці здійснюють контроль виконання діючих інструкцій і стану умов праці в підрозділах підприємства і на кожному робочому місці. Строге дотримання всіх правил і виконання робіт відповідно до вказівок НТД забезпечує чітку технологічну дисципліну при виготовленні мікросхем і сприяє якісному виконанню всіх технологічних процесів.

### 3.4 Рідинне очищення поверхні пластин

Фізичне очищення. При очищенні в першу чергу необхідно видалити молекулярні органічні і хімічно пов'язані з поверхнею забруднення, а потім залишкові іонні і атомарні. При фізичному рідинному очищенні відбувається десорбція адсорбованих поверхнею забруднень без зміни їх складу, тобто без хімічних реакцій, шляхом простого розчинення. Оскільки можливе зворотне забруднення поверхні з рідини, що очищається, необхідно слідувати принципу її безперервного оновлення (освіження).

Знежирення (відмивання). У органічних розчинниках (толуолі, чотирьох хлористому вуглеці, діхлоретані, спиртах: етиловому, метиловому, ізопропіловому і ін.) застосовується для видалення з поверхні пластин (підкладок) жирів тваринного і рослинного походження, мінеральних мастил, мастил, воску, парафіну і інших органічних і механічних забруднень.

Десорбція молекул жиру з оброблюваної поверхні відбувається в результаті їх власних коливальних рухів і тяжіння з боку молекул розчинника. Якщо сили зв'язку з поверхнею менше сил тяжіння молекулами розчинника, частинки жиру відриваються від поверхні і завдяки дифузії розповсюджуються за об'ємом оброблюваної рідини.

Знежирення в органічних розчинниках найчастіше виконують зануренням, в парах, за допомогою ультразвуку, ступеневою обробкою.

Відмивання водою. Застосовується для очищення від залишків полярних розчинників після знежирення, від залишків травильних, флюсів, кислот, лугів, солей і інших забруднень. Так само як і в органічних розчинниках, відмивання у воді супроводжується розчиненням забруднень або механічним змиванням порошинок, ворсинок і інших частинок. Відмивання виконують в підігрітій до 50-60 ° деіонізованій воді. При менших температурах відмивання недостатньо ефективне, при великих температурах можливе закріплення на оброблюваній поверхні залишків деяких забруднень, наприклад залишків лужних розчинів в результаті гідролізу лужних солей. Після відмивання в підігрітій воді пластини (підкладки) відмивають в холодній воді, щоб на поверхні не залишилися сліди забруднень, що перейшли у воду, що має місце при швидкому випаровуванні води (коли пластини підігріті). Відмивання у воді виконують зануренням, в багатокаскадних ваннах, струменем, гидромеханічним способом, в УЗ-ВАННАХ.

Хімічне очищення. Цей вид обробки передбачає руйнування забруднень або поверхневого шару очіщуємого об'єкту в результаті хімічних реакцій.

Хімічне знежирення. Виконують в складах, що руйнують молекули жиру, але не діючих на оброблюваний матеріал. У розчин переходять продукти реакції, тому зворотне забруднення молекулами жиру практично відсутнє.

Знежирення в розчинах миючих порошків. В процесі знежирення такими розчинами омиляємі жири переводяться в мило, що є розчинними у воді солями, які

віддаляються подальшим відмиванням у воді. До вмилених жирів відносяться всі рослинні і тваринні жири, які є складними ефірами гліцерину і високомолекулярних органічних кислот (стеаринової, олеїнової, пальмітинової і ін.).

Знежирення в лугах. Супроводжується хімічною реакцією омилення. Неомиляючі жири при цьому не розкладаються, але можуть утворювати емульсії, особливо при введенні в луг поверхнево-активних речовин. Емульсії утримують забруднення в миючому розчині, запобігаючи їх зворотному попаданню на поверхню, що очищається.

Відмивання в кислотах. Застосовується для очищення поверхні від атомів і іонів металів, від жирових забруднень, а також від оксидів, нітридів, сульфідів і інших хімічних з'єднань. Видалення іонів металів супроводжується їх витісненням іонами водню. Для видалення атомів металів застосовують кислоти, розчинювальні ці метали.

Той, що труїть звичайно проводиться після знежирення, оскільки тільки в цьому випадку травитель добре змочує всю поверхню пластин, і верхній шар віддаляється рівномірно.

Процес труїть можна розбити на п'ять стадій: дифузія реагентів до оброблюваної поверхні, їх адсорбція поверхнею, хімічна взаємодія їх з оброблюваним матеріалом, десорбція продуктів хімічних реакцій, дифузія їх від поверхні.

### **3.5 Сухе очищення і труїння**

Методи сухого очищення, за винятком відпалу, почали застосовуватися порівняно недавно. Їх поява стимулювалася не тільки проблемами виключення забруднень, але і головним чином необхідністю прецизійного локального труїть через контактні маски при формуванні топології мікросхем.

Термообробка (відпал). Термообробка застосовується для видалення адсорбованих поверхнею домішок, розкладання поверхневих забруднень і випаровування летючих з'єднань. Як правило, відпал проводиться у вакуумних і термічних установках безпосередньо перед процесами оксидування, епітаксії і ін. Наприклад, при вирощуванні на кремнії маскуючих плівок газу і волога віддаляються з поверхні у міру нагрівання пластин до температури оксидування. При відпалі напівпровідникових пластин у вакуумі з їх оксидованої поверхні вже при температурі 400 ° з легко десорбуючим вологу, вуглекислий газ, легкі вуглеводи. Оксидні плівки з поверхні кремнію у вакуумі віддаляються при температурах вище 900 ° З.

Іонне труїть. Іонне труїть - процес видалення розпилюванням шаруючи речовини із забрудненнями, що знаходяться на його поверхні, і адсорбованими газами. Той, що труїть виконують у вакуумних установках шляхом бомбардування пластин або підкладок (часто в даному випадку званих мішенями) прискореними позитивними іонами інертних газів.

Контроль якості очищення. Існує багато методів кількісного і якісного контролю забруднень поверхні. Більшість з них застосовується в лабораторних умовах при відробітку технології. Для оцінки якості очищення в промисловому виробництві найбільш ширше застосовуються легко здійснимі і не вимагаючи складного устаткування методи.

Метод крапок, що світяться. Заснований на використуванні явища розсіяння світла на механічних забрудненнях, що знаходяться на контрольованій поверхні, острівцях оксидів, конгломератних утвореннях, а також на дефектах (виколлах, подряпинах). Конгломератні утворення виникають в результаті коагуляції кремнієвої кислоти під дією іонів металу  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Ba}^+$ ,  $\text{Zn}^+$  або ряду органічних забруднень. Наявність кремнієвої кислоти пояснюється тим, що на чистій поверхні кремнію завжди є власні оксидні шари і адсорбована волога.

Контроль полягає в спостереженні поверхні пластин в темному полі оптичного мікроскопа (МБІ-11, ММУ-3) і підрахунку числа крапок, що світяться. Косе освітлення виключає попадання у полі зору спостерігача відображених від чистої поверхні пластин проміння. Кількість крапок, що світяться, в полі зору при певному збільшенні мікроскопа є критерієм оцінки якості очищення.

Метод краплі, або вимірювання краєвого кута змочування. Заснований на здатності води змочувати поверхні чистих або забруднених високо полярними речовинами пластин або підкладок і не змочувати поверхню, забруднену жирами.

На поверхню пластини за допомогою дозуючого пристрою наноситься крапля води або годинного масла. За допомогою оптичної системи установки УКУС-1 збільшене зображення краплі проектується на екран, де і вимірюється лінійкою з відліком в градусах краєвий кут змочування поверхні. Для чистих поверхонь пластин і підкладок краєвий кут змочування маслом не повинен перевищувати  $1-3^\circ$ .

### Питання для самоконтролю

1. Які вимоги відносяться до пластин і підкладок ?
2. Наведіть залежність кількості кристалів від діаметру пластини ?
3. Як формується механічно порушений шар поверхні пластини ?
4. Наведіть профіль шорсткої поверхні підкладки ?
5. Які властивості повинні мати матеріали підкладок ?
6. Назвіть основні недоліки підкладок ?
7. Які вимоги пред'являють до геометричних параметрів і якості поверхні діелектричних підкладок ?
8. Наведіть маршрут виготовлення пластин кремнію.
9. Назвіть основні операції технологічного процесу виготовлення підкладок ?
10. Що таке Електронна гігієна ?
11. Поясніть технології рідинного очищення поверхні пластин і підкладок ?
12. Поясніть технології сухого очищення поверхні пластин і підкладок ?

## Тема 4. МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ МІКРОСХЕМ

### 4.1 Загальні відомості

Застосування літографії. Упровадження літографії в напівпровідникове виробництво в 1957 р. визначило подальший розвиток елементної бази електроніки і дозволило перейти від дискретних елементів до інтегральних.

В даний час області застосування літографії істотно розширилися. У виробництві сучасних мікросхем літографія найуніверсальніший технологічний процес. Вона дозволяє відтворювати і з великою точністю виконувати складні малюнки з розмірами елементів до одного і менш мікрметра в різноманітних матеріалах. Літографія застосовується при виготовленні напівпровідникових і плівкових структур, для отримання всіляких канавок і поглиблень в напівпровідникових і інших матеріалах. З її допомогою виготовляють шаблони - інструменти для проведення самого процесу літографії, одержують кризні отвори у фользі при виготовленні прецизійних вільних масок, вивідних рамок або стрічок, вживаних для автоматизованої збірки і герметизації Ім. За допомогою літографії можна розділяти пластини або підкладки з готовими структурами на окремі кристали або платню, виготовляти прецизійні деталі, створювати точні шкали і т.д.

Основне призначення літографії при виготовленні структур мікросхем - отримання на поверхні пластин (або підкладок) контактних масок з вікнами, відповідними топології формованих технологічних шарів, і подальша передача топології (малюнка) з маски на матеріал даного шару.

Суть процесів літографії. Літографія є складним технологічним процесом, заснованим на використуванні явищ, що відбуваються в актинорезистах при актинічному опромінюванні.

Актинорезисти, на практиці звані просте резистори, є матеріалами, чутливими до випромінювання певної довжини хвилі (до актинічного випромінювання), і стійкі (резист – чинить опір) до технологічних дій, вживаних в процесі літографії. Під дією випромінювання ті, що відбуваються в резистах процеси необоротно міняють їх стійкість до спеціальних складів-проявників. Резисти, розчинність яких в проявнику збільшується після опромінювання, називаються позитивними. Негативні резисти після опромінювання стають практично нерозчинними в проявнику.

Локальне опромінювання (експонування) здійснюється або тіньовим способом, тобто екрануванням потрібних ділянок непрозорими для випромінювання ділянками шаблонів, або локалізацією самого випромінювання за допомогою, наприклад, оптичного проектування зображення. Після однакового експонування шарів позитивних і негативних резистів при прояві одержують резистивні маски з протилежними, позитивним і негативним по відношенню до характеру локального опромінювання, малюнками (Рис. 8) .бх0)

Вікнам маски з позитивного резиста відповідають опромінені ділянки; у масці з негативного резиста вікна утворюються на неопроміненних ділянках. Контактні резистивні маски формуються в результаті чутливості резистів до актинічного випромінювання. Для подальшої передачі топологічного малюнка з маски на матеріал технологічного шару необхідна стійкість маски до подальших технологічних обробок.

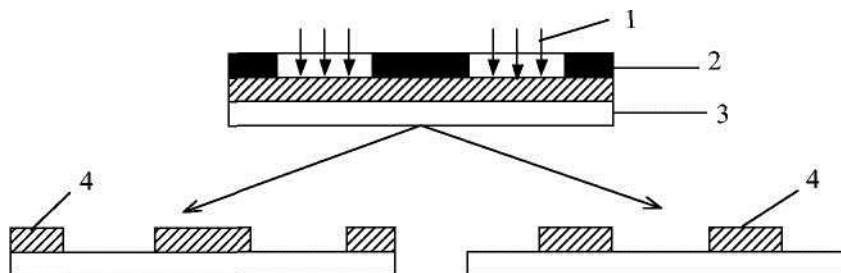


Рис. 8. Отримання контактних резистивних масок за допомогою позитивних (а) і негативних (б) резистів: 1- актинічне випромінювання; 2 - шар резиста; 3 - підкладка; 4 - резистивна маска

Етапи і основні операції літографічного процесу. Процес літографії можна розділити на три етапи, кожний з яких включає ряд операцій (Рис. 9).

Формування шаруючи резиста: підготовка поверхні підкладок, нанесення шаруючи резиста, термообробка (1-а сушка) шаруючи.

Формування резистивної контактної маски: передача топологічного малюнка на шар резиста - поєднання і експонування, прояв, термообробка (2-а сушка).

Передача топологічного малюнка з маски на матеріал формованого шару структури НИМ: видалення матеріалу (труїть) або нанесення матеріалу (наприклад, плівки металу), видалення резистивної маски.

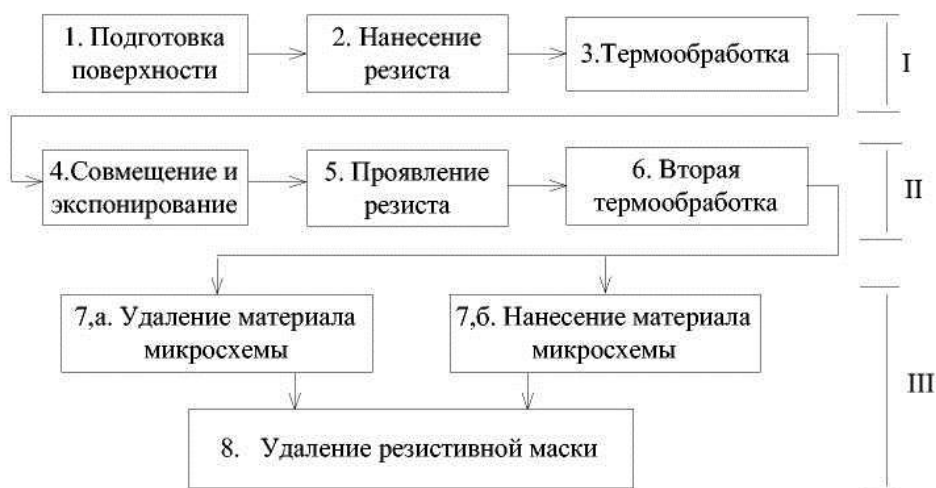


Рис. 9. Етапи ( I, II, III) і операції (1-8) літографічного процесу: I - формування шаруючи резиста; II - передача малюнка на шар резиста; III -передача малюнка на матеріал НИМ

Як видно з Рис. 9 і доповнюючого Рис. 10, передача малюнка з резистивної маски може виконуватися двома способами.

При прямій літографії (Рис. 10,а) плівка, в якій формується малюнок, нанесена на підкладку до формування шару резиста. Передача малюнка на плівку здійснюється тим, що труїть. Малюнок, одержуваний в плівці, відповідає малюнку маски.

При зворотній літографії плівка, в якій необхідно одержати малюнок, наноситься поверх вже сформованої резистивної маски. Частина плівки, як показано на Рис. 10,б, віддаляється разом з маскою («вибухова» літографія), і на підкладці залишається необхідний малюнок плівки. Для «вибухової» літографії необхідно забезпечити відповідну (з негативним нахилом) форму бічних стінок вікон маски і порівняно з плівкою товстий шар резиста. Разом з «вибуховою», різновидом зворотної літографії є спосіб, при якому плівка електролітично осідає тільки у вікна маски, з високою точністю відтворюючи її малюнок. При зворотній літографії малюнок, передаваний на плівку, протилежний малюнку резистивної маски. Перевагою зворотної літографії є можливість обійтися без того, що труїть.

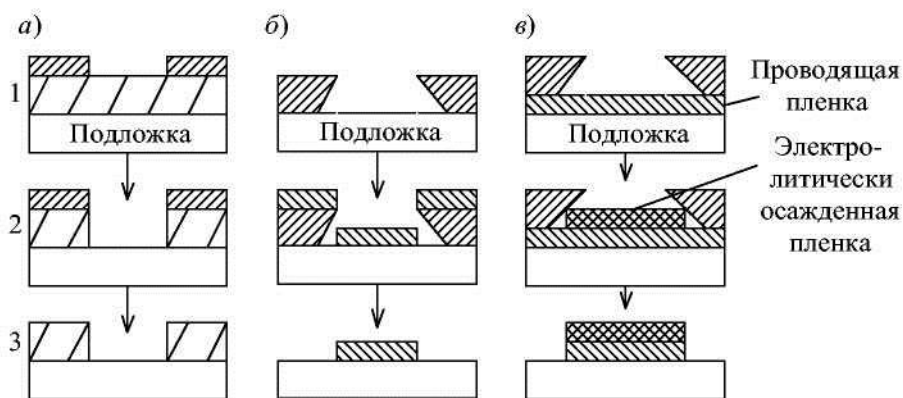


Рис. 10. Літографія пряма (а), зворотна "вибухова" (б) і зворотна з електролітичним осадженням плівки (в): 1 - формування резистивної маски; 2 — передача з малюнка з маски на шар SiO<sub>2</sub> при прямій літографії (а), нанесення плівки у вікна і поверх маски (б) або у вікна (в); 3 - видалення резистивної маски.

Електронна літографія може виконуватися шляхом послідовної передачі топологічного малюнка на шар резиста сфокусованим електронним променем або шляхом одночасної проекції всього малюнка. Те ж можна сказати і про іонну літографію.

## 4.2 Оптична літографія (фотолітографія)

Стандартна фотолітографія. Для стандартної фотолітографії застосовують фоторезисти, чутливі до ультрафіолетового (УФ) випромінювання з довжиною хвилі від 310 до 450 нм.

Фоторезисти є складні полімерні композиції, у складі яких є фото чутливі і плівкостворючі компоненти, розчинники і спеціальні добавки. Останні вводять для поліпшення умов плівко створення (розчинники), зміни фото чутливості (сенсibiliзатори), підвищення адгезії фото резистивного шару до підкладок, поліпшення стійкості до дій кислот, лугів, високих температур і ін. Розчинники визначають стабільність властивостей готових фоторезистів, впливають на процес нанесення і подальше висихання фото шару.

Опромінені ділянки фото шару, на відміну від неопромінених, стають гідрофільними, добре змочуються і віддаляються лужними проявниками.

Негативні фото резисти виготовляють на основі полівінілцинамата або на основі каучуків. Полівінілцинамат (ПВЦ) є складним ефіром циннамоїльної кислоти і полівінілового спирту і має загальну формулу  $R_1-Pr- R_2$ , де  $R_1$ - фото чутлива цинамотна група;  $R_2$  – плівкостворюча частина полівінілового спирту;  $Pr$  - сполучаючий їх атом кисню.

При поглинанні квантів випромінювання найслабкіші в світлочутливих частинах молекул хімічні зв'язки  $CN=CN$  розриваються. За рахунок зв'язків, що звільнилися, відбувається фотоструктуризація, тобто поперечне зшивання молекул ПВЦ в тривимірну сітку. Негативні фоторезисти на основі каучуку найчастіше є механічною сумішшю циклокаучука і бісазіда. Циклокаучук є полімерною основою і володіє слабкою фоточутливістю. Під дією опромінювання азиди розпадаються на азот і нітрєн. Нітрєн, що знаходиться у збудженому стані, вступає в хімічну взаємодію з каучуком, в результаті відбувається зшивання лінійних полімерів каучуку вільними радикалами, що утворюються.

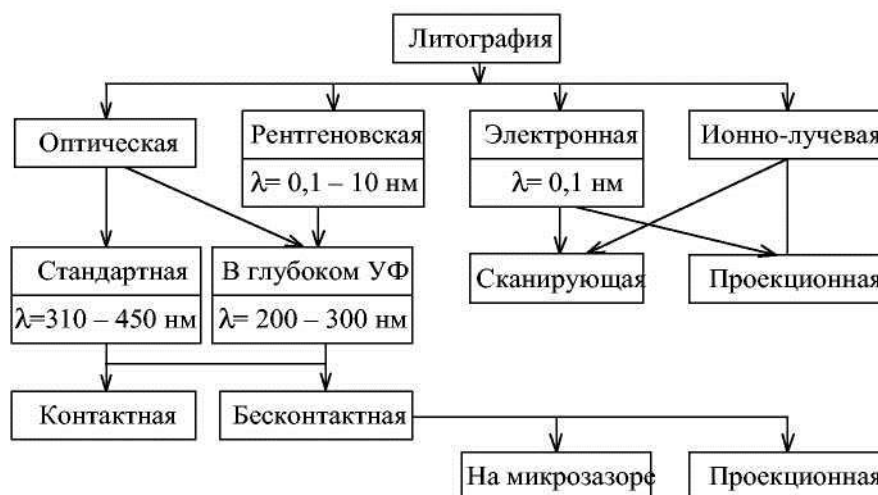


Рис. 11. Класифікація літографічних процесів



Фотошаблони є основними інструментами фотолітографії, з їх допомогою виробляється локальне опромінювання фотошару відповідно до топології мікросхеми. Фотошаблон для виготовлення структур мікросхем - плоскопаралельна пластина (або гнучка плівка) з прозорого для УФ-ІЗ-ЛУЧЕННЯ матеріалу з нанесеним на її робочу поверхню непрозорим плівковим малюнком, відповідним топології одного з шарів структури мікросхеми і багато разів повтореним із строго певним кроком в межах робочої області пластини (або плівки).

Для основи фотошаблонів застосовують оптичне боросилікатне скло або полімерні плівки, які добре обробляються і не змінюють властивостей під дією випромінювання. Для виконання малюнка застосовують галоїдно-срібну фотографічну емульсію (емульсивні фотошаблони), метали (металізовані фотошаблони) і напівпрозорі для видимого світла оксиди або інші матеріали (транспаренти, кольорові фотошаблони).

Формування фотошару забезпечити отримання рівномірних по товщині бездефектних фотошарів з хорошою адгезією до підкладки при збереженні початкових властивостей.

Підготовка підкладок до нанесення фоторезисту у кожному конкретному випадку індивідуальна і визначається матеріалом підкладки, технологією його отримання, станом поверхні і подальшим призначенням фотомаски. Під підкладкою в літографічних процесах мають на увазі той матеріал, на якому формують резистивний шар. У виробництві, наприклад, напівпровідникових ІМ фотолітографію проводять по монокристалічному і полікристалічному кремнію, плівкам діоксиду кремнію, примесносилікатним склом, алюмінію і т.п.

Якщо фотомаска використовується для того, що локального труїть, то якість передачі малюнка на підкладку (наприклад, плівку  $\text{SiO}_2$ ) залежить, в основному, від адгезії маски до підкладки і від здатності травителя проникати під шар фото маски по межах вікон.

Адгезія фото шару збільшується з підвищенням змочування поверхні підкладки фоторезистом. Проникнення травителя під шар фото маски, що приводить до роз'ятрення підкладки (Рис. 12), у свою чергу, залежить від змочування поверхні підкладки, в даному випадку  $\text{SiO}_2$ , травителем або водою. Критерієм змочуваності є краєвий кут змочування поверхні твердого тіла рідиною (Рис. 13).

Оптимально підготовленою до фотолітографії поверхнею є поверхня, яка добре змочується фоторезистом і погано змочується водою, тобто для якої виконується умова

$$\Theta_F \rightarrow 0^\circ, \Theta_B \rightarrow 180^\circ.$$

Ці умови не суперечать один одному для більшості полімерних фоторезистів, оскільки вони, будучи самі гідрофобними, добре змочують гідрофобні, а не гідрофільні поверхні.

Таким чином, підготовлена до нанесення фото резиста поверхня повинна бути не тільки очищена від забруднень, але також повинна бути гідрофобної.

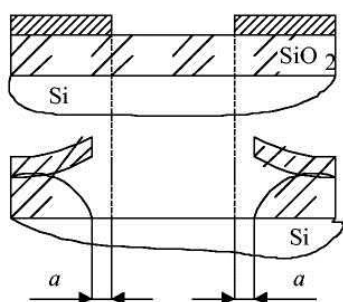


Рис. 12. Клин труїть а при передачі малюнка з фото маски на плівку SiO<sub>2</sub>

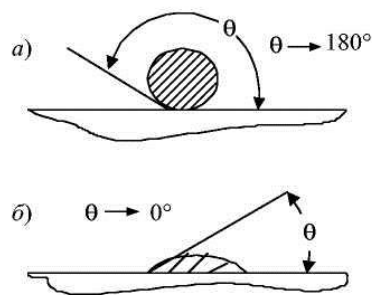


Рис. 13. Поверхня, погано (а) і добре (б), змочувана рідиною:  $\theta$  - краєвий кут змочування поверхні

Фотолітографію по плівці діоксиду кремнію доцільно проводити безпосередньо після термічного оксидування кремнію, поки поверхня діоксиду гідрофобна. Якщо пластини з плівкою SiO<sub>2</sub> зберігалися більше 1 ч, їх поверхня стає гідрофільною і необхідна термообробка в сухому інертному газі, у вакуумі або спеціальна гідрофобна обробка із застосуванням розчинів орґано-силанов.

Нанесення шару фото резиста можна виконувати центрифугуванням, розпилюванням, зануренням. Порівняно недавно почали застосовувати сухі плівкові фото резисти, які наносять накаткою.

Метод центрифугування (Рис. 14) застосовується для круглих підкладок, тобто пластин кремнію і інших напівпровідників. Підкладки розташовуються на диску центрифуги і утримуються при обертанні вакуумним притиском.

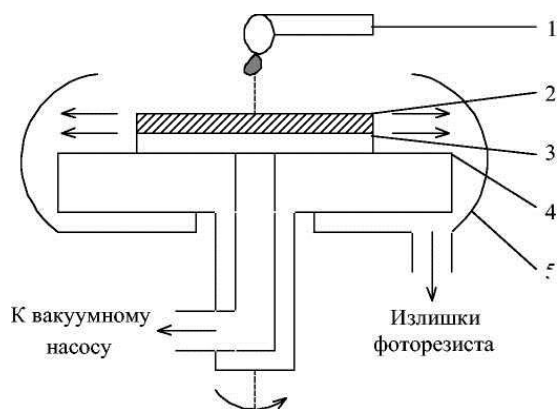


Рис. 14. Схема процесу нанесення фото резиста центрифугуванням: 1 - дозатор фото резиста (крапельниця); 2 - шар фото резиста; 3 - підкладка; 4 - диск центрифуги; 5 - збірка фото резиста

Декілька крапель фото резисту наносять на підкладку і миттєво включають центрифугу, оскільки в'язкість фото резисту дуже швидко міняється в результаті випаровування розчинників. При обертанні центрифуги рідкий фото резист

розтікається по поверхні підкладки під дією відцентрових сил, пропорційних числу оборотів центрифуги. За рахунок поверхневого натягнення фоторезиста виникають сили опору розтіканню, пропорційні в'язкості фоторезиста, тому він не повністю скидається з поверхні підкладки.

Залежність рідкого шару фото резисту  $h$ , що залишився на поверхні, від частоти обертання центрифуги з і кінематичній в'язкості фото резисту  $V$  визначається співвідношенням

$$h = A\sqrt{v/\omega},$$

де  $A$  - коефіцієнт пропорційності, підібраний експериментально.

При центрифугуванні на периферії підкладки утворюється потовщення - вал, висота і ширина якого залежать від в'язкості фото резиста, частоти обертання центрифуги і форми підкладки. Застосування пластин кремнію з периферійною фаською і робота при частотах обертання центрифуги, великих 2000 об/мин, дозволяє одержувати плоскішу поверхню фото шару.

Достоїнства методу: висока відтворність товщини фото шару в межах кожної пластини і партії пластин, можливість отримання тонких шарів (0,1-0,2 мкм).

Недоліки методу: неможливість отримання рівномірних шарів товщиною більше 2-3 мкм, наявність краевого потовщення, забруднення шарів через захоплення порошинок з повітря при обертанні центрифуги, необхідність ретельного контролю і коректування в'язкості фото резисту через випаровування розчинників. У плівках, що висихають при дії відцентрових сил, виникають внутрішні напруги. Процес погано піддається автоматизації.

Нанесення фоторезисту розпилюванням виробляється форсункою, в якій для диспергування струменя розчину фоторезисту при виході з сопла використовується стисле повітря.

Розпилюванням можна наносити шар на рельєфні поверхні (Рис. 15), одержувати шари товщиною від 0,3 до 20 мкм з точністю 5%. Краєве потовщення шару відсутнє. Унаслідок відсутності механічних напруг дефектність шарів в  $n$ - раз менше в порівнянні з одержаними центрифугуванням. Витрата фоторезиста істотно менше.

Процес відрізняється високою продуктивністю і можливістю автоматизації. Основна проблема при нанесенні шарів розпилюванням -затягуванням пилу і інших забруднень струменем диспергованого фоторезиста. Розпилювання застосовують для нанесення резиста на прямокутні діелектричні підкладки.

Метод занурення має два різновиди. Перший спосіб - просте занурення підкладки у фоторезист і витягання з нього з регульованою швидкістю 6-150 мм/міни. При повільному витяганні виходять тонші і однорідніші шари.

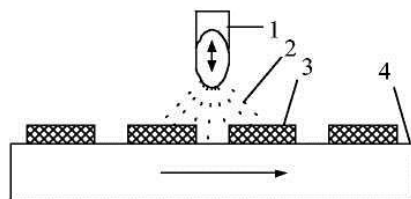


Рисунок 15. Нанесення шару резиста розпилюванням:  
1- сопло форсунки; 2 - диспергований резист; 3 - підкладки; 4 — стіл установки

Таке занурення застосовується для двостороннього нанесення шарів і для отримання товстих шарів, коли вимоги до рівномірності товщини не дуже високі. Для усунення кліновидності шару підкладку повертають на  $180^\circ$  і виконують повторне занурення. Просте занурення застосовують також для нанесення резиста на гнучку підкладку у вигляді безперервної стрічки. За допомогою роликів стрічка з постійною швидкістю при перемотуванні з рулону пропускається через ванну з резистом і поступає з неї в камеру сушки. Це, так звана, рулонна технологія.

У другому способі метод занурення полягає в зануренні підкладки у воду або органічний розчинник через тонкий шар наноситься резиста (Рис. 16) і в зворотному її витяганні. Завдяки полярності молекули резиста орієнтуються до поверхні, і підкладку обволікає моношар при зануренні і, моношар при витяганні. Повторюючи занурення кілька разів, можна одержувати шар резиста завтовшки 150-300 А. Основну перевагу процесу - утворення дуже тонких, рівномірних, бездефектних шарів з високою відтворністю параметрів, що забезпечує надалі формування елементів субмікронних розмірів.

Накатка (Рис. 17) застосовується для нанесення сухих плівкових резистів, що є тришаровою стрічкою. Шар резисту укладений між несучою і тоншою захисною полімерними плівками. Перед накаткою резиста валом на підігріту підкладку, що обертається, захисну плівку видаляють. Товщина сухого резиста близько 1-2 мкм, тому метод застосовують для випадку отримання топологічних малюнків з великими розмірами елементів, до десятків мікрометрів.

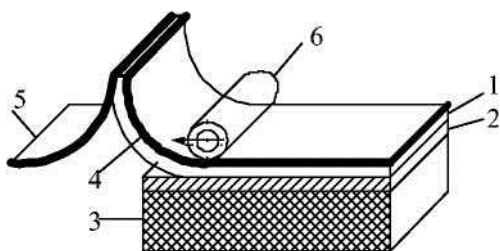


Рис. 16. Нанесення шару резиста накаткою: 1 - плівковий резист; 2 - шар резиста; 3 - ванна; 4 - вода або розчинник

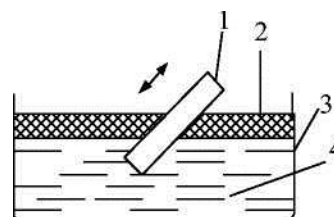


Рис. 17. Нанесення шару резиста зануренням: 1 - підкладка; 2 — плівка на підкладці; 3- несуча полімерна плівка; 4 — несуча полімерна плівка; 5 - захисна плівка; 6 — вал для накатки.

Термообробка (перша сушка) виконується після нанесення шару рідкого фоторезисту. В процесі сушки віддаляється розчинник, і в плівці фоторезисту відбувається складний процес релаксації щільної упаковки молекул, зменшуючий внутрішні напруги і збільшуючий адгезію фотошару до підкладки.

Основними параметрами процесу сушки є температура і час. При низьких температурах адгезія фотошару до підкладки погана, переважає зчеплення між власними молекулами полімеру (когезія). Цим пояснюється відшаровування фотошару при прояві, окрім цього, можливе неповне видалення розчинника. При великих температурах у фоторезистах йде термополімерізація (при 140-200°C) і інші процеси. Так, в шарі позитивного фоторезиста при температурах, більше критичних, протікають ті ж необоротні явища, що і при експонуванні. Якість проведення сушки впливає на всю решту операцій фотолітографії.

Конвективна сушка виконується в термостатах. Ущільнена частина шару, що утворюється на поверхні, перешкоджає рівномірній і полицею сушці. Для рівномірного випаровування розчинника і зниження внутрішніх механічних напруг у фотошарі сушку виконують в два етапи: 15-20 мін при 18-20 °С, 30-60 мін при 90-120 °С.

Термокомпресійна сушка під тиском азоту дозволяє формувати якісні фотошари, оскільки присутні пари розчинника забезпечують оптимальні умови для орієнтаційної релаксації молекул фоторезисту.

Інфрачервона (ІК) сушка відрізняється рівномірним видаленням розчинника по товщині шару резисту. Радіація сприяє дифузії розчинника до поверхні, тому у поверхні шар передчасно не ущільнюється. Час сушки знижується до декількох хвилин.

ІК-СУШКА є основним промисловим методом, вживаним в сучасних лініях фотолітографії. Вона виконується безпосередньо після нанесення фоторезиста під ІК-ЛАМПАМИ при безперервному продуванні азотом. Сушка завершує процес формування фотошару.

Формування фотомаски - технологічний етап, на якому у фотошарі створюється топологічний малюнок. Відповідно до відомих принципів локальності і послідовності технологічних обробок в процесі виготовлення структур напівпровідникових мікросхем літографія проводиться кілька разів (Рис. 18).

Починаючи з другої літографії, необхідно суміщати малюнок шаблону з малюнком на підкладці, одержаному при формуванні попереднього технологічного шару із застосуванням попереднього літографічного процесу.

Контактне експонування - добре вивчений і освоєний промисловим виробництвом метод передачі зображення з шаблону на фотошар.

Поєднання виконують візуально на тій же установці, що і подальше експонування, шляхом накладення при спостереженні під мікроскопом малюнків

шаблону і підкладки. Точність поєднання залежить: від точності поєднання фотошаблонів в комплекті, точність відтворення топологічного малюнка попереднім процесом фотолітографії і точність самої операції поєднання. Для поєднання шаблонів один з одним в комплекті і кожного шаблону з малюнком на підкладці застосовуються спеціальні топологічні малюнки - фігури поєднання у вигляді кілець, хрестів, штрихів і ін. Точність самої операції поєднання залежить від точності устаткування, досконалості фігур поєднання і індивідуальних здібностей оператора.

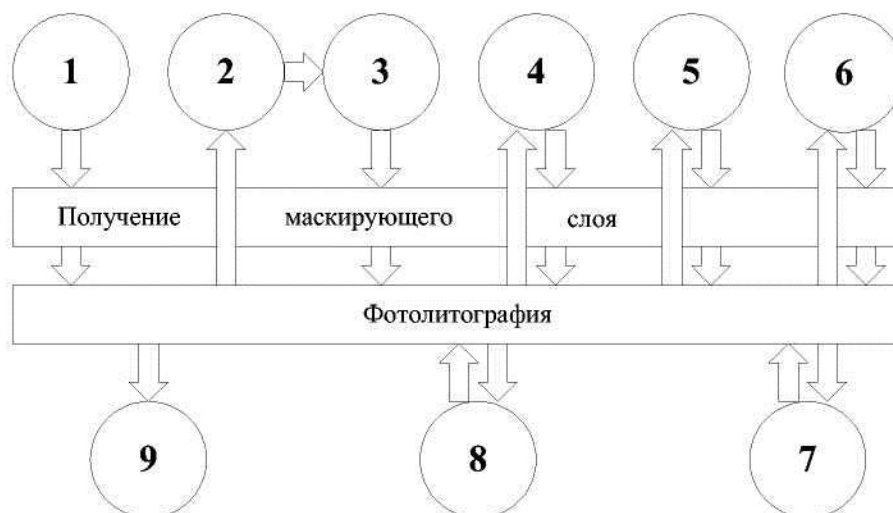


Рис. 18. Схема типового технологічного процесу виготовлення напівпровідникових мікросхем: 1 - очищення пластини кремнію р-типу; 2 — дифузія домішки прихованого n+-слоя; 3 - нанесення епітаксимального шару ючи n-типу; 4 - дифузія домішки р-типу для ізоляції; 5 - дифузія домішки р-типу; 6 - дифузія домішки л-типу; 7 - металізація; 8 - нанесення захисного покриття; 9 - контроль готових структур

Експонування контактним способом (відповідно і весь процес літографії називають контактною фотолітографією) виконується після поєднання малюнків і усунення зазора до повного контакту шаблон - підкладка.

Прояв - процес видалення зайвих у фотошарі ділянок відповідно до локального опромінювання при експонуванні.

Прояв негативних фоторезистів є простим розчиненням неопромінених ділянок в органічних розчинниках: толуолі, трихлоретілені, діоксане і ін. Проявник повинен володіти хорошою розчинювальною здатністю і мінімальною дією на опромінені ділянки фотошару. При заниженій експозиції опромінені ділянки сильно набухають, що приводить до спотворення малюнка і, отже, до зменшення роздільної здатності процесу фотолітографії. Якщо експонування викона-

не при оптимальній експозиції, перепроявлення негативного фоторезисту не небезпечно, тому процеси прояву легко автоматизувати.

Прояв позитивних фоторезистів на основі НХД супроводжується хімічною реакцією перетворення одержаної при експонуванні інденкарбонової кислоти в добре розчинну сіль, яка потім легко вимивається. Як проявники застосовують слабкі водні і водно-гліцеринові лужні розчини КОН, NaOH, Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O.

Прояв в розчині тринатрійфосфата супроводжується хімічною реакцією. Якщо шар проекспонований не повністю, розчин забарвлюється в малиновий колір, оскільки частина молекул кислоти перетворюється не на сіль натрію, а з'єднується з незруйнованими молекулами НХД, утворюючи фарбник. Якщо молекули НХД зруйновані повністю на всю глибину фотошару, проявник залишається безбарвним.

Термообробка (друга сушка) проводиться для видалення проявника, води, підвищення хімічної стійкості і адгезії фотомаски до підкладки. У негативних фоторезистов сушка супроводжується термополімерізацією, у позитивних - руйнуванням молекул і частковим зшиванням полімерних складових. Щоб не відбулося погіршення якості фотомаски, сушку проводять в два - три етапи з поступовим підйомом температури до максимальної. Для більшості фоторезистів максимальна температура другої сушки 150 °С, загальний час 1—1,5 ч. Опромінювання перед другою сушкою великою дозою глибокого ультрафіолета (ГУФ) усуває пластичний перебіг резі-ста при термообробці і істотно покращує якість фотомаски.

Передача зображення з фотомаски на матеріал шару ІМ виконується двома способами.

Той, що труїть при прямій фотолітографії є відповідальною операцією, оскільки брак після того, що труїть непоправний. Травитель повинен взаємодіяти тільки з матеріалом, що видаляється, оскільки можливе небажане видалення раніше сформованих областей структур НІМ, а при дії на фотошар не забезпечується контрольованість розмірів формованих елементів.

Якість труїння визначається величиною адгезії фотомаски до підкладки, наявністю в масці дефектів і залежить від властивостей травителя, способу і режимів труїть. Основним критерієм якості перенесення малюнка є клин труїть, тобто відхід горизонтальних розмірів малюнка по відношенню до маски.

Більшість рідких травителів ізотропні, тобто швидкість труїть в них практично однакова на всіх напрямках, тому малюнок маски переноситься із спотворенням (Рис. 19). У зв'язку з цим той, що рідинне труїть не може забезпечити отримання елементів з розмірами менше 1-2 мкм.

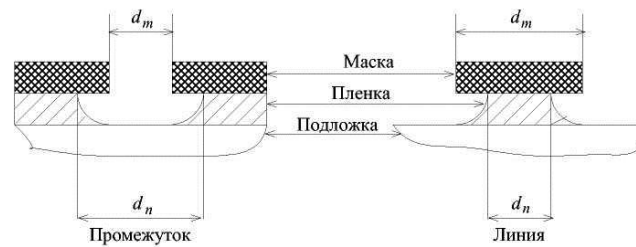


Рис. 19. Спотворення топологічного малюнка при тому, що рідинному ізотропному труїть

Той, що сухе труїть забезпечує більший дозвіл. Найбільш ширше для отримання ІМ з субмікронними розмірами елементів застосовують той, що реактивне іонне і іонно-плазмове труїть у вакуумних камерах з паралельними електродами. Ці методи відрізняються високою анізотропією труїть, що дозволяє чітко контролювати розміри витравлених областей. Параметри процесів труїть слід строго контролювати, щоб виключити небажані побічні ефекти: радіаційні пошкодження і осадження полімерів.

При зворотній фотолітографії перенесення топології з фотомаски на шар ІМ суміщене з операцією видалення фотомаски або з операцією нанесення шаруючи.

Видалення фотомаски має на меті також ретельне очищення від всіх забруднень підкладки в процесі фотолітографії.

Плазмохімічне видалення фотомаски - найефективніший і безпечніший процес, одночасно забезпечує і очищення пластин. Виконується, наприклад, у вакуумних напівавтоматах «Плазма-600», «Плазма-БООТ» в низькотемпературній плазмі суміші кисню з азотом. Азот оберігає відкриті ділянки кремнію від окислення. Тривалість обробки істотно скорочується в порівнянні з рідинними процесами. Проте тільки плазмохімічна обробка не повною мірою задовольняє збільшеним вимогам до технології великих і надвеликих НІМ, оскільки фоторезист газоподібні продукти  $\text{CO}_2$ , що виділяються при окислювальній деструкції,  $\text{Z}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  адсорбуються і хімічно взаємодіють з діоксидом кремнію. Крім того, на поверхні залишаються продукти неповного згорання фотошару, металеві забруднення; можливі радіаційні дефекти.

Технологічні маршрути видалення фотомаски розробляються для кожного конкретного випадку, залежно від марки фоторезиста, матеріалу підкладки і ін.

Фотолітографія в глибокому ультрафіолеті. Експонування у області глибокого ультрафіолета дозволяє значно підвищити роздільну здатність фотолітографії за рахунок зменшення дифракції світла з пониженням довжини хвилі. Цей порівняно новий напрям фотолітографії має обмеження, пов'язані з необхідністю узгодження спектрів джерела випромінювання і фоторезиста.



### Питання для самоконтролю

1. Навіщо застосовується літографії у виробництві сучасних мікросхем ?
2. Поясніть суть процесів літографії.
3. Назвіть етапи і основні операції літографічного процесу ?
4. Що таке пряма та зворотна літографія ?
5. Наведіть класифікацію літографічних процесів.
6. Підготовка підкладок до нанесення фоторезисту.
7. Поясніть процес нанесення фоторезисту центрифугуванням.
8. Наведіть схему нанесення резисту розпилюванням.
9. Назвіть основні операції нанесення шару резиста накаткою ?
10. Наведіть основні параметри процесу сушки ?
11. Схема типового технологічного процесу виготовлення напівпровідникових мікросхем.
12. Як переноситься зображення з фотомаски на матеріал шару ІМ ?
13. Якими параметрами визначається якість друкування ?

## Тема 5. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК

### 5.1 Термовакuumне напилення

Основи методу. Метод заснований на створенні направленою потоку пари речовини і подальшої конденсації його на поверхнях підкладок, що мають температуру нижче за температуру джерела пари. Процес термо вакуумного напилення можна розбити на чотири етапи: утворення пари речовини, розповсюдження пари від джерела до підкладок, конденсації пари на підкладках, утворення зародків і зростання плівки.

Утворення пари речовини виконується шляхом його випаровування або сублімації. Речовини переходять в пару при будь-якій температурі вище за абсолютний нуль, але щоб збільшити інтенсивність паротворення речовини нагрівають. Із збільшенням температури підвищується середня кінетична енергія атомів і вірогідність розривів міжатомних зв'язків. Атоми відриваються від поверхні і розповсюджуються у вільному просторі, утворюючи пару.

Тиск насиченої пари сильно залежить від температури. Прирости температури на кожні 5-10% понад температуру випаровування приводять до збільшення тиску насиченої пари, а отже, і швидкості випаровування на один порядок.

Розповсюдження пари від джерела до підкладок здійснюється шляхом дифузії і конвекції, на які в першу чергу впливає ступінь вакууму. Для зменшення втрат випарованого матеріалу за рахунок напилення на внутрішньо камерне оснащення і стінки камери, а також для підвищення швидкості напилення і отримання більш рівномірної по товщині плівки необхідно забезпечити прямолінійний

рух частинок пари у напрямі підкладки. Це можливо при умові, якщо довжина вільного пробігу частинок пари буде більше відстані джерело - підкладка.

Можна вважати, що частинки напиленої речовини розповсюджуються прямолінійно направленим молекулярним (атомарним) потоком, зберігаючи свою енергію до зустрічі з підкладкою. Рівномірність доставки частинок до поверхні підкладки поліпшується із зменшенням відношення лінійних розмірів поверхні випаровування речовини до відстані до підкладки.

Конденсація пари на поверхні підкладки залежить від температури підкладки і густини атомарного потоку. Атоми пари, що досягли підкладки, можуть миттєво відобразитися від неї (пружне зіткнення), адсорбуватися і через деякий час відобразитися від підкладки (реєспаріння), адсорбуватися і після короткочасної міграції по поверхні остаточно залишитися на ній (конденсація).

Конденсація атомів відбувається, якщо їх енергія зв'язку з атомами підкладки більше середньої енергії атомів підкладки, інакше атоми відображаються. Якщо підкладка нагріта, енергія її атомів вища, вірогідність конденсації пари нижча.

Температура, вище за яку при даній густині потоку пари всі атоми відображаються від підкладки і плівка не утворюється, називається критичною температурою конденсації.

Критична температура залежить від природи матеріалу плівки і підкладки і від стану поверхні підкладки. При певній температурі підкладки, менше критичної, конденсація пари можлива тільки за умови пересичення пари, тобто для конденсації існує критична густина атомарного потоку.

Критичною густиною атомарного потоку для даної температури підкладки називається якнайменша густина, при якій атоми конденсуються на підкладці.

Утворення зародків відбувається в результаті знаходження атомами місць, відповідних мінімуму вільної енергії системи атом - підкладка.

Зростання зародків відбувається за рахунок приєднання нових атомів, мігруючих по поверхні або потрапляючих на зародки безпосередньо з пролітного проміжку джерело - підкладка. У міру конденсації пари зародки ростуть, між ними утворюються сполучальні містки, зародки зливаються в крупні острівці. Після цього настає стадія злиття острівців з утворенням єдиної сітки. Сітка переходить в суцільну плівку, яка починає рости в товщину. З цієї миті вплив підкладки виключається і частинки пари від поверхні плівки практично не відображаються.

На етапі утворення зародків і зростання плівки дія залишкових газів на плівку, що росте, повинна бути зведена до мінімуму.

Забезпечити це можна підвищенням ступеня вакууму або збільшенням швидкості паротворення. Створення надвакуумних установок представляє значні труднощі, і крім того, час відкачування робочих камер великий. Тому на практиці процес, в основному, проводять при тиску  $1,3 \cdot 10^{-6}$  -  $10^{-5}$  Па, яке досягається відносно просто за допомогою форвакуумного і дифузійного паромасляного насосів.

На чистоту плівки, що росте, впливає також наявність в потоці пари частинок матеріалу випарника і забруднення, присутніх на поверхні підкладки. Тому застосовують випарники з матеріалів з тиском насиченої пари при температурі випаровування істотно меншому, ніж у випаруванні речовини, а також виконують очищення поверхні підкладок у вакуумній камері безпосередньо перед напиленням плівок.

Для збільшення швидкості паротворення з метою зменшення впливу залишкових газів на властивості напилених плівок випаровування майже завжди ведуть при температурах, що перевищують умовну температуру випаровування речовини (форсований режим). При низьких швидкостях випаровування можливе утворення рихлих, шорстких плівок.

Якість плівки визначається також розміром зерна і величиною адгезії до поверхні підкладки. Підвищення температури підкладок зменшує густину центрів зародкового утворення і, отже, сприяє формуванню грубозернистих плівок і, навпаки, підвищення густини потоку пари речовини сприяє отриманню плівок з дрібнозернистою структурою.

За інших рівних умов схильністю до утворення дрібнозернистої структури володіють метали з високою температурою випаровування W, Mo, Ta, Pt, Ni. Низькотемпературні метали Zn, Cd і інші утворюють грубозернисті плівки.

Адгезія, тобто міцність зчеплення плівки з підкладкою, при значній різниці в їх ТКЛР зменшується через внутрішні напруги, що виникають в плівці при охолодженні після напилення. Недостатня адгезія - причина відшаровування плівок. Плівки товщиною більше 1,5—2 мкм мають недостатню адгезію, тому термовакуумне напилення застосовують для отримання плівок меншої товщини.

Велика адгезія забезпечується для напилюваних матеріалів, хімічно споріднених з матеріалом підкладки. В цьому випадку конденсація супроводжується утворенням міцних хімічних зв'язків (хемосорбція). Матеріали підкладок для тонкоплівкових ІМ (ситалли, кераміка, скла) складаються з оксидів металів і неметалів. Хемосорбція відбувається при напиленні оксидів, а також легкоокисних металів Al, Cr, Mn, Ti, W. Золото, платина, паладій мають до цих підкладок низьку адгезію. Для поліпшення адгезії і структури плівок напилення проводять на нагріті до температури 200-400 °С підкладки.

Техніка термо вакуумного напилення (ТВН). Як було показано, процес ТВН виконують у вакуумних камерах з граничним тиском  $1,3 \cdot 10^{-6}$ — $6,6 \cdot 10^{-5}$  Па. Нагрів речовини здійснюють прямим або непрямим (теплопередачою від випарника) способами: шляхом пропускання електричного струму, струмами індукції, електронним бомбардуванням. Схема ТВН приведена на Рис. 20.

Стаціонарне і змінне оснащення вакуумної камери періодично очищається від нашарувань попередніх напилень. Процес починають із завантаження вакуумної камери: випаровуваний матеріал поміщають в теглі, підкладки встановлюють в

підложко тримачі, маски - в маско тримачі. Залежно від конструкції внутрішньо камерних пристроїв техніки виконання завантаження можуть розрізнятися. Потім камеру герметизують і виробляють відкачування повітря. При закритій заслінці виконують нагрів підкладок до заданої температури і випарників до температури випаровування. Проводять іонне очищення поверхонь підкладок. Відкачують камеру до граничного вакууму. Після цього відкривають заслінку і ведуть напилення плівки. При отриманні заданої товщини плівки процес напилення припиняють, перекриваючи атомарний потік заслінкою. Підкладки охолоджують і після цього в камеру напускають повітря і виробляють вивантаження підкладок.

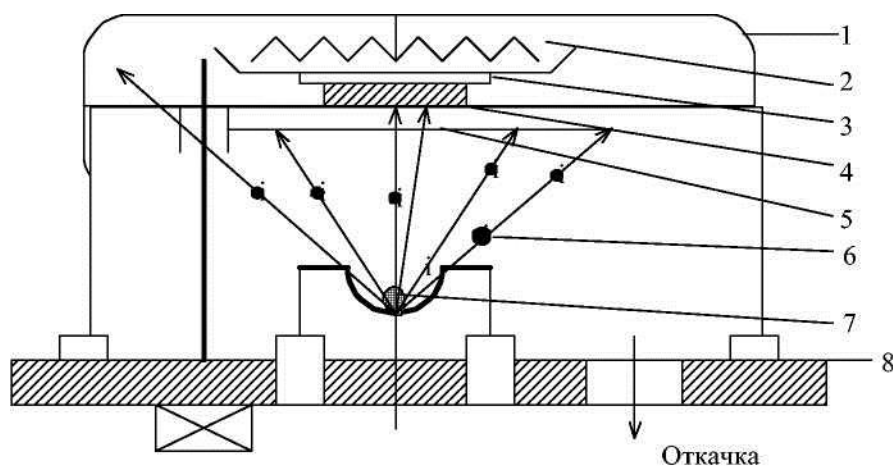


Рис. 20. Схема процесу термовакuumного напилення: 1 - вакуумна камера; 2 - награвателю підкладки; 3 - утримувач підкладки; 4 — підкладка; 5 - заслінка; 6 - частинки випарованої речовини; 7- випарник з навішуванням матеріалу плівки; 8 - опорна плита

Основні параметри процесу ТВН: тиск у вакуумній камері, температура випарників, температура підкладок, час напилення.

Достоїнства і недоліки методу. Процес ТВН добре освоєний, дозволяє одержувати багато пасивних елементів, металізацію напівпровідникових структур, застосовується при виготовленні фотошаблонів і ін. За допомогою ТВН можна одержувати плівки металів, напівпровідників, діелектриків. Процес забезпечує високі швидкості росту плівок і ступінь чистоти, отримання якісних плівок при порівняно низьких температурах підкладок. Порівняно легка автоматизація процесу дозволяє створювати складні вакуумні установки і комплекси, керовані з допомогою ЕОМ.

До недоліків методу відносяться: зміна процентного співвідношення компонентів при напиленні сплавів і складних речовин, недостатня рівномірність товщини плівок на великих підкладках, трудність отримання плівок тугоплавких матеріалів, висока інерційність при використуванні випарників (після виключення нагріву випарників паротворення продовжується, тому процес напилення плівки припиняється за допомогою механічної заслінки), порівняльно невисока адгезія плівок,

тривалість підготовки до процесу відкачування в порівнянні з напиленням плівки (1-2 ч і 1—1,5 мін), трудність створення випарників з великим ресурсом роботи більше 50-100 ч, відносна складність устаткування.

## 5.2 Розпилювання іонним бомбардуванням

Осадження плівок розпилюванням матеріалу в плазмі газового розряду в порівнянні з ТВН розширює можливості отримання плівок із заданими властивостями. Розпилювання дозволяє облягати плівки тугоплавких матеріалів, сплавів, складних речовин і матеріалів з низьким тиском пари.

Утворення потоку частинок відбувається в результаті бомбардування поверхні мішені іонами аргону, прискореними до енергій, достатніх для розпилювання.

Матеріал розпилюється у вигляді нейтральних атомів або молекул, і близько 1% його іонізується електронами плазми. Розпилювання, на відміну від випаровування, не залежить від пружності пари облягаючої речовини. Це дозволяє наносити плівки тугоплавких матеріалів при відносно низьких температурах. При отриманні плівок сплавів спочатку розпилюється в основному компонент з великим коефіцієнтом розпилювання, наприклад нікель у ніхромі. Притока рачкуючого компоненту здійснюється дифузією, тому швидко настає рівновага, і склад потоку розпиляних атомів відповідає складу сплаву. В результаті тільки декілька перших атомних шарів плівки відрізняються від основного складу. Нанесення плівок складного складу можна здійснити також розпилюванням декількох різних катодів.

Розповсюдження частинок відбувається в плазмі газового розряду. В результаті зіткнень з молекулами залишкового газу спрямованість потоку частинок, що розпилюються, втрачається, і вони поступають на поверхню підкладок під різними кутами. Разом з частинками розпиляної речовини на підкладки потрапляють також молекули і іони залишкових газів.

Конденсація, утворення зародків і зростання плівки при іонному розпилюванні істотно відрізняється від цих етапів при ТВН. Потік розпиляної речовини має ряд особливостей: на 1-2 порядки великі енергії поступаючих на підкладки атомів; на порядок менша густина потоку частинок; випадковий характер напрямів удару атомів об поверхню підкладок; у більшій мірі присутність в потоці разом з нейтральними атомами їх іонів, а також молекул залишкового газу. Все це обумовлює підвищення температури підкладки, збільшення швидкості міграції на поверхні, інтенсивну десорбцію облягаючих молекул і залишкових газів.

Експериментально встановлено, що плівки осідають при будь-якій густині потоку і в широкому температурному інтервалі підкладки, тобто при іонному розпилюванні для конденсації не існує критичної температури підкладки і критичної густини потоку розпиляної речовини.

Разом з механізмом зростання плівок з нейтральних частинок тут діє і зарядний механізм зростання, оскільки разом з атомами розпиляного джерела на підк-

ладку потрапляють і іони інертного газу і відносна велика кількість іонізуючих в між електродному просторі атомів джерела. Заряджені частинки за рахунок додаткової електростатичної енергії збільшують поверхневу міграцію між зародками і прискорюють їх зростання в площині. Останнім пояснюється те, що облягаючи іонним розпилюванням плівки стають суцільними при меншій товщині, ніж плівки, одержані ТВН. Швидкості осадження плівок, як правило, нижче, ніж при ТВН, через малу густину потоку. Густина плівок вища через більшу енергію облягаючих частинок.

Розрізняють катодне (фізичне і реактивне), іонно-плазмове, а також високочастотне (ВЧ) і магнетронне розпилювання.

Фізичне катодне розпилювання. Нанесення провідникових і напівпровідникових плівок цим методом виконують у вакуумних камерах діодного типу в плазмі тліючого розряду аргону. Підкладки розташовують на аноді (Рис. 21), а катод є джерелом матеріалу для утворення плівки.

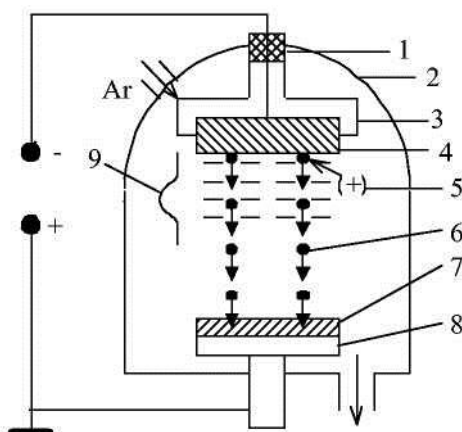


Рис. 21. Схема процесу отримання плівок катодним розпилюванням: 1 - ізолятор; 2 — вакуумна камера; 3 - екран; 4 — катод-мішень; 5 - іон аргону, бомбардуючий катод; 6 - частинки розпиляного катода; 7- підкладка; 8- анод; 9 - темний катодний простір тліючого розряду

У іншому процес по суті не відрізняється від того, що іонного плазмового трюїння в діодних камерах. У камеру вакуумної установки завантажують підкладки і виробляють відкачування до тиску  $110^{-3-1-10^4}$  Па, потім напускають аргон до тиску 1,3-13 Па. Далі процес ведуть при безперервному відкачуванні і надходженні аргону, що забезпечує заданий тиск газу. При подачі на катод-мішень негативного потенціалу 1,5—4 кВ щодо заземленого анода в камері запалюється тліючий розряд. Іони аргону, що потрапили в область катодного простору, бомбардують катод - починається його розпилювання. Розпилювання спочатку ведуть на заслінку, а після очищення поверхні катода заслінку відкривають - потік частинок осідає на поверхні підкладок. Процес припиняють відключенням напруги катод - анод; після охолодження підкладок вивантажують. Перевагами катодного розпилювання є: низькі температури підкладок в процесі нанесення плівок; більша, ніж при термо

вакуумному напиленні, рівномірність плівок за площею підкладок, оскільки діаметр катода (300-350 мм) істотно більше за відстань катод - підкладка (30-80 мм); без інерційності (розпилювання починається при подачі на електроди напруги і миттєво припиняється при його знятті); відсутність необхідності частої зміни джерела частинок плівки катода, що росте; незмінність **стехіометрії** складу плівки в порівнянні з складом катода; висока адгезія плівок до підкладок.

Основні недоліки: порівняльно невисокі швидкості осадження, забрудненість плівок молекулами залишкових газів і складніше управління техпроцесом в порівнянні з термовакуумним напиленням.

Реактивне катодне розпилювання. На відміну від звичного фізичного реактивне катодне розпилювання здійснюється в тліючому розряді суміші інертного і активного газів. Частинки катода, що розпилюється, хімічно взаємодіють з активним газом або утворюють з ним тверді розчини, і нова речовина поступає на підкладки. Щоб процес утворення речовини плівки, що наноситься, не відбувався на катоді, що вельми утрудняє горіння розряду, застосовують суміші аргону із змістом активних газів не більш 10%.

Для отримання плівок оксидів розпилювання виробляють в плазмі аргон - кисень, нітридів - в плазмі аргон - азот, карбідів - в плазмі аргон - чадний газ або аргон - метан. Вводячи в камеру різні активні гази, можна одержувати плівки різноманітних з'єднань, які практично неможливо одержати при термовакуумному напиленні. Наприклад: феритові магнітні плівки одержують при розпилюванні сплаву нікелю із залізом в плазмі тліючого розряду аргон - кисень; плівки силіциду молібдену одержують розпилюванням молібденової мішені в плазмі  $\text{Ar} + \text{SiH}_4$ .

Реактивне катодне розпилювання дозволяє не тільки одержувати різноманітні по складу плівки, але і контрольовано управляти властивостями плівок, наприклад, питомим опором резистивних плівок. Так, при розпилюванні танталового катода в плазмі аргон - азот одержують тонкі плівки  $\text{TaN}$ , опір яких можна змінювати концентрацією азоту, що вводиться в камеру. Реактивне розпилювання широко застосовується для формування високоомних резисторів.

Основна технічна трудність при реактивному катодному розпилюванні - точне дозування активного газу, що вводиться в камеру.

Іонно-плазмове розпилювання здійснюється при нижчому тиску 10~2 Па в плазмі несамостійного дугового розряду. Назва цього методу прийнята умовно; катодне і реактивно-катодне нанесення плівок також є іонно-плазмовими процесами. Плівки одержують в трьох або чотирьох електродних вакуумних камерах (Рис. 22). Термоемісійний катод служить для підтримки дугового розряду. Джерелом частинок матеріалу плівки, що наноситься, є додатковий електрод-мішень. Підкладки розташовують напроти мішеней на каруселі або барабані.

Повітря з камери відкачують до граничного вакууму, включають струм напруження катода, після розігрівання катода між ним і анодом подають напругу, і в камеру впускають інертний газ.

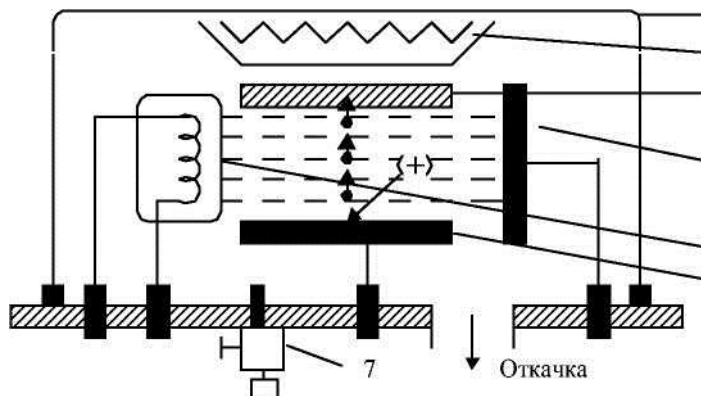


Рис. 22. Схема процесу іонно-плазмового розпилювання: 1 - вакуумна камера; 2 - нагрівач; 3 - підкладка; 4 — анод; 5 - катод; 6 — мішень; 7 - голчатий натикатель

Між анодом і катодом запалюється дуговий розряд. При подачі на мішень або підкладки невеликого негативного потенціалу можна виробити їх іонне очищення. Для нанесення плівки на мішень подається негативний по відношенню до анода потенціал 200-1000 В. Електричне поле мішені витягає з плазми позитивні іони і прискорює їх до енергій в сотні електрон-вольт. Починається розпилювання і формування плівки на підкладках.

Іонно-плазмове розпилювання в порівнянні з катодним розпилюванням здійснюється при вищому вакуумі, тому довжина вільного пробігу і енергія розпиляних атомів більше. Завдяки цьому забруднення плівок молекулами залишкових і інертних газів менше, швидкість осадження плівок більше і досягає декількох сотень і навіть тисяч ангстрем в хвилину. Густина плівок більше, адгезія плівок до поверхні підкладок краща. Процес осадження легше управляємо, товщина плівки регулюється потенціалом мішені і часом. Можна проводити велику кількість процесів осадження плівок без зміни мішені, що забезпечує відтворність властивостей облягаючих плівок. Наприклад, час роботи хромової мішені не менше 400 ч. Процес осадження плівок із заданими властивостями відповідає вимогам автоматизації і може бути застосований в безперервному циклі створення мікросхем.

Недоліками іонно-плазмового розпилювання є: обмежені можливості реактивного розпилювання через малий термін служби термокатода у присутності активних газів, катод є додатковим джерелом забруднень; порівняльна складність пристрою і експлуатації устаткування.

Іонно-плазмове розпилювання широко застосовується для виготовлення плівок пасивних елементів, отримання маскуючих плівок на напівпровідникових пластинах, осадження напівпровідникових шарів і магнітних плівок.



### 5.3 Термічне оксидування

Процес оксидування, що інтенсифікується нагрівом до високих температур, прийнято називати термічним оксидуванням. Метод термічного оксидування є основним в планарній технології для отримання маскуючих плівок на кремнії і плівок под затворного оксиду для МОП-структур.

Кремній дуже близький до кисню. На ретельно очищеній поверхні кремнію вже при кімнатній температурі утворюється плівка діоксиду кремнію завтовшки 10-15 °А, тому термічне оксидування у будь-якому випадку ведеться за наявності на поверхні тонкої оксидної плівки. В даний час немає єдиної моделі термічного оксидування напівпровідників, узгодженої зі всіма експериментальними даними. Розглянемо просту з них. Процес отримання термічного оксиду можна розбити на чотири етапи: доставка окислювача до підкладок і адсорбція їх поверхнею, дифузія окислювача крізь плівку діоксиду кремнію до поверхні кремнію, хімічна взаємодія окислювача з кремнієм з утворенням оксиду, видалення продуктів реакцій. Як окислювач застосовують очищений сухий або вологий кисень.

Швидкість оксидування визначається найповільнішим етапом дифузійного проникнення окислювача крізь розтушую плівку до межі розділу SiO<sub>2</sub> - Si. Коефіцієнти дифузії сильно залежать від температури. При низьких температурах коефіцієнти дифузії і, отже, швидкість росту плівки малі. Підвищити швидкість росту можна або збільшенням тиску в реакційній камері установки, або підвищенням температури процесу. На практиці термічне оксидування кремнію проводять при температурах 850-1250 ° С. При однієї і тієї ті температурі коефіцієнт дифузії води в діоксиді кремнію істотно більше за коефіцієнт дифузії кисню. Цим пояснюються високі швидкості росту оксиду у вологому кисні. Вирощування плівок тільки в парах води не застосовується через погану якість оксиду. Якісніші плівки виходять в сухому кисні, але швидкість росту плівок дуже мала.

При використуванні сухого кисню на поверхні кремнію йде реакція  

$$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2.$$

При використуванні вологого кисню йде ще додаткова реакція

Водень, що утворюється при реакції, достатньо швидко дифундує від межі Si -SiO<sub>2</sub> до поверхні оксиду. На утворення плівки витрачаються атоми кремнію, тому початкова поверхня підкладки в процесі оксидування йде в товщу оксиду. Цим пояснюється відсутність проблеми забезпечення високої адгезії.

При температурах більше 1000 °З оксидування кремнію підкоряється параболічному закону

$$x^2 = do t,$$

де  $x$  - маса або товщина оксидної плівки;  $t$  - час оксидування;  $do$  - const швидкості росту, залежна від типу окислювача, тиску його пари і наявності домішок в кремнієвій пластині і в плівці, що росте.

Техніка процесу. Для термічного оксидування застосовують те ж устаткування, що і для дифузійного легування, наприклад дифузійні електропечі типа СДО-125/3, трьох- або шестикамерні автоматизовані системи типа АДС-6-100. Камера установки (Рис. 23) з двічі переплавленого у вакуумі кварцу проходить через муфель печі з резистивними нагрівачами. Температура в робочій зоні підтримується з точністю  $0,5\text{ }^{\circ}\text{З}$  в діапазоні  $700\text{-}1250\text{ }^{\circ}\text{С}$ . Процес проводять способом відкритої труби, тобто через кварцову трубу-камеру безперервно проходить сухий або вологий кисень. Для забезпечення подачі в камеру строго певної кількості пари води випаровування ведуть в стаціонарному режимі. Для цього певну кількість води (дозу) заливають в герметичну судину-дозатор. Поступаючий в дозатор кисень проходить крізь воду, захоплюючи пари води. Такий дозатор барботажного типу нагрівають до температури  $60\text{-}95\text{ }^{\circ}\text{З}$ .

Підготовлені до процесу пластини кремнію поміщають вертикально в пази кварцової касети-човника. Човник з пластинами встановлюють на майданчик завантажувального пристрою установки. Запуском програматора автоматично виконуються технологічні переходи оксидування: продування камери азотом, нагрів робочої зони до попередньої температури, яка на  $100\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{З}$  нижче заданої за технологією робочої температури; завантаження човника з пластинами в робочу зону установки кварцовим штовхачем із швидкістю  $10\text{-}60\text{ см/міни}$ , нагріваючи печі із заданою швидкістю до робочої температури, подача парогазової суміші, витримка пластин протягом заданого часу, охолодження печі, вивантаження пластин кварцовим штовхачем.

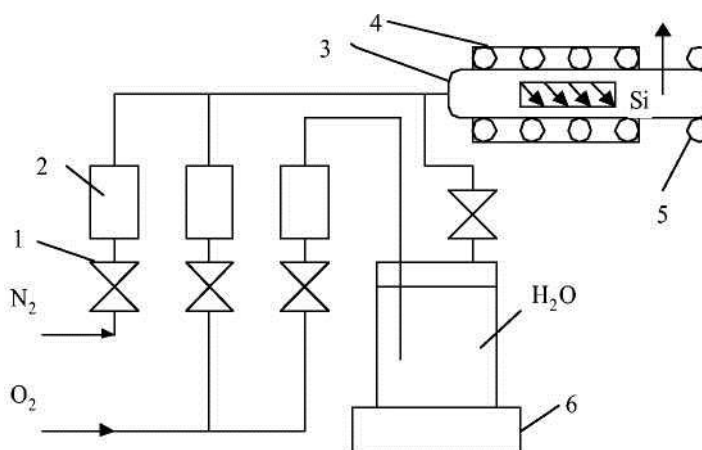


Рис. 23. Схема процесу термічного оксидування кремнію: 1 - вентилі; 2 - ротаметри; 3 - кварцова труба-реактор; 4 - нагрівальна піч; 5 - водоохолоджувана заглушка; 6 — нагрівач води

-В процесі термічного оксидування за допомогою кварцового штовхача здійснюються поворотно-поступальні переміщення човника з пластинами з амплітудою близько  $20\text{ мм}$ , щоб запобігти її приварюванню до поверхні труби. Попередній нагрів печі і повільне завантаження і вивантаження пластин забезпечують м'я-

кший режим оксидування і зменшують градієнт температури по радіусу пластин, а отже і термічні напружки, що приводять до вигину пластин. Швидкість нагріву печі разом з пластинами до робочої температури 10— 30 °С/хв, швидкість охолодження близько 8 °С/хв.

#### 5.4 Хімічне осадження плівок з розчинів

Метод відрізняється ще більшою простотою устаткування і проведення процесу. Достатньо мати ванну з підігрівом (Рис. 24) і вентиляційно-витяжну систему. Відсутня необхідність мати анод і катод, спрощується закріплення зразків. Зменшується непродуктивні витрати металів, що дуже важливе, якщо вони благородні. Плівки можна наносити локально і на профільні поверхні. Процеси хімічного осадження забезпечують високу рівномірність товщини плівок.

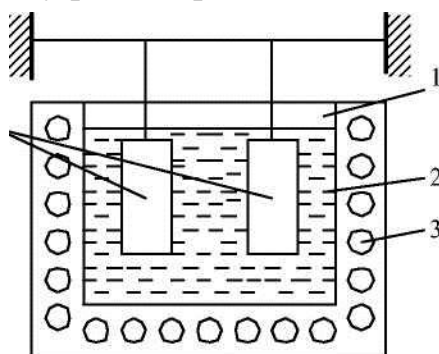
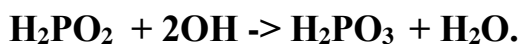
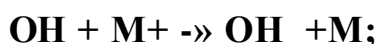
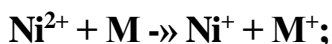


Рис. 24. Ванна хімічного осадження плівок з підігрівом

Метод заснований на витісненні металів з розчинів їх солей або на відновленні іонів металів в розчинах. У промисловому виробництві метод найчастіше застосовують для отримання плівок золота і нікелю. Розглянемо приклад хімічних реакцій при отриманні плівок нікелю на пластині напівпровідника.

Хімічне нікелювання полягає в каталітичному відновленні нікелю з розчину його солі. Процес ведеться в лужному середовищі (рН = 7-8). Взаємодія йде поетапно



Сумарна реакція має вигляд



Початкова стадія процесу полягає в переході електронів від металу-каталізатора (М) до іонів нікелю і перетворенні їх в одновалентні іони. Далі реакція диспропорціонування приводить до утворення металевого нікелю. Повернення

електронів до каталізатора здійснюється за допомогою іонів гідроксила, що перетворюється при цьому на радикала, що відновлюється потім гіпофосфітом.

### Питання для самоконтролю

1. Назвіть етапи термовакуумного напилення ?
2. Наведіть схему процесу термовакуумного напилення.
3. Навіщо застосовують розпилювання іонним бомбардуванням ?
4. Наведіть схему процесу отримання плівок катодним розпилюванням.
5. Наведіть схему процесу іонно-плазмового розпилювання.
6. Навіщо застосовують термічне оксидування ?
7. Наведіть схему термічного оксидування кремнію.
8. Навіщо застосовують хімічне осадження плівок з розчинів.
9. Поясніть процес хімічного осадження плівок у ванні з підігрівом.
10. У чому полягає хімічне нікелювання полягає ?

## Тема 6. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ШАРІВ І ПЕРЕХОДІВ

### 6.1 Загальні відомості

Напівпровідникові структури ІМ не можна виготовити, не застосувавши хоча б один-два з трьох процесів: епітаксіальне нарощування напівпровідникових шарів, дифузійне і іонне легування.

**Епітаксія** - процес нарощування монокристалічних шарів на монокристалічних підкладках. Монокристалічні підкладки в процесі зростання епітаксіального шару виконують орієнтуючу роль приманки, на якій відбувається кристалізація.

Процеси епітаксіального зростання аналогічні отриманню тонких плівок. Епітаксіальні шари можна нарощувати у вакуумі, з парогазової і рідкої фази. Більшість процесів епітаксії - осадження з парогазової фази. Вакуумна епітаксія, звана зараз молекулярно-променевою, відрізняється від розглянутого методу ТВН тим, що процес напилення ведеться в умовах надвисокого вакууму. Епітаксія відрізняється від вирощування монокристалів перш за все тим, що зростання кристала відбувається при температурі нижче за температуру плавлення. Жидкофазна епітаксія, заснована на кристалізації речовини, розчиненої в розплавленому металі, на поверхні підкладки, застосовується, головним чином, для отримання шарів подвійних і потрійних напівпровідникових з'єднань.

Жидкофазна епітаксія погано поєднується з сухими процесами інтегральної технології.

Залежно від складу матеріалів шаруючи і підкладки розрізняють процеси автоепітаксії і гетероепітаксії. Якщо склади матеріалів практично однакові, наприклад шар кремнію на кремнієвій пластині, процес називають автоепітаксією. Автое-

пітаксію можна одержати однорідні по складу (гомогенні) електронно-дірчасті переходи, тому процес вирощування шарів іноді називають гомоепітаксією.

**Гетероепітаксія** - процес орієнтованого наростання речовини, відмінної по хімічному складу від речовини підкладки. При нарощуванні гетероепітаксійних шарів на межі шар - підкладка утворюється неоднорідний по складу (гетерогенний) перехід. Процес гетероепітаксії можливий для елементів і складних речовин, не створюючих між собою хімічних з'єднань.

Основна особливість епітаксії в порівнянні з дифузією і іонним легуванням полягає у тому, що шари і локальні області протилежного типу провідності або з відмінною від напівпровідникової пластини концентрацією домішки є новими утвореннями над початковою поверхнею. В процесі зростання епітаксіальні шари легують, тобто в них вводять донорні або акцепторні домішки.

Можливості легування при епітаксії набагато ширші, ніж при інших методах отримання легованих шарів напівпровідника, наприклад при дифузії. Унікальною особливістю епітаксії є можливість отримання високоомних шарів напівпровідника на нізкоомних пластинах. При епітаксії можна одержувати різноманітні розподіли легуючих домішок, зокрема рівномірні розподіли, або з різким перепадом концентрації на дуже малій відстані. Можна одержувати багатошарові структури в одному процесі. Епітаксіальні шари, на відміну від кремнієвої пластини із злитка, вирощеного з розплаву, не містять кисню і вуглецю, які є центрами дефекмоутворення.

засноване на використуванні відомого явища дифузії, тобто направлено-го переміщення частинок речовини у бік убавання їх концентрації. Рушійною силою дифузії є градієнт концентрації атомів або молекул речовини. Чим більше градієнт концентрації, тим інтенсивніше дифузія. Використовувати дифузію для зміни типу провідності кремнію або германію вперше в 1952 році запропонував американський учений Пфанн.

При виготовленні дифузійних структур на поверхні напівпровідникових пластин створюють підвищені концентрації легуючої домішки, яка починає дифундувати у глиб.

Дифузія - широко вживаний метод введення легуючих домішок в напівпровідникові пластини або у вирощені на них епітаксіальні шари з метою отримання областей протилежного в порівнянні з початковим напівпровідником типу провідності або з нижчим електроопором. У першому випадку одержують, наприклад, емітерні, базові області біполярних ІМ, області витоків і стоків МОП-ІМ, а також області, ізолюючі елементи ІМ один від одного і від загальної пластини. У другому випадку - резистори, приховані  $p^+, p^+$ -області, зменшуючі опір тіла колектора, або при-контактні області, що зменшують інжекцію неосновних носіїв з омичних контактів і поліпшуючі їх якість. Дифузія застосовується також для легування полікремнієвих шарів. При виготовленні швидкодійних структур з хорошими імпу-

льськими властивостями дифузію застосовують для введення домішок, створюючих в забороненій зоні напівпровідника глибокі рівні і зменшуючих час життя неосновних носіїв струму. Такими домішками для кремнію є золото і нікель.

При дифузії випрямляючі або концентраційні переходи одержують в початковій пластині, змінюючи її властивості легуванням на необхідну глибину. На відміну від епітаксії дифузійне легування йде у присутності домішок підкладки. Саме тому отримання області протилежного типу провідності можливе тільки при перекompенсації початковій домішці.

Дифузійні шари мають товщину від сотих часток мікрметрів до декількох мікрметрів, на відміну від епітаксціальних шарів завтовшки 0,1 - 100 мкм.

Відмітною особливістю дифузійно-легованих шарів є нерівномірний розподіл концентрації домішки по глибині. Концентрація максимальна на поверхні і убуває в глиб шару. Концентрація і розподіл домішки в значній мірі визначаються властивостями домішки, легованого матеріалу і джерела домішки.

Іонне легування вперше було застосоване для виготовлення рн-переходів Шоклі в 1954 році.

Іонне легування здійснюється іонізованими атомами домішки, що мають енергію, достатню для упродження в напівпровідник. Іони бору, фосфору або миш'яку з енергіями в діапазоні 3-500 кеВ упроджуються в приповерхностну область кремнію на глибину 0,02-1 мкм. Для отримання іоннолегованих шарів недостатньо упродження іонів домішки необхідний відпал для усунення радіаційних порушень структури напівпровідника і для електричної активації донорних або акцепторних домішок.

Основною особливістю іонного легування є можливість відтворного отримання заданої концентрації домішки на даній глибині практично на будь-якій площі пластини. Це обумовлено тим, що можна з великою точністю задавати струм іонного променя. Можливе отримання неглибоких, однорідно легованих шарів, а також різких рн-и-переходов. Розподілами домішок можна легко управляти в широкіх межах, змінюючи дозу опромінювання, енергію і кут падіння іонів.

Можливості іонного легування більшою мірою визначаються параметрами процесу, ніж властивостями пластини кремнію і домішки. Метод іонного легування дозволяє вводити в напівпровідникові пластини іони різних домішок і одержувати необхідні розподіли концентрацій, зокрема такі, які не можна одержати іншими методами.

На відміну від методу дифузії, при якому теплова кінетична енергія атомів домішки складає десяті частки електронвольт, при іонному упродженні прискорені іони володіють кінетичною енергією в десятки кілоелектронвольт. Іони, що бомбардують підкладку, без праці долають поверхневі потенційні бар'єри, обумовлені наявністю оксидів і забруднень, тому іонне упродження йде рівномірно за всією

оброблюваною площею поверхні. Характеристики іон легування шарів виходять більш відтворними, ніж при дифузії.

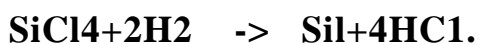
І окрім цього, можливе легування через шар плівки, наприклад діоксиду кремнію. Іонне легування має ще ряд переваг перед дифузією, завдяки чому метод став основним при створенні напівпровідникових елементів з субмікронними розмірами як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямі. Іонним легуванням складно одержати товсті шари більше 1 мкм з відтворними параметрами, тому їх одержують комбінованим методом: спочатку упроваджують з високою точністю задану концентрацію домішки на невелику глибину, потім приводять дифузією цієї домішки на задану глибину. Такі процеси називають дифузією з іон легуванням шарами. Іонне упровадження застосовують також для геттеріровання, а також для легування шарів полікристалічного кремнію, вживаних для затворів і металізації. Відзначимо також, що іонне легування - чистий, сухий процес.

## 6.2 Епітаксія кремнієвих шарів

Епітаксія з парогазової фази. Загальні питання, що стосуються основ процесів осадження з парогазової фази, були розглянуті в гл. 5. Для осадження шарів кремнію з парогазової фази в промисловому виробництві використовують кремній содєржачі з'єднання: тетрахлорид кремнію, силан. Відповідно до вживаних початкових продуктів називають і методи: хлоридний і силановий.

Хлоридний метод заснований на використуванні хімічної взаємодії пари тетрахлоріда кремнію з чистим воднем. Ця взаємодія супроводжується рядом оборотних хімічних реакцій, наступних одна за одною. Сумарну реакцію хлоридного процесу можна розглядати як оборотну реакцію відновлення тетрахлоріда кремнію воднем:

**1200°C**



Залежно від умов в робочій камері установки реакція може йти не тільки зліва направо, але і справа наліво, тобто за певних умов швидкість росту епітаксіального шару може стати рівною нулю, і кремній почне труїтися. Це спостерігається при низьких і високих температурах.

Процес нарощування шарів кремнію виконують способом проточної труби при атмосферному тиску (Рис. 25). У даній схемі використовується камера-реактор вертикального типу. Підложкодержатель одночасно виконує роль нагівача. Нагрів подложкодержателя здійснюється резистивним, індукційним або ІК-СПОСОБОМ. Підложкодержатель при високих температурах не повинен виділяти забруднення і вступати в хімічну взаємодію з пластинами, тому його виготовляють з високоякісних сортів стеклографіта або графіту і покривають шаром карбїду кремнію або кремнію. У разі індукційного нагріву можна застосовувати підложкодержателі з високоомного кремнію, покритого шаром діоксиду кремнію.

Щоб шари кремнію осідали тільки на пластинах і забруднення не потрапляли на пластини з внутрішніх стінок камери установки, останні охолоджують.

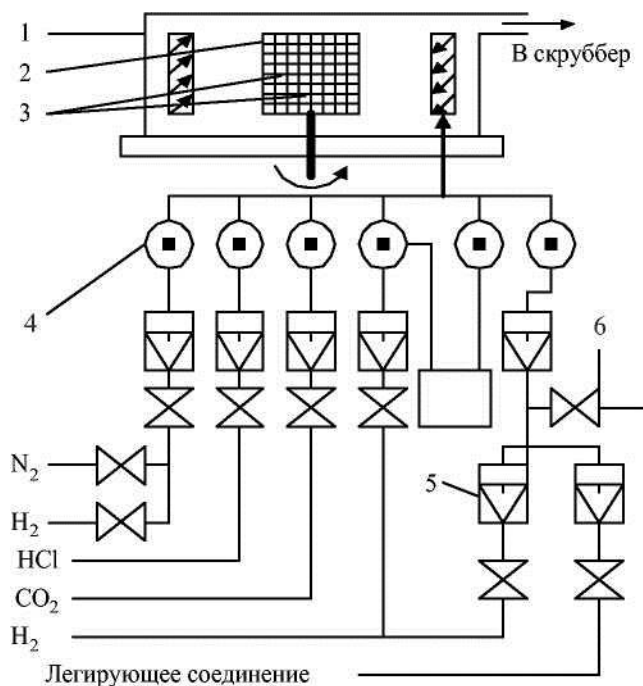
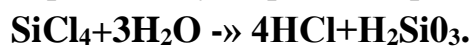


Рис. 25. Схема установки епітаксiального нарощування: 1 - реакційна камера; 2- підложкоутримувач; 3 - підкладки; 4 — голчаті вентилі; 5-ротаметри; 6- замочні вентилі

Парогазова суміш поступає в зону реакції через безліч отворів в кварцових трубках, розташованих уздовж створюючи циліндрового підложкодержателя. Тетрахлорид кремнію є рідиною, киплячою при температурі 57 °С і що має високий тиск пари, сильно залежне від температури. Для забезпечення подачі в реакційну камеру точної кількості тетрахлоріда кремнію його випаровування ведуть в дозаторі при строго сталому режимі. Чистота початкового тетрахлоріда кремнію визначає максимальний питомий опір шарів. Сучасний рівень очищення дозволяє одержувати тетрахлорид кремнію, забезпечує питомий опір до сотень Ом • див.

Водень, що бере участь в реакції відновлення, є одночасно і газом-носієм. Регулювання ступеня насичення водню парами тетрахлоріда кремнію можна здійснювати зміною швидкості потоку водню і температури рідкого тетрахлоріда кремнію. Водень повинен бути добре осушений, оскільки волога розкладає тетрахлорид кремнію з утворенням кремнієвої і соляної кислот



Процес епітаксiального осадження включає переходи:

- завантаження пластин в кубла підложкодержателя;
- продування реактора азотом для витіснення повітря;
- напуск в реактор водню і відключення азоту, продування воднем;



- нагрів пластин до температури 1200 °З і витримку близько 10 мін до відновного відпалу;

- газове труїть в зневодненому хлористому водні, по закінченню продування воднем і охолодження подложкодержателя до температури епітаксіального наросування 1150 °З;

- осадження епітаксіального шаруючи, для чого в камеру подають пари тетрахлоріда кремнію, легуюче з'єднання в концентраціях, забезпечують оптимальну швидкість росту 0,2-3,0 мкм/хв і необхідний рівень легування шаруючи; продування воднем;

- захист поверхні епітаксіальною шаруючою плівкою діоксиду кремнія, що необхідне для транспортування епітаксіальних структур або для міжопераційного зберігання, для цього в камеру подають CO<sub>2</sub>, SiHCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, продування воднем;

- повільне охолодження пластин до кімнатної температури в потоці водню;

- продування реактора азотом, розгерметизацію реактора, вивантаження епітаксіальних структур.

У сучасних промислових установках, наприклад УНЕС-2П-КА, управління процесом здійснюється, в основному ЕОМ, оператор виконує тільки завантаження і вивантаження пластин. Відходи хімічних реакцій на виході реактора поступають в скруббер, де спалюються в полум'ї водню. При виконанні процесу необхідно дотримувати правила безпечної роботи з токсичними речовинами і воднем.

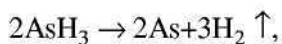
Основний недолік хлорідного методу - високі температури процесу, що приводять до дифузії домішок з пластин в шар, що росте, а також до автолегування.

Установка для вирощування епітаксіальних шарів силановим методом близька по пристрою до установок, використовуваних в хлорідному методі, і для обережності при роботі з моносиланом вона забезпечується системою для відкачування повітря і слідів вологи. Досконалі монокристалічні шари виходять при температурах розкладання моносилана 1000-1050 °З, що на 200-150 °З нижче, ніж при відновленні тетрахлоріда кремнію. Це зменшує небажані дифузії і автолегування, що дозволяє виготовляти епітаксіальні структури з різкішими межами переходів. Безповоротність реакції розкладання моносилана також сприяє отриманню різкішого розподілу концентрації легуючої домішки на межі пластина-шар. Відсутність серед продуктів розкладання хлористого водню або інших шкідливих продуктів, зокрема хлора, відноситься також до гідності силанового методу. Швидкість росту шарів вища, ніж при відновленні тетрахлоріда кремнію.

Легування епітаксіальних шарів здійснюється одночасно з їх зростанням шляхом введення в парогазову суміш з'єднань, що містять легуючі елементи, звані джерелами легуючих домішок.

Газоподібні джерела - гідриди, діборан  $B_2H_6$ , арсин  $AsH_3$ , фосфін  $PH_3$  - відрізняються високою токсичністю і тому поставляються на виробництво в балонах в суміші з воднем або інертними газами в концентраціях  $(2-20) \cdot 10^{-3} \%$ .

При використуванні діборана важко одержувати його суміш із змістом менше 10%, суміші нестабільні при зберіганні, складно встановити і точно зміряти малі витрати суміші, тому важко одержувати кремнієві шари, слабологовані бором з питомим опором, великим  $1 \text{ Ом} \cdot \text{див}$ . У зв'язку з цим застосовують рідкі і тверді джерела. З газоподібних джерел найчастіше застосовують арсин. Газ доставляється до підкладок, адсорбується їх поверхнею, диссоціює:



миш'як, що звільнився, вбудовується в грати шару кремнію, що росте.

**Гетероепітаксія.** Гетероепітаксія істотно розширює функціональні можливості мікроелектронних пристроїв. При виборі пари матеріалів підкладка-шар необхідно враховувати параметри їх кристалічних ґрат, ТКЛР, температури плавлення, коефіцієнти взаємної дифузії, пружність пари при температурі процесу і ін. При великій невідповідності вказаних параметрів на межі шар-підкладка виникають механічні напруги і дислокації. Перехідна область по своїх властивостях відрізняється від властивостей об'ємів по обидві сторони межі підкладка-шар, що впливає і на процес зростання шаруючи і на параметри мікросхем.

У виробництві мікросхем гетероепітаксія розвивається в двох основних напрямках: вирощуванні напівпровідникових гетеропереходів і нарощуванні напівпровідникових шарів на діелектричних підкладках.

Нарощування гетеропереходів застосовують для створення випрямлячів, що працюють на основних носіях ( $CdSe - Se$ ), тунельних діодів ( $GaAs - InP$ ,  $CdS - ZnTe$ ,  $GaAs - Ga_{1-x}In_xAs$ ), транзисторів з широкозонним емітером ( $GaAs - Ge$ ), інжекційних лазерів ( $GaAs - Ga_{1-x}Al_xAs$ ), джерел спонтанного випромінювання ( $GaAs - GaP$ ,  $CdSe - ZnTe$ ,  $GaAs - InAs$ ) і відповідних мікросхем. Для отримання гетеропереходів застосовують епітаксію з газової і рідкої фази.

Гетероепітаксія на діелектричних підкладках при виготовленні мікросхем вирішує проблему ізоляції елементів, забезпечує поліпшення параметрів, підвищує ступінь інтеграції і відсоток виходу годних виробів. В даний час найбільш освоєна виробництвом епітаксія кремнію на сапфірових підкладках (КНС), а також ведуться дослідження процесів нарощування кремнієвих шарів на інших ізоляторах (КНІ), зокрема аморфних, що по суті не є епітаксією, оскільки виключений орієнтуючий вплив підкладок.

КНС-структури одержують аналогічно авто-епітаксіальним шарам кремнію. З методів газової епітаксії найчастіше застосовують силановий, оскільки він дозволяє вирощувати кремній при нижчій температурі підкладок, крім того, відпадає небезпека трюїть сапфіра, оскільки серед продуктів реакції відсутній хлористий водень.

На відміну від кубічної симетрії кремнію сапфір має ромбоедричну симетрію. Кремній з орієнтацією (111) вирощують на (0001) і (1010) поверхнях сапфіра. Кремній з орієнтацією (100) вирощують на сапфірі з орієнтацією (1102). Температурні коефіцієнти лінійного розширення кремнію і сапфіра розрізняються майже в два рази. Ці невідповідності кремнію і сапфіра ускладнюють отримання якісних шарів. Окрім цього, в процесі зростання відбувається автолегування алюмінієм, що підвищує дефектність шарів. Автолегування обмежує рівень можливого легування шарів донорними або акцепторними домішками. Шари кремнію характеризуються порівняно високою густиною дефектів, яка зростає у напрямку до підкладки.

Молекулярно-променева епітаксія дякуючи нижчим температурам зменшує автолегування і також знижує дефекти невідповідності. Додаткова обробка шарів кремнію лазерним променем покращує їх якість.

Основним недоліком структур КНС поки залишається висока густина дефектів і, як наслідок, малий час життя неосновних носіїв. Тому вони застосовуються для НИМ з МОП активними елементами, що працюють на основних носіях.

КНИ-структури виготовляють шляхом нанесення шару аморфного або полікристалічного кремнію на ізолюючі підкладки і його подальшої перекристалізування. Технологія виготовлення КНІ з'явилася порівняно недавно. Перші структури виготовляли на термічно окисдованих пластинах кремнію. Потім почали застосовувати дешевші підкладки з ситаллов, кварцу. Перекристалізацію кремнію для формування монокристалічного шару виконують рухомою смужкою - нагрівачем, скануванням лазерного або електронного променя і ін.

### **6.3 Дифузійне легування**

У напівпровідниках дифузія може здійснюватися трьома способами (Рис. 26). При обмінному механізмі відбувається простий обмін місцями двох атомів або кільцевий обмін з участю декількох атомів. При вакансійному механізмі дифузія здійснюється шляхом послідовних перескоків домішкових атомів заміщення з власних вузлів у вакантні (вільні) вузли. Дифузія при між-вузлковому механізмі здійснюється в результаті послідовних переходів домішки упродовження з одного межвузлля в інше. Атоми домішки як би «продавлюються» між атомами, що знаходяться у вузлах кристалічних ґрат.

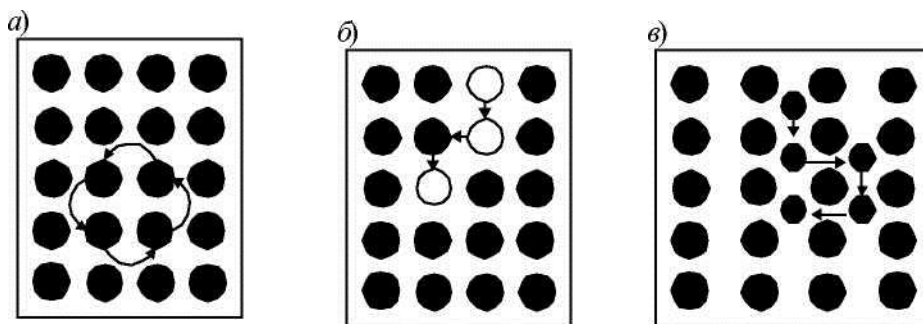


Рис. 26. Механізм дифузії в напівпровідниках:

а - кільцевий; б- вакансійний; в - у міжвузельний

Для легуючих домішок в германії і кремнії найбільш вірогідний вакансійний механізм, визначуваний наявністю в кристалі дефектів по Шотки і дефектів по Френкелю, тобто наявністю вакансій або парних дефектів вакансія - атом в міжвузлі. Утворення таких дефектів пов'язане з тепловими коливаннями ґрат. Із збільшенням температури кількість вакансій збільшується відповідно до виразу

$$n_v = n e^{-E/(kT)},$$

де  $n_v$  - кількість вакансій,  $\text{см}^{-3}$ ;  $e$  - підстава натурального логарифма;  $E$  - енергія, необхідна для утворення вакансії;  $k$  - постійна Больцмана;  $T$  - абсолютна температура;  $n$  - кількість атомів напівпровідника, що знаходяться у вузлах кристалічних ґрат.

Для утворення однієї вакансії необхідна енергія, рівна декільком електронвольтам. При кімнатних температурах кількість вакансій мало, на  $10^{15}$ - $10^{16}$  атомів напівпровідника доводиться одна вакансія. Із збільшенням температури до  $1000$ - $1200$  °З число вакансій стає порівнянно з числом атомів напівпровідника. Під дією теплових коливань атоми домішки можуть зайняти місце сусідньої вакансії і таким чином пересунутися. Вірогідність переходу домішки з вузла у вакантний вузол залежить від вірогідності наявності сусідніх вакансій і від вірогідності подолання потенційного бар'єру під час переходу атома на місце вакансії

$$p \approx \exp(-\Delta E/(kT)),$$

де  $\Delta E$  - енергія активації процесу дифузії, що складається з енергії, необхідної для утворення вакансії, і енергії переходу атома домішки з свого положення у вакантний вузол. Для вакансійної дифузії в кремнії  $\Delta E = 3,5 \cdot 10^3$  еВ.

Разом з дифузією легуючих домішок має місце і дифузія власних атомів напівпровідника - самодифузія. Через більший хімічний зв'язок власних атомів процес самодифузії незначний.

Багато домішкові атоми першої, другої, шостої, сьомої і восьмої груп таблиці Менделєєва в кремнії займають місця в міжвузільях, тобто утворюють тверді розчини упровадження. Дифузія цих домішок здійснюється по міжвузільному механізмі. Вірогідність міжвузільних переходів атомів істотно більше за вірогідність

переходів з вузла в сусідній вузол. Тому дифузія домішок упровадження відбувається істотно швидше дифузії домішок заміщення.

Розчинність домішок збільшується з підвищенням температури і після досягнення максимальної розчинності починає зменшуватися. Граничною розчинністю домішки в напівпровіднику називається максимально можлива кількість певної домішки в одиниці об'єму даного напівпровідника при даній температурі.

За допомогою методу дифузії в напівпровідник можна вводити домішку до концентрацій, не великих граничній розчинності при даній температурі.

Закони дифузії Фіка описують процеси дифузійного перенесення речовини.

Перше рівняння дифузії одновимірної, тобто що йде в основному у напрямі нормалі до поверхні напівпровідникової пластини, визначає потік атомів домішки з області з підвищеною концентрацією в область із зниженою концентрацією

$$F = -D \frac{dN}{dx},$$

де  $D$  - коефіцієнт дифузії, чисельно дорівнює кількості атомів домішки, проходячих за одиницю часу через одиничний майданчик, нормальний до напрямку дифузії, при градієнті концентрації домішки  $dN/dx$ , рівному одиниці. Знак мінус в правій частині рівняння указує, що дифузійне переміщення атомів відбувається у бік убавання концентрації.

Друге рівняння дифузії виводиться з першого при допущенні, що коефіцієнт дифузії не залежить від концентрації

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}.$$

Друге рівняння Фіка виражає основний закон дифузії, воно визначає концентрацію домішки, що вводиться в напівпровідник, у будь-який момент часу на будь-якій відстані від поверхні при заданій температурі дифузії. Температура входить в друге рівняння не явно, а через коефіцієнт дифузії

$$D = D_0 \exp(-\Delta E/(kT)).$$

де  $D_0$  - постійна, чисельно рівна коефіцієнту дифузії при нескінченно великій температурі;  $\Delta E$  - енергія активації процесу дифузії даної домішки, тобто енергія, необхідна для перескоку атома домішки у вакантний вузол ґрат.

При звичних кімнатних температурах дифузія в твердих тілах практично не спостерігається. Процеси дифузії в напівпровідниках ведуть при високих температурах (800-900 °З для германію і 1000-1200 °З для кремнію).

Розподіл легуючої домішки по глибині дифузійного шару  $N=f(x)$  (Рис. 27) для конкретних умов дифузії знаходиться шляхом рішення основного рівняння.

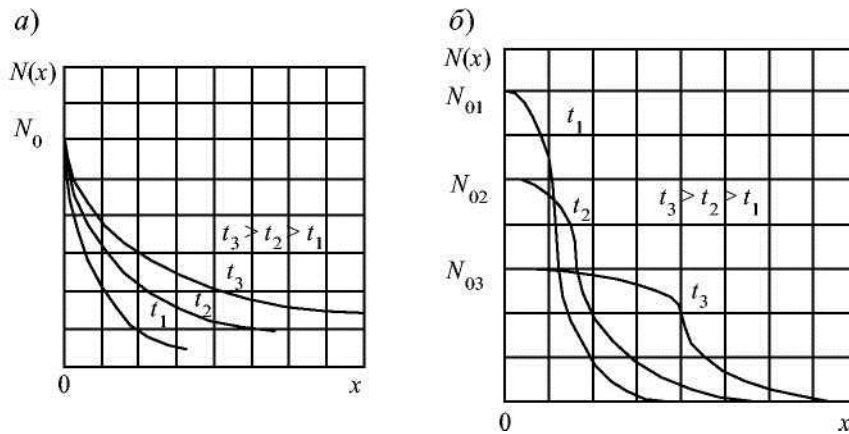


Рис. 27. Розподіл домішки при дифузії з нескінченного постійного (а) і з обмеженого {&} джерел

Для дифузії з нескінченного постійного джерела (Рис. 27,а), яке забезпечує постійне поповнення домішки, що йде в глиб напівпровідника

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}},$$

де  $N_0$  - концентрація домішки на поверхні пластини;  $x$  - глибина дифузії;  $t$  - час процесу;  $\operatorname{erfc}$  - умовне позначення функції доповнення інтеграла помилок до одиниці.

Для одновимірної дифузії з обмеженого джерела (Рис. 21,б), наприклад, створеного в тонкому приповерхносному шарі пластини і захищеного маскуючою плівкою від дифузії домішки в навколишній простір, розподіл домішки описується рівнянням Гауса

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-x^2/4(Dt)\right),$$

де  $Q$  - загальна кількість домішки, введене в напівпровідник через  $1\text{ см}^2$  поверхні за час дифузії. Особливістю приведених розподілів домішки, соответствующих додаткової функції помилок і функції Гауса, є монотонне убавання концентрації домішки від поверхні в глиб напівпровідника. Поверхнева концентрація при дифузії з необмеженого джерела постійна незалежно від часу дифузії, а при дифузії з обмеженого джерела зменшується у міру збільшення часу, оскільки у міру відходу домішки в об'єм пластини концентрація домішки в джерелі виснажується, а притока ззовні відсутня. Реальні розподіли домішок відрізняються від розрахункових. Проте на практиці для визначення режимів дифузії часто використовують рішення рівнянь Фіка, а результати розрахунку перевіряють і уточнюють експериментально.

Двохстадійна дифузія застосовується в більшості випадків з метою отримання відтворених параметрів легованих шарів і невисоких поверхневих концентрацій.

На першій стадії, званій «заганянням», в тонкий приповерхностний шар напівпровідникової пластини вводиться певна кількість леуючої домішки з необме-

женого джерела. Тим самим створюється поверхневий шар підвищеної концентрації - джерело домішки для другого етапу. Поверхнева концентрація домішки після етапу загання велика. Перша стадія звичайно проводиться швидко і при порівняно низьких температурах. На поверхні кремнієвих пластин при цьому утворюється шар примісносилікатного скла.

Другу стадію дифузії - дифузійний відпал, звану іноді «розгоном», проводять з попереднім зняттям або без зняття поверхневого скла, одержаного на першій стадії. Друга стадія, як правило, поєднується з наступною операцією термічного оксидування, тобто процес ведуть в окисному середовищі. Дифузійний відпал проводиться за відсутності джерела домішки, вживаного на першій стадії. При цьому відбувається перерозподіл введеної на першій стадії домішки на певну глибину - поверхнева концентрація домішки знижується за рахунок відходу в глиб напівпровідника і в шар оксиду, що росте, оскільки останній заглиблюється в пластину кремнію. Температура цієї стадії дифузії вища в порівнянні з першою.

Техніка виконання дифузійного легування. Основним для проведення дифузії домішок в пластини кремнію є спосіб проточної труби. Процес дифузії пред'являє високі вимоги до джерел домішок, до чистоти підготовки напівпровідникових пластин, оснащення, кварцової труби. Проведення дифузії певної домішки здійснюється в конкретній установці, в якій не проводять дифузії іншої домішки і не використовують оснащення з інших установок. Для запобігання збідненню газового потоку парами домішки в результаті поглинання внутрішніми стінками кварцової труби, останню перед проведенням дифузії спеціально насичають домішкою. Кварцове оснащення і контрольні термопари для вимірювання температурного профілю уздовж печі і визначення меж температурної зони зберігають в спеціальних кварцових трубах-футлярах.

#### **6.4 Іонне легування**

Іонне легування здійснюється в два етапи: упровадження іонів, відпал.

Упровадження іонів принципово відрізняється від дифузії з погляду механізму процесу. Рух іонів в напівпровіднику визначається їх початковою кінетичною енергією, а не градієнтом концентрації, як при дифузії. Іонне упровадження не є рівноважним процесом, тому концентрації домішок легко досягають граничних значень і в деяких випадках можуть їх перевершувати. Іонне упровадження - швидкий процес, його можна проводити при кімнатній температурі, застосовувати для легування домішки з низькими коефіцієнтами дифузії або низькою розчинністю твердій фази, а також для легування напівпровідників з низькою температурою плавлення (арсенід індія) або напівпровідників, дифузійне легування яких вимагає дуже високих температур (карбід кремнію).

Залежно від напрямку іонів упровадження може проходити по двох механізмах, що приводять до різних глибині проникнення і розподілу домішки.

Орієнтоване упровадження — коли кут між напрямом падіння іонів і головним кристаллографічним напрямом напівпровідникової пластини менше за критичний. Рух іонів відбувається по каналах.

Глибина проникнення іонів залежить від кристаллографічної орієнтації.

Якщо напрям падіння первинного пучка іонів на поверхню пластини відхиляється від основного кристаллографічного напрямку  $i$ , отже, від осі каналу, то іони виходять за область каналу і переміщуються по безладних траєкторіях. У реальних умовах, навіть якщо кут падіння відхиляється від осі каналу не більше ніж на критичний, чисте каналування не матиме місце. Це пояснюється тим, що у міру упровадження із збільшенням дози опромінювання частина падаючих на пластину іонів стикатиметься з поверхневими атомами. Ці іони не потраплять в канали, а відхиляться від первинного напрямку, в результаті їх нерегульованого руху утворюватимуться дефектні області, які, у свою чергу, впливатимуть на характер упровадження. При великих дозах опромінювання концентрація іонів в каналі велика, і не всі з них знаходяться в однакових умовах. Енергія іонів, рухомих по центральній частині каналу, втрачається в основному через взаємодію з електронами. Втрати енергії іонами, що відхилюють від центру каналу, обумовлені також взаємодіями з ядрами атомів. Відхилення іонів можуть відбуватися також і при взаємодії з тепловими коливаннями атомів напівпровідника, дефектами ґрат і ін. Вплив додаткових причин відхилень іонів тим більше, чим далі іон знаходиться від центру каналу. Із збільшенням дози опромінювання деканалування стає помітнішим і при дозах  $10^{15}$ -см<sup>2</sup> ефект каналування практично зникає.

Розподіл іонів при орієнтованому упровадженні, а також умовна схема руху іонів приведені на Рис. 28. Перший максимум розподілу обумовлений відхиленням іонів від напрямку каналування в результаті взаємодії частини з них з поверхневими атомами напівпровідника. Розподіл концентрації на цій ділянці відповідає функції Гауса. Другий максимум розподілу обумовлений ідеально каналування іонами. Розподіл цих іонів негауссово. Середня область кривої розподілу обумовлена іонами, які потрапили в канали, але не в ідеальні умови. Пройшовши деякий шлях, вони деканалували і упровадилися в проміжку між двома максимумами. орієнтованому упровадженні: 1 - відхилення іонів при зіткненні з поверхневими атомами пластини; 2 - деканалування іонів; 3 - ідеально-каналуємі іони; 4 - негауссово розподіл; 5 - гауссово розподіл

Із збільшенням дози опромінювання вірогідність розсіяння іонів на поверхні і подальшого деканалування зростає і тому каналування зменшується, другий максимум в кривій розподілу упроваджених іонів знижується, перший збільшується. При великій дозі опромінювання і не дуже високої початкової енергії іонів другий максимум розподілу взагалі може зникнути на фоні деканалованих іонів.



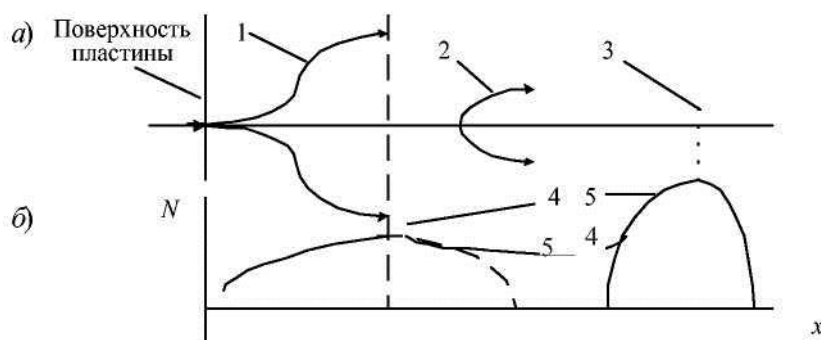


Рис. 28. Умовна схема руху (а) і характер розподілу іонів (б) при

Разоорієнтоване упровадження іонів при вугіллі падіння більше критичного супроводжується нерегульованим рухом іонів з передачею значної енергії. При кожному зіткненні відбувається передача енергії атомам пластины і гальмування рухомого іона до тих пір, поки іон не зупиниться остаточно. Якщо передана іоном енергія перевищує енергію зв'язку атомів в ґратах, атоми зміщуються і покидають вузли ґрат, внаслідок чого утворюються дефекти Френкеля - вакансії і атоми в міжвузлях. Оскільки первинна енергія іона велика, на шляху його переміщення усередині напівпровідника утворюються численні дефекти зсувів, що зливаються в зони розміром 50-100 °А. По мірі упровадження іонів кількість і розмір зон з разупорядкованими кристалічними ґратами збільшуються, і якщо густина зон велика, то в певний момент напівпровідник переходить в аморфний стан.

Критична доза іонного опромінювання, при якій напівпровідник переходить з кристалічного стану в аморфний, називається дозою аморфізації. Аморфізація поверхні кремнієвої пластины під дією іонів фосфору відбувається інтенсивніше, ніж під дією іонів бору. Доза опромінювання, необхідна для аморфізації поверхні кремнію, складає  $6,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Траєкторія руху іонів має вид ламаної лінії (Рис. 29), кожна прямолінійна ділянка якої відповідає пробігу іона до зіткнення з атомом ґрат. Повна довжина пробігу і траєкторії.

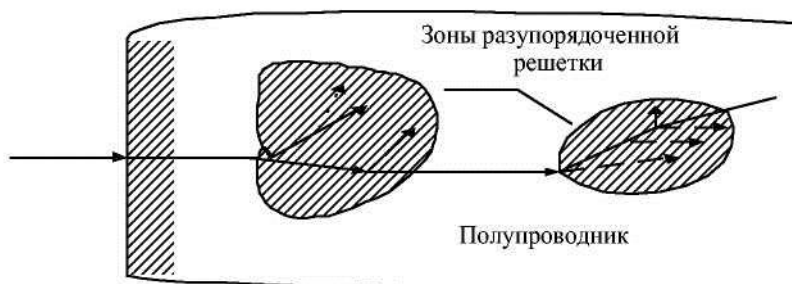


Рис. 29. Траєкторія руху упроваджених іонів: - - - відхилення атомів напівпровідника при зіткненні з іонами; траєкторія руху іона

Практичне значення для визначення глибини упровадження іонів має середня довжина проекції повного пробігу на напрям початкової швидкості іонів.  $R$  - середній нормальний пробіг.

Розподіл іонів при разорієнтованному упровадженні визначається законом Гауса, оскільки зіткнення іонів з атомами ґрат носять характер вірогідності

$$N(x) = \left[ \frac{Q}{\Delta R_n \sqrt{2\pi}} \right] \exp \left[ -\frac{(x - R_n)^2}{2\Delta R_n^2} \right],$$

де  $Q$  - доза опромінювання,  $\text{см}^2$ ;  $\Delta R$  - середньоквадратичне відхилення нормальних пробігів,  $\text{см}$ ;  $x$  - глибина упровадження іонів, див.

Максимум розподілів (Рис. 30) відповідає не поверхні пластин, як у разі термічної дифузії, а відстані від поверхні, рівному середньому нормальному пробігу іонів. Із збільшенням енергії максимум розподілу зсувається в глиб підкладки, це дозволяє одержувати приховані заглиблені шари з провідністю протилежного типу.

Переваги і недоліки іонного легування. Достоїнства іонного легування: висока точність і відтворність глибини і ступеня легування за рахунок підтримки параметрів іонного пучка; можливість формування практично будь-якого профілю легування; можливість отримання прихованих легуваних областей; точне відтворення малюнка маски при локальному легуванні; висока продуктивність і легкість автоматизації; можливість виконання комплексу операцій в одній установці.

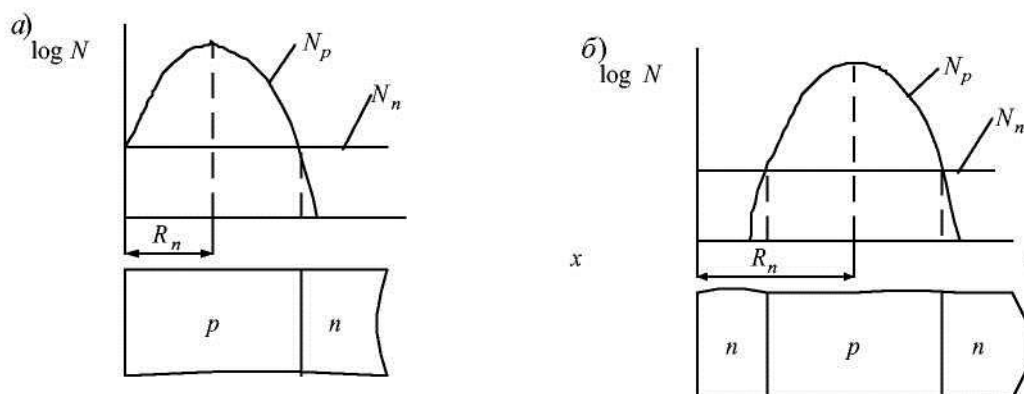


Рис. 30. Розподіл іонів з низькими (а) і високими (б) значеннями енергії при разорієнтованному упровадженні

Недоліки і обмеження іонного легування: необхідність відпалу; складність відтворного легування шарів товщиною більше 1 мкм; складність однорідного легування пластин великого діаметру через розфокусований промінь при повних відхиленнях, складність устаткування.

### Питання для самоконтролю

1. Які процеси необхідні для виготовлення напівпровідникових структур ІМ ?
2. Які бувають процеси жидкофазної епітаксії ?
3. Поясніть процес гетероепітаксії.
4. Поясніть процес автоепітаксії.
5. На якому явищі засноване дифузійне легування ?
6. Чим відрізняються епітаксія від дифузійного легування ?
7. Як відбувається епітаксія кремнієвих шарів ?
8. Які є, згідно початкових продуктів, методи епітаксії ?
9. Наведіть схему установки епітаксiального нарощування кремнієвих шарів.
10. Назвіть етапи процесу епітаксiального осадження ?
11. У яких напрямках розвивається гетероепітаксія у виробництві мікросхем ?
12. Які симетрії мають кремній та сапфір ?
13. Поясніть механізм дифузії в напівпровідниках.
14. За яким законом збільшується кількість вакансій відповідно зміни температури ?
15. Як обчислити вірогідність подолання потенційного бар'єру під час переходу атома на місце вакансії ?
16. Наведіть перше рівняння одновимірної дифузії ?
17. Наведіть друге рівняння дифузії, закон Фіка ?
18. Як визначається коефіцієнт дифузії ?
19. Наведіть закон розподілу домішки, який описується рівнянням Гауса.
20. Як здійснюється іонне легування ?
22. Які переваги має іонне легування ?
23. Наведіть розподіл іонів з низькими та високими значеннями енергії при разорієнтованому упродовженні.
24. Наведіть переваги і недоліки іонного легування.

## Тема 7. ТИПОВІ МАРШРУТИ ВИГОТОВЛЕННЯ СТРУКТУР МІКРОСХЕМ

### 7.1 Виготовлення біполярних структур

Елементи біполярних ІМ формують в окремих електрично ізольованих один від одного і від загальної пластини областях-кишенях. Для багатьох НІМ початковими заготівками є епітаксiальні структури з прихованими n+-областями, які зменшують опори колекторів.

Відповідно до принципу сумісності елементів одночасно з транзисторами формують діоди, резистори, конденсатори. На завершальних стадіях маршруту вико-

нують металізацію: контакти до активних областей, провідні доріжки між елементами, контактні майданчики для зовнішніх електричних з'єднань.

Нагадаємо, основу процесів виготовлення напівпровідникових ІМ які складаються з епітаксії, планарної та мезатехнології. Контактні маски в переважній більшості формують з діоксиду кремнію. Плівка діоксиду кремнію з акцепторних домішок маскує тільки від бору. Алюміній, індій, галій мають в плівці високий коефіцієнт дифузії. Для захисту від дифузії цих домішок використовують маски з нітрида кремнію. Частіше за інші донорні домішки застосовують фосфор, він має більший коефіцієнт дифузії, ніж сурма і миш'як, і велику граничну розчинність в кремнії, ніж сурма.

Виготовлення біполярних ІМ з ізоляцією р-п переходами. Розглянемо найтехнологічніші і добре освоєні виробництвом процеси, в яких ізоляція створюється за допомогою дифузії на всю глибину епітаксціальних шарів. В результаті дифузії одержують кишень, оточені р-п переходами.

Виготовлення біполярних ІМ методом розділової дифузії наскрізь епітаксціального і-слоя (Рис. 31) складається з двох етапів: виготовлення епітаксціальної структури з прихованими н-областями (а - в) і виготовлення біполярної ІМ на цій структурі (г - з).

Епітаксціальні структури звичайно виготовляють в окремому процесі. Легуюча домішка для прихованих  $n^+$ -областей повинна мати високу розчинність в кремнії при малій глибині дифузії. Разом з тим щоб не відбувалося пересування межі прихованого колекторного шару при подальших термообробках, домішка повинна мати по можливості мінімальний коефіцієнт дифузії. Поверхнева концентрація прихованого шару не повинна бути дуже високою, оскільки це збільшує дифузію в епітаксціальний шар, що росте, а також механічні напруги і густину дислокацій, викликані невідповідністю атомних радіусів кремнію і домішки.

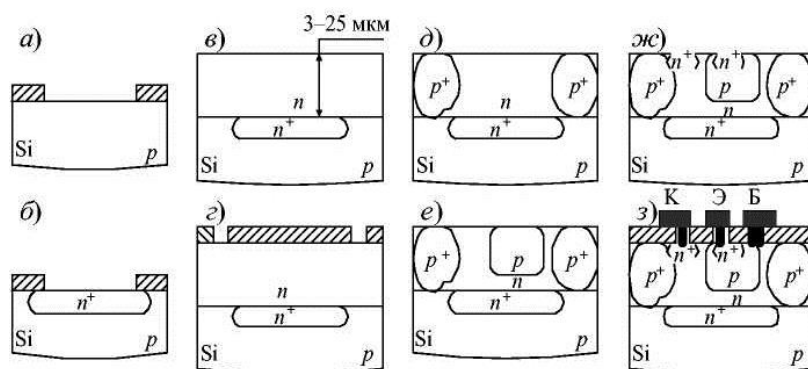


Рис. 31. Схема виготовлення епітаксціально-планарної біполярної ІМ з допомогою розділової дифузії: а — термічне оксидування і перша фотолітографія; б - локальна дифузія; в - епітаксія; г — термічне оксидування і друга фотолітографія; д — розділова дифузія; е - формування базових областей; ж — формування емітерних і прикордонних областей колекторів; з - формування металізації

У зв'язку з цим для отримання прихованого  $n^+$ -слоя застосовують сурму і миш'як, які мають менші, ніж фосфор, коефіцієнти дифузії. Проте при використуванні миш'яку в прихованих шарах спостерігається велика кількість дефектів. Тому для створення високовольтних біполярних мікросхем приховані шари легують переважно сурмою. Типовий поверхневий опір прихованого шару складає 15-50 Ом/м, товщина шарів 2-5 мкм.

Епітаксіальний  $i$ -слої вирощують звичайно хлоридним методом. Товщина шаруючи 3-25 мкм залежно від призначення ІМ. Розподіл домішків рівномірний, рівень легування 1015-1016 см<sup>3</sup>. Концентрація домішки вибирається оптимальною, щоб, з одного боку, не був великим опір тіла колектора, а з другого боку, не була великою паразитна місткість база-колектор, обмежуючі швидкодію біполярного транзистора.

Виготовлення структури ІМ на одержаній заготовці включає розділову дифузійну акцепторної домішки і формування транзисторів і інших елементів в  $p^+$  і-карманах. Базові, емітерні і при-контактні області формуються локальною дифузійною з використанням контактних масок з діоксиду кремнію. Дифузійний розподіл домішки в базі приводить до виникнення внутрішнього електричного поля, прискорюючого рух неосновних носіїв від емітера до колектора і завдяки цьому збільшуючого швидкодію мікросхем.

Для формування емітерних областей як легуюча домішка застосовують фосфор. Одночасно одержують  $n^+$ -області під омичні контакти колекторів. Процес закінчується металізацією і захистом структур. Захисна плівка на малюнку не показана.

За розглянутою технологією виготовляють ІМ першого і другого ступенів інтеграції. Можливості процесу для отримання вищих ступенів інтеграції обмежені через ряд недоліків НІМ: наявність великих струмів витоку; великої площі ізолюючого  $p$ - $n$  переходу, а отже, і місткості паразитного зв'язку; порівняльно низьких пробивних напруг; наявність паразитних транзисторів  $p$ - $n$ - $p$  між базою і ізолюючим  $p^+$ - шаром; низької радіаційної стійкості.

## 7.2 Виготовлення МОП-структур

Найбільш ширше в складі ІМ застосовуються МОП-транзистори з індукованими каналами, оскільки вони дозволяють найпростіше здійснювати узгодження схем між собою і реалізовувати універсальні логічні функції. Першими в промисловому виробництві були  $N$ -МОП-ІМ, тобто НІМ на транзисторах з  $p$ -каналами. Виготовлення  $N$ -МОП-ІМ утруднене виникненням на поверхні  $p$ - $Si$  при термічному окисдуванні інверсного  $i$ -слою, який електрично зв'язує елементи ІМ. Завдяки вдосконаленню технології в даний час у виробництві переважають  $i$ -канальні НІМ, що мають більшу швидкодію завдяки високій рухливості електронів. Разом з НІМ, що містять транзистори з каналами одного типу, виготовляються також

комплементарні мікросхеми КМОП-ІМ, що містять транзистори з каналами протилежних типів.

МОП-ІМ виготовляються за планарною та епітаксiallyно-планарною технологією. Завдяки простішій конструкції МОП-транзистора і самоізоляції елементів загальна кількість технологічних операцій зменшується в порівнянні з біполярною технологією. Це підвищує вихід годних і зменшує вартість ІМ.

Найвідповідальніші моменти в технології МОП-ІМ: створення оксиду підзатвора, точне поєднання затвора з каналом і отримання структур з малою довжиною каналу.

Оксид підзатвора є складовою частиною активного елементу ІМ, до нього пред'являються жорсткіші вимоги, ніж до матеріалу контактної маски: висока електрична міцність, мінімальний заряд в об'ємі і на межі Si - SiO<sub>2</sub>, максимальна стабільність властивостей і ін. Густина поверхневого заряду для (100) Si складає 1,4-10~8 Кл/см<sup>2</sup>, для (111)Si—8-10<sup>^</sup> Кл/см<sup>2</sup>. Саме тому переважним є (100) Si.

Затвор не повинен перекривати області витoku і стоку, оскільки виникаючі паразитні місткості зменшують швидкодію ІМ. Якщо ж довжина затвора менше довжини каналу, ланцюг витік-стік розімкнений.

Довжина каналу визначає час прольоту носіїв струму від витoku до стоку і, отже, швидкодія МОП-ІМ. Підвищення швидкодії МОП-ІМ розширює області їх застосування, а мала площа на один елемент і простота технології дозволяють реалізувати високий ступінь інтеграції. МОП-структури складають основу більшості великих і надвеликих ІМ.

Виготовлення товстооксидних P-МОП-ІМ і N-МОП-ІМ. Розглянемо найпростіші типові процеси виготовлення ІМ з металевими затворами і товстою плівкою оксиду між металізацією і пластиною кремнію. Це зменшує паразитні місткості, а також дає деякі інші переваги перед раніше вживаною тонкооксидної технологією.

МОП-ІМ з р-каналами виготовляють за планарної технологією (Рис. 32). Локальна дифузія і вирощування товстого оксиду можуть

проводитися одночасно або роздільно. У другому випадку оксид облягають з парогазової фази. Товщина кінцевого оксиду над активними областями витоків і стоків близько 1 мкм, над початковою поверхнею і-кремнієвої пластини - 1,5 мкм.

Найскладнішим є проведення фотолітографії для розкриття вікон під тонкий оксид і подальше труїть товстого оксиду.

Завдяки створенню товстого оксиду під металізацією параметри мікросхем істотно поліпшуються. Проте проблема отримання мінімального перекриття областей витоків і стоків затворами не розв'язується, оскільки поєднання каналів із затворами тут виконується за допомогою фотолітографії і утруднене через невідомість розташування бічних границь n-и-переходов витоків і стоків, а також через необхідність труїння товстий оксид.

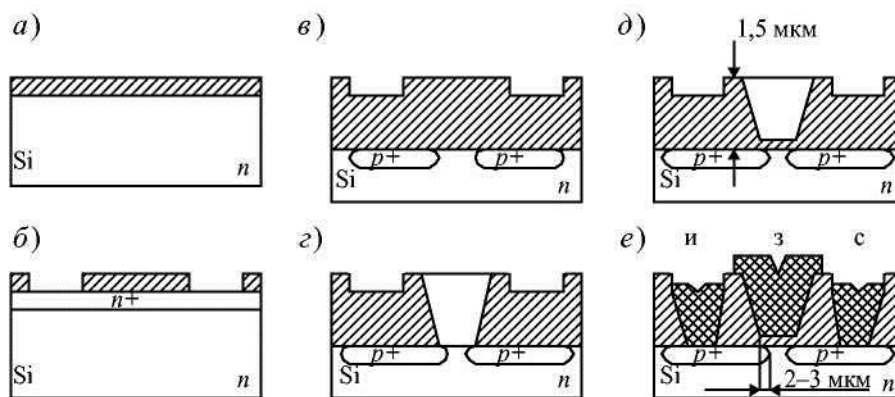


Рис. 32. Схема виготовлення товстооксидних МОП-ІС з р-каналами: а — вирощування маскуючого оксиду; б— перша фотолітографія; у - локальна дифузія, вирощування товстого оксиду; г — друга фотолітографія; д — вирощування тонкого оксиду підзатвору; е — третя фотолітографія, формування затворів і металізації

При товщині оксиду підзатвору 0,1 мкм перекриття каналу затвором складає 2-3 мкм. Разом з тим технологія виготовлення рп-МОП-ІМ порівняльно проста, забезпечує великий відсоток годних і низьку вартість виробів. МОП-ІМ з р-каналами широко використовуються в недорогих калькуляторах.

### 7.3 Типові маршрути технології тонкоплівкових структур

Виготовлення тонкоплівкових структур за допомогою вільних масок. Вільні металеві маски для отримання топології елементів можна використовувати тільки в поєднанні з методами термовакуумного напилення і іонно-плазмового розпилювання. При отриманні тонких плівок методом катодного розпилювання застосовувати металеві вільні маски не можна, оскільки вони спотворюють електричне поле між катодом і анодом. В результаті енергія бомбардуючих катод іонів аргону або іншого іонізованого газу різко зменшується, що приводить до значного зменшення швидкості осадження плівок або до повного припинення процесу. Застосування не спотворюючих електричне поле вільних масок з діелектричних матеріалів, наприклад з фотоситалу, поки обмежено складністю їх технології.

Виготовлення тонкоплівкових структур може виконуватися в безперервних, роздільних і комбінованих вакуумних процесах.

При безперервних вакуумних процесах всі технологічні шари структури одержують в одній установці без розгерметизації вакуумної камери. Виключається взаємодія плівок, що наносяться, з повітрям. Загальний час процесу напилення зменшується. Проте безперервний спосіб вимагає складної внутрішньокамерної арматури, робота якої в умовах підвищених температур і високого вакууму утруднена. Для зменшення взаємного забруднення плівок необхідне надійне екранування підкладок і випарників, крім того, контроль плівок утруднений.

При роздільних вакуумних процесах кожна плівка наноситься в окремій вакуумній установці. Цим зменшується взаємне забруднення плівок.

Внутрішньокамерні пристрої більш прості в порівнянні з пристроями для безперервного наплення. Можливий міжопераційний контроль. Поєднання шарів спрощується, оскільки виробляється на повітрі. До недоліків роздільного способу відносяться можливість забруднення плівок при перенесенні в наступні вакуумні камери і тривалість загального процесу через неодноразове відкачування і розгерметизацію.

Комбіновані вакуумні процеси застосовуються найчастіше. Розглянемо такий процес на прикладі виготовлення тонко плівкової структури РС-ІМ (Рис. 33).

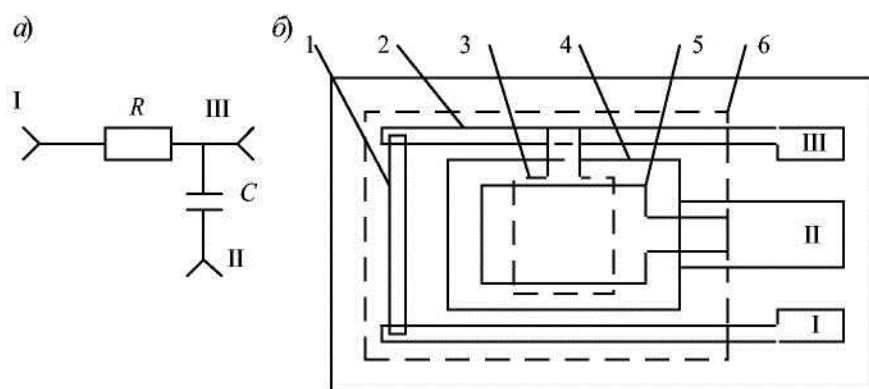


Рис. 33. Принципова електрична схема (а) і топологія (б) тонко плівкової РС-ІМ: 1 - резистор (хром); 2 — провідні доріжки і контактні майданчики (мідь з підшаром хрому); 3 - нижнє обкладання конденсатора (алюміній); 4 - діелектрик конденсатора (монооксид германію); 5 - верхнє обкладання конденсатора (алюміній); 6 — захисний шар (монооксид кремнію)

Виготовлення тонко плівкових структур із застосуванням фотолітографії. Фотолітографія - складний і дорогий процес, тому її застосовують тільки тоді, коли за допомогою вільних масок не можна одержати складну топологію і високу точність номіналів елементів.

Схема виготовлення тонко плівкових R-структур за допомогою фотолітографії включає два етапи. Спочатку одержують провідники і контактні майданчики із золота з підшаром хрому, забезпечують хорошу адгезію до плівки резисторів із сплаву МЛТ-3. Потім за допомогою другої фотолітографії завершують формування резисторів. Провідники на малюнку не показані. Основною складністю є вибір травителя, вибірково видаляючого тільки потрібний матеріал і не погіршуючого параметри присутніх плівок. Цим пояснюється практична непридатність прямої фотолітографії для формування багат шарових елементів, наприклад конденсаторів.



У зв'язку з трудомісткістю технологічний процес застосовують у разі, коли він економічно виправданий високими електрофізичними параметрами і високим відсотком виходу годних ІМ.1

Завершальні операції типових маршрутів виготовлення тонко плівкових структур. У економічно обгрунтованих випадках в технологічні маршрути вводять спеціальні операції, що забезпечують стабільність і точність значень параметрів плівкових елементів. Нестабільність параметрів плівок обумовлена наявністю термодинамічно нестійких дефектів структури, мікронеоднорідностей, нерівноваженого фазового стану та ін.

Стабілізація параметрів резисторів забезпечується відпалом або струмовою обробкою. Відпал у вакуумі безпосередньо після нанесення плівки збільшує розмір зерна і зменшує опір. При відпалі на повітрі підвищення стабільності досягається оксидуванням поверхні, що знижує зміни властивостей плівки при експлуатації ІМ. Термотокова стабілізація супроводжується впорядкуванням структури і оксидуванням поверхні.

Стабілізація параметрів конденсаторів виконується термообробкою і імпульсним струмовим тренуванням, при якій відбувається «залік» дефектних місць діелектрика металом обкладань.

Підгонка номіналів елементів після їх отримання є важливою перевагою плівкової технології. Підгонка елементів може бути передбачена топологією і виконуватися шляхом перерізання або підпаяє спеціальних перемичок. Така підгонка забезпечує дискретну зміну параметрів у бік збільшення або зменшення номінала.

Плавна підгонка забезпечується видаленням частини плівки резистора або верхнього обкладання конденсатора, зміною поперечного перетину резистора в результаті оксидування, зміною структури плівки.

Групова, тобто одночасна для всіх елементів, підгонка недостатньо ефективна, оскільки точність значень опорів, що досягається, в кращому разі складає одиниці відсотків. Здійснюється вона оксидуванням, підбурюванням і відпалом.

Індивідуальна послідовна підгонка елементів компенсує і систематичні, і випадкові похибки технологічного процесу, і завдяки цьому досягається висока точність номіналів елементів. Найпродуктивнішим і широко вживаним в промисловості є метод лазерної підгонки. Гідністю його є висока точність, обумовлена можливістю строгого дозування дії лазерного променя на плівку, і простота автоматизації процесу. За допомогою лазерного променя можна видаляти частину резистивної плівки або опромінювати плівку, нагріваючи її без руйнування з метою зміни структури. У обох випадках точність підгонки величини опору під номінал може складати 0,1%. Комбінуючи поперечний і подовжній рух променя по плівці, можна підганяти резистори з великим відхиленням опорів від номіналів. Імпульсну теплову дію променя лазера можна локалізувати в малій зоні, що дозволяє в схемах

великого ступеня інтеграції з складною топологією підганяти кожен резистор окремо. Для підгонки резисторів застосовують напівавтоматичні і автоматичні лазерні установки "Темп-10", "Темп-30" і ін. Продуктивність установки "Темп-10" при довжині різку 1 мм складає 600 резисторів в годину. Точність підгонки 0,5%. Для підгонки тонкоплівкових конденсаторів використовують імпульсний розряд, що випалює слабкі області діелектричного шару, а також лазерну підгонку для видалення частини верхнього обкладання.

Захист тонкоплівкових елементів забезпечується плівками монооксиду кремнію, оксидами алюмінію і танталу, фоторезистом, додатковим шаром припою, полімерними плівками, наприклад плівкою епоксидної смоли. Після контролю структур на вигляд і на функціонування вони передаються на герметизацію або збірку ГІМ.

#### **7.4 Типовий маршрут технології товстоплівкових структур**

Поняття тонко- і товсто плівкової технології характеризують товщину плівок, а також способи їх нанесення і вживані матеріали. Значні успіхи, досягнуті за останні роки у області матеріалів, технології, конструювання і схемотехніки, дозволили підвищити якість і розширити області застосування товсто плівкових ІМ і ГІМ від промислової автоматики до побутової апаратури. До недавнього часу при створенні СВЧ-ІМ перевагу віддавали тонко плівковим структурам. В даний час створені ІМ на товстих плівках, працюючі в діапазоні частот 1-18 ГГц. Товсто плівкові ГІМ вигідні при помірно високих потужностях розсіювання ( $2,5^{0,0}$  Вт/см<sup>2</sup>), а також коли число резисторів велике, а число активних елементів порівняно мало.

- :
- трудомісткість товсто плівкових технологій в три рази нижче;
- товсто плівкова технологія менш дорога, оскільки нижча вартість виробничих приміщень, устаткування і матеріалів,
- менше нераціональна витрата матеріалів, високий вихід годних, досягає 80-100%;
- товсто плівкова технологія технічно більш проста, не вимагає висококваліфікованих операторів;
- товсто плівкова технологія менш чутлива до забруднень навколишнього повітря, оскільки сторонні частинки вигоряють при термообробці паст, а товщина плівок у багато разів перевищує розміри забруднюючих частинок;
- у товстоплівкових технології можливі контроль і виправлення браку після кожної операції;
- товсто плівкові елементи, володіючи високими технічними характеристиками і надійністю, можуть працювати в жорстких умовах від -180 до +300°C при різкому перепаді температур, що не витримують тонкоплівкові елементи;

- відносно велика товщина плівок від 12 до 25 мкм дозволяє зменшувати шкідливі наведення і паразитні місткості, що дуже важливе для створення багаторівневої металізації з високою надійністю;

- товсті плівки витримують високе розсіяння енергії і тому переважно тонких плівок при виготовленні могутніх Ім.

Пасти, що є початковими матеріалами для формування товсто плівкова елементів, містять три основні компоненти: функціональну, конструкційну і технологічну складові. Функціональна складова додає пасті необхідні провідникові, резистивні, діелектричні властивості. Для провідникових паст як функціональна основа використовують срібло, паладій, золото, системи і сплави на їх основі, а також неблагородні метали: мідь, нікель, алюміній, молібден. Вони забезпечують не тільки меншу вартість паст, але і у ряді випадків кращі параметри і стабільність при високих температурах. Мідь, наприклад, є єдиним металом з високою електропровідністю, до якого можна під'єднувати зовнішні виводи як зваркою, так і паянням. Крім того, мідь має хорошу адгезію до алюмокерамічних підкладок, високі теплопровідність, стійкість до вилуговування, радіації і хороші властивості в діапазоні СВЧ.

Для резистивних паст широко використовують: паладій і оксид срібла (срібно-паладієва паста); оксид рутенію; рутенати свинцю і вісмуту; оксиди талія, кадмію, індію. Діелектричні пасти для конденсаторів як функціональна складова містять порошки сегнетоелектриків, наприклад тітаната барію ВаТЮ, оксид ітрію  $Y_2O_3$ , для СВЧ - Ім. Пасти для міжслойної ізоляції і захисту виготовляють на основі скла, ситаллоцементів.

Конструкційна складова забезпечує рівномірний розподіл функціональних частинок і адгезію плівки до підкладки, в процесі формування плівки не віддаляється і залишається в готовому елементі. Найбільш ширше застосовуються свинцевоборосилікатне скло.

Технологічна складова - це тимчасові органічні зв'язуючі і розчинники, які вводяться для забезпечення рівномірного розподілу компонентів в процесі приготування пасти, для отримання певної консистенції і додання пасті оптимальної в'язкості. Після нанесення пасти на підкладку вони повністю віддаляються в процесі термообробки. При неповному видаленні органічних зв'язуючих в шарі діелектрика, наприклад вуглецю, різко підвищується електропровідність.

Підкладки для С структур, в основному, виготовляються з алюмокераміки марки 22ХС, що складається з оксидів: алюмінію - 94,4%, кремнію - 2,76%, марганцю - 2,35%, хрому - 0,49%.

Типовий маршрут виготовлення товсто плівкових структур. Основу товсто плівкових технологій складає трафаретний друк, число повторень якої в процесі виготовлення ІМ (Рис. 35) відповідає кількості технологічних шарів. З приведеної

схеми розглянемо лише основні етапи виготовлення пасивної частини ІМ, оскільки далі структуру передають на збірку.

Виготовлення паст включає виготовлення компонентів і отримання їх гомогенних сумішей. Звичайно виробники ІМ одержують пасти готовими з інших підприємств.

Виготовлення компонентів полягає в отриманні дрібнодисперсних порошків складових і скла певного гранулометричного складу. Дрібнодисперсні порошки срібла і паладію одержують хімічним відновленням з відповідних розчинів при підвищених температурах. Одержане відновленням срібло або паладій ретельно промивають дистильованою водою. Надтонкі порошки металів для резистивних паст можуть бути одержані за допомогою електролізу розчинів так, щоб катодний осад виходив дуже пористим.

Скло входить до складу паст також у вигляді дрібнодисперсного порошку. Після варива скла виробляють фріттовання - розплавлене скло виливають у воду для розтріскування або розпилюють стислим повітрям. Потім виробляють помел у вібрмельницях. Процес можна інтенсифікувати шляхом додавання рідини, що добре змочує частинки, що піддаються помелу. Рідина, проникаючи в мікротріщини частинок, надає розклинюючої дії і сприяє отриманню дрібніших частинок. Помел застосовується також для отримання дрібнодисперсних порошків керамічних наповнювачів для діелектричних паст.

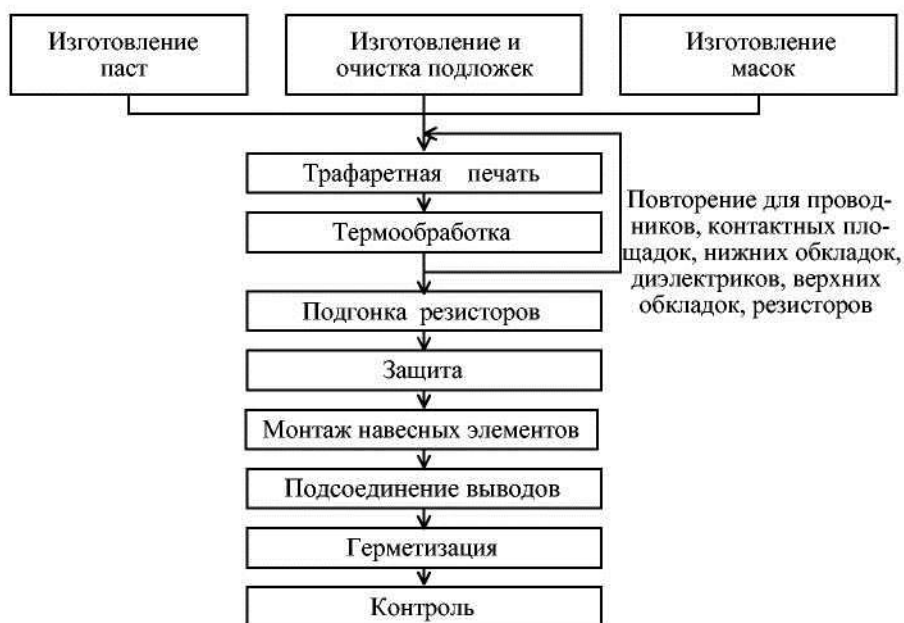


Рис. 35. Схема виготовлення товстопліткових ГІМ

Після сушки порошок просівають, упаковують в тару і передають на операцію отримання гомогенних сумішей.

Приготування гомогенних сумішей мікро порошків компонентів скла і органічних зв'язуючих виконується їх перемішуванням на спеціальній пасто терці. При перемішуванні необхідно забезпечувати місцеве відсмоктування повітря і уникати високих швидкостей, оскільки можливе упродовження в пасту повітря. Після перемішування виробляється контроль в'язкості пасти. Готові пасти упаковуються в тару, що щільно закривається. У міру вживання і при зберіганні розчинники випаровуються і тому необхідно коректувати в'язкість паст додаванням розчинників і додатковим перемішуванням.

Трафаретний друк здійснюється на спеціальних друкарських автоматах або напівавтоматах двома способами: безконтактним або контактним.

При безконтактному способі сітчаста маска розташовується на фіксованій відстані від підкладки. Підкладка закріплюється за допомогою механічного утримувача або вакуумного притиску. Продавлення пасти крізь отвори маски здійснюється за допомогою спеціальної лопатки-ракеля (Рис. 36). Лезо ракеля виготовляють з міцних і пружних матеріалів, стійких до дії органічних розчинників. Найбільш ширше використовують поліуретан і фторкаучук. Кут ракеля при вершині складає 90 або 60°. Переміщуючись по поверхні маски, рапель жене попереду себе хвилю пасти і одночасно натискає на маску. Маска прогинається і торкається підкладки. Під дією виникаючого гідромеханічного тиску паста заповнює отвори сітки в місцях торкання з підкладкою і продавлюється. У міру відходу ракеля маска випрямляється, залишаючи на підкладці малюнок нанесеної пасти.

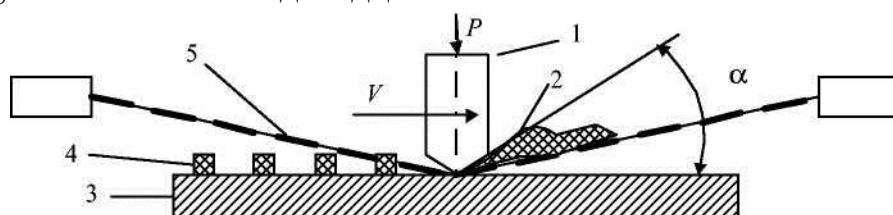


Рис. 36. Схема процесу безконтактного трафаретного друку: 1 - рапель; 2 - паста; 3 - підкладка; 4 - відбиток пасти; 5 - маска; V— швидкість руху ракеля;  $\alpha$  - кут зустрічі ракеля з поверхнею підкладки; P — тиск

Необхідною умовою отримання якісного відбитку з чітким краєм малюнка є використання паст з хорошими тиксотропними властивостями.

Розміри маски приблизно в 4 рази перевершують розміри підкладки, тому в процесі нанесення пасти робоча частина ракеля недоходить по самі вінця маски. Цим забезпечується оборотна деформація і рівномірне прогинання маски в процесі нанесення паст.

Термообробка паст включає дві операції: сушку і вжигання. Сушка необхідна для поступового видалення з пасти летючих компонентів. При швидкому видаленні розчинника в плівці з'являються спучування, можуть виникнути раковини і пустки. Сушку проводять при температурах 80-150 °С протягом 5-15 мін в печах

або під інфрачервоними лампами. Інфрачервоне проміння проникає в глиб шару пасти і сушить його рівномірно без утворення утруднюючої сушки поверхневої шкороночки.

Вжигання паст проводять в конвеєрних електропечах безперервної дії. Перед входом в піч часто встановлюється додаткова приставка для виконання сушки з тим, щоб весь процес термообробки виконувати на одній конвеєрній стрічці за один цикл. Схема конвеєрної печі і приблизний температурно-часовий режим приведені на Рис. 37. Підкладки, розміщені на конвеєрній стрічці, поступають в муфель печі. Назустріч руху підкладок піч продувають сухим повітрям під тиском. Повітря з газами, що виділилися при термообробці, виходить через отвір в муфелі у витяжну вентиляційну систему.

Для запобігання попаданню всередину муфеля повітря з виробничого приміщення біля входу печі за допомогою вентилятора встановлюється повітряна завіса. Процес вжигання паст проводиться в два етапи.

Перший етап - випалювання з пасти органічної зв'язки ведуть при повільному підйомі температури до робочої 300-350°C, щоб в плівках не виникали кризні отвори, що особливо небажане для діелектричних паст через можливість закорочування по цих дефектах.

Другий етап - спікання паст, проводиться при істотно вищих температурах 700-1000°C (залежно від типу паст) і більш критичний до коливань температури не тільки уздовж печі, але і в поперечному перетині. При підйомі температури від 350 до температури спікання із швидкістю 50-60°C/хв відбувається розм'якшення, а потім розплавлення постійної скляної зв'язки і утворення суспензії з частинками функціональних компонентів. Металеві частинки паст в процесі термообробки спікаються, утворюючи крупніші зерна.

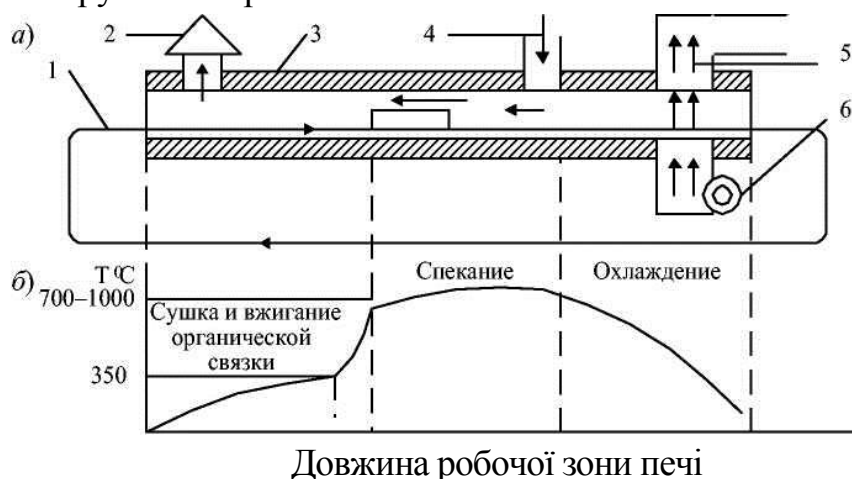


Рис. 37. Схема конвеєрної печі термообробки паст (а) і характер розподілу температури уздовж печі (б); 1 - конвеєрна стрічка; 2 - вентиляційна система; 3 - кварцовий муфель печі (робочі зони); 4 — сухе повітря; 5 - повітряна завіса; 6 - вентилятор

Після спікання підкладки охолоджуються і знімаються з конвейерної стрічки печі. Максимальна температура вжигання вказується в паспорті на кожную пасту.

Нанесення паст і термообробка проводяться в послідовності зменшення температури вжигання. При цьому повинна враховуватися здатність паст витримувати повторні нагриви без розтікання. В окремих випадках можливо суміщати вжигання паст, для яких роздільно виконані трафаретний друк і сушка.

Підгонка товсто плівкових елементів. Підгонка резисторів і конденсаторів товсто плівкових структур принципово не відрізняється від тонко плівкових. Резистори підганяють, видаляючи частину їх матеріалу або змінюючи його структуру, при цьому опір зростає або зменшується. Підгонка конденсаторів полягає у видаленні частини верхнього обкладання, що приводить до зменшення місткості.

Захист товсто плівкових елементів. Для захисту товсто плівкових елементів від вологи і навколишнього середовища застосовують глазуровані покриття, які також наносять методом трафаретного друку. Найбільш ширше застосовують низькотемпературні стекла з великим змістом свинцю. Для збільшення стійкості глазури до хімічних дій до складу скла додають тугоплавкі з'єднання. Регулювання ТКЛР скла здійснюється введенням оксиду цирконію. Процес термообробки захисного покриття проводять при температурах не більш 500°C. При вищих температурах спостерігаються зміни параметрів резисторів. Правильно С захисні плівки напівпрозорі і мають матову поверхню. Для зручності збірки різні структури захищають пастами різного кольору.

### **Питання для самоконтролю**

1. Як виготовляються біполярні структур ?
2. Наведіть схему виготовлення епітаксіально-планарного біполярного ІМ з допомогою розділової дифузії.
3. За якою технологією виготовлення МОП-структур?
4. Наведіть схему виготовлення товсто оксидних МОП-ІС з р-каналами .
5. Як виготовляються тонко плівкових структур ?
6. Наведіть принципову електричну схему тонко плівкової RC-ІМ.
7. Наведіть топологія тонко плівкової RC-ІМ.
8. Як забезпечується стабілізація параметрів резисторів.
9. Як виконується стабілізація параметрів конденсаторів.
10. Поясніть типовий маршрут технології товсто плівкових структур ?
11. Наведіть переваги товсто плівкових технології перед тонко плівковими ?
12. Які складові . використовують для резистивних паст ?
13. Наведіть схему виготовлення товсто плівкових ГІМ
14. Як здійснюється трафаретний друк ?
15. Наведіть схему процесу безконтактного трафаретного друку.

16. Які операції включає термообробка паст ?
17. Наведіть схему конвеєрної печі термообробки паст.
18. Як забезпечується захист товсто плівкових елементів ?

## Тема 8. ЗБІРКА МІКРОСХЕМ

### 8.1 Розділення пластин і підкладок

Підготовка до збірки ІМ. Після автоматичного зондового контролю електричних параметрів готових структур НІМ пластини і підкладки розділяють на одиничні структури: кристали або платні. Важливим для подальшої збірки є збереження після розділення орієнтації, тобто взаємного розташування кристалів, платні. Це особливо відноситься до пластин. Саме тому пластини поміщають на липкі еластичні стрічки і розділяють не на всю товщину, а різанням або скрабіруванням наносять механічно, ослаблюючи матеріал резисту.

Скрабірування від англійського слова scribe - дряпати. На цій стрічці виконують розламування пластин на кристали, гідромеханічне очищення від забруднень деіонізованою водою, сушку, візуальний контроль. В процесі візуального контролю відсортовують відмічений маркерною фарбою брак по електричних параметрах, а також зразки з механічними пошкодженнями. При рівномірному розтягуванні еластичної стрічки кристали розсуваються, що робить зручним їх захоплення інструментом для переміщення на наступну операцію - монтаж кристалів.

Для розділення підкладок і пластин застосовують абразивну обробку, обробку лазерним променем, хімічне трутть.

Абразивне різання. За допомогою абразивного різання можна розділяти пластини і підкладки з будь-яких матеріалів.

Різання дисками із зовнішньою ріжучою кромкою (Рис. 38) широко застосовується в промисловому виробництві для крізного розділення пластин і для отримання рисок.

Диск із зовнішньою ріжучою кромкою закріплюється на шпінделі верстата своєю центральною частиною. Жорсткість ріжучої кромки забезпечується його конструкцією. Ріжуча кромка виступає за зовнішній діаметр притискних фланців не більше ніж на 1,5 глибини різання. Мінімальна товщина кромки при різанні пластин кремнію 0,036 мм.

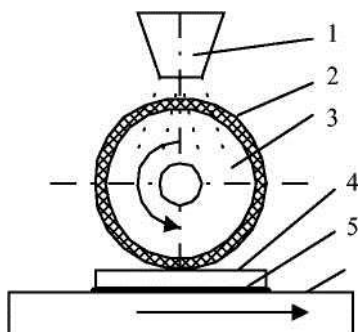




Рис. 38. Схема різки диском із зовнішньою алмазосодержащою ріжучою кромкою: 1 - сопло подачі смазуюче-охолоджуючої рідини; 2 - ріжуча кромка диска; 3 — основа диска; 4 — розрізаюча пластина; 5 - клеювальний матеріал; 6 - облямовування для закріплення пластини

**Скрабірування алмазним різцем** в промисловому виробництві застосовується, в основному, для розділення діелектричних підкладок (Рис. 39). Порівняно недавно цей метод широко застосовувався при розділенні напівпровідникових пластин. В даний час він не задовольняє виробництво з двох основних причин: невелика глибина ризику не забезпечує якісне розламування товстих пластин великого діаметру, не вертикальність бічних граней утрудняє перенесення кристалів інструментом при автоматичній збірці. Нахил бічних граней кристалів пояснюється тим, що розламування пластин після скрабірування відбувається по площинах спайності кристала.

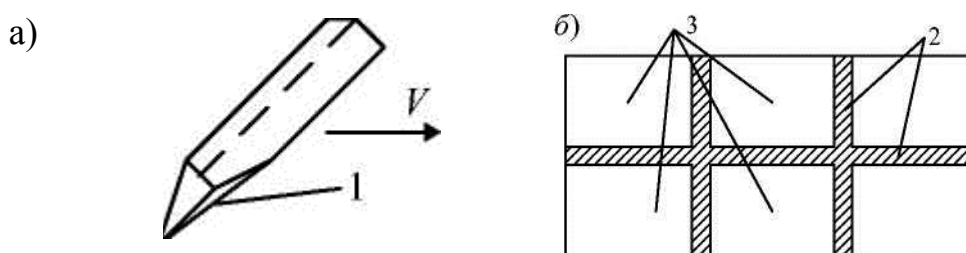


Рис. 39. Скрабірування алмазним різцем: а - нанесення різки; б - підкладка з ризиками; 1 - ріжуча грань різця; 2 — лінії розрізу; 3 - окрема платня; 4 — підкладка

Лазерне розділення пластин і підкладок. Розділення за допомогою лазерного випромінювання відноситься до безконтактних способів, при яких відсутня механічна дія на оброблюваний матеріал. Розділення можна виконати або з попереднім отриманням різки (лазерне скрабірування), або шляхом крізного проходу всієї товщі матеріалу (лазерне різання).

Утворення різки відбувається в результаті випаровування матеріалу сфокусованим лазерним променем великої потужності. При крізному різанні має місце також і плавлення.

До недоліків лазерного розділення відносяться: висока вартість і складність устаткування; необхідність захисту поверхні спеціальною плівкою від забруднень продуктами випаровування і розплавлення, виникнення зони із структурними порушеннями кремнію, складність розділення товстих пластин діаметром більше 100 мм.

Розламування пластин. Після скрабірування пластини або підкладки розламують по ослаблених ризиками лініях.

При ручному розламуванні циліндровим валом прокатують по пластині, розташованій на товстій пружинячій підставі - гумі (Рис. 40). Напрямок руху валу повинен точно співпадати з напрямом різки. Пластину або підкладку спочатку ро-

зділяють на смуги, потім при повороті на  $90^\circ$  - на кристали або платню. При ручному розламуванні валом якість виконання операції залежить від мистецтва оператора. При русі валу не уздовж рисок або при несприятливому розподілі механічного навантаження можливе розламування не по ризиках, а також сколи і ломка кристалів. Спосіб із за малою продуктивності і невисокої якості розламування застосовується в дрібносерійному виробництві і в лабораторіях.

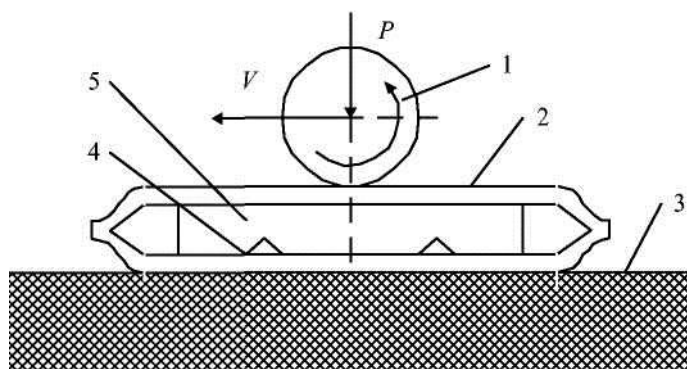


Рис. 40. Розділення скрабірування пластин за допомогою підпружиненого ролика: 1 - ролик; 2 - плівка поліетилену; 3 - опора; 4 - лінія розділення; 5 - пластина.

При розламуванні на півсфері (Рис. 41) продуктивність підвищується і виключається вплив оператора на якість виконання операції. Розламування відбувається одночасно по всіх ризиках в результаті обжимання пластини по сферичній поверхні за допомогою еластичної мембрани, що добре розтягується.

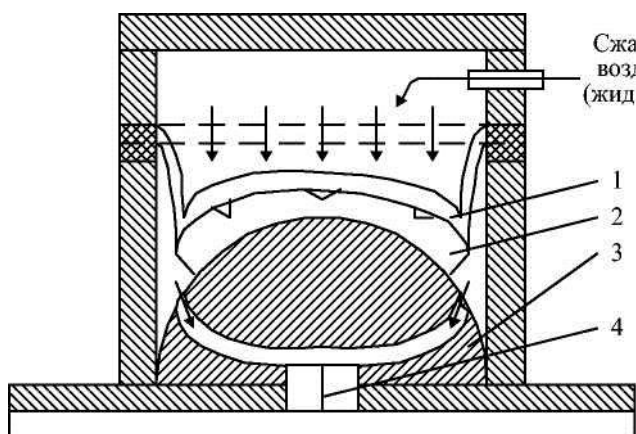


Рис. 41. Розділення скрабіруванням пластин на півсфері: 1- гнучка мембрана; 2 - пластина; 3 - півсфера; 4 - вихід повітря на пластину, що розділяється, передається гідравлічним способом або стислим повітрям.

Спосіб застосовують для розламування пластин діаметром не більш 76 мм на кристали квадратної форми, оскільки при великих діаметрах пластин периферійні кристали крошаться, а якість прямокутних кристалів низька.

Контроль після розламування виконується візуально за допомогою мікроскопа із збільшенням 100 - 200 <sup>x</sup>. Відбраковують неподілені кристали, розділені не після ризику, з неприпустимими скалами, пошкодженнями металізації і ін.

Хімічне розділення. Розділення шляхом того, що крізне хімічне труїння застосовується в даний час порівняно рідко для напівпровідникових структур і передбачає відповідне попереднє маскування поверхні, для чого проводиться процес фотолітографії. Застосування пластин великого діаметру до 150 мм і більш і виробництво на них надвеликих ІМ вимагають немеханічних способів розділення. Мабуть, той, що крізне анізотропне труїть, лазерне різання і інші способи розроблятиметься і удосконалюватиметься.

## 8.2 Методи збірки

Паяння, зварка і склеювання є основними методами виконання складальних операцій: монтаж кристалів і платні, під'єднування дротяних виводів, герметизація корпусів.

**Паяння.** Процес отримання нероз'ємного з'єднання деталей шляхом нагріву і подальшого охолодження за наявності між ними проміжного матеріалу - припою називається паянням.

При нагріві до температури плавлення припою між ним і деталями, що сполучаються, одночасно відбуваються: розчинення матеріалів, що сполучаються, в рідкому припої, дифузія припою в матеріали, що сполучаються, з утворенням твердого розчину, хімічна взаємодія припою з матеріалами деталей, що сполучаються, з утворенням інертно металевих з'єднань. При охолодженні припій кристалізується у поверхонь деталей, що сполучаються, вступаючи з ними в міцний металевий зв'язок. Поверхні деталей, що сполучаються, повинні бути ретельно очищені від оксидів і забруднень. Розчинність матеріалів деталей в розплавленому припої повинна бути достатньою для утворення міцного сполучення шва.

Припій повинен мати температуру плавлення набагато нижче температур плавлення матеріалів деталей, що сполучаються. Він повинен добре змочувати поверхні, що сполучаються, розтікатися, заповнюючи між ними весь проміжок. Поверхня припою повинна бути вільна від оксидів і забруднень. Температура одержаного паяного шва повинна бути по можливості невисокою, щоб не погіршити параметри готових структур. Припій не повинен зраджувати своїх властивостей при робочих температурах ІХ (125°C для кремнієвих).

Залежно від температури правління припої розрізняють паянням низькотемпературним (до 450°C) і високотемпературним (більше 450°C).

До м'яких або низькотемпературних припоїв відносяться сплави олова з свинцем (ПОС-40: 40% Sn + 60% Pb; ПОС-61: 61% Sn + 38,2% Pb + 0,8% Sb), олово з вісмутом (ПОВі-05: 99,6-99,4% Sn + 0,4-0,6% Ві) і ін. До низькотемпературних

припоїв відносяться також, широко застосовуються у виробництві напівпровідникових приладів і НИМ, евтектичні сплави  $\text{Al} + \text{Si}$  і  $\text{Al} + \text{Ge}$ .

Евтектичними називають сплави, в яких відбувається одночасна по всьому об'єму кристалізація компонентів при найнижчій для даної системи евтектичній температурі.

До твердих або високотемпературних припоїв відносяться сплави на основі срібла ( ПСр-45: 45% Ag + 30% Si + 25% Zn; ПСр-72: 72% Ag + 28% Si) і ін.

Припої для виконання паяння застосовують у вигляді пігулок, прокладок, покриттів на деталі, що сполучаються, або локальні ділянки. Паяння сумісне з товстоплівковою технологією, пасти припоїв можна наносити трафаретним друком.

Інтенсифікацію паяння забезпечують флюси, відновні середовища, тиск на деталі, що спаюються, УЗ-КОЛЕБАННЯ, коливання промислової частоти і струміння нагрітого газу.

Флюси застосовують для поліпшення змочування припоєм поверхонь, що сполучаються. Флюси в процесі паяння видаляють поверхневі оксиди, запобігають новому оксидуванню і знижують поверхневе натягнення припою. При виготовленні мікросхем застосовуються без кислотні антикорозійні флюси на основі каніфолі марок ФКСп, ФПЕТ, ФКТС і на основі хлористого цинку ФХЦ. Проте флюси в процесі паяння вносять забруднення, тому стараються їх застосовувати в окремих випадках. В більшості випадків паяння виконують без флюсу, але у відновному (водень, форміргаз) або інертному (аргон, криптон, гелій) середовищі. Водень в процесі паяння витісняє з паяного шва інші гази, а сам потім легко віддаляється при знегажуванні мікросхем. Водень повинен бути очищений від вологи (точка роси не вища - 50-60°C) і від кисню (не більш 0,003-0,005 %). Водень вибухонебезпечний, тому при паянні у великих об'ємах - печах застосовують форміргаз (суміш: 85 % азоту і 15 % водню). Відзначимо, що при виготовленні товсто плівкових НИМ з резисторами на основі оксиду паладію паяння у водні виконувати не можна через відновлення Pd з оксиду.

Механічна міцність з'єднань визначається способом і режимом паяння, підготовкою поверхонь, міцністю припою в шві, міцністю зв'язку припою з матеріалом деталей, що сполучаються, наявністю інтерметалевих з'єднань в шві, міцністю матеріалів, що сполучаються, в зоні шва після охолодження. Режим паяння: максимальна температура, швидкість нагріву, час витримки при максимальній температурі, тиск на деталі, що сполучаються, швидкість охолодження деталей.

З'єднання деталей виконують встик, внахлест, а також комбінованими способами. Міцність з'єднань встик нижча міцності з'єднань внахлест.

Достоїнствами паяння є простота процесу, відсутність розплавлення і відносно невисокий нагрів деталей, що сполучаються, можливість з'єднання деталей складної конфігурації. Після паяння можна роз'єднувати деталі без руйнування їх конструкції. Для виконання операцій збірки мікросхем застосовують паяння у вод-

невих печах; електропаяльником; за рахунок теплопередачі від інструменту, що імпульсно-нагрівається електричним струмом; ультразвуком; електроопором за рахунок джоульового тепла, що виділяється в місці з'єднання деталей; зануренням в припій; випромінюванням.

**Зварка.** При збірці мікросхем зварка поступово витісняє паяння. Це пояснюється високою якістю зварних з'єднань і меншою дією на параметри структур.

Зваркою називається процес отримання нероз'ємного з'єднання деталей без участі припою в результаті їх зближення на відстань атомної дії.

В процесі зварки можливі наступні стани матеріалів поверхонь деталей, що сполучаються: пластична деформація; плавлення і пластична деформація; плавлення і подальша кристалізація.

Зварка може виконуватися з нагрівом і без нагріву, за наявності або відсутності стискаючого зусилля, а також з одночасною дією нагріву і стискаючого зусилля.

Для виконання операцій збірки мікросхем найчастіше застосовують наступні способи зварки: термокомпресійну, непрямим імпульсним нагрівом, ультразвукову, здвоєним електродом, лазерну точкову і шовну, електронно-променеву, холодну, електроконтактну, аргонно - дугову.

**Склеювання.** Клейові з'єднання не вимагають складного устаткування, легко виконуються, але не завжди забезпечують хорошу якість контакту. Цим пояснюється їх застосування, в основному, для мікросхем знижених потужностей, що працюють в нежорстких умовах експлуатації. Розрізняють струм непровідні і струмопровідні клеї. Для отримання з'єднань клей дозований, наносять на поверхні, приводять їх в контакт і за наявності або без стискаючих зусиль забезпечують склеювання. При отвердінні відбувається усадка клею. Механічні напруги, що виникають при цьому, забезпечують стягання і щільне механічне з'єднання деталей.

Струм непровідні клеї забезпечують високу механічну міцність з'єднань, яка виникає за наявності зовнішнього стискаючого зусилля. Проте при цьому з'являється вірогідність проходження електричного струму по металевих плямах торкання деталей, шляхом тунельного просочування електронів через тонкий прошарок клеївши, а також по провідних каналах, одержаних дифузією металу по дефектних ділянках. З'єднання за допомогою струмопровідних клеїв володіють більшою електропровідністю, але меншою механічною міцністю. Збільшення механічної міцності досягається зменшенням змісту металевого наповнювача.

Міцність клейового з'єднання залежить від якості підготовки склеюваннях поверхонь, товщину клеївши, правильності вибору режиму, якості клеївши.

Перед склеюванням поверхні ретельно очищають від забруднень. Органічні розчинники, використовувані для очищення, повинні бути повністю видалені сушкою. Залишковий розчинник при отвердженні клею створює пористість і внутрішні напруги. Кількість дефектів в шарі клею збільшується з його товщиною, мі-

цність з'єднання зменшується. Тому рекомендують шар клею обмежувати завтовшки 0,05-0,1 мм. Для операцій складки застосовують клеї на основі епоксидних смол, поліаміда і ін.

### 8.3 Монтаж кристалів і плат

**Метод прямого монтажу.** На робочу поверхню під'єднують структури ІМ до підстав корпусів, посадочних майданчиків вивідних рамок або стрічок, до пасивної частини ГІМ або до додаткових контактних майданчиків.

Основні вимоги до операцій монтажу: забезпечення високої механічної міцності з'єднань, гарного тепловідводу від структури і у ряді випадків хорошої електропровідності. Температури і стискаючі зусилля при виконанні монтажу не повинні бути дуже високими, щоб не порушити раніше одержані з'єднання, не погіршити параметри структур, не поруїнувати їх механічну цілісність. В той же час вони повинні бути достатні для міцного під'єднання. Нижня межа температур обмежена необхідністю після монтажу ще двічі (при під'єднанні електродних виводів і герметизації) піддавати структури тепловому впливу, яке повинне послідовно від операції до операції зменшуватися. Необхідно також при виборі способу монтажу враховувати умови експлуатації Ім.

Елементи ІМ займають лише приповерхностную частину кристалів або розташовані на поверхні платні, тому операції прямого монтажу не критичні до глибини проникнення з'єднувального шва.

З'єднання клеями досить широко застосовуються для монтажу, оскільки відрізняються простотою процесу, низькими температурами отвердіння достатніми механічною міцністю і надійністю.

**Склеюванням** можна сполучати різноманітні матеріали, відмінні товщиною. Клейові з'єднання спрощують конструкцію, зменшують масу, економлять витрату дорогих металів.

Недоліки клейових з'єднань: низька теплопровідність, неможливість заміни дефектних структур, перегрівши при під'єднанні електродних виводів, можливе виділення газів в герметичний корпус.

Для монтажу кристалів і платні застосовують клеї на основі епоксидної смоли. Ці клеї забезпечують хорошу міцність при температурах до 300°C, що дозволяє виконувати подальше під'єднання виводів без руйнування клейового шва. Для поліпшення теплопровідності і зменшення контактного опору між кристалами і підставами корпусів до складу клеїв вводять металевих наповнювачів, наприклад срібло.

Клеї наносять на поверхні, що сполучаються, у вигляді краплі уручну або автоматично, у вигляді пігулок, трафаретним друком. Точне дозування по товщині і площі забезпечують плівки на основі метіл-поліамідно-фенольного клею МПФ-1.

**З'єднання склом** забезпечують добре узгодження по ТКЛР, відрізняються низькою вартістю. Основні недоліки з'єднань склом: відсутність електричного контакту, поганий тепловідвод, висока температура розм'якшення скла (біля 500°C). Для часто використовуваних поєднань матеріалів, під'єднаних деталей скла з потрібним ТКЛР, як правило, тугоплавкі, тобто непридатні для монтажу кремнієвих кристалів. У зв'язку з цим з'єднання склом застосовують, в основному, при монтажі плат з ситалу, полікору і кераміки.

Технологія монтажу склом включає нанесення суспензії скляного порошку або склопасти на очищену поверхню, стиснення деталей, що сполучаються, в касеті, сушку, оплавлення в печі в контрольованій атмосфері.

Паяння металевими припоями забезпечує високі тепло- і електропровідність з'єднань, механічну міцність, хороше узгодження по ТКЛР. М'які припої допускають при необхідності демонтаж кристалів. В той же час відносно низькі температури плавлення, в основному не більш 280-300°C, обмежують застосування м'яких припоїв через необхідність нагріву на подальших складальних операціях.

**Паяння евтектичними сплавами** Аї - Si (94 і 6%), або Аї - Ge (88 і 12%), що мають температуру плавлення 370 і 356°C не обмежена подальшими нагріваними при збірці Ім. Можливі два варіанти паяння.

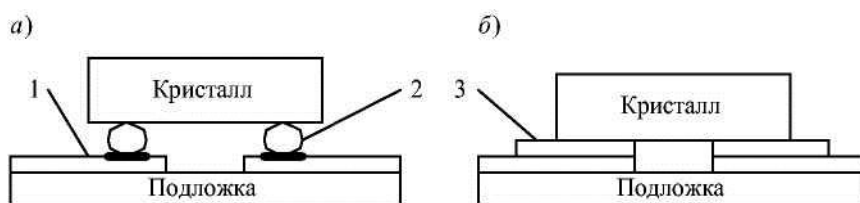


Рис. 42. Монтаж кристалів з кульковими висновками (а) і балочними (б) висновками: 1 - контактний майданчик; 2 - кульковий висновок; 3 - балочний висновок

Метод «переверненого кристала». Кристали з об'ємними виводами, що входять до складу ГІМ або мікро складок, вмонтовують на пасивну частину робочою стороною вниз. За допомогою об'ємних виводів одночасно від'єднують і кристал, і всі висновки (Рис. 42). Основними труднощами монтажу методом "переверненого кристала" є зведення до мінімуму різновисотності виступаючих над кристалом висновків і їх поєднання з контактними майданчиками. Різновисотність приводить до необхідності створення достатніх деформацій для найбільш виступаючих кульок або стовпчиків, щоб забезпечити контакт і з найнижчими виступами. При цьому деформації не повинні перевищувати допустимі норми, оскільки виникаючі після монтажу механічні напруги ведуть до потенційних відмов ІМ.

### **Поєднання виконується в два етапи.**

Попередня орієнтація положення на спеціальних автоматах, наприклад ЕМ-433, забезпечує поворот кристалів вниз робочою поверхнею і розворот в горизонтальній площині до відповідності координат висновків і контактних майданчиків.

Поєднання виводів з контактними майданчиками на установці приєднання висновків виконується за допомогою дзеркальної оптики і проєктора або за допомогою направляючої фільтери.

Поєднання перевернених кристалів з балочними висновками виконувати простіше, оскільки вони виходять за межі кристала.

## **8.4 Під'єднування електродних виводів**

*Завершальні операції монтажу.* Після під'єднання плат і кристалів слідує операції, завершальні виконання всіх електричних з'єднань між елементами, а також між структурами і зовнішніми виводами готових ІМ. До них відносяться з'єднання омичних контактів активних навісних елементів з плівковими контактними майданчиками пасивної частини ГІМ, контактних майданчиків структур НІМ із зовнішніми висновками корпусів, контактних майданчиків з контактними майданчиками (або об'ємними висновками) багато кристальних ІМ. Всі ці з'єднання виконуються за допомогою паяння, зварки і склеювання.

Залежно від вживаних засобів розрізняють дротяний і бездротовий монтаж. Для дротяного монтажу використовують тяганину із золота, алюмінію, сплавів алюміній - кремній, алюміній -магній. Монтаж кристалів з об'ємними висновками є бездротовим.

Основні особливості електродних з'єднань: велика різниця товщини об'єктів, що сполучаються; складність точної орієнтації і поєднань через малі розміри об'єктів, що сполучаються; складність підбору повністю сумісних матеріалів по ТКЛР, по відсутності небажаних взаємодій; великий об'єм індивідуальних дротяних під'єднувань; висока вартість дротяного монтажу; високий відсоток відмов НІМ через дефекти з'єднань.

Не дивлячись на складність і недоліки, в основному застосовують дротяну збірку. Переваги дротяної збірки: можливість візуального контролю якості з'єднань; здатність дротяних з'єднань передавати значні потужності; добре освоєних способів зварки і паяння дротяних контактів виробництвом, наявність устаткування.

## **8.5 Збірка НІМ на стрічкових носіях**

*Бездротова збірка.* На відміну від трудомісткої збірки за допомогою дротяних електродних висновків збірка з використанням об'ємних висновків і плоских висновків на стрічкових носіях значно знижує вартість ІМ за рахунок різкого підвищення продуктивності, оскільки під'єднання виводів виконується груповим способом і процес збірки легко автоматизується. Групове під'єднання плоских ви-



сновків виконують тими ж способами, що і індивідуальне під'єднання дротяних висновків. Різниця полягає в конструкції інструменту, який повинен одночасно під'єднати всі висновки. Збірка за допомогою висновків на гнучкому стрічковому носії є найефективнішим методом групового під'єднання. Застосування гнучких стрічкових носіїв дозволило створити так звану рулонну технологію і повністю автоматизувати процеси збірки і герметизації.

Стрічкові носії висновків. Першими були розроблені жорсткі металеві носії висновків, потім носії з тонкої металевої фольги, а в кінці 60-х років вперше була застосована непровідна стрічка з сформованими на ній тонкими мідними провідниками.

Поява і вдосконалення стрічкових носіїв висновків стимулювалася необхідністю: заміни індивідуального під'єднання висновків груповим, для чого потрібне точне фіксоване взаємне розташування висновків відповідно до розташування контактних майданчиків на кристалі, до яких вони від'єднуються; створення безперервного автоматизованого технологічного процесу збірки, для чого потрібна безперервна стрічка з краєвою перфорацією, яка служить засобом транспортування орієнтований розташованих висновків.

Виводи представляють єдине ціле із стрічкою, висновки для однієї НІМ на ленте-кадр. Кадри розташовані з певним кроком. Стрічка є утримувачем висновків і засобом їх транспортування в технологічному процесі збірки. Кристал вмонтовують на посадочний майданчик стрічки і за допомогою дротяних або плоских перемичок від'єднують контактні майданчики кристала до висновків стрічки. Виробляють герметизацію, і ІМ з висновками відділяють від підтримуючої частини стрічки. На жорстких стрічках виготовляють тільки зовнішні висновки ІМ.

## 8.6 Герметизація мікросхем в корпусах

*Герметизація ІМ* використовується для ізоляції кристалів від дії агресивних чинників зовнішнього середовища. Для цього використовуються різні методи і способи герметизації в спеціальних корпусах (Рис. 43). Конструкції корпусів одночасно дозволяють здійснювати електричні з'єднання контактних майданчиків кристалів з друкарським і дротяним монтажем друкарських вузлів електронної апаратури. Герметизація ІМ в корпусах розділяється на два основні види: вакуумплотную і негерметичну. Подальша класифікація здійснюється по видах корпусів.

*Типи корпусів.* Класифікація корпусів по зовнішньому конструктивному оформленню приведена в табл. 4. Габаритні і приєднувальні розміри кожного типу корпусів строго стандартизовані.

Залежно від вживаних матеріалів корпуси підрозділяються на скляні, керамічні, металокерамічні, металоскляні, пластмасові. Скляні і керамічні корпуси відрізняються від металоскляних і металокерамічних тим, що в їх конструкцію з металевих деталей входять тільки виводи.

Виготовлення деталей і вузлів корпусів. Нагадаємо, що герметизація в корпуси припускає попереднє виготовлення підстави з ізолюваними висновками, кришки корпусу, допоміжних деталей.



Рис. 43. Класифікація методів і способів герметизації НІМ в корпуси

Металеві деталі корпусів виготовляють в основному холодним штампуванням на механічних штампах, робочими інструментами яких є пуансон і матриця

Таблица 4 - Типы корпусів

Тип	Форма проекції тіла корпусу на площину підстави	Розташування проекції висновків на площині підстави	Розташування висновків щодо площини підстави
1	Прямокутна	В межах проекції тіла корпусу	Перпендикулярне
2	Прямокутна	За межами проекції тіла корпусу	Те ж
3	Кругла або овальна	У межах або за межами тіла корпусу	
4	Прямокутна	За межами проекції тіла корпусу	Паралельне
5	Квадратна	В межах проекції тіла корпусу	На площині підстави і на бічній стороні корпусу

Холодним штампуванням можна виконувати: вирубку, обрубкування, пробивку отворів, витяжку, об'ємне штампування, осідання.

Металосклянні вузли одержують спаяванням в конвеєрних печах заздалегідь підготовлених і зібраних в графітних касетах деталей. Деталі з вакуумплатної кераміки виготовляються, в основному, методом гарячого литва парафінованої керамічної маси - шлікера під тиском в металеві форми на спеціальних ливарних машинах. Для з'єднання керамічних деталей з металевими, наприклад висновків з рамкою для плоского керамічного корпусу, кераміку металізують за до-

помогою молібден-марганцевих паст або металевої фольги завтовшки 30-50 мкм. Металізацію виконують: намазуванням пасти пензликом, розпилюванням через вільну маску, трафаретним друком, вирубкою з фольги з тим, щоб подальше приклеїть.

На металізацію електролітично наносять шар нікелю або міді завтовшки 3-5 мкм і потім виробляють вживання. Другий метод з'єднання металу з керамікою - через шар скла припою, яке у вигляді суспензії наноситься на поверхні, що сполучаються, і потім спікаються при температурі 400-500°C.

Гальванічні покриття деталей корпусів необхідні для отримання гладких поверхонь, захисту від корозії, забезпечення високої якості їх з'єднань при герметизації. Перед нанесенням гальванічних покриттів деталі ретельно знежирюють, трують, промивають. На гальванічній ділянці виконуються: хімічне нікелювання коварових деталей, електролітичне нікелювання мідних і сталевих деталей, міднення ізоляторів, золочення ніжок і ін.

### 8.7 Завершальні операції виготовлення мікросхем

До виконання завершальних технологічних операцій після герметизації ІМ проводять кліматичні, електричні і механічні *випробування*. Необхідність цих випробувань обумовлена наявністю прихованих дефектів через недосконалість конструкції, використання матеріалів або режимів, що не відповідають вимогам або технологічній документації і ін. В процесі технологічних випробувань НІМ з прихованими дефектами відбраковують, тим самим гарантується надійність в умовах експлуатації. Після проходження всіх етапів технологічних випробувань і вимірювань параметрів виконуються завершальні технологічні операції і ІМ можуть бути відправлені споживачам. До завершальних технологічних операцій відносяться операції зовнішнього оформлення, забезпечення захисту ІМ від зовнішніх дій, зручність під'єднання в апаратуру, а також що дають інформацію про тип ІМ і зовнішнє естетичне оформлення.

#### Питання для самоконтролю

1. Які застосовують методи розділення пластин і підкладок?
2. Поясніть процес скрабірування.
3. Який процес виконують після скрабірування ?
4. Які застосовують методи збірки мікросхем?
5. Назвіть основні методи монтажу кристалів і плат ?
6. Назвіть основні методи під'єднання електродних виводів ?
7. Що називають збіркою НІМ на стрічкових носіях ?
8. Як і навіщо використовують герметизацію мікросхем ?
9. Назвіть завершальні операції виготовлення мікросхем
10. Назвіть завершальні операції виготовлення мікросхем ?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія і автоматизація виробництва радіоелектронної апаратури: Ученьник для вузов/Ж 77. Бушмінській, О. Ш. Даутов, А. 77. Достанко і др.; Під ред. А. 77. Достанко, Ш. М. Шабдарова. М.: Радіо і зв'язок, 1989. 624 з.
2. Гель 77. 77., Іванов-Есиповіч 77. К. Конструювання і мікромініатюризація радіоелектронної апаратури. Л.: Енергоіздат, 1984. 536 з.
3. Готра З. Ю. Технологія мікроелектронних пристроїв: Справочник. М.: Радіо і зв'язок, 1991. 528 з.
4. Кирпоносе А. І., Юдін В. В. Технологія виробництва напівпровідникових приладів: Навчань. допомога. М.: Висш. шк., 1974. 400 з.
5. Павлівський В. У., Васильев В. І., Гутман Т. І. Проектування технологічних процесів виготовлення РЕА. М.: Радіо і зв'язок, 1982. 372 з.
7. Довідник конструктора-приборостроїтеля. Проектування. Основні норми/ В. Л. Соломахо, Р. І. Томілін, Би. У. Цитповіч, Л. Р. Юдовін. Мінськ: Висш. шк., 1988. 272 з.
6. Ханке Х., Фабіан Х. Технологія виробництва радіоелектронної апаратури. М.: Енергія, 1980. 484 з.
7. Хвоц З. Т., Варлінській 77. 77., Попів Е. А. Мікропроцессори і МікроЕОМ в системах автоматичного управління: Справочник/ Під ред. З. Т. Хвоца. Л.: Машинобудування, 1987. 640 з.

Конспект лекцій з дисципліни «Технологічні основи електроніки» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальностей:

153 «Мікро- та наносистемна техніка», 171 «Електроніка» / Укл.: Трикіло А.І. – Кам'янське: ДДТУ, 2019.– 93 с.

Укладачі: Трикіло Алік Іванович

Підписано до друку \_19\_09\_ 2019 р. Формат А4  
Обсяг 3,0 д.а. Тираж 50 прим. Замовлення № \_227\_  
Безкоштовно. 51918, м. Кам'янське, Дніпробудівська, 2.