

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

А. І. Кузьмичєв , Л. Д. Писаренко, Л. Ю. Цибульський

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ.
КНИГА 1.
ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА МІКРОСХЕМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»,
спеціалізацією «Електронні прилади та пристрої»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент *Гончаров А. А.*, головний наук. співробітник Інституту фізики
НАНУ, докт. фіз.-мат. наук, професор
Відповідальний редактор *Михайлов С.Р.*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри
електронних приладів та пристроїв КПП ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № від р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 03/2019 від 25.03.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Анатолій Іванович Кузьмичев, докт. техн. наук, проф.,
Леонід Дмитрович Писаренко, докт. техн. наук., проф.,
Леонід Юрійович Цибульський, канд. техн. наук, доц..*

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ.
КНИГА 1.
ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА МІКРОСХЕМ**

«Технологічні основи електроніки. Книга 1. Технологія виробництва мікросхем»: для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації «Електронні прилади та пристрої» / А.І. Кузьмичев, Л.Д. Писаренко, Л.Ю. Цибульський; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 27,98 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 127 с.

У навчальному посібнику розглянуто конструкції мікросхем і технології їх виробництва – напівпровідникових мікросхем та гібридних на тонких і товстих плівках. В посібнику представлено всі сучасні технології обробки напівпровідникових структур (літографія, плазма та інш.), починаючи з отримання монокристалічного кремнію як вихідного матеріалу. Також розглядаються тонкоплівкові та гібридні мікросхеми.

Навчальний посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка», спеціалізацією «Електронні прилади та пристрої», може бути корисним студентам інших спеціальностей та спеціалізацій.

Л.Д. Писаренко, 2019
© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

Передмова.....	5
1. ЕЛЕКТРОНІКА – ІЗ МИНУЛОГО ДО СЕГОДЕННЯ.....	7
1.1. Мікросхеми.....	11
2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ	16
2.1. Виготовлення напівпровідникових ІС	17
2.2. Для чого потрібен оксид кремнію	22
2.3. Рисунок на камені або літографія.....	26
2.4. Дифузійний процес та іонна імплантація	32
2.5. Нарощування кристалічної структури – епітаксія.....	36
2.6. Створення активних та пасивних елементів ІС	39
2.7. Ізоляція активних та пасивних елементів ІС.....	45
3. ТОНКОПЛІВКОВІ ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ	49
3.1. Термовакuumне випаровування	49
3.2. Застосування газових розрядів і плазми для осадження тонких плівок.....	58
3.3. Застосування кількох хімічних методів.....	61
3.4. Підкладки, резистори і конденсатори для тонкоплівкових інтегральних схем.....	62
3.5. Виготовлення топології тонкоплівкових мікросхем	68
4. ТОВСТОПЛІВКОВІ ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ	74
4.1. Конструкція ГІС.....	75
4.2. Виготовлення елементів та монтаж ГІС	77
4.3. Друкування товстоплівкових мікросхем	81
4.4. Гончарне мистецтво у технології виготовлення товстоплівкових мікросхем	83
4.5. Нові варіанти технології товстоплівкових мікросхем.....	85
5. ЗБИРАННЯ (МОНТАЖ) МІКРОСХЕМ	87
5.1. Зондовий контроль і скрайбування чіпів.....	87
5.2. Продовжуємо монтаж мікросхем	88
5.3. Створення будиночка для мікросхем – корпусування чіпів.....	93
5.4. Випробування та перевірка мікросхем	95
Післямова.....	98
Глосарій.....	99
Додатки	116
ІЛЮСТРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ.....	116
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	124

ПЕРЕДМОВА

Для прискорення науково-технічного прогресу, інформатизації суспільства та розвитку суспільного виробництва, його автоматизації з кінцевою метою підвищення добробуту людства необхідне неперервне збільшення виробництва та використання електронної техніки різного призначення. Своєю чергою, її створення і випуск неможливо собі уявити без інтенсивних досліджень та нових розробок у галузі технології електронних приладів і систем. Рівень технології зумовлює граничні параметри і можливості, надійність і якість електронної техніки загалом.

Термін **технологія** дослівно [з грецької τεχνη (technē) – мистецтво, ремесло, майстерність + logos – вчення] означає сукупність знань про способи і засоби проведення технологічних процесів, а також самі процеси, за допомогою яких якісно змінюють об'єкт обробки. Технологічні процеси – це серцевина більш широких виробничих процесів, які здійснюються на заводах електронної промисловості.

Особливістю сучасної електронної техніки є постійна зміна поколінь апаратури та її елементної (компонентної) бази, але це можливо лише завдяки безперервному розвитку технології та використанню найновіших результатів фундаментальних наук, у тому числі математики, теоретичної і прикладної фізики, хімії, матеріалознавства, інформатики. При цьому слід відзначити, що, наприклад, фізичні засади технології базуються на таких розділах фізики, як електродинаміка, атомна фізика, фізика твердого тіла і плазми, фізична і квантова електроніка, оптика.

Технологію слід розглядати не лише як просте зібрання рецептів та інструкцій, а й як прикладну науку, що займається вивченням фізико-хімічних та інформаційних закономірностей, що діють під час технологічних процесів, і впровадженням у практику виявлених закономірностей. Тому технологія є заманливою цариною для майбутньої праці науково і технічно обдарованої молоді, яка ще вчиться. Базові знання з технології необхідні і студентам-електронікам молодших курсів (студентам-бакалаврам), і старших курсів, а також кожній людині, яка усвідомлює себе ерудованою в науці й сучасній техніці.

Історію розвитку електроніки звичайно поділяють на кілька етапів за видами основних електронних приладів, на яких будують апаратуру (тут ми не розглядатимемо електричні пристрої з активними елементами у вигляді електромеханічних перемикачів типу реле). Отже, ми виокремлюємо етапи розроблення і застосування:

- 1) дискретних електровакуумних приладів (електронних ламп, телевізійних кінескопів);
- 2) дискретних напівпровідникових приладів (транзисторів);

3) інтегральних мікроелектронних приладів (мікросхем, мікропроцесорів, схем пам'яті) і дисплеїв (інформаційних екранів-панелей чи моніторів) із дискретною мікроструктурою, у тому числі рідкокристалічних (*LCD*), на тонкоплівкових транзисторах (*TFT*), плазмових (*PDP*);

4) функціональних та наноелектронних приладів.

Наразі типовою є електронна техніка на інтегральних мікросхемах, технологія якої включає як раніше відомі способи обробки, так і найновіші науково-технічні досягнення, тому ми вважаємо, що найбільш доцільно викладати технологічні основи електроніки на прикладі розгляду технології мікросхем. Це і виконано під час складання цього навчального посібника.

Додатком до посібника є Глосарій (вузькоспеціалізований словник) із перекладом українських термінів російською та англійською мовами. Цей Глосарій систематизує терміни і дає посилання на сторінки посібника, де ці терміни пояснюються. На погляд авторів, це полегшує освоєння як довільно специфічної технологічної термінології, так і всього матеріалу загалом. Глосарій можна також використовувати як словник під час читання текстів російською та англійською мовами. Зрештою, його рекомендуємо використовувати для самоконтролю засвоєння навчального науково-технічного матеріалу.

Під час складання цього посібника були використані навчальні видання, енциклопедії та науково-популярна література різних авторів, а також досвід викладання технологічних дисциплін на кафедрі електронних приладів і пристроїв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». В кінці книги наведений список додаткової літератури, яка є в бібліотеках і доступна в Інтернеті. Також вказані адреса сайтів Інтернет-енциклопедії «Вікіпедія» з тематики посібника.

Автори посібника сподіваються, що він буде цікавим і корисним для учнів середніх шкіл, насамперед тих, які беруть участь у роботі Малої академії наук, а також для студентів молодших курсів (бакалаврів з електроніки, радіотехніки та обчислювальної техніки) і старших курсів (спеціалістів і магістрантів).

А. І. Кузьмичев,
професор
кафедри електронних приладів та пристроїв
КПІ ім. Ігоря Сікорського

1. ЕЛЕКТРОНІКА – ІЗ МИНУЛОГО ДО СЬОГОДЕННЯ

Коли нам говорять про електроніку та мікроелектроніку, виникає уявлення про красиві, сучасні, надійні й компактні прилади, з якими доводиться мати справу всюди у повсякденному житті: вдома, на вулиці, у школі, на роботі. Дійсно, важко уявити часи, коли не було портативних радіоприймачів, мобільних телефонів, переносних телевізорів та CD- і DVD-програвачів, мікрокалькуляторів, електронних годинників, електромузичних інструментів та інших побутових електронних виробів.

Абсолютно неможливо здійснювати польоти космічних апаратів (ракет-носіїв, орбітальних станцій, супутників зв'язку, міжпланетних зондів-розвідників) без радіоелектроніки, за допомогою якої керують реактивними двигунами і виводять апарати на задану орбіту, обчислюють і коригують траєкторію польоту, досліджують космічний простір, здійснюють зв'язок із Землею, стежать за системою життєзабезпечення космонавтів, включають двигуни гальмування та засоби м'якої посадки.

Сучасні літаки, крім бортового зв'язку, забезпечені радіокомпасом і радіовисотоміром, радіолокатором для виявлення грозових хмар, нерухомих і рухомих об'єктів, а також для спостережень за Землею, електронним обладнанням для посадки вночі і в негоду.

У науці й техніці електроніка допомагає вимірювати і контролювати електричні, часові, температурні та інші параметри, дистанційно керувати процесами.

Список використовуваних електронних виробів буде неповним, якщо не згадати про медичні прилади для діагностики та біологічних досліджень, про електронні протези, стимулятори, апаратуру для сільського господарства, транспортну електроніку, техніку зв'язку, обчислювальні машини і багато іншого, де застосування електроніки стало життєво важливим і необхідним.

Що ж розуміти під цим широким поняттям *електроніка*, що походить, як відомо, від слова електрон? Як вона виникла? На якому рівні перебуває сьогодні і що буде з нею завтра? Усі ці запитання нам і належить розглянути у пропонованій книжці.

Електроніка – це, насамперед, **галузь фізики, яка вивчає процеси, що відбуваються з електронами у вакуумі, газах, рідинах і твердих тілах**. Разом із тим електроніка – галузь техніки, де взаємодію електронів з електромагнітними полями використовують для перетворення електромагнітної енергії; де створюють електронні прилади і пристрої, що передають, обробляють і зберігають інформацію. Наприклад, під час передавання інформації телефоном звуковий сигнал (мова, музика) першого абонента надходить у мікрофон, де перетворюється на електричний струм, що змінюється відповідно до звукових хвиль. Лініями зв'язку цей електричний

струм передається на певну відстань, а потім його коливання перетворюються на звукові телефоном другого абонента; у такий спосіб приймається звукова інформація.

Дуже схожі, але складніші процеси відбуваються під час радіомовних і телевізійних передач.

В електроніці досліджують взаємодію електронів у макрооб'ємах (робочому просторі електронних приладів) **та у мікрооб'ємах** (усередині атома, молекули або кристалічної ґратки речовини).

Електроніка спирається на низку розділів фізики, таких, як електродинаміка, механіка, оптика, термодинаміка, а також на хімію, кристалографію, металургію та інші науки.

Вважають, що електроніка – продукт ХХ ст. Однак її коріння сягають у середину ХІХ ст., коли були розроблені основи термодинаміки, що вивчає властивості макроскопічних фізичних систем без звернення до атомно-молекулярної будови речовини. Згодом були відкриті ефекти, які надалі лягли в основу створення **фоторезисторів, діодів (детекторів), транзисторів** та інших елементів. До таких ефектів належать змінювання опору селенового стовпчика під впливом світла (1873 р.), одностороння провідність загостреного металевго дроту, що перебуває у контакті з деякими сульфідами металів (1874 р.), виникнення електрорушійної сили на кінцях селенового елемента в разі його освітлення (1876 р.). У 1883 році Т. А. Едісон, намагаючись подовжити термін служби лампи з вугільною ниткою за допомогою введення в її вакуумний балон металевго стрижня, виявив між цим стрижнем-електродом і ниткою струм. В умовах вакууму струм виникав у разі подачі позитивного потенціалу на електрод. Це явище, згодом назване **термоелектронної емісією**, виявилось єдиним фундаментальним відкриттям винахідника, на яке він сам не звернув серйозної уваги. Це й лежить в основі усіх електронних ламп, отже, й в основі усієї **електроніки першого періоду**, названого епоєю електронних ламп. Але кілька десятків років ані сам Едісон, ані інші вчені не могли знайти застосування цьому явищу. Винахід 1895 р. – радіо А. С. Попова – привернуло увагу до зазначених ефектів.

Після того, як у 1904 р. Д. Флемінг створив **вакуумний діод** (двоелектродну лампу), а Л. Форест у 1906 р. – **тріод** (триелектродну лампу), електронні лампи стали широко застосовувати в генераторах і передавачах, підсилювачах і випрямлячах, радіоприймачах і, нарешті, в електронних обчислювальних машинах (**ЕОМ**). З'явилися **тетроди, пентоди** (лампи з чотирма і п'ятьма електродами) малої та великої потужності, клістри, магнетрони, лампи біжучої та зворотної хвилі і багато інших ламп, складних не лише за назвою, а й за конструкцією. З'явилися різноманітні газорозрядні прилади-лампи: **стабілітрони, газотрони (діоди), тиратрони (тріоди) та індикаторні лампи**. І це закономірно, тому що життя потребувало нових

електронних пристроїв, що складаються з великої кількості елементів і вирішають величезну кількість найрізноманітніших завдань. Наприклад, якщо в 40-х роках бортова апаратура літаків, в основному, складалася з приладів радіозв'язку, то сьогодні, як ми уже зазначали, вона включає радіолокатори, системи сліпого польоту і посадки, а також різні навігаційні системи, телевізійне обладнання тощо. Кількість використовуваних елементів (ламп, конденсаторів, резисторів тощо) зростає у 100, а то й у 200 разів і, в середньому, становить 200 тисяч. Якщо об'єм одного елемента ери електронних ламп взяти рівним 10 см^3 , а масу – 10 г, то неважко підрахувати загальний об'єм і масу всіх використовуваних елементів, які становитимуть відповідно 2 м^3 та 2000 кг! Додавши ще до цих комплектуючих необхідні елементи для кріплення і з'єднання їх відповідно до заданої електричної схеми (дроти, кабелі та шасі), ми збільшимо наведені цифри у декілька разів. Такий стан справ, природно, не міг задовольнити галузі науки і техніки, що швидко розвиваються. Але! Із цим доводилось миритися і створювати громіздке обладнання, вельми енергоємне і ненадійне.

У найпростіший ЕОМ того часу «Урал» налічувалося близько 1000 ламп (менше, ніж елементів у сучасних електронних годинниках), кожна з яких виходила з ладу приблизно за 50 годин. У великих машинах типу БЕОМ (БЭСМ) налічувалося вже 5–6 тис. ламп, і передбачалося довести їх кількість до 10 тис., а це означало б скорочення часу безвідмовної роботи ЕОМ до 5 годин. При цьому знадобився б час і для того, щоб знайти несправну лампу серед 10 тис. майже однакових.

Перші ЕОМ потребували не одного десятка квадратних метрів площі з хорошою енергосистемою і потужною вентиляцією. Коефіцієнт їхньої корисної дії у кращому випадку становив 2–3%, а інша енергія виділялася у вигляді тепла. У цей період не могли створювати бортових ЕОМ малих розмірів, і тому проводили інтенсивні розробки малогабаритних електронних ламп. Так з'явилися пальчикові та інші типи ламп, які в 3...5 разів менші за раніше застосовувані. В одному скляному балоні розміщували елементи двох і навіть трьох ламп, а також резистори і конденсатори. Через це апаратура була надзвичайно складною, дорогою і ненадійною. Ремонтопридатність її залишалася вкрай низькою. Вирішити всі численні проблеми тоді було неможливо. Необхідні були інші, принципово нові елементи, поява яких справила б революцію в електроніці.

І революція відбулася в 1948 р., коли В. Шоклі, Д. Бардін та У. Браттейн винайшли **транзистор – напівпровідниковий тріод**, принцип дії якого докорінно відрізняється від принципу дії електронних вакуумних ламп, але він був здатен виконувати їх функції.

Зі шкільного курсу фізики відомо, що в природі є речовини, провідність яких займає проміжне значення між великими значеннями (метали,

електроліти) і дуже малими (діелектрики). Звідси і назва – напівпровідники. До них належать такі елементи, як кремній, германій, селен тощо, а також низка сполук (сульфід свинцю, сульфід кадмію, арсенід галію та ін.).

В абсолютно чистих напівпровідниках, що не мають домішок, електропровідність зумовлена так званою власною провідністю. Вона, як відомо, створюється електронами і дірками (це квазічастинки чи вакансії енергетичного стану). Але може виникнути і домішкова провідність, якщо до напівпровідника додати інші елементи (домішки).

Наприклад, якщо до кремнію з чотирма валентними електронами додати фосфор (миш'як, сурму) з п'ятьма валентними електронами, кількість вільних електронів збільшиться порівняно з кількістю дірок. Домішки, які збільшують кількість вільних електронів, називають донорними. Напівпровідники, що мають донорну домішку, тобто надлишок електронів, отже, електронний тип провідності, отримали назву **електронні напівпровідники** або **напівпровідники n -типу** (n від слова *negative* – негативний).

Домішки алюмінію, бору, індію (елементів з трьома валентними електронами) збільшують у кремнії кількість дірок і називаються акцепторними (приймальними) домішками. Напівпровідники, у яких діркова провідність переважає електронну, отримали назву **напівпровідники p -типу** (p від слова *positive* – позитивний).

Якщо у напівпровідниковому кристалі області з електронною та дірковою провідністю перебувають у контакті, то на їх межі утворюється **електронно-дірковий перехід** (n - p - або p - n -перехід). Ці переходи – основа багатьох напівпровідникових приладів (на одном переході – **діодів**), а поєднання двох переходів (p - n - p або n - p - n) дало змогу створити елемент, який називають **напівпровідниковий тріод** або **транзистор** і застосовують для посилення і генерації електричних коливань (рис. 1).

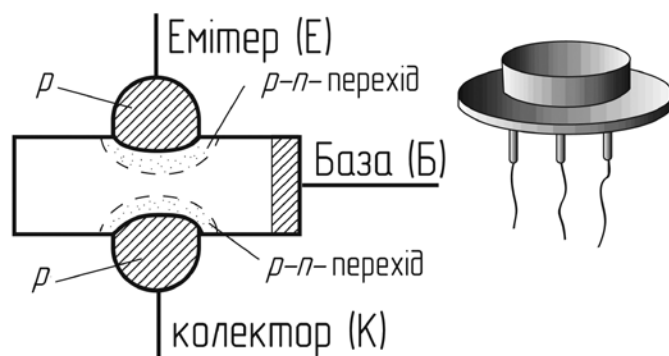


Рис. 1. Ліворуч – спрощена схема конструкції перших сплавних транзисторів, у яких металеві контакти **емітера** і **колектора** (з акцепторною p -типу домішкою) сплавлені з електронною n -напівпровідниковою **базою**; праворуч – загальний вид транзистора у металічному корпусі

Після винаходу транзистора мініатюризація відразу сягнула на вищий щабель. Стали використовувати елементи, що мали розміри зі шпилькову голівку і малу енергію споживання, високий ККД і вищу надійність. Були розроблені резистори і конденсатори, менші за об'ємом у 50...75 разів, і провідники завтовшки з людську волосину, що дало змогу перейти на щільні й компактні методи монтажу цих елементів. Так, якщо перша ЕОМ для літаків мала масу понад 200 кг і потужність споживання 3000 Вт, то ЕОМ, у якій частину ламп замінили напівпровідниковими діодами, мала масу 100 кг і потужність 1500 Вт, а ЕОМ на транзисторах – відповідно 50 кг і 420 Вт!

Однак цей **другий період розвитку електроніки** тривав недовго, тому що функціональна складність електронних пристроїв потребувала ще більшої кількості елементів у складі одного пристрою. Необхідно було підвищити їх надійність за рахунок зменшення кількості зварних або паяних з'єднань під час монтажу, зменшити габарити пристроїв, зменшуючи розміри елементів аж до мікрметра ($1\text{ мкм} = 10^{-6}\text{ м}$), різко збільшити кількість розрахункових операцій у ЕОМ.

Третій період розвитку електроніки розпочався у 1957 р., коли було запропоновано **планарну технологію**. (Ми пам'ятаємо, що технологія – це наука про способи і засоби проведення виробничих процесів. Технологія визначає, що, як і у якій послідовності необхідно робити, щоб отримати той чи інший виріб, забезпечити виробу необхідні властивості.) Слово планарний утворилося від англійського слова *planar*, в основі якого лежить латинське слово *planus* – плоский, рівний. Тому під планарною технологією розуміють сукупність операцій, за допомогою яких можна створювати у напівпровідниковій пластині набір *p-n*-переходів, межі яких виходять на одну і ту саму плоску поверхню (див. рис. 2 і 3). Таке розташування значно спрощує їх формування, з'єднання відповідно до заданої електричної схеми і захист від зовнішніх впливів плівкою оксиду (наприклад, оксиду кремнію SiO_2). У поєднанні з плівковою технологією (емітерний, базовий і колекторний контакти можуть бути виготовлені у вигляді плівок) планарна технологія дала змогу перейти до виготовлення принципово нових електронних виробів – **інтегральних мікросхем**, що є основою сучасної електроніки.

1.1. Мікросхеми

Мікроелектроніка – галузь електроніки, що займається створенням електронних функціональних пристроїв у мікромініатюрному інтегральному виконанні.

«А чи не можна простіше?» – запитаєте ви. Звісно, можна, але небажано, тому що інакше ми ризикуємо неповно чи однобічно розкрити значення цього

визначення, у якому закладений глибокий зміст, що стає зрозумілим після коротких пояснень.

Так, під **функціональним пристроєм** зазвичай розуміють електронний пристрій, що виконує певну функцію перетворення та оброблення сигналу (наприклад, телефон, радіоприймач, телевізор).

Мікромініатюризацію не слід плутати з **мініатюризацією**.

Мініатюризація – звичайне зменшення об'єму і маси будь-якого елемента.

Мікромініатюризація дає змогу створювати надмініатюрні вироби, в основу роботи яких покладено нові фізичні явища і принципи (порівняйте роботу вакуумної електронної лампи-діода і напівпровідникового діода).

Інтеграція – об'єднання певної кількості елементів у заданому об'ємі (не менше ніж п'ять елементів в 1 см^3) у поєднанні з новими технологічними методами, що сприяють цьому об'єднанню (наприклад, за допомогою **планарної технології** можна одночасно формувати кілька сотень тисяч елементів, укладених в одному об'ємі).

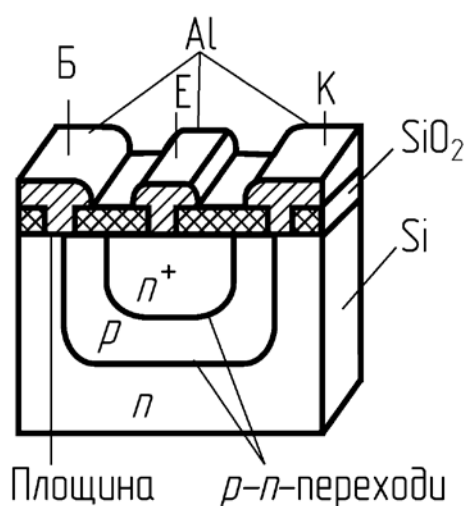


Рис. 2. Структура планарного *n-p-n*-транзистора

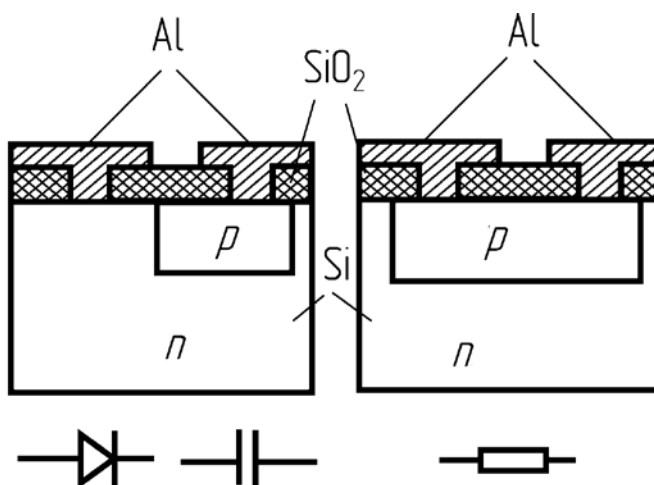


Рис. 3. Планарні структури діода (ліворуч) і резистора (праворуч)

Таким чином, мікромініатюрне інтегральне виконання – це виготовлення виробів електроніки з високим ступенем мініатюризації з елементів, які відповідно до заданої електричної схеми конструктивно і технологічно пов'язані між собою в одне ціле. Інакше кажучи, мікроелектронні пристрої отримують не в результаті складання їх з окремих дискретних елементів (діодів, транзисторів, резисторів, конденсаторів тощо), а в результаті послідовної групової обробки багатьох ділянок поверхні заготовки в єдиному технологічному процесі. Це дає змогу сформувати одночасно як *p-n*-переходи й елементи, які складаються з них, так і мікроелектронний виріб загалом, який називають **напівпровідниковою інтегральною мікросхемою (IC)**. Наприклад,

напівпровідникова ІС має складатися із тисяч транзисторних структур, одну з яких показано на рис. 2, а також діодних і резисторних структур (рис. 3). Принцип послідовності й одночасності полягає в тому, що водночас для тисяч транзисторів спочатку формується область p , потім – n , захисний шар SiO_2 і т. д. Сказане стосується й інших типів мікросхем, про які йтиметься у наступних розділах книжки.

Таким чином, труднощі створення електронної апаратури, що складається з величезної кількості елементів, були усунені завдяки мікроелектронній технології. З'явилися мікросхеми, які дали можливість вирішити цілу низку важливих і потрібних завдань, серед яких насамперед слід назвати розроблення та виготовлення складної електронної апаратури з різноманітними функціональними можливостями.

Наразі в електронній промисловості під час виготовлення деяких типів ІС використовують **напівпровідникові пластини** (заготовки) діаметром 30...300 мм. Якщо кристал (частина напівпровідникової пластини), в якому розміщується лише один елемент, має площу 0,25...1,0 мм², то стає зрозумілим, чому кількість одночасно формованих елементів на одній пластині може сягати тисяч і сотень тисяч. Це дає змогу різко зменшити габарити і масу електронної апаратури, про які вже багато говорилося.

Одна зі специфічних особливостей мікросхем – зменшення споживання електроенергії. Якщо вважати, що в Україні є близько 100 млн лампових радіоприймачів і телевізорів із середньою потужністю 100 Вт, то в сумі це становитиме 10 млн кВт. Отже, потужність кількох великих електростанцій витрачається на електроживлення тільки радіоприймачів і телевізорів. Однак сучасна радіо- і телевізійна апаратура, в якій застосовано мікросхеми, споживає вже не 100 Вт, а набагато менше (3...10 Вт), використовуючи потужність у 10...30 разів меншу, ніж апаратура на лампах.

А як же надійність мікроелектронних виробів, тобто, безаварійність їх роботи протягом певного відрізка часу? За теорією надійності, зі збільшенням кількості елементів надійність виробу має зменшуватися. Для прикладу порівняємо дві групи людей: чотири і сорок осіб. Умовно вважатимемо всіх однаковими за можливостями і здібностями. Цілком очевидно, що ймовірність будь-якої неузгодженості або неправильності у діях набагато вища для великого колективу! Тож завдяки чому мікроелектронна апаратура, що складається з величезної кількості елементів, більш надійна і довговічна? Пояснюється це так.

По-перше, у діодів, транзисторів, резисторів та інших елементів мікросхем легший режим роботи (менші значення струму і напруги). По-друге, за допомогою планарної технології елементи ІС (і схеми загалом) створюються практично в однакових умовах з точки зору забезпечення якості і надійності. По-третє, в ІС набагато менше зварних і паяних з'єднань – основних джерел

виходу з ладу апаратури. І знову слід згадати планарну і плівкову технології, за допомогою яких створюють електронні вироби, не складаючи їх із величезної кількості окремих елементів, отже, з мінімальною кількістю пайок і зварювань.

Усе це значно скоротило час і витрати на проектування і випуск електронної апаратури.

Мікроелектроніка породила мікросхеми, які відрізняються між собою використовуваними матеріалами, методами виготовлення, складністю та функціональними можливостями.

Напівпровідникова інтегральна мікросхема, про яку говорили раніше, являє собою пристрій, у якому всі елементи і з'єднання між ними виконані в єдиному об'ємі і на єдиній поверхні напівпровідникової пластини (див. кольорову вклейку І).

Методи формування напівпровідникових ІС та їх елементів фахівці називають **напівпровідниковою технологією**. Ця технологія дає змогу отримувати ІС найменших розмірів і мас, використовуючи методи планарної технології. Але, на жаль, у житті немає нічого універсального і для всього придатного. Це стосується і напівпровідникових ІС. Поряд із перевагами названі мікросхеми мають низку істотних недоліків, що впливають з особливостей застосовуваних матеріалів і заважають рекомендувати їх для повсюдного використання. У напівпровідниках електричний опір значною мірою залежить від температури, і цю властивість використовують під час створення так званих **термісторів** або **терморезисторів**. І тому, уявіть собі, що станеться з напівпровідниковою ІС, яка потрапила в умови підвищеної (або низької) температури! Параметри елементів мікросхеми змінюватимуться, станеться розбалансування ІС, електронний пристрій почне працювати нестабільно і може навіть вийти з ладу.

У зв'язку з викладеним виникла необхідність розроблення такої технології, за допомогою якої можна було б створювати елементи мікросхем зі стабільними параметрами в умовах експлуатації. Насамперед, це стосувалося пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, індуктивностей), що виконують функцію передавання електричного сигналу, а не активних (діодів, транзисторів), які обробляють і перетворюють сигнал. Крім того, між елементами повинні бути надійні з'єднання, що відповідають певній електричній схемі. Усі ці вимоги сприяли виникненню **плівкової технології і плівкових інтегральних мікросхем**.

Плівкова інтегральна мікросхема – це ІС, усі елементи й міжелементні з'єднання якої виконано лише у вигляді плівок на **підкладці**, виготовленій з діелектричного матеріалу. Можуть бути **тонкоплівкові ІС** із товщиною плівок менше за 1 мкм і **товстоплівкові ІС** завтовшки понад 1 мкм. Принципова відмінність цих мікросхем полягає не лише у товщині застосовуваних плівок, а й у методах їх формування, про що поговоримо далі.

Раніше плівкова технологія не давала можливості виготовити якісні активні елементи, але тепер ситуація змінилася. Однак це тема окремої розмови, що виходить за рамки нашої книжки. Наразі напівпровідникова і плівкова технології не стільки конкурують, скільки доповнюють одна одну. У результаті цього з'явилися гібридні й поєднані інтегральні мікросхеми.

Гібридною інтегральною мікросхемою (ГІС) називають ІС, що містить, крім елементів, ще й компоненти, а іноді кристали (див. кольорову вклейку І).

Елемент (транзистор, діод, конденсатор, резистор тощо) не є самостійним виробом, його не можна відокремити від підкладки.

Компонент виконує ті самі функції, що й елемент, але це цілком самостійний виріб, виготовлений до складання ІС у зовсім іншому місці.

Кристал є частиною напівпровідникової пластини. У його об'ємі й на поверхні можна сформувати як елементи, так і з'єднання між ними. Кристал ІС часто називають **чіпом**.

У **гібридній інтегральній мікросхемі** основою є діелектрична підкладка (пластина); пасивні елементи здебільшого виконані у тонко- або товстоплівковому варіанті; активні елементи являють собою напівпровідникові компоненти.

Суміщена інтегральна мікросхема належить до класу напівпровідникових ІС, у яких активні елементи формуються в об'ємі напівпровідникової пластини, а плівкові пасивні елементи – на оксиді, що покриває поверхню цієї пластини (див. кольорову вклейку І).

Показником складності всіх мікросхем є **ступінь інтеграції** (K), який характеризується кількістю елементів і компонентів (N) у ІС і визначається за формулою $K = \lg N$. При цьому K округлюють до найближчого більшого цілого числа.

ІС	1-го ступеня інтеграції:	$K = 1; N \leq 10^1$
ІС	2-го ступеня інтеграції:	$K = 2; 10^1 \leq N \leq 10^2$
ІС	3-го ступеня інтеграції:	$K = 3; 10^2 < N \leq 10^3$
ІС	4-го ступеня інтеграції:	$K = 4; 10^3 < N \leq 10^4$
ІС	5-го ступеня інтеграції:	$K = 5; 10^4 < N \leq 10^5$
ІС	6-го ступеня інтеграції:	$K = 6; N > 10^5$

Інтегральну мікросхему називають **простою**, якщо $K \leq 1$; **середньою**, якщо $1 < K \leq 2$; **великою** (ВІС, російською мовою – БИС), якщо $2 < K \leq 4$; і **надвеликою** (НВІС, російською мовою – СБИС), якщо $K \geq 4$.

Наприкінці 60-х – на початку 70-х років з'явились, а надалі набули широкого застосування мікропроцесори (МП). **Мікропроцесор** – це ВІС або НВІС, що виконує чітко спеціалізовані функції за заданою програмою (наприклад, введення і виведення інформації, її зберігання тощо); вони є основою ЕОМ, що називаються мікроЕОМ, а також персональних комп'ютерів,

ноутбуків, електронних книг і планшетів, мобільних телефонів та інших сучасних електронних пристроїв.

Існують й інші мікросхеми, призначені для розв'язання найрізноманітніших завдань. Але у них є і спільне: будь-яку ІС можна виготовити, поєднуючи методи, що є в арсеналі напівпровідникової, тонко- й товстоплівкової технологій. Тому надалі розглянемо напівпровідникові, гібридні тонко- і товстоплівкові мікросхеми, які сьогодні застосовують якнайширше.

Мікроелектроніку, яка базується на інтегральних мікросхемах, останнім часом дедалі частіше називають **інтегральною мікроелектронікою**. З одного боку, у такий спосіб намагаються підкреслити, що мікроелектроніка сьогодення пов'язана з підвищенням ступеня інтеграції мікросхем і зменшенням розмірів елементів. З іншого боку, з'являються напрями в мікроелектроніці, які передбачають використання нових принципів побудови електронної апаратури. Так виникла **функціональна мікроелектроніка (четвертий період розвитку електроніки)**, заснована не на стандартних базових елементах (діодах, транзисторах, резисторах, конденсаторах тощо), а на застосуванні фізичних явищ в об'ємі й на поверхні твердих тіл. Інакше кажучи, у структурі функціональних мікросхем дуже важко, а часом і неможливо виокремити елементи й компоненти, що є еквівалентними традиційним. У таких виробках застосовують не лише напівпровідники, а й надпровідники, матеріали з фотопровідними і магнітними властивостями. Крім електропровідності, у функціональній мікроелектроніці сьогодні використовують ультразвукові коливання, оптичні та магнітні явища в діелектриках.

2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

У першому розділі ми познайомилися з історією виникнення та розвитку електроніки, нетривалою за часом, але багатою на події і сенсації. Дізналися про те, що є мікроелектроніка, які типи мікросхем набули найбільшого поширення.

У цьому та наступних розділах належить з'ясувати, як народжуються мікросхеми, які фізичні й хімічні явища лежать в основі технологічних процесів їх виготовлення, яка послідовність цих операцій.

Розмову про створення мікросхем почнемо з розгляду напівпровідникових ІС. І не випадково! Саме завдяки їм мікроелектроніка сьогодні зробила крок далеко вперед і дала змогу створити величезну кількість дуже необхідних для народного господарства, але часом дуже складних приладів і пристроїв. Справді, площа однієї напівпровідникової ІС, далеко не найвищого ступеня інтеграції, в середньому дорівнює 1 мм^2 , кількість активних і пасивних елементів сягає десятків і сотень штук, при тому що їхні лінійні розміри менші за 2 мкм , і відстань між ними менша за 5 мкм . У низці мікросхем ці розміри зменшені у $1,5\dots 2$ рази, а НВІС налічують мільйони елементів з мінімальними лінійними розмірами, значно меншими за 1 мкм .

Ми вже говорили, що в обсязі напівпровідникової пластини формують ділянки провідності n - і p -типу і на їх основі створюють елементи напівпровідникових ІС. Наприклад, транзистор у найпростішому випадку включає в себе три області, розташовані одна в іншій, які й утворюють добре відомі структури n - p - n - або p - n - p -типу (рис. 2). Для діода достатньо мати лише дві області, що утворюють структури p - n - або n - p -типу (рис. 3, ліворуч). Конденсатор дуже схожий з діодом, але йому необхідна велика площа для забезпечення заданої ємності; напруга до ділянок з електронною і дірковою провідністю подається інакше. Докладніше про це розповімо, коли розглядатимемо елементи напівпровідникових ІС. І нарешті, резистор (рис. 3, праворуч) може бути сформований з матеріалу n - або p -типу, і для нього не потрібно n - p -переходів.

У низці структур є області з позначенням n^+ . Чи це не помилка? Ні, помилки тут немає! Область n^+ відрізняється від області n великою кількістю введеної донорної домішки. Відповідно більше електронів, вище електропровідність і менше опір. Ці позначення справедливі і для напівпровідників p -типу. Тут опір збільшується, а електропровідність зменшується в разі заміни p^+ на p .

Транзисторна структура з усіх розглянутих структур – найскладніша.

2.1. Виготовлення напівпровідникових ІС

Виготовлення напівпровідникових ІС включає в себе понад сто операцій, кожна з яких є по суті досить самостійним і складним технологічним процесом. Але перш ніж перейти до їх розгляду, згадаємо матеріали, з яких виробляють напівпровідникові мікросхеми. Поговоримо про їхні властивості, а також про методи досягнення цих властивостей.

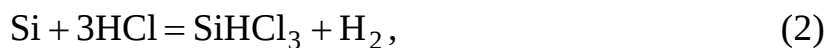
Мікроелектроніка використовує сьогодні десятки напівпровідникових матеріалів з найрізноманітнішими характеристиками, серед яких виділяється й отримав особливе визнання кремній (Si). Йому приділимо найбільше уваги.

Кремній – другий за поширеністю елемент після кисню, і його можна вважати одним з основних на Землі. У земній корі кремній зустрічається лише в сполуках, найважливішою з яких є **диоксид кремнію** (SiO₂). Його зазвичай називають **кремнеземом**. Часто його супроводжують кисневі сполуки інших елементів. Чистота природного SiO₂ становить 99,8...99,9%, а в окремих випадках сягає 99,99%. Елементарний кремній з кремнезему можна отримати в електричній печі, в якій джерелом теплоти слугує дуговий розряд. У разі торкання двох графітових (вугільних) стрижнів (електродів) у місці їх контакту електричний струм виділяє значну кількість теплоти. Це відбувається через дуже малу площу дотику електродів і тому дуже великий опір їх контакту. Температура підвищується настільки, що негативно заряджений електрод (катод) починає випускати електрони, й виникає **термоелектронна емісія**. Якщо розсунути електроди, між ними виникає плазмовий стовп, що яскраво світиться; це і є електрична дуга (дуговий розряд), у зоні якої температура сягає кількох тисяч градусів. У цих умовах і відбувається розкладання кремнезему з реакцією



Отриманий у результаті цього технічний кремній містить 1...2% домішок, і для напівпровідникових ІС його не використовують. Але він є вихідною сировиною для виробництва кремнію високої чистоти, в якому загальний вміст домішок не може перевищувати 10⁻⁶%. Це означає, що коли в напівпровіднику об'ємом 1 см³ знаходиться 10²² атомів, а чистий кремній не повинен мати більше ніж 10¹²...10¹³ атомів сторонніх речовин в 1 см³, то один атом домішки може припадати лише на 10⁹...10¹⁰ атомів кремнію. Очистити кремній до такого ступеня якимось одним методом дуже важко, тому застосовують комбіноване очищення у кілька стадій.

Спочатку технічний кремній хлорують за температури 300...400 °С і перетворюють його на легколеткі з'єднання:



У такий спосіб отримують до 90% **трихлорсилану** (SiHCl_3) і 10% **тетрахлориду кремнію** (SiCl_4). Нагадаємо, що сполуки кремнію з воднем носять назву **силанів**. Реакції, наведені у рівняннях (1) і (2), є оборотними і можуть протікати не лише зліва направо, а й навпаки. Щоправда, для цього потрібні дещо інші умови: інша температура, концентрація компонентів тощо. Наприклад, у нашому випадку реакції протікають зліва направо за температури до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ і надлишку HCl . Справа наліво реакції відбуваються за більш високих температур і менших кількостей HCl .

Отримані у такий спосіб технічні хлориди кремнію містять хоча і менше, але все-таки досить значну кількість різноманітних домішок. Це зумовлено тим, що як вихідну сировину використовують дешеві, отже, сильно забруднені домішками технічні кремній і хлористий водень із вмістом основної речовини 98,99%. Процеси хлорування відбуваються за температур у кілька сотень градусів, і при цьому хлориди і хлористий водень агресивно діють на матеріали апаратури і насичуються домішками. Тому технічні хлориди кремнію надалі піддають спеціальному очищенню кількома методами, сукупність яких дає змогу знизити сумарну концентрацію домішок у хлориді в 10...100 тис. разів (на 4, а то і 5 порядків), а вміст окремих домішок при цьому не перевищує $10^{-7}\%$. Застосовують методи екстракції, зв'язування домішок хімічними реагентами, адсорбційні методи і ректифікацію. Ці види очищення досить складні, цікаві й можуть скласти тему окремої і досить ґрунтовної розмови.

Очищені хлориди обробляють воднем за температури вище за $1000\text{ }^\circ\text{C}$, у результаті чого названі реакції протікають справа наліво, при цьому з хлоридів відновлюється кремній. Цей кремній – сирець, і його поки що не можна використовувати для наших потреб, адже він містить багато домішок – забруднень, які значною мірою впливають на його властивості й тому абсолютно не потрібні і навіть шкідливі під час створення напівпровідникових ІС.

Довільно введені домішки не створять у кремнії заданих властивостей. Необхідні цілком певні домішки; такі, щоб кремній мав провідність *n*- або *p*-типу. Домішки-забруднення у кремнії не потрібні так само, як сіль у солодкому чаї.

За допомогою хімічного процесу можна очистити кремній від багатьох забруднень, але отримати матеріал із вмістом окремих домішок не більше ніж 1...100 атомів на 1 млн атомів основної речовини несила навіть хімії. Тому кремній піддають очищенню за допомогою різних фізичних методів, одним з яких є **зона плавка**.

Зазвичай **зонну плавку** проводять у тиглях з особливо чистого графіту, але для кремнію такий спосіб не годиться через високу температуру його плавлення ($1420\text{ }^\circ\text{C}$) й інтенсивну хімічну взаємодію кремнію і матеріалу

апаратури. Зонну плавку кремнію виконують так званим бестігельним методом в установках вертикального типу (*див. кольорову вклейку II*).

Злиток, виготовлений сплавленням порошкового кремнію-сирцю, отриманого відновленням хлоридів у водні, закріплюють у затискачах, які можуть переміщуватися вгору, вниз й обертатися. Щоб запобігти окисленню кремнію, робочу камеру установки (вертикальну кварцову трубу) продувають азотом або воднем протягом усього процесу. Потім кремній розплавляють за допомогою кільцевого індуктора, який переміщують згори вниз зі швидкістю 1 мм/хв. Плавленню піддають вузьку область злитка. Рідка зона не розтікається й утримується між твердими областями за рахунок сил поверхневого натягу. Домішки мають властивість залишатися у рідкій фазі, тому вони залишають ту частину зливка, яка починає тверднути під час охолодження. Під час багаторазового повторення процесу домішки відтісняються від одного кінця злитка до іншого, після чого його забруднену частину відрізають. Для кращого перемішування розплавленого кремнію верхню та нижню частини злитка обертають у різні боки.

Очищений у такий спосіб кремній складається з великої кількості маленьких кристаликів і називається **полікристалічним** (*полі* з грецької – *багато*). Але для нашої мети потрібен монокристал (одиначний кристал) з винятково правильною, єдиною для всього злитка кремнію кристалічною ґраткою. Однак відомо, що правильна зовнішня форма – не єдиний і навіть не найголовніший наслідок впорядкованості будови кристала. Головне – це залежність фізичних властивостей від вибраного у кристалі напрямку, що називається **анізотропією** (від грецьких слів *анізос* – *нерівний* і *тропос* – *напрямок*). Наприклад, слюда легко розшаровується на окремі пластинки в певному напрямку й набагато важче – у напрямку, перпендикулярному першому. Подібно до слюди кристал кремнію виявляє різні властивості залежно від напрямку (кристалографічної орієнтації): неоднаково взаємодіє з хімічними реактивами, окислюється з різними швидкостями тощо. Отже, для нас дуже важливо мати **монокристалічний злиток кремнію** з певною орієнтацією і заданим типом провідності (n або p). Такий злиток можна отримати в разі витягування монокристалічного шматочка кремнію (**затравочного кристала**, званого **затравкою**) з очищеного і розплавленого кремнію (*див. кольорову вклейку II*). У цей розплав з огляду на тип провідності додано елементи третьої чи п'ятої групи періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва. Затравку закріплено на стрижні, який обертається навколо своєї осі й повільно піднімається. Атоми кремнію добудовують кристалічну ґратку затравки, таким чином формується монокристал. Процес якоюсь мірою схожий на вирощування великих кристалів кухонної солі з розчину, в який опущено нитку з маленьким кристалом солі (цей експеримент рекомендуємо виконати самотужки). Під час цього процесу дуже важливо витримати умови

вирощування монокристала: температуру розплаву, швидкість обертання і витягування. Інакше буде отриманий злиток із великою кількістю дефектів, тобто недосконалою кристалічною ґраткою. Прикладами таких дефектів можуть слугувати (див. кольорову вклейку ІІІ) відсутність атома у вузлі кристалічної ґратки (**вакансія**), зайвий атом у міжвузловині, впроваджений у ґратку чужий атом (**заміщений**) і т. п. Це найпростіші, тобто точкові дефекти. Можуть бути і складніші лінійні дефекти – **дислокації**, що являють собою зсув шарів кристала відносно сусідніх. Зсуви утворюються, якщо один шар атомів не добудований, й утворилася напівплощина. Зсув площин (шарів) за гвинтовою лінією називається **гвинтовою дислокацією** і належить до об'ємних дефектів.

Ще більш неприємним моментом є переміщення (міграція) дефектів під впливом підвищеної температури, електричного поля та інших факторів, що призводить до некерованого змінювання властивостей напівпровідника і параметрів елементів мікросхем (дрейфу параметрів).

З наведеного стає очевидною важливість отримання кремнію у вигляді монокристала з мінімальною кількістю дефектів і цілком певним типом провідності. Такі зливки і надходять до заводу-виробника, де виконують тривалу і копітку роботу зі створення напівпровідникових мікросхем.

Усе починається з контролю, в результаті якого перевіряють (і вкотре!) тип провідності (n або p), ступінь легування (кількість необхідних домішок), величину опору матеріалу, ступінь дефектності й інші параметри. Далі **зливки розрізають на пластини**. Операція дуже схожа на те, як ріжуть огірки або морквину на круглі частини. Тільки для нашої мети застосовують не звичайний ніж, а диски з величезною кількістю дрібних штучних або природних алмазів, закріплених по периметру. Кожне алмазне зерно є мікрорізцем, який знімає дрібні стружки з оброблюваної поверхні кремнію. За високих швидкостей різання (кількість обертів диска зазвичай становить близько 5...10 тис. об/хв) та одночасної участі в різанні всіх алмазних зерен злиток швидко ділиться на пластини завтовшки 0,4...1 мм.

Отримані **напівпровідникові пластини** ще не можна використати для виготовлення мікросхем, позаяк вони мають розкид за товщиною. Крім того, якщо подивитися за допомогою мікроскопа на поперечний переріз пластини (рис. 4 а), то видно, що поверхня пластини рельєфна, і величина мікронерівностей Δ становить 1600...6500 Å. Зауважимо, що на практиці товщину плівок вимірюють в ангстремах (Å) і мікрометрах (мкм). Запам'ятаємо, що $1 \text{ Å} = 10^{-4} \text{ мкм} = 10^{-10} \text{ м}$.

Якщо на такій поверхні формувати, наприклад, провідну тонку плівку завтовшки 500...10000 Å, ця плівка буде несучільною, з розривами чи дуже великим опором (рис. 4 б). У кращому випадку провідник з такою плівки, маючи неоднаковий перетин, швидко вийде з ладу (перегорить) через місцеві (локальні) перегріву (рис. 4 в). Порівняйте тонкий провідник і товстий. Тонкий

провідник має більший опір, тому за однакового струму тонкий провідник перегріватиметься сильніше.

Алмазні зерна, проникаючи у напівпровідниковий злиток під час різання, створюють тріщини, що йдуть від поверхні вглиб. Утворюється **порушений (пошкоджений) поверхневий шар**, якій зовсім неприпустимий для виготовлення напівпровідникових ІС. Цей шар знімають на наступних операціях шліфування, полірування та хімічного травлення поверхні пластин кремнію. Водночас названі операції дають змогу отримати пластини строго заданих розмірів за товщиною, верхня і нижня площини яких паралельні й мають величину мікронерівностей менше за 100...150 Å.

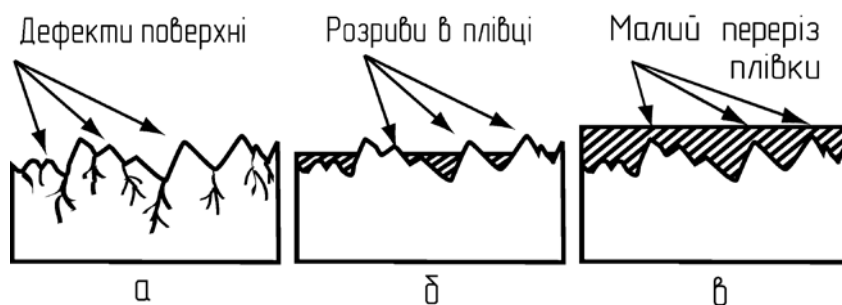


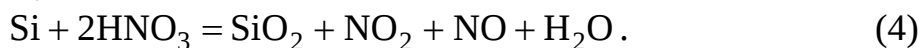
Рис. 4. Поверхня напівпровідникової пластини після алмазного різання

2.2. Для чого потрібен оксид кремнію

Напівпровідникова монокристалічна пластина готова до подальшої обробки, і можна подумати про формування областей n- і р-типу.

Ці області розташовані у строгому порядку і в певних місцях об'єму пластини, тобто локально (див. рис. 3). Ймовірно, таку точну і заздалегідь сплановану локалізацію можна здійснити, якщо більшу частину поверхні кремнієвої пластини закрити, а відкрити лише ті ділянки, крізь які надходитиме домішка заданого типу провідності. Для цього необхідно мати своєрідний трафарет – **маску**, яка щільно прилягає до поверхні пластини і має прорізи (вікна).

Такою **маскою** на поверхні кремнію та інших напівпровідникових пластин найчастіше слугує **плівка диоксиду кремнію (SiO₂)**, яку отримують різноманітними методами. Так, на кремнієвій пластині оксид може бути сформований під час її обробки в сильних хімічних окислювачах. Часто для цієї мети використовують азотну кислоту (HNO₃) з невеликою кількістю плавикової кислоти (HF). Позаяк HNO₃ присутній у значному надлишку, процес окислення переважає над іншими побічними реакціями (наприклад, над процесом розчинення плівки оксиду):



У результаті згаданої реакції утворюється досить щільний і без дефектів оксид кремнію, властивості якого значною мірою залежать від суворого

дотримання режимів окислення (концентрації і температури розчину кислоти, часу окислення тощо), а також від забруднення напівпровідникових пластин продуктами реакції (оксидами азоту).

У планарній технології найпоширенішим є **термічне окислення** кремнію, під час якого SiO_2 отримують за нагрівання пластин кремнію в середовищі газу, що окислює (тобто в кисню, водяній парі, зволоженому кисню). За допомогою цього методу можна виготовити плівки SiO_2 , рівномірні за товщиною і структурою, без тріщин і дефектів. Крім того, він добре вписується у загальну технологію виготовлення напівпровідникових ІС, вдало поєднується з іншими операціями (епітаксією, дифузією), про які ми розповімо далі.

Якщо припустити, що на поверхні кремнію вже є тонкий шар SiO_2 , то **термічне окислення** проходить в три стадії (рис. 5).

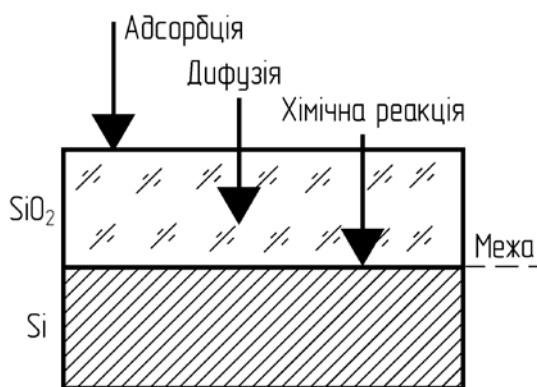


Рис. 5. Три стадії термічного окислення пластини з кремнію

Спочатку частинки окислювача адсорбуються на поверхні оксиду. Згадаймо, що **адсорбцією** називається здатність поверхні твердих речовин приєднувати й утримувати частинки газів, парів або розчинених речовин. У нашому випадку поверхня оксиду кремнію адсорбує газоподібний кисень або водяну пару, оскільки окислення відбувається за температури $1000 \dots 1200^\circ\text{C}$. Поряд з адсорбцією може протікати й **абсорбція** – подальший перехід частинок з поверхні оксиду в його об'єм. Обидва ці процеси називають **сорбцією**. Якщо сорбція завершується утворенням хімічних сполук, має місце **хемосорбція**.

На другій стадії процесу сорбовані оксидом частинки окислювача потрібно доправити крізь шар SiO_2 до поверхні кремнію. Інакше плівка SiO_2 не формуватиметься, і її товщина не збільшиться. Окислювач транспортується крізь оксид завдяки **дифузії**. Зазвичай під дифузією розуміють взаємне проникнення речовин, що торкаються. Стосовно цього випадку кисень або водяна пара проникають від поверхні оксиду кремнію крізь його об'єм до поверхні самого кремнію.

На останній стадії окислювач взаємодіє з кремнієм, тобто, відбувається хімічна реакція (див. рис. 5). Залежно від типу окислювача можуть протікати такі хімічні реакції:



Із трьох стадій процесу термічного окислення дифузія окислювача є найважливішою, оскільки саме вона визначає швидкість окислення загалом. Про це свідчить зниження швидкості росту плівки оксиду зі збільшенням її товщини за умови сталості інших параметрів окислення (кількості окислювача, що надходить до поверхні SiO_2 ; температури процесу і т. п.).

Під час порівняння реакцій (5) і (6) на перший погляд може здатися, що найбільш прийнятним є окислення у чистому, незв'язаному кисні, тобто, немає побічних продуктів реакції, процес більш чистий і має проходити досить швидко. Як свідчить практика, плівки оксиду, отримані в результаті реакції (5), дійсно, більш щільні й бездефектні, ніж у результаті реакції (6). Але виявляється, що швидкість окиснення в кисні набагато менша за швидкість окислення у водяній парі. Пояснюється це так.

Під час реакції (6) на межі розділення $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ (див. рис. 5) виділяється водень, який можна видалити з місця хімічної взаємодії знову лише шляхом дифузії, але тепер уже зворотної – крізь шар SiO_2 від межі $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ до зовнішньої поверхні SiO_2 . У цьому випадку водень розпушує і насичує оксид, робить його пористим і створює величезну кількість дефектів. Дифузія і транспортування парів води від поверхні крізь шар пухкого SiO_2 до межі розділення відбуватимуться значно швидше, ніж крізь щільний оксид, що і скорочує весь процес окислення в 17...20 разів.

У виробництві мікросхем важливо отримати оксид щільним, бездефектним і швидко. Як ми побачимо пізніше, під час виготовлення мікросхем окислення повторюється 5...6 і більше разів. Починаючи з другого окислення у пластині вже є області *n*- або *p*-типу, і, відповідно, створений *n-p*-перехід. Цей перехід повинен бути досить різкий. Але за багаторазових високотемпературних впливів, що відбуваються під час окислення, домішки перерозподіляються між областями *n*- і *p*-типу, межа переходу розмивається, стає нерізкою, якість напівпровідникових елементів ІС знижується. Ось чому дуже важливо якщо не знизити температуру, то зменшити час окислення. Як же бути?

Компромісне рішення для максимальної швидкості утворення SiO_2 , а також для отримання якомога меншої кількості дефектів і якнайбільшої щільності оксиду досягається в разі використання комбінованого методу, тобто, окислення проводиться у вологому кисні. Змінюючи співвідношення кисню і водяної пари у газовій суміші, можна досить швидко сформувати плівку оксиду з малою кількістю дефектів.

На практиці **окислення кремнію** часто проводять послідовно в сухому кисні, у зволоженому (для прискорення процесу) і знову в осушеному. Пориста плівка, отримана у вологому кисні й оброблена потім у сухому, ущільнюється (підсушується) завдяки видаленню водню і гідроксильних груп (ОН). Схему установки для здійснення комбінованого окислення показано на *рис. 6*.

Зі схеми видно, що під час окислення сухим киснем крани K2 і K3 закриті, й O₂ надходить до робочої камери через відкритий кран K1. Для зволоження кисню відкривають крани K2 і K3. Бульбашки кисню проходять крізь шар підігрітої води H₂O, зволожуються й далі надходять у зону реакції (робочу камеру). При цьому K1 може бути закритий або дещо відкритий: все залежить від необхідного співвідношення кисню і пари води. Іноді буває необхідно провести окислення у водяній парі. Для цього K1 закривають, а K2 і K3 відкривають і через резервуар з водою пропускають газ-носіє (інертний газ). Найчастіше це аргон (Ar), ступінь зволоження якого можна регулювати як за допомогою швидкості подачі газу, так і температури підігрівання води.

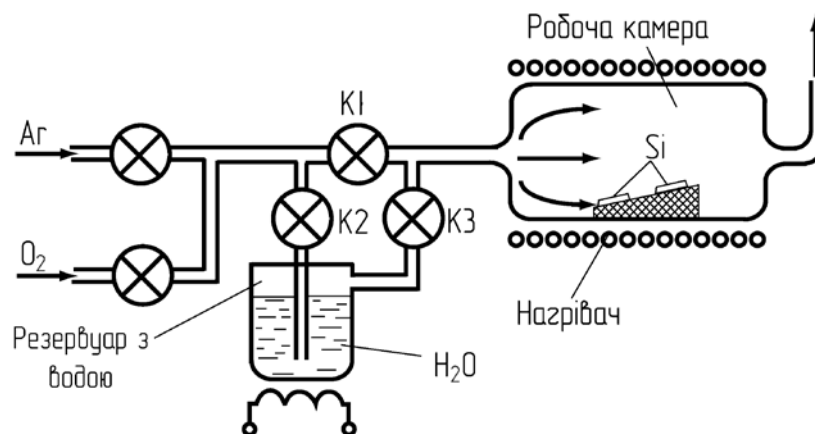


Рис. 6. Схема установки для комбінованого окислення кремнію

Ще більш досконалу і бездефектну структуру SiO₂ і чіткий *n-p*-перехід отримують, використовуючи високий тиск окислювача. Якщо окислювачем слугує водяна пара, процес здійснюють за тиску 200...500 Па і температури 400...700 °С. Для кисню достатньо тиску всього декілька паскалей і температури 500...550 °С. Цьому процесу притаманні більш високі швидкості нарощування оксиду — 10...20 тис. Å/год. Недоліком його є використання громіздких товстостінних автоклавів, покритих зсередини плівкою золота для запобігання хімічній взаємодії окислювача з матеріалом робочої камери.

Усе, здавалося б, добре! І захисну плівку вибрали, і метод її отримання визначили! Але припустимо, що оксид кремнію необхідно сформувати на пластинах з інших напівпровідникових матеріалів. Наприклад, із германію (Ga), арсеніду галію (GaAs) тощо. Чи це можливо? Звісно! Однак, слід застосувати інші способи отримання плівок SiO₂, позаяк у цьому випадку кремнію в чистому

вигляді немає, і окислювати нічого. Із цією метою можна використати сполуки кремнію з воднем або хлором (силани, хлориди і т. п.), які за відповідних умов (температура, навколишня атмосфера) можуть розкладатися, виділяючи оксид кремнію. Так, силан (SiH_4) за температури 300...400 °C окислюється з реакцією



У результаті досить швидко утворюється малодфектний шар SiO_2 , і межі *n-p*-переходу є чіткішими. Крім розглянутих методів отримання плівок SiO_2 , існують інші, вельми цікаві й перспективні для технології мікросхем. Більш підготовлені і захоплені читачі можуть почерпнути необхідні відомості з популярної та науково-технічної літератури.

2.3. Рисунок на камені або літографія

Отже, ми знаємо, як дістати на поверхні напівпровідникової пластини захисний шар оксиду кремнію заданої товщини і щільності з мінімальною кількістю дефектів.

Наступним етапом буде створення в шарі SiO_2 вікон заданої конфігурації, необхідних для введення у напівпровідник донорних і акцепторних домішок. Ще задовго до появи мікроелектроніки був відомий процес, названий **фотолітографією** (від грецьких слів *photos* – *світло* + *lithos* – *камінь* + *grapho* – *пишу*). Це один із способів друкування рисунка на камені із застосуванням світлочутливих матеріалів. У нашому випадку, зрозуміло, йдеться не про рисунок на камені, але, якщо подумати, то цей термін підходить для нашого процесу і цілком відображає його сутність. Дійсно, фотолітографію ми розуміємо як формування покриття з певною конфігурацією вікон із спеціального світлочутливого матеріалу, нанесеного на поверхню оксиду кремнію напівпровідникової пластини, а потім перенесення отриманого рисунка з цього покриття на оксидну плівку. У результаті отримуємо захисний шар з вікнами з оксиду кремнію, який раніше ми назвали маскою. У цьому процесі та його назві задіяні і *світло*, і *камінь* (напівпровідникова пластина з оксидом), і *спосіб друкування рисунка*.

Світлочутливі матеріали, що їх використовують у фотолітографії, складаються з органічних світлочутливих з'єднань, наприклад полімерів, розчинників та інших добавок, і називаються **фоторезистом** (від *photo* – *фото* й англійського *resist* – чинити опір, перешкоджати). При цьому фоторезист є субстанцією, яка за своїми властивостями подібна до звичайного лаку.

Під дією ультрафіолетового випромінювання у **фоторезисті** протікають хімічні реакції, під час яких із двох або декількох молекул виходить з'єднання, що має той самий склад, але більш високу молекулярну масу, тобто йде **полімеризація**. Можливий і зворотний процес – **деполімеризація** (приставка *де* означає відділення, видалення, скасування). І в першому, і в другому

випадку змінюється не лише молекулярна маса фоторезисту, а й значно змінюються його властивості – розчинність і стійкість у кислотах, лугах і під час нагрівання.

Опишемо сутність фотолітографічного процесу. На поверхню пластини окисленого кремнію наносять тонку плівку фоторезиста і виконують його **експонування**, тобто, **впливають ультрафіолетовим світлом** крізь фотошаблон. **Фотошаблон** – це скляна пластина або полімерна плівка зі спеціальним покриттям, крізь яке не проникає ультрафіолетове випромінювання. У покритті сформовані вікна. Прикладом фотошаблону може слугувати фотонегатив, у якому немає напівтонів, а є лише прозорі й непрозорі області.

Залежно від того, як змінюються властивості фоторезистів під час опромінення та який рисунок утворюється на їхній поверхні, всі **фоторезисти** **поділяють на дві основні групи: негативні й позитивні** (рис. 7).

Негативні фоторезисти під дією світла утворюють нерозчинні ділянки рисунка на поверхні пластини й після проявлення залишаються на ній. Сам же рисунок на поверхні пластини є негативним (зворотнім, протилежним) зображенням фотошаблону. Для кращого розуміння можна згадати добре відомий процес фотографування і друкування фотокарток: фотографічна картка має зворотне зображення стосовно фотоплівки, якою був заряджений фотоапарат. Світлим місцям на фотографії відповідають темні місця на фотоплівці й навпаки.

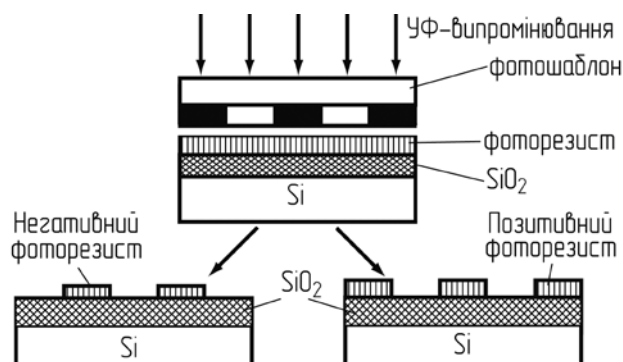


Рис. 7. Схема фотолітографії з негативним і позитивним фоторезистами

Позитивні фоторезисти на противагу негативним під дією світла утворюють розчинні ділянки. У цьому випадку рисунок фотошаблону точно повторюється на поверхні пластини.

Існує досить велика кількість найрізноманітніших фоторезистів, однак у виробництві ІС можуть бути використані далеко не всі, а лише певні, що відповідають основним вимогам і мають необхідні властивості, одна з яких – **світлочутливість**. Для **негативних фоторезистів** під світлочутливістю розуміють їхню здатність утворювати окремі полімеризовані ділянки після

ультрафіолетового опромінення і подальшого проявлення. Для **позитивних фоторезистів**, навпаки, про світлочутливість судять за повнотою руйнування полімеризованої ділянки після світлового опромінення і проявлення.

Фізичний зміст цього критерію, очевидно, є таким: що менше потрібно часу та енергії для опромінення шару фоторезисту і змінювання його властивостей на певну глибину, то він більш світлочутливий.

Другою властивістю фоторезистів є **роздільна здатність (R)**, яку часто визначають за мінімальними розмірами зображення, що отримується за допомогою цього фоторезисту. У техніці під цією властивістю розуміють здатність фоторезиста відтворювати на 1 мм пластини можливо більшу кількість ліній, розділених проміжками такої самої ширини: $R = 1000 / 2l$ (лін/мм), де l – ширина ліній і проміжків у мікрометрах.

Однак, якщо теоретично обчислене значення $R = 1000$ лін/мм, то на практиці досягається R , яке дорівнює лише 400...500 лін/мм. Це зумовлене тим, що геометричні розміри зображуваного елемента будуть спотворені за рахунок бічного засвічення (*рис. 8*), зумовленого такими фізичними явищами, як **дифракція** (огинання світловими хвилями затемненої ділянки фотошаблону), **розсіювання світла на поверхні зерен** (адже фоторезист має зернисту структуру!) і **відбивання його від поверхні SiO_2** (особливо у разі неправильно вибраного і занадто великого часу експонування).

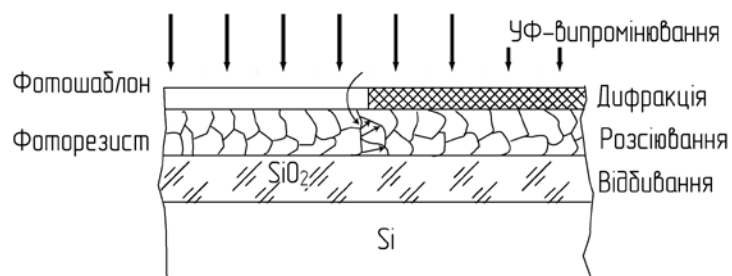


Рис. 8. Дифракція і розсіювання світла на межах зерен

Третьою досить важливою властивістю фоторезистів є висока стійкість до дії кислот (HNO_3 , HCl , H_2SO_4 , HF , H_3PO_4) і лугів (KOH , NaOH). Часто цю здатність фоторезисту для стислості називають **кислотостійкістю**, яка залежить як від хімічного складу фоторезисту, так і від якості отриманого фоторезистивного покриття, тобто наявності наскрізних пор (проколів), порожнин, тріщин тощо.

Розглянемо тепер детальніше, з яких операцій складається **фотолітографічний процес**, яка їх послідовність і що досягається на кожній з них (*рис. 9*).

Процес фотолітографії починається з обробки, тобто з **очищення поверхні пластин**, що необхідно для забезпечення високої якості фоторезистивного покриття, поліпшення його **адгезії** (зчеплення) з поверхнею пластини. Будь-

який пил або забрудник, що потрапив випадково, можуть спричинити невиправний брак під час виготовлення ІС. Для цих потреб найчастіше застосовують хімічну обробку в розчинах і парах органічних речовин (толуол, чотирихлористий вуглець та інші).

Нанесення фоторезисту – одна з найважливіших операцій, позаяк від неї залежить якість покриття, а значить, і кислотостійкість, адгезія і відтворюваність геометричних розмірів рисунка. Шар фоторезисту найчастіше наносять за допомогою **центрифугування** (рис. 10). Пластину з краплиною фоторезисту поміщають у центрі платформи **центрифуги** (від латинських слів *centrum* – *центр* + *fuga* – *втеча*), притискають за допомогою вакуумного присоса й обертають разом із платформою. Відцентрові сили вирівнюють фоторезист на поверхні. У такий спосіб за 20...30 с отримують шар 0,5...20 мкм залежно від кількості обертів центрифуги (500...2000 об/хв) і в'язкості фоторезисту.

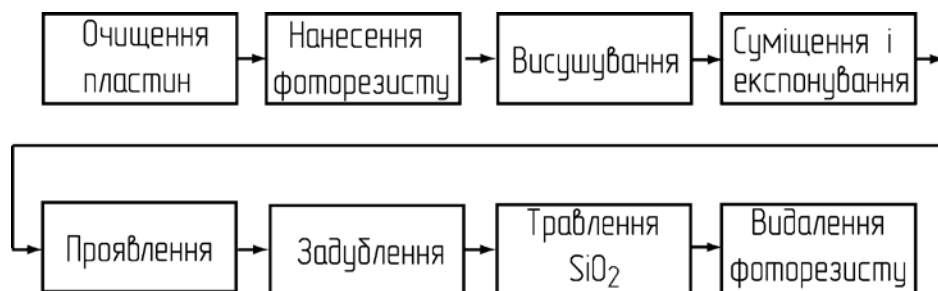


Рис. 9. Схема фотолітографічного процесу

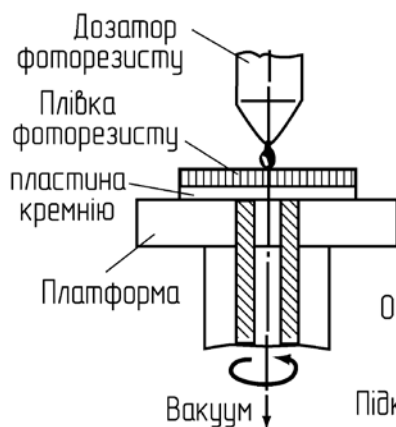


Рис. 10. Нанесення фоторезисту за допомогою центрифуги

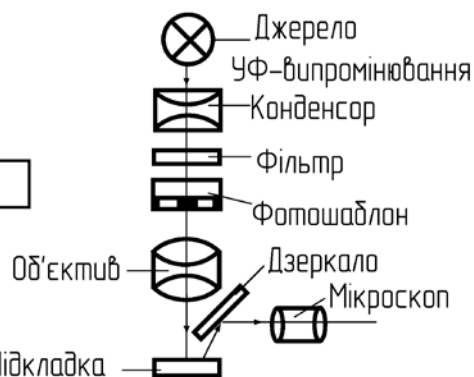


Рис. 11. Схема експонування у проєкційний фотолітографії

Крім цього, наносити фоторезист можна шляхом розпорошення зі спеціального пульверизатора.

Далі перше **висушування** (див. рис. 9), у результаті якого розчинник, призначений для забезпечення необхідної в'язкості та плинності вихідного

фоторезисту, має бути вилучений з нанесеного шару. Під час сушіння фоторезист рівномірно розподіляється поверхнею пластини. Цю операцію можна виконувати у печах з температурою 80...120 °С або в камерах інфрачервоного випромінювання. Потім ретельно суміщають **фотошаблон** із пластиною й **експонують фоторезист ультрафіолетовим світлом**. Ділянки фоторезисту, на яких не сталися фотохімічні перетворення, видаляють – проявляють в органічних рідинах або лугах залежно від типу фоторезисту.

Наступна операція – **задублення (зміцнення)** фоторезисту (друга термообробка); вона призначена для завершення полімеризації фоторезисту, збільшення його кислотостійкості. Зазвичай друге висушення проводять протягом 10...20 хв за температури 120...180 °С.

Сформована у такий спосіб **фоторезистивна маска** повністю готова для вибіркового (локального) травлення плівки SiO₂. Найпоширеніший витравлювач для цієї мети – плавикова кислота HF або розчин $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 2:7:1$.

Після того, як у SiO₂ витравлені вікна, фоторезист можна видалити обробкою у кислотах H₂SO₄ або HNO₃, а також в органічних розчинниках або високочастотній плазмі.

Розглянутий нами **фотолітографічний процес** із експонуванням в ультрафіолетовому світлі є **контактним методом**, позаяк здебільшого передбачає досить щільний контакт фотошаблону з поверхнею напівпровідникової пластини. Це зумовлює певні обмеження у застосуванні методу, що пов'язано з двома основними недоліками.

По-перше, часте торкання фотошаблону і пластини неминуче призводить до появи проколів і подряпин як у шарі фоторезисту на пластині, так і на самому фотошаблоні. У результаті з'являються дефекти рельєфу на пластині, а це – виробничий брак. За багаторазового використання фотошаблону дефекти, що з'являються на ньому, швидко накопичуються, і після 50...200 процесів він стає непридатним для роботи. Накопичення дефектів на фотошаблоні – головна перешкода для зменшення розмірів елементів, створення функціонально складних мікросхем із високим ступенем інтеграції.

Для усунення цього недоліку застосовують **проекційну фотолітографію**, сутність якої полягає в тому, що рисунок фотошаблону проєктують на пластину так, щоб вони не торкалися один одного. Установки проєкційної фотолітографії побудовані за принципом проєкційного апарата. Подібний апарат (фотозбільшувач) застосовують у фотографії для друкування відносно великих фотознімків на фотопапері, де фотоплівка з невеликим негативним зображенням відіграє роль фотошаблону. Проте, наша установка забезпечена об'єктивом, який не збільшує зображення, а проєціює з великою точністю рисунок фотошаблону в масштабі 1:1 (рис. 11).

Але це ще не все. Другий недолік зумовлений законами оптики, згідно з якими мінімальні розміри зображення не можуть бути менше за довжину хвилі світла. Оскільки фотолітографічний рельєф створюється не однією, а кількома операціями, розміри рисунка під час експонування ультрафіолетовим світлом із довжиною хвилі 0,3...0,5 мкм на практиці дорівнюють 1,5...2 мкм. Який же вихід з такого становища?

Зменшити розміри можна, використовуючи принципово інші методи засвічення резисту – це **електронно-променеве** та **рентгенівське експонування**. На рис. 12 показана схема **електронно-променевої проекційної літографії** із застосуванням спеціального шаблона. Шаблон – це кварцова пластина з не прозорим для ультрафіолетового випромінювання рисунком з оксиду титану TiO_2 , поверх якого нанесений шар паладію; TiO_2 виконує роль фотокатода – випромінювача фотоелектронів під дією світла. Ультрафіолетове випромінювання, проходячи крізь прозорі ділянки фотошаблону, утворює на них фотоелектрони, які прямують до пластини, що перебуває під позитивним потенціалом. Електронний пучок фокусується системою електромагнітів. За допомогою електронно-променевої літографії отримують розміри рисунка мікросхеми менші, ніж 0,5 мкм.

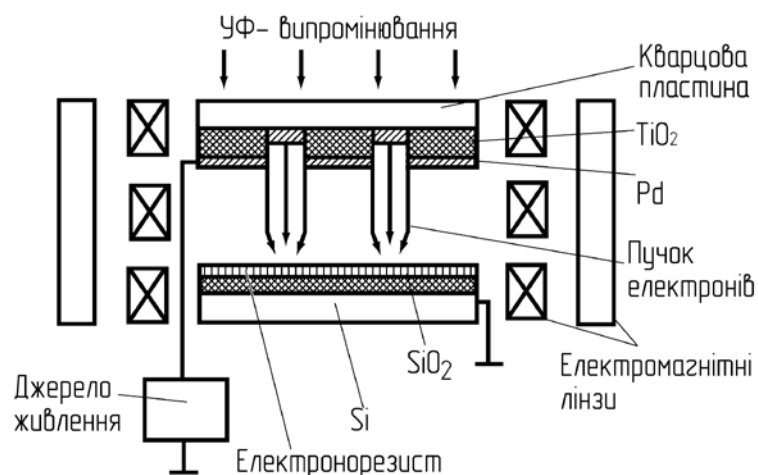


Рис. 12. Схема електронно-променевої проекційної літографії

На **електронорезисті** можна створювати рисунок і без фотошаблону: за принципом **сканування (розгортки)** електронного променя (переміщення площиною підкладки) відповідно до заданої програми, закладеної в ЕОМ. Основними труднощами застосування цього методу є складність встановлення і необхідність розміщення пластин у вакуумі.

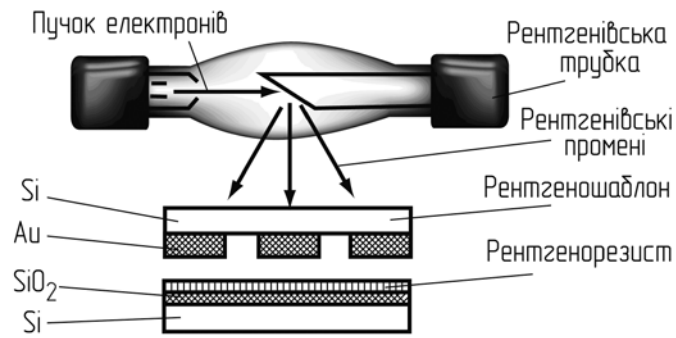


Рис. 13. Схема рентгенолітографії

Під час **рентгенолітографії** пластину з **рентгенорезистом** опромінюють крізь шаблон рентгенівськими променями (рис. 13). Шаблон зазвичай є тонкою пластиною кремнію, яка добре пропускає рентгенівські промені. Рисунок його, виконаний у вигляді золотої плівки, променів не пропускає. Рентгенолітографія забезпечує мінімальні розміри рисунка на резисті 0,05 мкм і менше

2.4. Дифузійний процес та іонна імплантація

Розглядаючи окислення кремнію, ми зіткнулися з явищем **дифузії**. Слід зазначити, що з дифузією чи перенесенням і перерозподілом речовин у просторі (газі, рідині і твердих тілах) ми маємо справу щодня. Чи йдеться про аромат квітів і парфумів, розчинення сиропу або цукру в чаї, приготування ліків або створення сталей і сплавів, скрізь відбувається дифузія. Без дифузії є неможливими і багато технологічних процесів, якими користуються в мікроелектроніці. Дифузія є самостійною та однією з основних операцій у виробництві інтегральних мікросхем. Саме завдяки їй стало можливим виготовити високоякісні *p-n*-переходи на площі від тисячних часток квадратного міліметра до кількох квадратних сантиметрів. При цьому можливо контролювати і керувати такими важливими параметрами, як концентрація домішки на поверхні напівпровідникової пластини (N_0), розподіл її в об'ємі формованої області (наприклад, донорна домішка в області *n*⁺-типу або акцепторна домішка в області *p*-типу, які показані на рис. 2) і **глибина залягання *p-n*-переходу** – X_{p-n} (відстань від межі SiO₂–Si до горизонтальних ділянок *n*⁺-*p* і *p-n*-переходів, див. рис. 2).

Але спочатку згадаємо деякі положення теорії дифузії. Якщо дати більш суворе визначення цього явища, то під дифузією розумітимемо переміщення частинок речовини (атомів, іонів, молекул) **у напрямі зменшення їх концентрації**, яке зумовлене **тепловим впливом**. Наприклад, запах троянди, якій сильніше відчувається біля квітки, стає слабкішим зі збільшенням відстані до неї.

У кристалах переміщення частинок іншої речовини (дифузія) відбувається між вузлами кристалічної ґратки і за вакансіями, тобто за порожніми, вільними вузлами, а також унаслідок заміщення атомів. Однак переважатимуть два перші варіанти дифузії, позаяк це простіший шлях та енергетичні витрати значно менші. Що більше дефектів має напівпровідникова пластина, то швидше проходить дифузія (згадайте дифузію окислювача крізь шар наявного оксиду у випадку окислення кремнію).

Математичний опис дифузійних процесів, який уперше запропонував у 1855 р. німецький вчений А. Фік, у загальному вигляді може бути представлений так: $F = -D\Delta C$, де F – потік речовини, яка проходить одиницею площі за одиницю часу (секунду); D – коефіцієнт дифузії; ΔC – **градієнт** (перепад, змінювання) концентрації речовини, яка дифундує. Знак мінус свідчить про те, що дифузія йде від більшого значення концентрації до меншого, тобто у напрямку її зменшення.

Мірою швидкості дифузії є коефіцієнт дифузії (D). Він залежить від того, яка речовина дифундує, і в якій речовині відбувається це переміщення. Доречно ще раз згадати й порівняти дифузію кисню і водяної пари в оксиді кремнію під

час термічного окислювання кремнію. Крім того, швидкість процесу дифузії буде то більша, що вища температура.

Дифузія – це об’ємний ефект, тобто, перерозподіл речовини відбувається в об’ємі (просторі). Отже, для математичного опису положення будь-якої частинки речовини, яка дифундує у просторі, потрібно користуватися тією чи іншою системою координат. Наприклад, для цього підходять добре всім знайомі Декартові координати. За їх допомогою будь-який об’єм можна представити як тривимірну систему з координатами x , y , z . Але нас цікавить частковий (одновимірний) випадок, коли речовина дифундує з поверхні пластини в її об’єм одним з напрямків, наприклад координатою x .

Таким чином, якщо через N позначити концентрацію введеної у кремній домішки, через N_0 – її значення на поверхні, через x – відстань від поверхні до будь-якої точки всередині пластини, через t – час дифузії, то неважко помітити таке: кількість домішки на довільній глибині в той чи інший момент часу $N(x, t)$ залежить від вихідної концентрації N_0 і D , а також пов’язане з x і t :

$$N(x, t) = f(N_0; D, x, t).$$

Із курсу фізики відомо, що для створення провідності n -типу в кремнії (IV група періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва) необхідно ввести елементи (домішки) V групи, наприклад фосфор. Для провідності p -типу вводять елементи домішки III групи, наприклад бор. Джерелом цих домішок слугують газоподібні, рідкі і тверді з’єднання, що носять назву **дифузанти**.

Під час проведення дифузії застосовують апаратуру, яка майже не відрізняється від апаратури для термічного окислення кремнію (див. рис. 6). Як газ-носії у ній застосовують найчастіше аргон, а до резервуара джерела (барботера) заливають, наприклад, трихлористий фосфор PCl_3 або трибромід бору BBr_3 . Якщо ж це газоподібне або тверде джерело, конструкція буде дещо іншою.

За температури в робочій камері 1000...1300 °C протягом заданого часу t формується область p -типу в області кремнію n -типу і навпаки. При цьому слід зважати, що в реальних напівпровідникових пластинах вже є певна концентрація основної легувальної домішки. Наприклад, на рис. 14 пластина до створення дифузійної області має провідність n -типу, а концентрація донорної домішки ($N^n(x) = N_0^n$) незмінна по всій її товщині.

Після дифузії акцепторної домішки у відповідних місцях поверхні отримуємо деяку поверхневу концентрацію цієї домішки. На певній відстані від поверхні крива розподілу знову введеної домішки перетнеться з лінією, що характеризує вихідну концентрацію донорної домішки в пластині N_0^n . Точка перетину носить назву **точки інверсії** (змінювання, перестановки) типу провідності, у якій відбувається компенсація – зрівнювання донорної та

акцепторної домішок. Ця точка характеризує глибину залягання p - n -переходу (X_{p-n}).

У результаті послідовного і багаторазового окислення, фотолітографії і дифузії у пластині може бути створено стільки p - n -переходів, скільки необхідно для цього елемента (транзистора, діода тощо) **Таку технологію називають дифузійною.**

Однак **термічна дифузія**, про яку досі йшлося, поряд із переліченими перевагами має **низку обмежень і недоліків.**

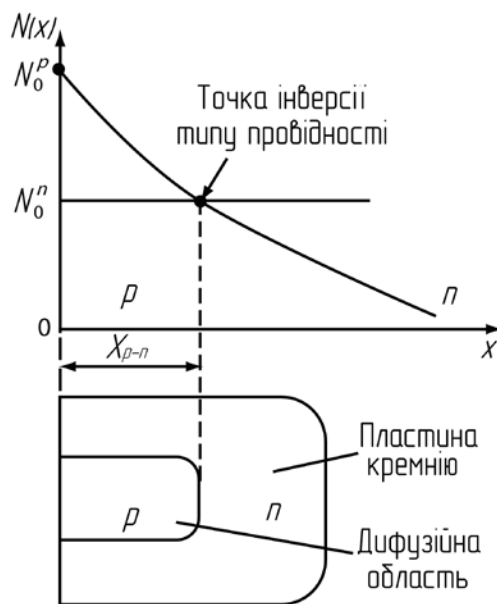


Рис. 14. Розподіл домішок після дифузії

По-перше, висока температура процесу призводить до перерозподілу домішки в раніше сформованих областях і зміщення (розмивання) p - n -переходу, що ускладнює відтворюваність дуже малих за розмірами і точних напівпровідникових елементів.

По-друге, як просторове явище дифузія проходить не лише координатою x , а й по y і z , тобто, відбувається бічна дифузія, яка збільшує площу окремих дифузійних областей та елементів загалом. Цей фактор дуже небажаний у мікросхемах з малими розмірами елементів і високим ступенем інтеграції.

Нарешті, третім обмеженням є залежність коефіцієнта дифузії та розчинності домішки в кремнію від температури. Це, на жаль, унеможливорює використання багатьох перспективних для мікроелектроніки матеріалів, що мають малі коефіцієнти дифузії і невисоку розчинність. Інакше кажучи, у низці випадків висока температура процесу є недостатньою для перерозподілу домішки в напівпровіднику.

Учені вирішили піти іншим шляхом, застосувавши як активатор процесу не температуру, а електричне поле. Процес назвали **іонним введенням** або **іонною імплантацією**, можна його назвати також **іонним легуванням**, позаяк

вводиться домішка, яку попередньо іонізують, а потім іонам надають енергію в електричному полі за напруги у кілька сотень кіловольтів, необхідну для проникнення іонів домішки у кристал. Загалом процес іонного легування досить складний і без спеціальної підготовки складний для розуміння. Однак у загальних рисах процес і схему установки можна представити таким чином (рис. 15).

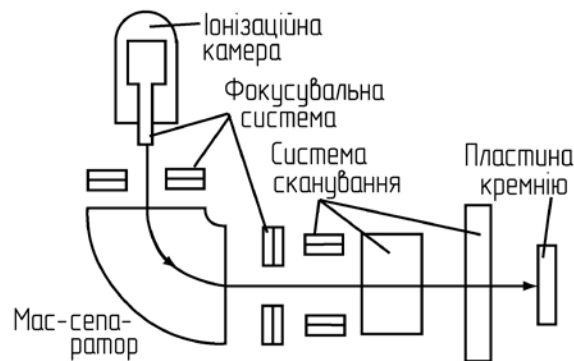


Рис. 15. Схема установки для іонного легування

В іонізаційній камері за допомогою дії різних випромінювань, застосування дугового розряду або електронного бомбардування (іонізації електронним ударом) здійснюють іонізацію частинок легувальної речовини, яку попередньо переведено у пароподібний стан. При цьому виникає прискорений потік іонів, який необхідно сфокусувати і спрямувати у певне місце напівпровідникової пластини. Цього досягають застосуванням електричного і магнітного полів, які створюють фокусувальну систему. Якщо вихідними матеріалами для отримання іонів фосфору чи бору слугують галогеніди, це призводить до того, що в іонному пучку одночасно будуть присутні як потрібні іони (фосфор, бор), так і непотрібні (хлор, бром). Спеціальним пристроєм, названим мас-сепаратор, виділяють іони потрібної маси (фосфор, бор) і за допомогою системи сканування, керованої ЕОМ, забезпечують переміщення потоку іонів поверхнею напівпровідникової пластини відповідно до заданої програми. У мас-сепараторі та системі сканування також застосовують електричні й магнітні поля, які впливають на траєкторії руху іонів.

Незважаючи на низку труднощів, пов'язаних зі складністю устаткування, цей метод наразі широко використовують для виготовлення мікросхем із надзвичайно малими розмірами елементів і високим ступенем інтеграції – ВІС (БІС) і НВІС (СБІС). Цьому сприяє точне і відтворюване дозування імплантованої домішки завдяки контролю іонного пучка і часу опромінення. Проходить цей процес буквально за кілька хвилин, що є неможливим у разі термічної дифузії. Формування *p-n*-переходу з точністю до 0,02 мкм і зручність об'єднання цього методу з іншими технологічними процесами

мікроелектроніки дають змогу віднести іонну імплантацію до найперспективніших методів виробництва напівпровідникових ІС.

На завершення розмови про дифузію та іонну імплантацію, слід нагадати, що за обох методів *p-n*-перехід, як відомо, утворюється в результаті перекомпенсації одного типу провідності у вихідній пластині іншим, створюваним у дифузійній області. Інакше кажучи, можливість або неможливість отримання областей високого легування (n^+ або p^+) залежить від ступеня легування вихідної пластини. Завдання ще більше ускладнюється, коли необхідно багаторазово провести дифузію або іонну імплантацію, відповідно, і багато разів здійснити перекомпенсацію. Чи є вихід із ситуації чи неможливо вибратися із цього замкненого кола?

2.5. Нарощування кристалічної структури – епітаксія

Таким чином, дифузія, яка тривалий час була базовим процесом виготовлення напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів) і різних типів мікросхем, виявилася нездатною самостійно вирішувати завдання подальшої мікромініатюризації апаратури і створення високоякісних мікросхем, що стабільно працюють. Озираючись у минуле, можна сказати, що вихід 1...5% придатних мікросхем жодним чином не влаштовував промисловість. Але іншого бути не могло! Природа дифузійного процесу є такою, що потрібна висока концентрація домішки на поверхні пластини, яка досить різко зменшується вглиб. **Градiєнт** (міра убубання) концентрації, що лежить в основі дифузії, разом із тим створює нерівномірність розподілу домішок товщиною дифузійних областей, нестабільність у роботі приладів, а також дрейф параметрів. Крім того, тривалість дифузійної технології ще більшою мірою виявляє недоліки процесу, а власне виробництво мікросхем стає дорогим. Тому перед технологами постало завдання розробити метод, за допомогою якого стане можливим створити структури з рівномірним розподілом домішок, необхідні для широкого класу напівпровідникових приладів.

Понад п'ятдесят років тому в технічну літературу було введено термін **епітаксія** для позначення орієнтованого нарощування монокристалічного шару на монокристалічну пластину. Цей термін походить від грецьких слів *epi*, що означає *на*, і форми минулого часу *таксис* від дієслова *тайнен*, що означає розташовувати в порядку. Це поєднання слів правильно відображає зміст слова *епітаксія*: простір, що оточує пластину, виділяє атоми кремнію, які потрапляють на поверхню цієї пластини й переміщуються доти, поки не займуть найбільш впорядковане положення і не стануть частиною вирощуваної у такий спосіб плівки. За правильно підібраних умов (температура, час процесу, швидкість подачі атомів кремнію до поверхні тощо) **плівка виходить монокристалічною**. Вона виявляється орієнтованою стосовно певної

кристалографічної площині вихідної напівпровідникової пластини – **підкладки**.

Епітаксія як самостійний процес у технології мікросхем відбулася наприкінці 60-х – на початку 70-х років минулого століття. Завдяки застосуванню епітаксіального нарощування вихід якісних інтегральних мікросхем збільшився з 1...5% у 1962 р. до 30...50% у 1965-му, а за останні роки досяг 98%. Отримані зараз епітаксіальні шари відрізняються від об'ємних монокристалів досконалістю структури, ідеально рівномірним розподілом домішок товщиною та істотно меншим вмістом неконтрольованих забруднень. Епітаксія дала змогу значно скоротити час і витрати на процес виготовлення мікросхем, позаяк кількість дифузій зменшилася, а швидкість росту епітаксіальних шарів виявилася відносно високою. Наразі у промисловості застосовують найрізноманітніші методи **епітаксіального нарощування**. У низці випадків атоми напівпровідникового матеріалу переносяться від джерела до поверхні пластини шляхом випаровування з рідкої фази, сублімації або розпилення, про які розповімо у наступних розділах. При цьому жодних проміжних реакцій не відбувається.

Для створення структур складних напівпровідників (наприклад, GaAs – GaAlAs) розроблено **рідиннофазну епітаксію**, в основу якої покладено принцип формування монокристалів із розплаву.

У виробництві кремнієвих ІС найбільшого поширення набула **газофазна епітаксія**. Під час цього процесу на поверхню вихідної напівпровідникової пластини потрапляють атоми кремнію в результаті розкладання парів сполук, які містять кремній. Найчастіше це реакції відновлення хлоридів, бромідів, йодидів кремнію у водні, хоча можуть бути використані й реакції розкладання парів інших сполук за високих температур.

Незалежно від застосовуваного методу **атоми кремнію**, що потрапляють на напівпровідникову пластину (у нашому випадку з кремнію), **повинні мати достатню енергію і здатність мігрувати (переміщуватися) поверхнею підкладки**. Це необхідно для того, щоби добудова кристалічної ґратки відбувалась рівномірно на всій поверхні без дефектів. Оскільки міграція атомів збільшується з підвищенням температури, процес проводять за температури 1200 °С і більше. За температури, меншої від 1050...1100 °С, шар кремнію формується у вигляді **полікристалічної плівки**.

Розглянемо епітаксіальне нарощування на прикладі відновлення тетрахлориду кремнію (SiCl_4) у водні, що найчастіше застосовують у виробництві (рис. 16).

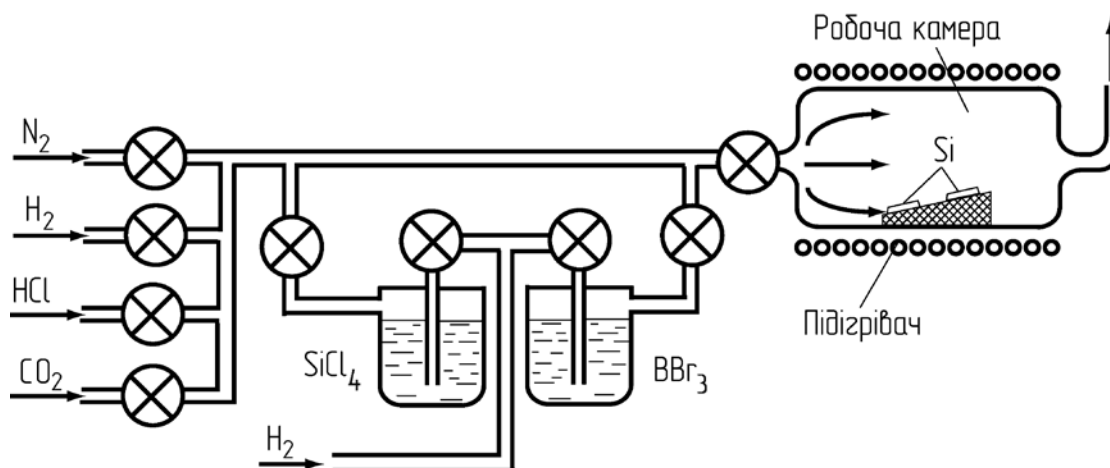


Рис. 16. Установа для газофазної епітаксії

У робочу камеру з особливо чистого кварцового скла, яка нагрівається за допомогою індуктора, поміщають підставку з пластинами кремнію. Системою трубопроводів до зони формування **епітаксіальної плівки** можна подати різні гази й пароподібні речовини, необхідні як для нормальної роботи установки, так і для забезпечення провідності шару заданого (*n* або *p*) типу. Кожен із газів проходить окремою магістраллю, яка має вентиль для перекривання потоку газу. Перш ніж нагріти пластини до заданої температури, камеру продувають азотом – таким чином із системи витісняють повітря.

Далі з пластин кремнію видаляють оксид, нагріваючи їх у потоці водню за температури 1200...1290 °С. Йде реакція відновлення кремнію:

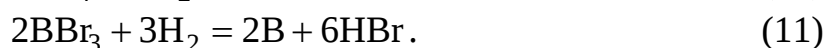


За 5...20 хв у потік водню додають зневоднений хлористий водень (HCl) до 5% і за тієї самої температури за 5...10 хв стравлюють **пошкоджений шар**, від якого важко було позбутися за допомогою шліфування, полірування і травлення пластин у розчинах:



Продукти реакції (SiCl_4 і H_2) постійно видаляють із системи.

Після стравлювання шару кремнію заданої товщини подачу хлористого водню припиняють, систему продувають воднем, а потім водень починають пропускати крізь основне джерело (з SiCl_4) і джерело легувальної домішки (з BBr_3). На цій стадії процесу речовини (SiCl_4 , BBr_3 і H_2) переносяться до поверхні кремнію, адсорбуються нею і вступають у хімічну взаємодію. У результаті реакцій відновлення із сполук виділяються кремній, що йде на вирощування **епітаксіальної плівки**, і легувальний елемент (у нашому випадку бор):



Неважко помітити, що реакція (10) аналогічна реакції (9), але проходить у зворотному напрямку. І це закономірно, тому що протіканню реакції в тому чи іншому напрямку сприяє не лише змінювання температури процесу (а в цьому випадку вона однакова), а й змінювання концентрації речовин, що вступають у реакцію. Надлишок HCl в реакції (9) призводить до травлення кремнію. Нестача HCl і надлишок H₂ – до епітаксiального нарощування кремнію, див. реакцію (10).

Бор (В) – елемент ІІІ групи періодичної системи – виділяється в результаті реакції (11) і вводиться у кристалічну ґратку. Він створює діркову провідність.

Продуктивність процесу нарощування плівки залежить не лише від співвідношення SiCl₄ і H₂, а й від температури, швидкості загального газового потоку і кристалографічної орієнтації вихідної напівпровідникової пластини (див. анізотропію властивостей матеріалів).

Наразі вдається нарощувати епітаксiальні шари *n*- або *p*-типу з концентрацією домішок $5 \cdot 10^{14} \dots 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, що відповідає питомому опору $0,001 \dots 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Виготовлену таким методом епітаксiальну плівку необхідно закрити шаром оксиду. Це дасть можливість, по-перше, захистити її від механічних пошкоджень і впливів навколишнього середовища. По-друге, в установці епітаксiального нарощування можливо отримати структуру, яка придатна для подальшої фотолітографії і дифузії. Однією з типових реакцій формування оксиду може бути:



Ось для чого необхідна магістраль CO₂ в установці, представлений на рис. 16. Процес здійснюється за температури 1200...1250 °С зі швидкістю ~ 0,1 мкм/хв. Такий вид технології виробництва мікросхем на відміну від дифузійної носить назву **епітаксiально-дифузійної**.

2.6. Створення активних та пасивних елементів ІС

Ми познайомилися з базовими технологічними методами, за допомогою яких можуть бути сформовані області *n*- і *p*-типу, що становлять основу елементів напівпровідникових мікросхем. При цьому залежно від конкретної мети використовують найрізноманітніші **активні й пасивні елементи**; на деяких їх найбільш важливих різновидах зупинимося. Спочатку визначимо, чим різняться активні й пасивні елементи: **активні елементи** генерують і перетворюють сигнали, **пасивні** – забезпечують роботу активних. Типові активні елементи – транзистор і діод; типові пасивні елементи – резистори і конденсатори. Почнімо з найпростіших пасивних елементів.

Резистори. Як уже зазначалося у першому розділі книжки, напівпровідникові матеріали не завжди придатні для виготовлення резисторів. Це пов'язано насамперед із тим, що діапазон опорів таких резисторів обмежений. Крім того, через значний **температурний коефіцієнт опору** (ТКО) напівпровідників – величина, що характеризує залежність опору від температури – вони більш придатні для виготовлення **термісторів**. Однак унаслідок економічності виготовлення кремнієвих резисторів, а також у разі порівняно невисоких вимог до значень опорів останні досить поширені і широко застосовуються.

Так, **дифузійний резистор** у вигляді області *p*-типу (див. рис. 3, праворуч) можна виготовити, наприклад, у пластині кремнію *n*-типу послідовним проведенням таких операцій: окислення вихідної пластини; фотолітографія по SiO_2 з метою розкриття вікон для формування області *p*-типу дифузією; дифузія акцепторної домішки; окислення кремнію у вікнах; розтин вікон під **контактні майданчики** шляхом фотолітографії; осадження всією поверхнею металевої плівки завтовшки порядку 8 тис. Å (0,8 мкм); фотолітографія по металевій плівці для формування електричного з'єднання відповідно до заданої електричної схеми.

Таким чином можуть бути отримані резистори з опором (R) від 100 Ом до 30 кОм, з ТКО, що дорівнює $5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, і похибкою $\pm 5 \dots 20\%$. Через невисоку точність виготовлення і значний ТКО такі резистори краще застосовувати у схемах, де використовують відношення опорів, а не їхні абсолютні значення. Таке використання дифузійних резисторів засноване на одній з істотних переваг – відношення опорів двох резисторів (R_1 і R_2), виготовлених однією дифузією в одній пластині кремнію, зберігатиметься, незважаючи на велике значення ТКО ($R_1/R_2 = \text{const}$).

Епітаксіальний резистор конструктивно аналогічний дифузійному, але технологія його виготовлення дещо відрізняється. Основна перевага епітаксіальних резисторів – майже рівномірний розподіл домішок товщиною шару, що покращує стабільність роботи цього резистора, підвищує надійність і зменшує дрейф параметрів зі змінюванням температури.

У **суміщених мікросхемах** часто застосовують **резистори з полікристалічного кремнію**, нанесеного на шар оксиду кремнію (рис. 17, а). Не поступаючись за електричними параметрами епітаксіальним резисторам, полікристалічні резистори разом із тим добре ізольовані оксидом від пластини кремнію.

У деяких мікросхемах виникає потреба використовувати **резистори зі змінним опором**. Такі резистори називаються **польовими** (рис. 17, б). Їх робота заснована на ефекті поля, тобто, на змінюванні провідності (величини, зворотної опору) під дією поперечного електричного поля. Перетин робочого

каналу (області p -типу), розташованого між двома областями n -типу, може бути змінений за рахунок напруги на керувальному електроді.

Як відомо, опір провідника змінюється прямо пропорційно його довжині l , зворотно пропорційно площі його поперечного перерізу S і залежить від питомого опору матеріалу провідника ρ , тобто $R = \rho \frac{l}{S}$. Отже, зменшення площі поперечного перерізу каналу S призведе до збільшення опору і навпаки.

Такий резистор виготовляють, застосовуючи традиційні базові методи – окислення, фотографію, дифузію, **осадження (напилення)**.

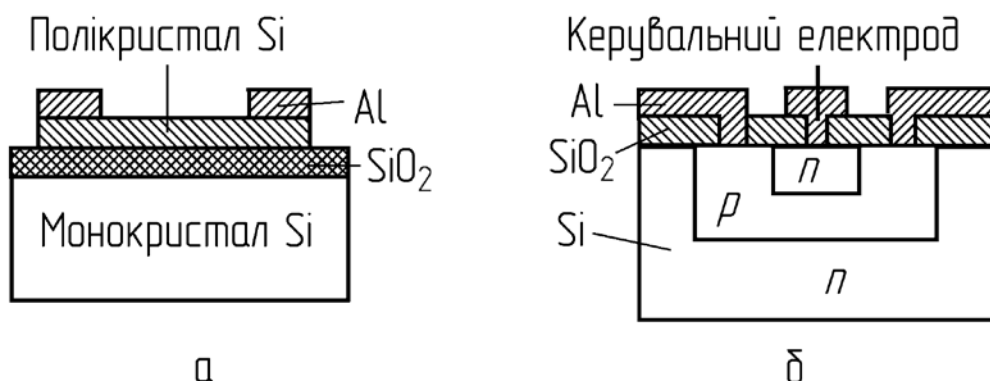


Рис. 17. Резистори для інтегральних схем: а – з полікристалічного кремнію, б – польовий резистор

Конденсатори. Наразі у напівпровідникових ІС застосовують такі типи конденсаторів: **дифузійні на основі n - p -переходу, МДН-конденсатори і тонкоплівкові.**

Відомо, що електроємність плоского конденсатора C залежить від геометричних факторів: площі пластин (обкладок) S і відстані між ними d , а також від електричних властивостей середовища між пластинами. Інакше кажучи, електроємність конденсатора багато в чому залежить і від відносної діелектричної проникності ϵ :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

де ϵ_0 – електрична стала.

Незалежно від способу формування n - p -переходу йому обов'язково відповідає деяка електроємність. Як відомо, вона виникає в обернено зміщених (зворотних) n - p -переходах під час утворення запірного (збідненого) шару, оскільки він практично не містить носіїв заряду і його можна вважати ізолятором. Відносна діелектрична проникність для кремнію 2. Області n - і p -типу (див. рис. 3, ліворуч), які розділені запірним шаром, виконують роль обкладок (пластин) конденсатора.

Такі конденсатори називають **дифузійними**, позаяк їх можна повністю виготовити за допомогою дифузії. Ці конденсатори мають питому

електроємність, що дорівнює $2000 \dots 2400 \text{ пФ/мм}^2$, її **температурний коефіцієнт (ТКЕ)** відповідає $2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Недолік дифузійних конденсаторів полягає в тому, що вони працюють лише за подачі напруги певної полярності (до області *n*-типу підключається плюс джерела напруги, до області *p*-типу – мінус джерела напруги). Тільки в цьому випадку утворюється шар, що запирає струм. У разі зміни полярності *p-n*-перехід починає працювати в режимі відкритого діода. Крім того, електроємність конденсатора залежить від величини прикладеної напруги та градієнта концентрацій домішки в переході.

Перелічені недоліки дещо обмежують застосування дифузійних конденсаторів зі структурою *p-n*-переходу. Більш досконалими щодо цього є **МДН-конденсатори**, тобто конденсатори на основі структури **метал – діелектрик – напівпровідник**. Окремий випадок їх – **МОН-конденсатор** (метал – оксид – напівпровідник), у ньому як діелектрик застосовують, наприклад, оксид кремнію (див. кольорову вклейку І, напівпровідникову інтегральну мікросхему). З рисунка видно, що цей конденсатор ближчий до звичайних зразків конденсаторів, у яких використовують діелектричний шар, а не збіднену область *p-n*-переходу. Однією обкладкою є кремній *p*⁺-типу, отриманий легуванням у процесі дифузії, іншою – алюміній, напилений одночасно зі струмопровідними доріжками на поверхні оксиду кремнію.

МДН-конденсатори – неполярні і не змінюють ємності залежно від прикладеної напруги на обкладках. Однак їхня ємність становить усього кілька сотень пікофарад ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$). Із чим це пов'язано? З формули електроємності конденсатора випливає, що *C* то більша, то менше *d*. Але зменшувати товщину діелектрика не можна безмежно. За $d \leq 500 \text{ Å}$ в шарі оксиду є значна кількість дефектів, а коли товщина діелектрика ще менша, вона є неоднаковою по всій площі, й діелектрик може бути навіть несучільним. Зрештою зменшення товщини діелектрика у гонитві за ємністю неминуче призведе до зниження пробивної напруги $U_{\text{пр}}$, що сягає не більше за 50 В.

Електричну ємність конденсатора можна було б підвищити за рахунок збільшення площі обкладок *S*. Однак і тут виникають обмеження. У плівках оксиду кремнію завжди є дефекти у вигляді дрібних наскрізних отворів (проколів) і ямок, які не доходять до поверхні кремнію. Зі збільшенням площі обкладок збільшується ймовірність того, що в діелектрику між обкладками виявиться дефект, який призводить до пробію конденсатора.

Тонкоплівковий конденсатор є класичним варіантом конденсатора з двох металевих обкладок (верхньої та нижньої) і діелектрика між ними, що виконані у вигляді тонких плівок (див. кольорову вклейку І, гібридна інтегральна мікросхема). Про виготовлення таких конденсаторів докладніше розповімо у розділі, присвяченому тонкоплівковим мікросхемам.

Транзистори. Так зазвичай називають **біполярні транзистори**, в яких протікання електричного струму крізь кристал напівпровідника зумовлене

рухом носіїв заряду обох знаків. **Транзистор напівпровідникової інтегральної мікросхеми** відрізняється від звичайного транзистора, насамперед, тим, що його колекторний вивід виконано на верхній поверхні структури (рис. 18). Але зверніть увагу, як невелике конструктивне змінювання впливає на роботу транзистора і технологію його виготовлення.

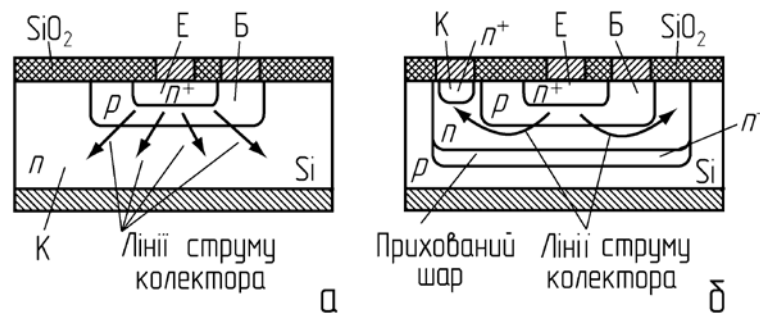


Рис. 18. Транзистори звичайний (а) і для напівпровідникових інтегральних мікросхем (б)

У звичайному транзисторі, який використовують як самостійний прилад, струм тече від емітера через базу до колектора, тобто згори вниз, зазнаючи порівняно невеликого опору пластини кремнію (рис. 18, а).

У транзисторі ІС, що є елементом схеми і має **контактні майданчики** всіх трьох електродів (**емітера Е, бази Б та колектора К**) на одній поверхні пластини, струм протікає обхідним шляхом крізь шар кремнію *n*-типу між колекторним і ізолювальним переходами. Це показано на рис. 18, б, де відображений *n⁺-p-n*-транзистор, у якого додатковий нижній *p-n*-перехід є ізолювальним елементом. Такий транзистор, маючи товщину шару емітера 2 мкм, бази 0,7 мкм і колектора 10...12 мкм, у мініатюрних пристроях **можна використовувати і як самостійний елемент (компонент)** в корпусі й без нього. Усе це непогано, але суть проблеми в іншому. За такого протікання струму колекторний (послідовний) опір транзистора значно збільшується (від одиниць до сотень омів). Удосконалення транзисторів розглянутого типу йшло здебільшого шляхом подолання саме цих недоліків.

Деякого зменшення послідовного опору вдалось домогтися шляхом створення дифузійного шару *n⁺*-типу з високою поверхневою концентрацією носіїв (у разі транзистора *n-p-n*-типу) біля виходу колектора на поверхню. Одночасно забезпечувався добрий контакт із цією областю металевих провідників.

Однак виявляється, що важливіше зменшувати опір горизонтальної ділянки колектора, для чого було запропоновано в області ізолювального переходу створити низькоомний шар *n⁺*-типу завтовшки 1...3 мкм, названий заглибленим або прихованим шаром. У такий спосіб опір колектора було зменшено від кількох сотень до десятків омів, але додалося роботи технологам.

Дійсно, через появу лише однієї нової області виникла потреба додаткового проведення ще одного окислення, фотолітографії і дифузії (або епітаксії). Транзисторі, виготовлені з використанням дифузії, носять назву **дифузійні**, а з використанням епітаксії – **епітаксіальні**.

Останніми десятиліттями широкого застосування набувають ІС з **уніполярними транзисторами**, у яких протікання струму крізь кристал зумовлено носіями заряду лише одного знака – електронами або дірками (рис. 19). При цьому струм між витоком В (входом) і стоком С (виходом) створюється основними носіями заряду. Струмом на виході керують за допомогою поля, створюваного прикладеним до затвора З потенціалом зі знаком мінус. Якщо на область *n*-типу подано позитивний потенціал, у результаті виникає електричне поле на *p-n*-переході й утворюється збіднений на носії заряду шар. Проникаючи в область *n*-типу, збіднений шар зменшує як площу перерізу цієї області, так і концентрацію носіїв у ній, змінюючи таким чином силу струму. Отже, робота уніполярного транзистора заснована на тому самому ефекті поля, що й у випадку змінних резисторів. Звідси друга назва цих транзисторів – **польові**.

За структурою і фізичним принципом роботи розрізняють **польові транзистори з керівним *p-n*-переходом** (рис. 19 а) і **транзистори з керуванням за допомогою ізолюваного електрода-затвора** (рис. 19 б). Перша група транзисторів носить назву **дифузійні**, позаяк у їхній основі – дифузійна структура. Транзистори другої групи називають **МДН-транзистори**, оскільки основною є структура метал – діелектрик – напівпровідник, чи **МОН-транзистори**, де діелектриком слугує оксид кремнію. Обидва типи транзисторів можна виготовити послідовним і багаторазовим проведенням процесів окислення, фотолітографії і дифузії.

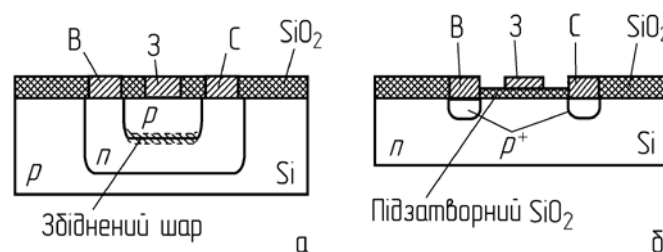


Рис. 19. Польові (уніполярні) транзистори з керівним *p-n*-переходом (а) і з керуванням за допомогою ізолюваного електрода-затвора (б)

Отже, ми дізналися, що являють собою різні елементи напівпровідникових ІС, познайомилися з базовими методами їх виготовлення. Але цим ще не все сказано!

2.7. Ізоляція активних та пасивних елементів ІС

Тепер необхідно з'ясувати: як виготовити сотні, тисячі й навіть мільйони однакових елементів на одній напівпровідниковій пластині? Якими мають бути співвідношення і послідовність відомих нам базових технологічних процесів під час формування тієї чи іншої структури, того чи іншого елемента? І нарешті, як **ізолювати один від одного** цю величезну кількість елементів? Запитань чимало. Але ми з вами цілком підготовлені, щоб отримати на них повну відповідь.

Почнімо з того, що ізолювати елементи один від одного в об'ємі однієї мікросхеми можна у різні способи, одним з яких є ізоляція зворотно зміщеним *p-n*-переходом. Для цього на пластині кремнію, наприклад *p*-типу, нарощують епітаксціальний шар *n*-типу й потім проводять локальну (у певних місцях) дифузію домішки на всю глибину епітаксціального шару. В результаті епітаксціальний шар немовби поділяється на безліч областей (кишень) *n*-типу, відокремлених одна від одної кремнієм провідності *p*-типу. У кожній з цих кишень послідовно за допомогою окислення, фотолітографії і дифузії можна сформувати необхідну кількість *p-n*-переходів і на їх базі створити потрібні напівпровідникові елементи. Але суть проблеми в іншому! Якщо тепер нижній бік пластини *p*-типу підключити до негативного потенціалу, а кишень області *n*-типу – до позитивного, то *p-n*-перехід виявиться зміщеним у зворотному напрямку; при цьому утворюється запірний шар, і тому струм між елементами через нижній бік пластини буде дуже малим або практично відсутнім. Елементи будуть ефективно ізолювані один від одного. Таку ізоляцію іноді називають **діодною**.

Уявімо тепер раніше розглянуті операції у вигляді єдиної технології виготовлення біполярних транзисторів ІС *p-n*-типу, ізолюваних один від одного *p-n*-переходом (див. кольорову вклейку IV).

Спочатку пластину кремнію *p*-типу окислюють в атмосфері сухого кисню за температури 1000 °С. Після фотолітографії і розкриття вікон в оксиді проводять дифузію сурми або миш'яку з метою створення провідної області з малим опором під колектором майбутнього транзистора, тобто створення прихованого шару (див. також рис. 18,б).

Далі шліфуванням видаляють шар SiO_2 з усією пластини й нарощують епітаксціальний колекторний шар із провідністю *n*-типу (*n*-епі шар). Наприклад, для цього цілком підходить традиційний процес відновлення SiCl_2 в H_2 за температури 1200 °С.

Потім здійснюють так звану **розділювальну дифузію**, для чого отриману структуру знов окислюють у вологому кисні до товщини оксиду приблизно 1 мкм. Фотолітографією селективно видаляють SiO_2 для створення вікон і проводять дифузію бору у вікна. Дифузію бору об'єднують із поверхневим

окисленням кремнію за температури 1250 °С для отримання оксиду завтовшки 1,5 мкм. У результаті утворюються ізолювальні p^+ -області, закриті згори шаром SiO_2 .

Для створення бази транзистора в оксиді фотолітографією розкривають вікна і за 30 хв здійснюють дифузію бору за температури 950 °С. Як і в попередньому випадку, дифузію бору об'єднують з окисленням у вологому кисні.

Тривала і кропітка робота з виготовлення транзисторних структур, найскладніших з усіх, що існують, завершується створенням емітерної області, для чого вкотре розкривають вікна в оксиді і протягом 10...20 хв за температури 1100 °С дифузією вводять фосфор в область p , формуючи у такий спосіб n^+ -шар біля виходу емітера на поверхню. Процес завершується окисленням кремнію у водяній парі.

Після розтину вікон під **контактні майданчики** на кремнію, напилення (осадження) провідної плівки на поверхню кремнію та оксиду і фотолітографії по цій плівці можна сказати, що в об'ємі напівпровідникової пластини створені транзистори, ізольовані один від одного та з'єднані між собою відповідно до заданої електричної схеми.

Цей спосіб ізоляції часто називають методом **розділювальної дифузії**, він має численні різновиди, з якими за бажання можна ознайомитися у спеціальній літературі, присвяченій технології мікросхем. Проте, всі ці різновиди мають недоліки, що обмежують їх застосування у БІС (*БИС*) і НВІС (*СБИС*). Насамперед, слід відзначити порівняно велику площу ізолювального p - n -переходу і кожного елемента ІС, отже, й низький ступінь інтеграції. Крім того, ізолювальні переходи для роботи елементів схеми не потрібні й навіть шкідливі, тому що додаткові електричні зв'язки призводять до електричних втрат і струмів витоку, отже, й до погіршення роботи схеми загалом. Ці побічні зв'язку та нові додаткові елементи, які виникають, у техніці називають паразитними. Важлива роль у втратах належить **паразитним транзисторам p - n -типу**, які утворюються між базою та ізолювальним шаром p^+ -типу (див. кольорову вклейку IV). Таке становище є зовсім неприпустимим під час розроблення логічних напівпровідникових ІС з малою потужністю споживання (кілька мікроват), які широко застосовують у ЕОМ.

Спроби усунути ці недоліки мали наслідком створення нових технологічних методів, в яких ізолювальні p - n -переходи замінено шаром SiO_2 . Метод виготовлення **транзисторів із діелектричною ізоляцією** для ІС існує у кількох варіантах, кожен із яких має як переваги, так і недоліки. У літературі можна знайти їх опис під назвою **епік-процес**, або метод із застосуванням полікристалічного кремнію. Але суть не в назві! Основу розглянутої технології становить формування структури з діелектричною ізоляцією (рис. 20).

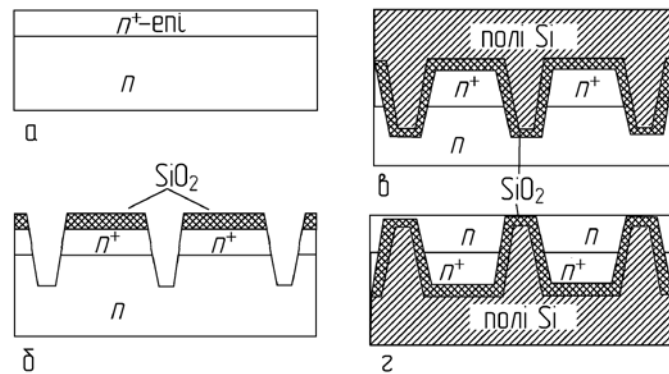


Рис. 20. Схема формування структури з діелектричною ізоляцією

Кожен елемент розміщується у своєрідному «квітковому горщику», виконаному з оксиду кремнію. Виготовлення структур із діелектричною ізоляцією починають з формування дифузії або епітаксією в пластині кремнію n -типу прихованого шару n^+ завтовшки 1...3 мкм. Потім поверхню окислюють у сухому кисні й за допомогою глибокої фотолітографії витравлюють канавки. Глибина травлення повинна бути трохи більше за товщину колекторної області – приблизно 15...20 мкм. Далі на внутрішній поверхні канавок створюють шар оксиду кремнію. Можливе застосування нітриду (Si_3N_4) чи карбіду (SiC) кремнію або складного діелектрика типу SiO_2 - Si_3N_4 , SiO_2 - SiC завтовшки приблизно 1 мкм. Нітрид і карбід мають кращі діелектричні властивості, що зменшує струм витоку і підвищує пробивну напругу. Потім з боку окислених канавок вирощують опорний (неробочий) полікристалічний кремній завтовшки 100...175 мкм, що відіграє роль підкладки для розміщення елементів ІС. Шар кремнію можна отримати розкладанням тетрахлориду кремнію у водні, див. реакцію (10). Ця операція дає змогу надалі ошліфувати або стравити монокристалічний кремній до шару оксиду або поки не побачимо полікристалічний кремній. Цей процес найбільш критичний і потребує спеціального прецизійного обладнання.

В ізольованій у такий спосіб колекторній області з прихованим шаром за допомогою звичайних операцій (окислення, фотолітографія, дифузія) виготовляють базу та емітер транзистора.

Забезпечуючи надійну ізоляцію, метод на основі **епік-процесу** дає змогу скоротити відстань між елементами до 8–10 мкм, значно зменшити площу елементів і більш компактно розмістити їх на пластині.

Ще істотніше зменшити елемент і водночас спростити технологію можна, використовуючи **МДН-структури** (рис. 21). Для цього високоомний кремній (2,5...10 Ом·см) n -типу окислюють, створюючи оксид кремнію завтовшки 0,6 мкм. Після розтину вікон шляхом фотолітографії проводять дифузію акцепторної домішки до глибини 2 мкм і знову закривають поверхню пластини шаром оксиду. У цьому випадку вимоги до дифузії менш жорсткі, ніж під час

виготовлення біполярних транзисторів, позаяк немає потреби точно витримувати товщину областей p^+ -типу. Подальша фотолітографія дає змогу протравити вікно і в ньому окислити кремній у сухому кисні, створивши щільний підзатворний шар оксиду завтовшки 0,1...0,15 мкм. Фотолітографія по оксиду задля розкриття вікон під **контактні майданчики**, а потім напилення суцільного шару алюмінію і фотолітографія по ньому завершують процес формування польового транзистора мікросхеми. Ізолювати елементи один від одного можна за допомогою **епік-процесу**.

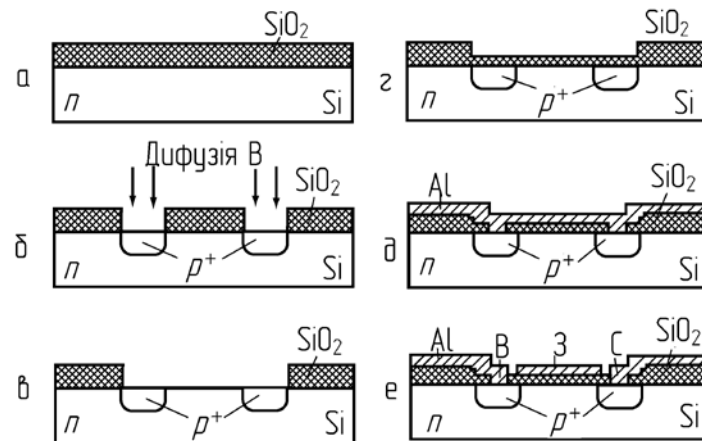


Рис. 21. Формування транзистора з **МДН(МОН)-структурою**

Аналогічно виготовляють та ізолюють простіші елементи напівпровідникових мікросхем, наприклад діоди, резистори, конденсатори. Але це в тому випадку, коли в об'ємі пластини формують однотипні елементи.

А що робити, якщо необхідно мати в межах однієї і тієї самої напівпровідникової заготовки транзистори $p-n-p$ - і $n-p-n$ -типу, так звані **комплементарні структури**? Коли електрична схема передбачає наявність в ІС одночасно транзисторів, діодів, конденсаторів і резисторів? Подібні труднощі легко усунути застосуванням основних базових процесів, які ми розглянули раніше, – окислення, фотолітографії, дифузії. Природно, поєднання операцій і кількість їх у кожному конкретному випадку будуть різними. Та це й неважливо! Поданої інформації тепер цілком достатньо, щоб уявити собі технологію виготовлення будь-якої напівпровідникової мікросхеми.

3. ТОНКОПЛІВКОВІ ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

Як було зазначено в розділі I, уже в процесі створення перших напівпровідникових інтегральних мікросхем з'явилися недоліки й обмеження. Крім того, зі збільшенням ступеня інтеграції та переходом до ВІС (*ВИС*) і НВІС (*СВИС*) відсоток браку збільшувався, і якісних мікросхем отримували менше. Тому майже одночасно стала розвиватися **гібридно-плівкова технологія**, за допомогою якої можна було виготовити функціонально складні пристрої високого ступеня інтеграції, але не на одній напівпровідниковій пластині, а на діелектричній підкладці у вигляді кількох кристалів, поміщених у загальний корпус. Таку конструкцію називають **багатокристалною гібридною інтегральною мікросхемою або мікробіркою**.

Слід відзначити, що час іде, а технологія мікросхем бурхливо розвивається, тому теперішні НВІС (*СВИС*) дають змогу створювати **однокристалні електронні пристрої** дуже високої складності, і багатокристалні гібридні інтегральні мікросхеми можуть виявитися непотрібними. Подібний приклад – **однокристална ЕОМ**.

Ми пам'ятаємо, що основою тонкоплівкових елементів є плівки (тонкі шари матеріалу), товщина яких коливається у межах 0,01...1,0 мкм (100...10000 Å). Більш тонкі плівки не застосовують через їх нерівномірність за товщиною і значний ступінь дефектності. Отримувати товстіші плівки методами **тонкоплівкової технології** – процес тривалий та економічно недоцільний.

Для формування тонких плівок застосовують багато різних способів, але всі їх можна поділити на два основні класи:

- **фізичне осадження** (термовакuumне випаровування, іонне розпилення тощо),
- **хімічне осадження** (хімічне, електрохімічне, електролітичне, піролітичне, плазово-хімічне осадження, термічне окислення, анодне окислення та ін.).

3.1. Термовакuumне випаровування

Метод, про який розповімо, має багато різних назв: **термовакuumне осадження плівок, термічне випаровування у вакуумі, вакуумно-термічне випаровування, термічне вакуумне напилення** і т. п. Але головне не в назві, а в тому, що під впливом високої температури у вакуумі речовина з твердого стану переходить у пароподібний (випаровується), й потім у певному місці заданої поверхні пара знову перетворюється на тверду речовину у вигляді шару чи плівки. Інакше кажучи, вихідну речовину поміщають у випарник робочої камери (рис. 22), нагрівають до високої температури, попередньо відкачавши з

камери повітря, потім випаровують. Потрапляючи в зону підкладки, пара конденсується на ній у вигляді тонкої плівки. Певні умови формування тонкої плівки створюються температурою підкладки, хоча це і не єдиний фактор керування ростом плівки. Але про це йтиметься трохи пізніше. Початок і закінчення осадження плівки регулюються відкриванням і закриванням заслінки.

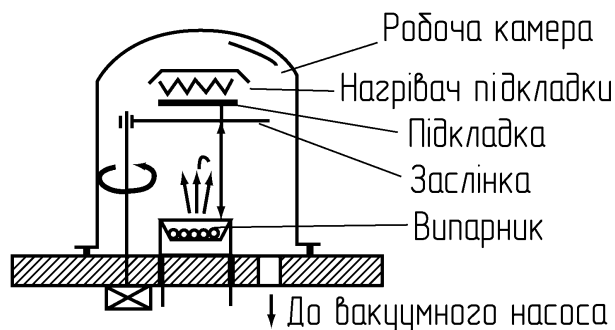


Рис. 22. Схема установки для термовакuumного осадження плівок

Умови, за яких речовина випаровується, поширюється у просторі й конденсується, багато в чому визначають властивості та якості структури плівки. Дійсно, електрофізичні параметри тонких плівок, осаджених різними методами, і товстих пластин з аналогічних матеріалів, але отриманих металургами, значною мірою відрізняються. Так, у металевих пластин значно більша провідність, тобто менший опір, ніж у таких самих металевих плівок. Пояснюється це так. **Електричний загальний опір плівки $R_{\text{заг}}$** не лише залежить від опору її матеріалу $R_{\text{м}}$, а й пов'язаний також із опором, створеним розсіюванням електронів провідності на дефектах кристалічної ґратки, тобто з $R_{\text{д}}$. У тонких плівках концентрація дефектів велика; значно більше, ніж у пластинах. У зв'язку з цим $R_{\text{д}} > R_{\text{м}}$ і $R_{\text{заг}}$ може, в основному, залежати від $R_{\text{д}}$. Інакше кажучи, електрофізичні властивості тонких плівок залежать від досконалості структури останніх, яка, своєю чергою, залежить від умов випаровування речовини, поширення її парів у пролітному просторі (від випарника до підкладки, див. рис. 22) та умов конденсації, тобто, структура і властивості визначаються умовами формування плівки.

На першому етапі термовакuumного осадження речовина повинна випаруватися й переміститися у вигляді пари з випарника до підкладки. Унаслідок теплового руху атомів усі речовини принципово здатні випаровуватися навіть за низьких температур. Із зростанням температури збільшується кінетична енергія частинок, зростає ймовірність їх відриву від поверхні й розповсюдження в навколишньому просторі.

У замкнутому об'ємі атоми речовини під час випаровування створюватимуть у ньому деякий тиск пари. Одночасно з випаровуванням

відбувається і зворотний процес: деякі атоми пари повертаються у випаровувану речовину (конденсуються на ній). Зі збільшенням тиску над поверхнею речовини швидкість конденсації зростає, і настає такий момент, коли швидкості випаровування $V_{\text{вип}}$ і конденсації $V_{\text{кон}}$ стануть однаковими. Умови, за яких $V_{\text{вип}} = V_{\text{кон}}$, називають рівноважними, тобто, спостерігається стан **насичення пари**, а власне пара, що перебуває у рівновазі з рідиною або твердою речовиною, називається насиченою. Її тиск $P_{\text{нас}}$, або пружність пари є характеристикою цієї речовини і залежить від вихідних властивостей матеріалу й температури випаровування.

Однак за низьких температур значення $P_{\text{нас}}$ і $V_{\text{вип}}$ є малими. Досить швидко випаровування відбувається, починаючи з $P_{\text{нас}} \geq 1,33 \text{ Па}$ (10^{-2} мм рт. ст.). Температуру, за якої тиск пари досягає згаданого значення, називають **температурою випаровування**. Для різних речовин вона неоднакова. Так, для алюмінію вона дорівнює 1148°C , для золота – 1465°C , вольфраму – 3229°C . Але разом із тим тиск пари не має перевищувати 133 Па (1 мм рт. ст.), тому що інакше різко зростає швидкість випаровування речовини, і пара не встигає перерозподілитися з випарника у навколишній простір; над поверхнею нагрітої речовини виникає шар пари, що перешкоджає подальшому випаровуванню. Атоми випарюваної речовини повинні дифундувати крізь цей надповерхневий шар, унаслідок чого перенесення речовини від поверхні випаровування сповільнюється.

На поширення пари значно впливає також ступінь вакууму в робочій камері, що тісно пов'язаний із **тиском залишкових газів** $P_{\text{зал}}$ та оцінюється середньою довжиною вільного пробігу атомів газів λ . Довжина вільного пробігу – це відстань, яку проходять частинки (атоми, молекули) газу між двома послідовними зіткненнями. Якщо через r позначити відстань між випарником і підкладкою (див. рис. 22), то за $\lambda > r$ маємо глибокий вакуум, за $\lambda \approx r$ – середній, за $\lambda < r$ – низький. Позаяк в установках термовакуумного осадження r дорівнює $15\dots 25 \text{ см}$, то для створення прямолінійної траєкторії руху атомів пари, а також для унеможливлення їх розсіювання і відбивання від частинок залишкових газів необхідний вакуум $P_{\text{зал}} < 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. Умови, за яких тиск пари менший за 133 Па , тиск залишкових газів менший ніж $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, і атоми речовини безперешкодно досягають поверхні підкладки, називають **молекулярним режимом випаровування**, а потік пари при цьому – **молекулярним потоком**.

Частинки речовини, які випаровуються, вилітають з випарника зі швидкістю близько 500 м/с , досягають поверхні підкладки і стикаються з нею. При цьому можливі такі варіанти їх взаємодії.

Потрапляючи на підкладку, в якій також висока внутрішня енергія, отримана під час нагрівання, частинки речовини перебувають у контакті з поверхнею приблизно 10^{-14} с . За такий короткий проміжок часу частинка не

може досягти рівноваги з підкладкою, тобто **не встигає адсорбуватися і закріпитися**. У цьому випадку перехід речовини з пароподібного стану в рідкий або твердий стан, тобто **конденсація**, неможливий.

Утвориться плівка чи ні, багато в чому залежить від щільності молекулярного потоку випаровуваних частинок на поверхні підкладки і від температури підкладки. За дуже малої щільності молекулярного потоку конденсація не відбувається.

Температура, в разі перевищення якої всі молекули (атоми) відбиваються від поверхні підкладки і плівка не утворюється, називається **критичною температурою**. Вона залежить від фізико-хімічних властивостей випаровуваної та конденсованої речовини, природи і стану поверхні підкладки.

Проте, нас більше цікавить, коли відбувається конденсація й утворюється плівка, тобто, в який момент частинка, зіткнувшись із поверхнею підкладки, віддасть їй значну частину своєї енергії. Виявляється: якщо відсутні умови, необхідні для відбивання від поверхні, **частинка адсорбується і мігрує** (переміщується) деякий час на поверхні підкладки в пошуку родинних частинок і найбільш вигідного енергетичного стану. **Міграція** відбувається в потенційному енергетичному полі поверхні, рельєф якого характеризується наявністю горбів і западин і має деяке розподілення сил зв'язку на поверхні підкладки (рис. 23).

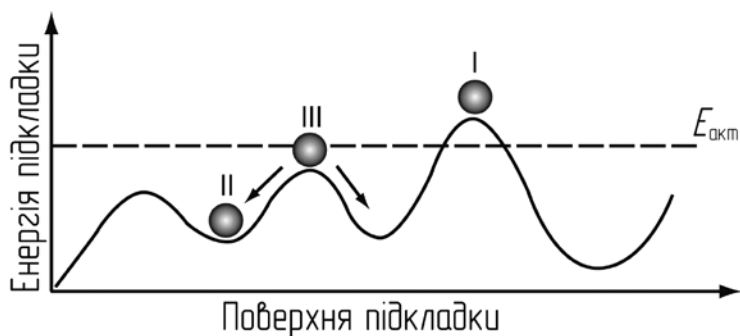


Рис. 23. Розподілення потенційного енергетичного поля на поверхні підкладки

Для частинки важливо потрапити на ту частину поверхні підкладки, енергія якої менша за деяке цілком певне значення так званої енергії активації ($E_{\text{акт}}$). Зустрівши на поверхні енергетичний горб, що перевищує $E_{\text{акт}}$, частинка потрапляє в зону надлишкової енергії підкладки (положення I) і не може передати їй свою енергію. У цьому випадку через слабкий зв'язок з поверхнею частинка залишає підкладку. Зустрівши на поверхні підкладки енергетичну западину (сильний зв'язок), частинка віддає їй надлишок своєї енергії, фіксується на підкладці, утворюючи **центр зародження** майбутнього кристала (положення II). Якщо ж частинка потрапляє у становище III, вона може мігрувати поверхнею в пошуку спорідненої частинки. Створюючи сильний

енергетичний зв'язок під час взаємодії з поверхнею, вона закріплюється в певному місці, й починається ріст **зародка – основи майбутнього кристала**. Власне, сукупність кристалів і є плівкою.

Існує **критичний розмір зародка кристала**, за якого зародок має мінімальну стійкість, тобто, в разі вилучення від нього однієї частинки зародок розпадається, і навпаки, в разі додавання однієї частинки він стає стійкішим. У разі перевищення критичного розміру зародка починається стійке зростання плівки: зародки стають більшими, об'єднуються (**коалесценція**), потім утворюється **острівкова структура** й нарешті **суцільна плівка** (рис. 24).



Рис. 24. Формування суцільної плівки

Повноту процесу конденсації оцінює **коефіцієнт конденсації** α_k , який дорівнює відношенню кількості частинок, що фактично закріплюються на підкладці в одиницю часу (n_k), до загальної кількості частинок, що досягають її поверхні за той самий час ($n_{\text{заг}}$). Інакше кажучи, $\alpha_k = n_k / n_{\text{заг}}$. Ймовірно, α_k буде то більше, що вищий вакуум, нижче температура підкладки, а також коли плівка стає суцільною і зникає **острівкова структура**.

Отже, короткий екскурс у теорію кристалізації плівок приводить нас до висновку, що швидкість їх утворення та електрофізичні параметри істотно залежать від деяких факторів термовакuumного осадження, що називаються технологічними. За їх допомогою керують процесом, отримують якісні вироби з відтворюваними параметрами.

Можна назвати більше десяти факторів, які більшою чи меншою мірою впливають на кінцеве значення параметрів елементів ІС. До них слід, насамперед, віднести тиск залишкових газів у робочій камері, про який так багато говорилося, швидкість випаровування матеріалу, температуру підкладки, чистоту вихідних продуктів та умови їх підготовки до напилювання,

чітку послідовність операцій напилення і дотримання не лише температурних, а й часових режимів формування плівок.

Наприклад, з підкладки перед напиленням (осадженням плівки) необхідно не лише ретельно видаляти сліди полірувальної пасти, вологу й газу навколишньої атмосфери (кисень, водень, азот тощо), а й зберігати очищені підкладки перед їх установкою в робочу камеру в певних умовах. Чому це так важливо і що станеться, якщо не виконати названі вимоги?

Розглядаючи окислення кремнію, ми з вами зіткнулися з **адсорбційними процесами**, характерними для дуже багатьох простих і складних речовин. **Адсорбційну здатність** можна пояснити таким чином.

Молекули чи атоми, які розташовані поблизу поверхні, перебувають в умовах, що відрізняються від умов усередині підкладки (рис. 25). Дійсно, молекула А оточена молекулами з усіх боків, і її енергетичне поле однаково компенсоване подібними полями сусідніх молекул. В іншому становищі перебуває молекула Б, позаяк її поле із зовнішнього боку не компенсоване. На поверхні залишаються вільні енергетичні зв'язки молекули Б, за рахунок яких до неї, отже, й до підкладки можуть притягатися й утримуватися молекули сторонніх речовин, у тому числі й навколишніх газів. Таким чином, поверхня має вільну енергію, величина якої то більша, що чистіша поверхня. Це призводить до її швидкого повторного забруднення газами, пилом, вологою, які є у навколишньому середовищі. Наявність забруднень на підкладці погіршує **адгезію** вирощуваної плівки (міцність зчеплення з поверхнею підкладки), сприяє її газонасиченню, змінює умови кристалізації.

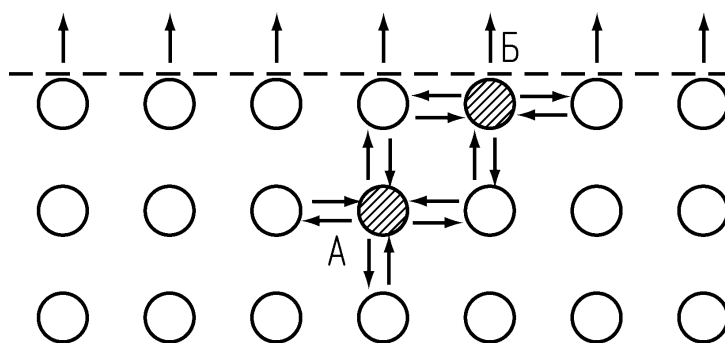


Рис. 25. Атомна структура твердого тіла

У гіршому випадку можуть статися навіть **хемосорбційні процеси** (адсорбція + хімічна реакція). Наприклад, наявність кисню на поверхні призводить до окислення провідних плівок і збільшення їх опору в десятки і сотні разів. Тому зрозуміло, чому під час виготовлення мікросхем величезну увагу приділяють чистоті застосовуваних матеріалів і газів, а також приміщень, у яких виконують технологічні операції.

Не менш важливим фактором для отримання якісних плівок є тиск залишкових газів у робочій камері або ступінь вакууму. У цьому ми вже переконалися раніше. Можна додати, що в разі низького вакууму, коли $P_{\text{зал}} > 10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па, в камері присутні такі гази, як кисень, азот, водень та інші, які за підвищених температур не лише перешкоджають переміщенню молекул випаровуваної речовини, а й спричиняють такі самі процеси, як і в разі наявності забруднень і газів на поверхні підкладки. Отже, необхідний глибокий вакуум. Створити його можна, але це справа дуже складна. Набагато простіше для керування процесом конденсації плівок варіювати температуру на випарнику і швидкість випаровування речовини. Але яким чином кількість частинок залишкових газів стосується швидкості випаровування? Справа в тому, що нас цікавить не абсолютна кількість цих частинок, а відносна. Інакше кажучи, що більше буде частинок основної речовини на підкладці в момент конденсації і менше залишкових газів, то більш вигідний і керований буде процес формування плівок, а тонкоплівкові елементи – якісніші. А цього можна досягти, застосовуючи вищі швидкості напilenня, зрозуміло, якщо процес випаровування не виходить за межі молекулярного режиму.

Адгезія плівок і ймовірність їх взаємодії із залишковими газами пов'язані і з такими технологічними чинниками, як температура, час попереднього прогрівання випарника, випаровуваної речовини і підкладки. Саме вони сприяють видаленню залишкових газів та проведенню чистого напilenня.

Температура підкладки в процесі напilenня (осадження) вважають, без перебільшення, одним з найважливіших і визначальних технологічних факторів. Від неї залежить ступінь насичення підкладки залишковими газами, отже, ймовірність та інтенсивність хімічної взаємодії їх з матеріалом плівки. Умови кристалізації також пов'язані з температурою підкладки, підвищення якої за незначного зменшення коефіцієнта α_k водночас сприяє наближенню процесу конденсації до термодинамічно рівноважного. Частинки речовини, мігруючи поверхнею підкладки, знаходять енергетично найбільш вигідні положення, закріплюються в них, і таким чином формується ненапружена структура з певною величиною **зерна**. Згадаймо, що від величини зерна залежать в решті-решт електричні характеристики плівок. Якщо порівняти великокристалічну структуру з дрібнокристалічною, то за однакової товщини в останній **міжзерновий прошарок** розвинений сильніше, більше дефектів і відповідно вище значення загального опору $R_{\text{заг}}$. Однак основна прикрість полягає в тому, що в елементах, виготовлених на основі дрібнокристалічних плівок, структура може змінюватися і переходити у великокристалічну за підвищених температур експлуатації мікросхем. Процес змінювання кристалічного стану без розплавлення під впливом температури називається рекристалізацією. **Рекристалізація** в тонкоплівкових елементах призведе до зменшення міжзернового прошарку, зниження дефектності структури і

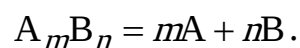
зменшення $R_{\text{заг}}$. Усе це сприяє загальному розбалансуванню електричної схеми. Мікросхема вийде з ладу. Отже, необхідно рекристалізацію провести заздалегідь, на етапі виготовлення елементів схеми. Саме тому плівки напильюють на підкладку, нагріту до такої температури, за якої утворюється оптимальна величина зерна, яка не змінюється під час роботи плівкових елементів.

Для остаточної рекристалізації та цілковитого запобігання їй у процесі роботи тонкоплівкових елементів, зняття механічної напруги, унеможливлення розтріскування і відшаровування від підкладки плівки на заключному етапі напильнення відпалюють у вакуумі за температури 300...400 °С протягом 1...4 годин.

Після завершення формування і термообробки плівки робочу камеру, що знаходиться за температури не більше ніж 50 °С, заповнюють повітрям. Температура підкладки, як і тиск залишкових газів, у разі надходження повітря визначають ступінь хімічної взаємодії (насамперед окислення) матеріалу плівки.

Викладеним далеко не вичерпується перелік складних і цікавих фізико-хімічних явищ у тонких плівках.

Термовакуумне осадження, будучи відносно простим, є давно відомим і добре освоєним, але має разом із тим істотні недоліки. Так, одержувані цим методом плівки багатокомпонентного складу значною мірою можуть відрізнятися від складу вихідних випаровуваних речовин. Порушуються кількісні співвідношення – **стехіометрія**, за яких речовини з'єднуються одна з одною або вступають у хімічну взаємодію. Проблема забезпечення стехіометрії виникає під час термовакуумного осадження багатокомпонентних сполук, які в разі нагрівання і випаровування розпадаються на вихідні речовини. Цей процес часто називають **фракціонуванням**. Наприклад, під час нагрівання сполуки з двох компонентів відбувається розкладання:



Компоненти А і В відрізняються один від одного фізико-хімічними властивостями, отже, за однакової температури випаровування матимуть різні значення пружності пари і випаровуватимуться з різною швидкістю. Унаслідок цього в парі, а потім і на підкладці під час конденсації компоненти опиняться не в тому співвідношенні, яке необхідне для утворення з'єднання $A_m B_n$. Інакше кажучи, на підкладці зростає плівка, збагачена тим чи іншим компонентом, що призводить до змінювання її властивостей стосовно вихідного матеріалу. Ймовірно, необхідний вищий рівень енергій, який би забезпечив випаровування компонентів сплаву одночасно і в заданому співвідношенні, навіть якщо сплав фракціонує.

Спочатку інженери і дослідники пішли шляхом удосконалення старого і перевіреного термовакуумного методу осадження. Було зроблено припущення, що сплав, який фракціонує і нерівномірно випаровується за відносно низьких температур, і повинен поводитись інакше за температури 2000 °С і більше. Дійсно, якщо створити умови, за яких компоненти сплаву як із низькою, так і з високою пружністю пари можуть випаровуватися практично одночасно, переходити в парову фазу, а потім і конденсуватися в **стехіометричному співвідношенні**, то завдання отримання плівок заданого складу вирішено. Так, було запропоновано **вибухове випаровування**, під час якого суміш порошків (навіть не сплав!), приготовану в певному співвідношенні компонентів, подають на випарник, нагрітий до 2000 °С. Важливо, щоб швидкість подачі суміші (сплаву) була не більше за швидкість випаровування. **Миттєве випаровування** і переміщення частинок речовини від випарника до підкладки сприяють утворенню на її поверхні плівки того самого складу, що і сплав. Цей спосіб іноді називають також методом **вібродозування** або **дискретного випаровування**, оскільки сплав подається на випарник визначеними порціями.)

Із цією самою метою був запропонований **метод трьох температур**, або випаровування з двох розділних джерел, у разі якого кожен із компонентів випаровується за своєї температури. Підкладка також має свою цілком визначену температуру. З огляду на індивідуальні особливості компонентів і тиск насиченої пари у паровій фазі створюється саме така концентрація компонентів, яка необхідна для отримання плівок стехіометричного складу.

Завдання забезпечення стехіометрії (відповідність хімічній формулі), здавалося б, вирішене, але за високих температур різко підвищується хімічна активність випаровуваних речовин і матеріалу випарника (вольфраму, молібдену, танталу). Кінцевий результат – забруднення плівок цими елементами.

Було запропоновано **випаровувати речовину за допомогою сфокусованого пучка електронів**. При цьому зона нагрівання локалізується (обмежується), тобто нагрівається випаровувана речовина лише в області падіння пучка, теплові контакти і хімічні взаємодії з матеріалом випарника відсутні. Проте більше, можливо випаровувати речовину, яка перебуває у водоохолоджуваному утримувачі (тиглі). Метод **електронно-променевого випаровування** вельми придатний, але при цьому трапляються випадки, коли поверхня випаровування набагато менша за поверхню конденсації. Наприклад, площа речовини, розплавленої електронним пучком, дорівнює приблизно 60 мм², а площа підкладки – 2900 мм². Така невідповідність призведе до нерівномірного розподілу молекулярного потоку площею підкладки, а також до нерівномірної конденсації і зменшення товщини плівки від середини підкладки до периферії. виправити становище можна, змусивши промінь переміщатися

(сканувати) поверхнею випаровуваної речовини або пересуваючи підкладку над джерелом випаровування. Подібні конструктивні удосконалення у поєднанні з досить складним електронним прожектором (чи електронною гарматою, як часто називають електронно-променевий випарник) не дають змоги рекомендувати метод для повсюдного застосування. **Але одне безсумнівно! Електронно-променеве випаровування – один із перспективних способів виготовлення плівок стехіометричного складу.**

Можливий брак енергії під час термовакuumного випаровування ускладнює, а часом унеможлиблює отримання плівок тугоплавких металів (вольфраму, молібдену, ренію), перспективних для мікроелектроніки.

Ці та інші раніше описані труднощі змусили інженерів і вчених дослідити й розробити ще більш досконалі методи формування тонкоплівкових структур.

3.2. Застосування газових розрядів і плазми для осадження тонких плівок

Молекулярний потік випаровуваної речовини, спрямований у бік підкладки, можна отримати не лише під час нагрівання вихідної речовини до високої температури, а й шляхом бомбардування вихідної речовини у твердому стану іонами газу з енергією в сотні і тисячі електрон-вольтів. При цьому частинкам речовини, що розпорошується, або розпилюється (тут доречніший саме цей термін) іонами, додається енергія 20...300 eV, що в тисячу разів більше, ніж за термовакuumного випаровування. Усе це дає можливість осаджувати на підкладці тугоплавкі матеріали, забезпечує стехіометрію в багатокомпонентних системах, покращує адгезію плівок до підкладки. Остання обставина також пов'язана з високою енергією частинок речовини, що розпилюється, які перед початком конденсації активно впливають на поверхню підкладки, руйнують і видаляють забруднення. Останній процес більш ефективний, коли на підкладку подають негативну напругу (0,1...3 кВ) для прискорювання газових іонів, які бомбардують підкладку і видаляють забруднення. Такий процес носить назву **іонне очищення**.

Загалом технологію із застосуванням іонів називають **іонною**. Оскільки іони беруться із **плазми газових розрядів**, ця технологія також має назву **іонно-плазмова** чи просто **плазмова**.

Один з найпростіших різновидів іонної технології – **катодне розпилювання**, фізична сутність якого полягає у такому. Із курсу фізики відомо, що у скляній трубці з двома металевими електродами за низького тиску виникає **тлійний розряд**, якщо на ці електроди подати напругу в кілька сотень вольтів. Саме у цьому розряді має місце катодне розпилення.

На практиці з робочої камери відкачують повітря до 10^{-3} ... 10^{-4} Па, наповнюють її інертним газом (найчастіше аргон), встановлюючи тиск

1...10 Па (див. рис. 26). Під час подавання напруги від сотень до кількох тисяч вольтів між катодом і анодом виникають електрони, які на своєму шляху до анода бомбардують та іонізують молекули аргону. Позитивно заряджені іони, що виникають таким чином, прямують до катода. Катод часто називають катодом-мішенню (чи просто **мішенню**), тому що він (вона) приймає «вогонь на себе» – енергію позитивних іонів, що бомбардують його. Під час іонного бомбардування з поверхні катода-мішені, утвореного з розпилюваної речовини, вибиваються атоми, які у вигляді молекулярного потоку прямують до підкладки.

З катода також вибиваються електрони внаслідок так званої **іонно-електронної емісії**; ці катодні електрони забезпечують підтримку тліюного розряду, іонізуючи газ і генеруючи плазму. **Плазма**, як бачимо, є газом із вмістом великої концентрації іонів та електронів. Вона завжди створюється у більш-менш потужних розрядах різного типу, включаючи тліюний розряд.

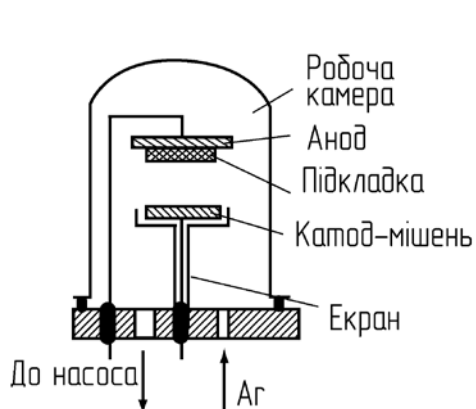


Рис. 26. Система для катодного розпилення у тліюному розряді

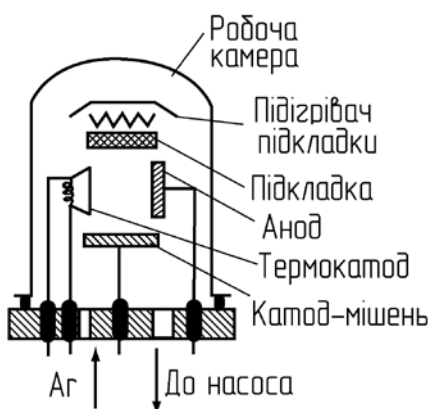


Рис. 27. Система для розпилення в несамостійному газовому розряді

У подібній двоелектродній системі, названій також діодною, за тиску аргону 1...10 Па можна створити будь-який інший тип розряду, але **тліюний розряд** більш вигідний з енергетичної точки зору, він відносно легко підтримується і керується. Крім того, **коефіцієнт розпилювання** $S = n_a/n_i$, де n_a – кількість розпилюваних атомів, n_i – кількість іонів, що бомбардують, досить високий і забезпечує достатню швидкість осадження.

Процес, під час якого матеріал розпилюваного катода-мішені переноситься без змінювання складу на підкладку, і при цьому не відбувається хімічних реакцій між розпилюваною речовиною і навколишнім газом, називають **фізичним катодним розпилюванням**. Якщо ж до аргону додатково ввести якийсь газ або речовину в пароподібному стані, з молекулами якого розпилювальний матеріал утворює хімічну сполуку, то має місце **реактивне (реакційне) катодне розпилювання**. Так, наприклад, оксиди можна отримувати у середовищі $Ar + O_2$, нітриди – в $Ar + N_2$ і т. д. Припустімо, потрібно виготовити плівкові елементи із сульфіду кадмію (CdS). Цей

напівпровідниковий матеріал легко фракціонується під час нагрівання. Плівки на його основі, як правило, мають значні відхилення від стехіометрії. Завдання вирішується досить просто, якщо катод-мішень для розпилювання буде виконаний із кадмію, а до робочого газу додано пари сірки. Формування хімічної сполуки може відбуватися на поверхні катода, у пролітному просторі й на поверхні підкладки під час конденсації.

Поряд із зазначеними раніше перевагами катодне розпилювання дає також змогу отримувати плівки на великій поверхні й рівномірні за товщиною. Пояснюється це тим, що розпилювання проводять не з точки, а з досить великої поверхні катода діаметром 300...350 мм. Нерівномірність за товщиною дорівнює $\pm(1...2)\%$, що особливо важливо для групового методу обробки підкладок і створення електронних виробів (наприклад, дисплеїв) з великою робочою поверхню.

На жаль, катодне розпилювання не є універсальним способом формування плівкових структур. Специфічні особливості процесу визначили деякі його недоліки. Порівняно високий **тиск залишкових газів** за робочого тиску аргону 1...10 Па призводить до збільшення концентрації кисню у плівках. За таких і вищих тисків скорочується довжина вільного пробігу частинок розпилюваної речовини, зменшується щільність потоку, що сприяє зменшенню швидкості розпилення і деякому забрудненню залишковими газами плівки, що зростає. Дійсно, за малої швидкості розпилення (див. вище розділ з термовакuumного випаровування й осадження, де йдеться про вплив залишкових газів) наявне співвідношення кількості атомів залишкових газів і частинок основної речовини на підкладці виявляється не на користь останніх.

Збільшення робочого тиску в системі є небажаним ще й тому, що досить велика кількість катодних електронів із високою енергією призводить до інтенсивного бомбардування поверхні підкладки та її розігріву. У результаті – зменшення швидкості осадження, а в низці випадків – і порушення поверхневого шару. Таким чином, напрошується висновок: необхідно знизити тиск робочого газу в системі з тліїм розрядом. Але це спричинить різке зменшення кількості електронів та іонів, зменшення інтенсивності розпилення і навіть його припинення! Де ж вихід із цього замкнутого кола?

Вихід був знайдений – використання **несамостійного газового розряду**. Як джерело електронів у подібних установках використовують допоміжний термокатод, який нагрівають до великої температури, після чого він випускає електрони за рахунок так званої **термоелектронної емісії**. До системи також вводять допоміжний анод (рис. 27). Для спрямованого руху потоку електронів і виникнення розряду в системі створюють тиск аргону 10^{-2} Па, а на термокатод і анод подають напругу 100...200 В. Починається іонізація частинок аргону прискореними електронами з термокатоду. Щоб отримати максимально можливу щільність струму в розряді й збільшити кількість (концентрацію)

іонів, за віссю розряду від термокатада до анода створюють поздовжнє магнітне поле, що змушує електрони рухатися по спіралі навколо осі розряду, в результаті чого ступінь іонізації підвищується в 10...100 разів порівняно зі звичайним катодним розпилюванням у тліїному розряді. Стан газу при цьому також називають плазмовим, а процес – **іонно-плазмовим**. Якщо тепер прикласти негативний потенціал 2...3 кВ до катода-**мішені**, позитивні іони витягуватимуться з **плазми** розряду й бомбардуватимуть поверхню мішені. Далі процес триває так само, як і під час катодного розпилювання.

Цей процес практично безінерційний, тобто, розпилювання миттєво припиняється після відключення напруги. Не вбудовуючи спеціальної системи електродів, можна здійснювати іонне очищення як підкладок, так і катода-мішені. Розглянута триелектродна система іонно-плазмового розпилення забезпечує гнучкість керування процесом. Швидкість осадження у кілька разів вища, ніж у разі катодного розпилювання у тліїному розряді.

Останнім часом з'явилися й інші вельми ефективні, але складніші розпилювальні системи, наприклад, магнетронні системи. Однак для першого знайомства, сподіваємось, цілком достатньо того, що ми розглянули вище.

3.3. Застосування кількох хімічних методів

Завершуючи розмову про способи формування тонких плівок для гібридних мікросхем, зауважимо, що хімічні методи використовують для цього набагато рідше, ніж фізичні. З деякими з хімічних методів ви ознайомилися у другому розділі (термічне окислення, піроліз тощо). До традиційних хімічних методів, що їх застосовують у мікроелектроніці, можна віднести також **хімічне й електрохімічне (електролітичне) осадження та анодне окислення**.

В основі **хімічного осадження** плівок лежать реакції відновлення металів із водних розчинів їхніх солей. Хімічним методом можна отримати плівки нікелю, срібла, золота, паладію та інших матеріалів на провідних і діелектричних підкладках.

На відміну від суто хімічних методів під час **електрохімічного осадження** плівки отримують з водних розчинів солей металів (електролітів) під дією електричного струму. Тому цей метод також називають **електролітичним** і **гальванічним**. Останній термін – від прізвища італійського фізика Гальвані. В електролітах молекули солей дисоціюють (розкладаються) на позитивні іони металів та негативні іони. У спеціальну ванну з електролітом занурюють два електроди. Катодом є підкладка з провідного матеріалу. Анод виготовлений з матеріалу, інертного щодо електроліту, або з матеріалу одержуваної плівки. На аноді негативно заряджені іони віддають зайві електрони – йде реакція окислення. На катоді-підкладці позитивні іони отримують відсутні електрони –

йде реакція відновлення з осадженням атомів металу. Так можуть бути виготовлені плівки міді, нікелю, золота, срібла та інші.

Анодне окислення – процес, що передбачає хімічну взаємодію металів з іонами кисню, які виділяються біля анода під час електролізу. На відміну від електролітичного осадження у цьому випадку плівка оксиду формується на аноді, роль якого виконує підкладка. **Анодування** засноване на електрохімічній реакції окислення металу киснем без розчинення анода. Стимулятором, дієвим фактором зростання **оксидної плівки** є електричне поле, що створене між катодом і анодом і сприяє перенесенню іонів кисню через шар оксиду, що зростає. Швидкість зростання пов'язана не лише з величиною напруги, а й зі складом електроліту і температурою проведення процесу. Плівки оксидів танталу (Ta_2O_5) й алюмінію (Al_2O_3), виготовлені у такий спосіб, дуже щільні, бездефектні й характеризуються високою електричною міцністю. Ці властивості дають змогу використовувати їх у **плівкових конденсаторах**, а також як ізолювальні шари для **багат шарового розведення** (в **багат шарових комутаційних платах**). Такі плати знаходять широке застосування у технології виготовлення ВІС (*БИС*), а точніше ВГІС (*БГИС*) – **великих гібридних інтегральних мікросхем**. За їх допомогою можливо електрично поєднати величезну кількість елементів (компонентів), що дуже складно зробити у звичайні способи через необхідність перетину металевих комутувальних шин.

3.4. Підкладки, резистори і конденсатори для тонкоплівкових інтегральних схем

Тонкоплівкові резистори і тонкоплівкові конденсатори можна виготовити методами, описаними у попередньому розділі. Але перш ніж говорити про них, коротко зупинімося на простіших, але не менш важливих складових частинах та елементах **гібридних інтегральних мікросхем** (ГІС).

Підкладка в ГІС відіграє дуже важливу роль і є її основою, вона ізолює елементи один від одного, слугує для відведення тепла. Підкладка багато в чому визначає електрофізичні та експлуатаційні параметри схеми, стабільність і надійність її роботи. Звідси впливає низка вимог до підкладок ГІС, у разі виконання яких ми забезпечимо високу якість мікросхем.

Із глави I випливає, що підкладка ГІС повинна бути з діелектричного (ізоляційного, непровідного) матеріалу, що має комплекс необхідних властивостей. Наприклад, **термостійкість** забезпечує можливість нагрівання підкладки до 500...600 °С. Такі температури необхідні для формування тонкоплівкових елементів, а також можуть виникнути в процесі роботи вже готових мікросхем у радіоелектронній апаратурі. При цьому **теплопровідність** матеріалу повинна бути достатньо високою, щоб унеможливити перегрівання

елементів мікросхеми і вихід її з ладу. Особливо ця вимога важлива для ІС високого ступеня інтеграції і великої щільності упаковки, а також досить потужних мікросхем з інтенсивним виділенням тепла. Не менш важлива **механічна міцність** підкладок. І справа не лише в тому, що з міцними виробами простіше працювати, не побоюючись поломки і розтріскування. Механічна міцність необхідна для роботи мікросхем в екстремальних умовах (за підвищених температур, ударних та інших навантажень, наприклад, в авіаційній та космічній техніці).

Гібридна мікросхема є багатошаровою конструкцією, виконаною з матеріалів з неоднаковими **температурними коефіцієнтами лінійного розширення** (ТКЛР). Згадаймо біметалічну пластину, що складається з двох шарів різнорідних металів із різними ТКЛР. Вона під час нагрівання вигинається в напрямку того шару, ТКЛР якого нижчий. Аналогічне відбувається і з багатошаровою конструкцією ГІС: підкладка деформується або розтріскується, не витримавши внутрішніх напружень, що виникли. Отже, ще однією вимогою під час вибору підкладок є забезпечення максимально близьких величин ТКЛР матеріалу підкладок і осаджених плівок.

Безпористість підкладок дасть змогу унеможливити високу газонасиченість, виділення цих газів під час нагрівання, протікання побічних хімічних взаємодій з матеріалом плівки.

Хімічна стійкість підкладок забезпечує свободу вибору реагентів, необхідних для фотолітографічного та інших способів формування ГІС, пов'язаних з хімічними процесами.

Шорсткість поверхні підкладки (величина мікронерівностей), як у випадку напівпровідникових пластин, є одним із критичних параметрів тонкоплівкових елементів (див. рис. 4), що мають товщину 200...10000 Å (0,02...1,0 мкм). Нерівномірна товщина тонких плівок може спричинити концентрацію електричного струму у вузьких місцях, локальне (місцеве) перегрівання і несправності елемента.

Позаяк за одним із методів виготовлення тонкоплівкових елементів передбачається застосування масок, тобто трафаретів, які досить щільно прилягають до поверхні підкладки, необхідна висока її **площинність**. Інакше осаджений матеріал потраплятиме на підкладку не лише через спеціальні прорізи в масці, виконані відповідно до конфігурації тонкоплівкових елементів, а й крізь зазор між маскою і підкладкою. При цьому геометричні розміри елементів спотворюються і змінюються їх електричні параметри.

Наразі немає універсального матеріалу підкладок, який повною мірою задовольняє ці різноманітні вимоги. Тому матеріал вибирають з огляду на специфіку виготовлення та роботи мікросхем.

Так, **керамічні підкладки** на основі оксидів різних металів (Al_2O_3 , BeO та інші) мають комплекс необхідних властивостей, серед яких вирізняється висока

теплопровідність. Це дає змогу використовувати їх у схемах НВЧ (СВЧ), тобто на надвисоких частотах, що працюють зі значним виділенням тепла. Теплопровідність кераміки в 200...250 разів вище за скло. Однак кераміка дуже пористий, отже, газонасичений матеріал.

Скляні підкладки мають малу теплопровідність і крихкість, але водночас і найбільш гладку поверхню (нерівності менші за 100 Å), що дуже важливо під час виготовлення плівкових елементів завтовшки до тисячі ангстремів.

Найбільшого поширення набули підкладки із **ситалу**. На відміну від скла (аморфної речовини, що не має строгого порядку в розташуванні атомів) ситал – це матеріал, який має як аморфну, так і кристалічну фазу у своїй структурі. Кристали в ситалі мають розмір близько 0,01 мкм і займають 50...95% загального об'єму матеріалу. Кристалізація ситалу відбувається за спеціальних умов термічної обробки, що і надає йому зрештою низку чудових властивостей. Ситал удвічі-втричі міцніший за скло, непористий, газонепроникний і має малу газовіддачу, хімічно стійкий у кислотах. Ситал витримує перепади температур від мінус 60 до 700 °С.

Тонкоплівкові провідники слугують для з'єднання окремих елементів між собою відповідно до заданої електричної схеми.

Контактні майданчики призначені для приєднання до них виводів компонентів, зовнішніх виводів мікросхеми та контролю її електричних параметрів. Висока електропровідність, надійна адгезія (зчеплення з підкладкою), здатність до якісних зварювань і пайки, інертність щодо зовнішніх хімічних та інших факторів – далеко не повний перелік неодмінних вимог, що їх мають задовольняти тонкоплівкові провідники та контактні майданчики.

Найбільше застосовують мідь, золото і алюміній. Через індивідуальні особливості кожен із цих матеріалів має певні переваги і недоліки. Так, вирізняючись високою електропровідністю і здатністю до зварювання і пайки, мідь має низьку корозійну стійкість – метал руйнується внаслідок хімічної та електрохімічної взаємодії з киснем навколишнього середовища. Для захисту від корозії провідники з міді покривають плівкою золота. Однак не слід забувати, що золото має дуже високий коефіцієнт дифузії, унаслідок чого в разі підвищених температур відносно легко проникає у плівки, змінюючи таким чином їхні електрофізичні властивості. Крім того, золото з алюмінієм у присутності кремнію утворює пухку сполуку під назвою «пурпурна чума». Мідь і золото мають слабу адгезію до поверхні підкладки, тому необхідно попередньо наносити тонкий **адгезійний підшар** із хрому, титану, ніхрому та інших речовин.

На практиці дуже часто використовують провідники з алюмінію, який має хорошу електропровідність, корозійну стійкість (на поверхні утворюється

тонкий захисний шар Al_2O_3) та адгезію до діелектричних підкладок. Однак мала твердість і певні труднощі під час пайки обмежують його застосування.

Тонкоплівковий резистор (опір) є смужкою з плівки на поверхні підкладки між двома плівковими провідниками (рис. 28а). Як відомо, опір будь-якого провідника-резистора завдовжки l , завтовшки h і завширшки b із заданого матеріалу з питомим опором ρ може бути представлений формулою $R = \rho l / (b \cdot h)$. Для їх виготовлення використовують найрізноманітніші матеріали: метали (хром, тантал, вольфрам, реній тощо), сплави металів та їх суміші.

Нехай читача не дивує, що з металів можна зробити резистор. Як провідники метали проявляють себе в моноліті (шматку, бруску, прутку). У тонкій плівці, як ми вже відзначали на початку цієї глави, загальний опір $R_{\text{заг}}$ залежить не лише від властивостей матеріалу, а й від дефектів структури, частина яких значна. Саме вони й визначають опір резистивної плівки. При цьому за рахунок дефектності плівок можна створити не лише низькоомні резистори, а й високоомні, опір яких у десятки разів більший.

Для отримання високоомних резисторів часто застосовують сплави, наприклад, **металосиліцидні**. Назва свідчить про те, що в їх складі є метали і кремній (*silicium*). Кремній, як відомо, є напівпровідником, і його електричний опір більший, ніж у металів, але менший, ніж у діелектриків. Додавання певної кількості кремнію дають змогу збільшити опір металів у кілька десятків разів.

Ще більш значного збільшення опору досягають шляхом змішування металів з діелектриками, наприклад із різними кераміками на основі оксидів. Так, із **керметів** (кераміка + метал) на основі Cr і SiO можна виготовити резистори з опором в сотні й тисячі разів більшим, ніж із чистого хрому.

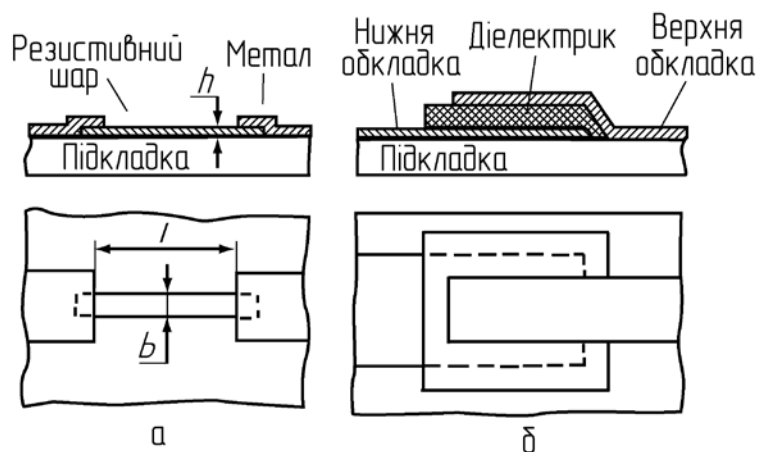


Рис. 28. Конструкції тонкоплівкових резистора (а) і конденсатора (б)

Так, цілеспрямовано змінюючи структуру і склад плівки, збільшуючи кількість структурних дефектів, що підвищують розсіювання електронів провідності, можна отримати опір резисторів від декількох омів до 100 кОм.

Тонкоплівкові конденсатори мають конструкцію з двох плівкових металевих обкладок і плівкового діелектрика між ними (рис. 28б).

Електроємність плоского конденсатора залежить від площі взаємного перекриття обкладок (пластин) – S , відстані між ними (товщини діелектрика) – d і діелектричної проникності цього діелектрика ϵ за відомою формулою

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

де ϵ_0 – електрична стала.

Отже, ємність визначається не лише геометричними параметрами S і d , а й властивостями діелектрика, що поряд із великим значенням ϵ повинен витримувати великі електричні навантаження, мати мало дефектів у структурі, надійну адгезію до підкладки й обкладок, бути стійким до температури і вологи.

Для виготовлення тонкоплівкових конденсаторів використовують оксиди кремнію (SiO і SiO_2), германію (GeO), алюмінію (Al_2O_3), танталу (Ta_2O_5), борсилікатне ($n\text{SiO}_2 \cdot m\text{B}_2\text{O}_3$) та алюмосилікатне ($n\text{SiO}_2 \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3$) скла. Різноманітність діелектриків пояснюється тим, що неможливо виконати всі вимоги, використовуючи тільки один матеріал.

Як відомо, найбільш характерною і стійкою сполукою кремнію з киснем є **діоксид** SiO_2 . Однак за температури 1250°C і надлишку кремнію можливий синтез **монооксиду кремнію** SiO за реакцією



Діелектричну плівку на основі SiO можна отримати термовакuumним осадженням за температури випаровування $1200 \dots 1300^\circ\text{C}$. Однак речовина випаровується нерівномірно, з викидом мікрочастинок, що погіршують характеристики конденсаторів. Крім того, через порівняно мале значення ϵ не можна отримати конденсатори великої ємності. Електрична міцність таких конденсаторів також невелика ($10 \dots 100 \text{ кВ/мм}$).

Велику ємність і пробивну напругу мають конденсатори на основі SiO_2 . Проте, їх виготовлення пов'язане з певними труднощами, зумовленими високою температурою випаровування (1700°C) і порушенням стехіометрії. Саме ця обставина змушує технологів застосовувати реактивне катодне чи іонно-плазмове розпилювання або швидкісне електронно-променеве випаровування.

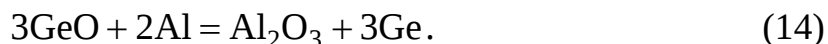
Оксид германію GeO порівняно з SiO має кращі діелектричні властивості ($\epsilon = 10 \dots 12$), що дає змогу за тієї самої товщини діелектрика отримувати у декілька разів більшу ємність. Та й процес випаровування менш складний і потребує відносно невисоких температур ($800 \dots 850^\circ\text{C}$). Однак плівки GeO за адгезією, механічною та електричною міцністю поступаються плівкам SiO .

Оксиди алюмінію і танталу мають комплекс необхідних властивостей і досить перспективні для мікроелектроніки, але їх недоліком слід вважати

специфіку виготовлення – анодне окислення або реактивне катодне розпилення, адже перший спосіб потребує великої кількості чистих хімічних реактивів, ретельного відмивання підкладок від них і важко вписується в загальну технологічну схему виготовлення, а другий – досить складний.

Останніми роками значного поширення набуло боро- і алюмосилікатне скло. Маючи невисоке значення відносної діелектричної проникності ϵ , скло разом з тим є основою щільних, бездефектних плівок, отриманих одним з найпростіших методів – термовакуумним осадженням. Усе це і дає змогу збільшити ємність конденсаторів в 2...3 рази за рахунок зменшення товщини діелектричного шару.

Наша розповідь про тонкоплівкові конденсатори буде неповною, якщо не згадати про матеріал обкладок, який повинен мати високу електропровідність, хімічну стійкість і малий коефіцієнт дифузії щодо діелектрика. Останні дві вимоги особливо важливі. Наприклад, за температур понад 200 °C у конденсаторах з GeO можлива хімічна взаємодія діелектрика з обкладками:



Втрачаючи кисень, GeO перетворюється на напівпровідник Ge, ізоляційні властивості якого гірші. Крім того, окислення обкладок з Al збільшує товщину діелектрика і зрештою зменшує ємність конденсатора.

Однак саме алюміній з його здатністю утворювати тонку захисну плівку Al_2O_3 на поверхні й межі розділення між шарами широко використовується для виготовлення конденсаторів. Золото і мідь за великої електропровідності мають високу дифузійну здатність стосовно багатьох діелектричних плівок, що призводить до короткого замикання і несправності конденсатора.

Виготовлення **тонкоплівкових індуктивностей** не становить особливих технологічних труднощів. Методами вакуумного напилення, катодного розпилення або електрохімічного осадження матеріалів з високою провідністю можна отримати одно-, дво- або тришарову структуру, що має форму круглої і прямокутної спіралі (рис. 29). Товщина провідників дорівнює 0,25...0,5 мкм, мінімальна ширина – 10...30 мкм. Однак застосування таких індуктивностей є обмеженим через доволі великі розміри і малу величину індуктивності. Наприклад, кругла індуктивність із діаметром спіралі 10 мм і кількістю витків 100 має індуктивність лише 15 мкГн (п'ятнадцять мікрогенрі). І при цьому ступінь інтеграції сучасних мікросхем $K = 4...5$ і розміри елементів менші за один мікрометр! Тут ще є над чим поміркувати розробникам мікросхем і технологам.

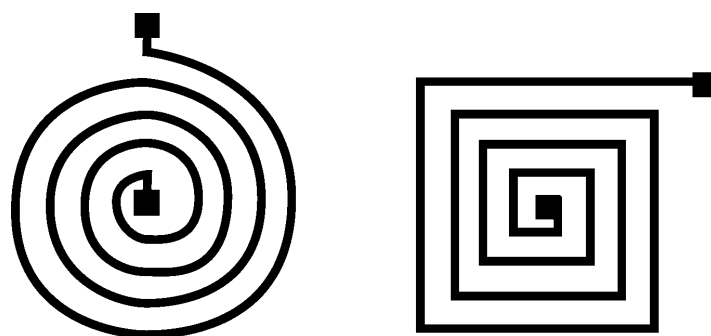


Рис. 29. Конфігурації тонкоплівкових індуктивностей

Останніми роками широко застосовують радіопристрої-позначки (*RFID*) для ідентифікації товарів у магазинах, проїзних квитків на транспорті, посвідчень тощо. Ці пристрої, як правило, складаються з мікросхеми (чіпа) та радіоантени у вигляді тонкоплівкової індуктивності на полімерній підкладці.

Менше застосування знайшли тонкоплівкові діоди і транзистори. Незважаючи на те, що давно доведено принципову можливість виготовлення тонкоплівкових активних елементів, мікроелектронна промисловість не відразу спромоглася налагодити їх випуск. Це пов'язано з тем, що надзвичайно тонкі плівки ($50\ldots 200 \text{ \AA}$) часто відрізняються нестабільністю і низьким відтворюванням параметрів елементів. Але наразі **тонкоплівкові транзистори** почали застосовувати в деяких електронних приладах і пристроях (наприклад, рідинно-кристалічних дисплеях з активними *TFT*-матрицями на тонкоплівкових транзисторах).

Підбиваючи підсумок сказаного, доходимо висновку, що **тонкоплівкова технологія** вельми перспективна для виготовлення пасивної частини мікросхем, що складається з прецизійних (високоточних) резисторів і конденсаторів, струмопровідних доріжок і контактних майданчиків. Однак, треба мати на увазі, що прогрес у технології істотно змінює ситуацію і щодо активних елементів.

3. 5. Виготовлення топології тонкоплівкових мікросхем

Тепер ми досить чітко уявляємо, які елементи мікросхем можна виконати з тонких плівок, яка структура цих елементів і які матеріали для них потрібні. Усе це є основою виконання креслень, на яких повинні бути зображені не лише потрібні елементи, об'єднані відповідно до заданої електричної схеми в конкретний мікроелектронний виріб, а й пошарова **топологія**, тобто, конфігурація і розташування кожного тонкоплівкового шару із зазначенням матеріалу, з якого його виконують. У поєднанні з обраним методом формування тонкоплівкових структур цей комплект креслень є основою

технології виготовлення (технологічної реалізації) пасивних елементів гібридних інтегральних мікросхем.

Одним із давно відомих і доступних методів формування тонкоплівкових елементів є **метод вільних масок**, за якого конфігурацію елементів на підкладці отримують напиленням через спеціальний **трафарет**, який є моно- або біметалічною пластиною з прорізами, що відповідають формам і розташуванню елементів, і негативно відображає топологію шару плівкового елемента. **Трафарети**, або **маски**, існують незалежно (тобто вільно) від підкладки, і через кожен з них можна сформувати кілька сотень однакових шарів. Вони повинні досить щільно прилягати до поверхні підкладки, не допускаючи підпилення матеріалу в зазор між ними і спотворення геометричних розмірів елементів, що призводять до змінювання електричних параметрів. Що менша товщина маски, то менше затінення під час напилення від потоку речовини, яка падає під кутом до поверхні підкладки, більш чіткий край і більша точність виготовлення елементів. Крім того, матеріал масок повинен мати низьке значення пружності пари за температури 400...450 °С у вакуумі, де тиск дорівнює 10^{-4} Па, що забезпечує чистоту одержуваних плівок. Інакше за згаданих температур матеріал маски випаровуватиметься, потраплятиме на підкладку, забруднюючи таким чином нарощувану плівку. Ці вимоги задовольняють вольфрам, молібден, нікель, бронза (мідний сплав) та інші метали. Найбільшого поширення набули маски завтовшки 100...150 мкм на основі берилієвої бронзи, покриті тонким шаром нікелю (10...15 мкм), що забезпечує точність виконання рисунка (прорізів).

Виготовляють такі маски (рис. 30) фотохімічним способом (за допомогою фотолітографії). Для цього на ретельно очищену і знежирену заготовку з бронзи з обох боків наносять негативний фоторезист і крізь фотошаблони **експонують ультрафіолетовим світлом** (рис. 30, а). Після проявлення й кристалізації в місці майбутнього прорізу (вікна) утворюються ділянки фоторезисту, що захищають поверхню заготовки (рис. 30, б). Далі проводять електрохімічне нанесення нікелю (рис. 30, в), потім видаляють фоторезист і травлять заготовку через вікна в нікелі (рис. 30, г, д). Травильник має витравлювати лише бронзу (бути селективним), не взаємодіючи з нікелем.

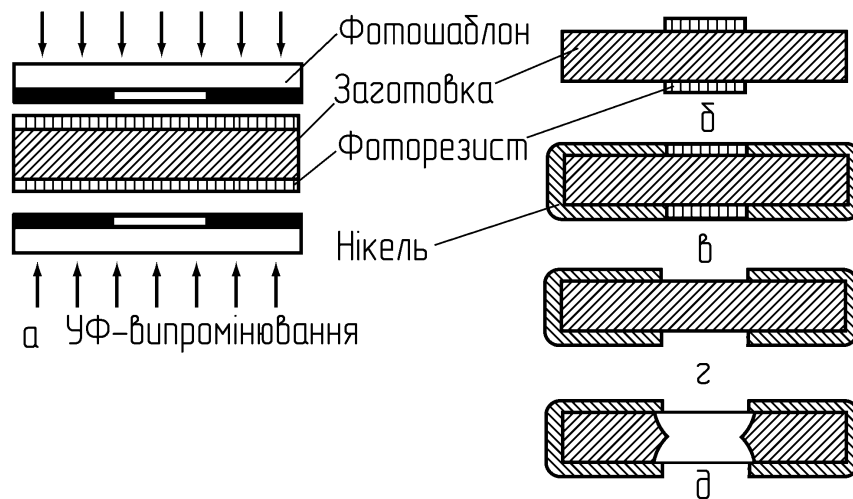


Рис. 30. Фотохімічний спосіб виготовлення масок

Через виготовлені у такий спосіб маски послідовно напильють тонкоплівкові шари, створюючи пасивну частину гібридних мікросхем. Познайомимосся з тим, як це робиться, на прикладі умовної мікросхеми, що складається з двох резисторів, конденсатора, струмопровідних доріжок і контактних майданчиків (рис. 31).

Підкладку із ситалу спочатку очищують хімічним травленням у реактивах, потім сушать в очищеному аргоні й обробляють потоком швидких іонів у робочій камері установки вакуумного напильнення, аби остаточно очистити поверхню. Далі крізь маску М1 з прорізами, що відповідають конфігурації резисторів, напильють резистивний матеріал, необхідний для отримання заданих значень резисторів, а крізь маску М2 – тонкоплівкові провідники, контактні майданчики і нижню обкладку конденсатора. Після цього крізь маску М3 наносять діелектрик конденсатора, а крізь маску М4 – його верхню обкладку. Формування структури завершується напильненням крізь маску М5 діелектричного шару-захисту від зовнішніх впливів і механічних пошкоджень.

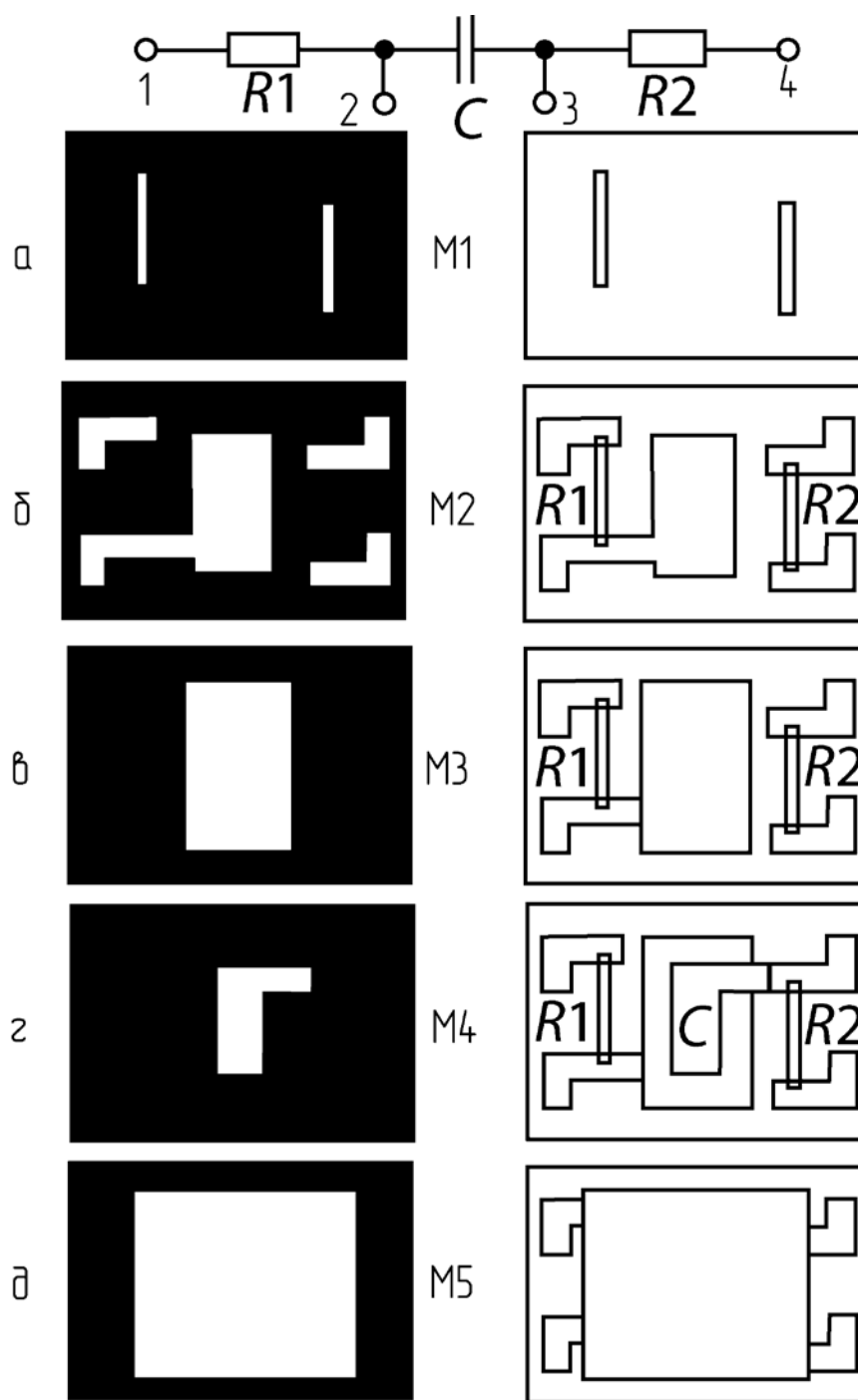


Рис. 31. Вільні маски й отримана за їх допомогою топологія тонкоплівкової мікросхеми

Метод вільної маски, попри всі його переваги (багаторазове використання, висока продуктивність, економічність тощо), має і низку суттєвих недоліків, що не дає змоги рекомендувати його для виготовлення мікросхем з малими і дуже точними розмірами елементів і високим ступенем інтеграції. До таких недоліків слід віднести, насамперед, нещільне прилягання масок до поверхні підкладок, підпилення під маску, отримання нечіткого (розмитого) краю тонкоплівкових елементів, спотворення їх геометричної форми.

Для виготовлення прецизійних елементів мікросхем частіше використовують **метод контактної маски** і **метод подвійної фотолітографії**.

Контактна маска, на відміну від вільної, не має мікрозазорів між підкладкою і поверхнею маски, тобто є невід'ємною частиною підкладки. Ця маска — одноразового використання, виготовлена вакуумним осадженням тонкої металевої плівки або нанесенням фоторезисту.

Розглянемо метод контактної маски на прикладі виготовлення тонкоплівкового резистора (рис. 32).

На очищену діелектричну підкладку напилюють шар міді завтовшки 1000 Å. Далі відбуваються всі фотолітографічні операції (див. главу II), потрібні в цьому випадку для формування одношарової маски: нанесення, висушування, експонування крізь фотошаблон, проявлення та задублення фоторезисту. Отримана фоторезистивна маска дає змогу провести локальне (місцеве) травлення плівки міді, в результаті чого після зняття фоторезисту утворюється контактна металева маска-трафарет. Через неї потім напилюють резистивний матеріал, надлишки якого видаляють механічним шляхом після усунення мідної маски селективним травленням.

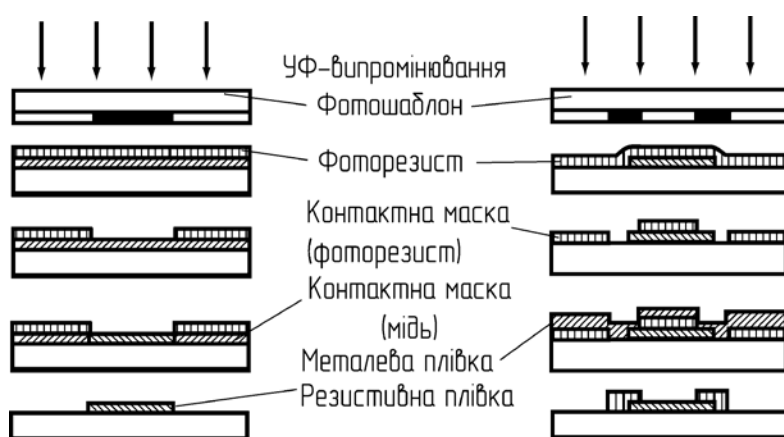


Рис. 32. Ілюстрація методу контактної маски на прикладі виготовлення тонкоплівкового резистора

На виготовлену у такий спосіб резистивну смужку знову наносять шари фоторезисту, проводять фотолітографію й після зміцнення отримують термостійку захисну фоторезистивну маску, крізь яку надалі й напилюють контактні майданчики. Після видалення вже не потрібної фоторезистивної маски з напиленням на неї матеріалом контактних майданчиків на підкладці залишаються сформовані резистори.

Метод подвійної фотолітографії (рис. 33) унеможливорює застосування масок-трафаретів, через які напилюють тонкі плівки певної конфігурації.

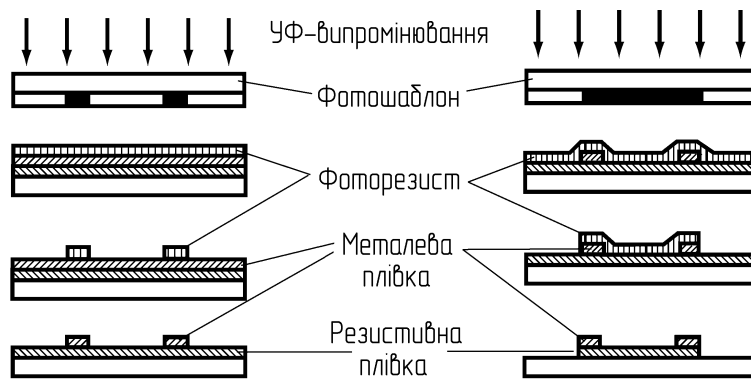


Рис. 33. Метод подвійної фотолітографії

Виготовлення резистора починається з послідовного напилювання суцільних плівок резистивних і провідникових матеріалів на поверхню очищеної діелектричної підкладки. У результаті першої фотолітографії формуються контактні майданчики. Після вторинного нанесення фоторезисту і проведення другої фотолітографії по резистивному шару отримують резистори, форма яких дещо відрізняється від попередніх. У цьому методі дуже важливий підбір травильника з різко вираженими селективними властивостями. Наприклад, під час травлення матеріалу контактних майданчиків травильник має бути практично інертний щодо матеріалу резистора й навпаки.

Цей метод широко застосовують під час виконання точних, а також досить складних, ажурних рисунків мікросхем.

Розглянуті методи не конкурують між собою, а доповнюють один одного. Так, виготовляючи мікросхеми з резисторами і конденсаторами, подвійну фотолітографію застосовують лише для формування резисторів. Складові частини конденсаторів і захисний шар напилюють крізь вільні маски.

Ми розглянули випадки формування тонкоплівкових елементів, коли технологічна точність їх виготовлення цілком задовольняє і збігається з необхідною точністю мікросхем. Або, інакше кажучи, функціональна точність і технологічна відтворюваність від операції до операції такі, що не потрібно жодних додаткових заходів щодо їх поліпшення. Однак в умовах заводу сучасні технологічні процеси виготовлення тонкоплівкових ГІС не дають змоги отримувати вихідні параметри мікросхем з високою точністю. Наприклад, тонкоплівкові резистори мають розкид опорів $\pm (2...10) \%$, тоді як часто потрібний розкид менший за 1%. Цього досягають пригонкою елементів, яка є необхідним та економічно обґрунтованим процесом.

Не зупиняючись на різноманітті методів пригонки, відзначимо лише, що **пригонка резисторів** (найчастіше коректують саме їхній опір) може бути **груповою та індивідуальною**.

У разі **групової пригонки** параметри всіх елементів на підкладці змінюються одночасно. Наприклад, підвищити опір усіх резисторів можна

шляхом часткового травлення резистивних смужок або нагрівання їх в окисній атмосфері, в результаті чого зменшується їх товщина h . Знижують опір гальванічним нарощуванням, отже, збільшенням товщини резистора. Крім того, не змінюючи геометричної форми елемента під час нагрівання у вакуумі або інертному газі, можна зменшити опір за рахунок рекристалізації матеріалу резистора.

Індивідуальна пригонка пов'язана зі зміною конфігурації резистора, видаленням частини резистивної плівки і зменшенням поперечного перерізу резистора. Найбільш економічним і продуктивним засобом індивідуальної пригонки (до $\pm 0,1\%$), що знайшов широке застосування у виробництві, є лазерний метод.

Формування пасивної частини мікросхем за допомогою тонких плівок – далеко не єдиний спосіб. Якщо під час виготовлення не потрібні малі допуски і велика точність, а натомість необхідні пасивні елементи великих значень і потужності, доцільніше застосовувати товстоплівкові технології, про які йтиметься у наступному розділі книжки.

4. ТОВСТОПЛІВКОВІ ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

Гібридні інтегральні мікросхеми (ГІС) можна виконати її **на основі товстих плівок**, як було зазначено у розділі І. Товщина їх більше ніж 1 мкм і сягає 50 мкм за ширини смужок 50 мкм і менше. Однак поняття тонко- і товстоплівкова технологія значною мірою характеризують не товщину плівок, а спосіб їх нанесення та використані матеріали. Для виготовлення товстих плівок використовують давно відомий **трафаретний друк**, що дає змогу відтворювати графічне зображення або текст за допомогою друкованої форми (трафарету), через яку на друкований матеріал протискують фарбу спеціальною дощечкою. У цьому випадку **трафарет** – це пристосування у вигляді пластини з металу, дерева, картону чи іншого матеріалу з отворами (прорізами), через які фарбу наносять на будь-яку іншу поверхню. Саме так стародавні єгиптяни розфарбовували стіни споруд, усипальниць, гончарні вироби. Наразі різновиди цього методу широко використовують для виконання рисунка на тканинах, папері, картоні, склі, під час розмноження графічних творів, рекламних плакатів, виготовлення упаковок, шкал, написів тощо.

Для виробів мікроелектроніки **формування товстих плівок засноване на механічному нанесенні відповідних паст** (суміш скляного порошку, органічної сполучної речовини і добавок, що забезпечують як визначені електричні властивості плівок, так і необхідну консистенцію – густоту, в'язкість, текучість) на поверхню діелектричної підкладки через спеціальний трафарет. Після витримки за заданої температури протягом певного часу елемент ГІС набуває необхідних властивостей і форми. Залежно від типу добавок (метали, оксиди), а також від співвідношення їх і скляного порошку отримують найрізноманітніші типи паст, за допомогою яких можна виготовити практично всі види пасивних елементів ГІС. Крім того, існують **пасти припойні**, для створення міжшарової ізоляції, захисних покриттів та інші, про які докладніше розповімо у наступних розділах.

Донедавна більш широко застосовували **тонкоплівкову технологію**, тому що вона давала можливість отримувати точнішу геометрію елементів і кращі електричні характеристики. Це цілком природно, тому що в мікроелектроніці тонкоплівкова технологія має більший період розвитку. Її методи досліджені й відпрацьовані ретельніше, ніж товстоплівкові. Однак ця обставина не може слугувати приводом для зневажливого ставлення до товстих плівок. Поряд із характеристиками, близькими до параметрів тонкоплівкових мікросхем, товстоплівкові мають й очевидні переваги.

Товсті плівки здатні витримувати більш високий вплив електричного струму, й тому їх краще використовувати у потужних схемах. Мікроелектронні пристрої на їх основі можуть працювати за винятково важких умов (від мінус

180 до 300 °C) і різкого перепаду температур, чого не витримують тонкоплівкові схеми.

Товстоплівкова технологія простіша, її трудомісткість утричі нижча, вона дешевша і не потребує висококваліфікованого персоналу, менш чутлива до забруднень і пилу, які вигорають за високих температур випалювання і впікання, що сягають 800...1000 °C. Крім того, товщина плівок у багато разів перевищує розміри забруднювальних частинок. Це дає змогу, з одного боку, збільшити вихід якісних мікросхем до 80...100%, з іншого – знизити витрати на створення особливо чистих кімнат, боксів, камер, які широко застосовують у виробництві інших видів мікросхем.

Разом із тим, не слід вважати товстоплівкову технологію абсолютно придатною та універсальною.

Обидва види технологій не стільки конкурують, скільки доповнюють один одного. Ба більше, останніми роками починають дедалі ширше застосовувати різні варіанти поєднання товстих і тонких плівок, що дає змогу повніше використовувати їхні переваги.

4.1. Конструкція ГІС

Коли йдеться про якийсь виріб, то насамперед характеризують особливості його конструкції (будову, взаємне розташування частин, їх взаємодію). Далі переходять до оцінки матеріалів, з яких виконано цей виріб, і завершують його опис розглядом методів виготовлення (технології), доцільності застосування тих чи інших способів. Ми не порушуватимемо загальноприйнятої схеми й почнемо знайомство з товстоплівковими ГІС із конструкції.

Найпоширеніша **конструкція гібридних товстоплівкових схем** – це підкладка з кераміки з пасивними елементами й активними компонентами, що має необхідну кількість виводів, закрита з одного боку металевим ковпачком, з іншого залита **компаундом** – ізоляційним матеріалом з низькою температурою плавлення (рис. 34).

Як і в тонкоплівкових ГІС, **діелектрична підкладка** – основа конструкції товстоплівкових схем. На ній елементи формуються і з'єднуються відповідно до заданої електричної схемою. Із вимог до підкладки, перелічених у розділі III, особливу увагу приділяють високій міцності, високій теплопровідності, а також термічній і хімічній стійкості.

Теплопровідність, як відомо, дуже необхідна під час виготовлення потужних мікросхем високого ступеня мініатюризації з великою розсіювальною потужністю. Саме такими здебільшого є товстоплівкові ГІС.

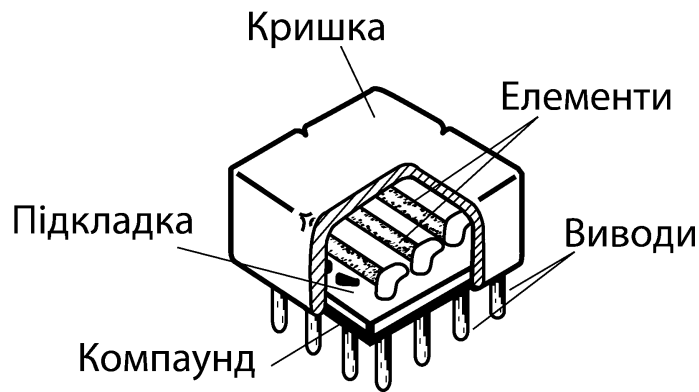


Рис. 34. Конструкція гібридної товстоплівкової мікросхеми

Позаяк рисунок мікросхеми (конфігурація елементів та їх розташування) створюється продавллюванням паст через отвори у трафареті, дуже важлива **механічна стійкість** підкладок і здатність витримувати деяке докладене зусилля.

Для закріплення рисунка та забезпечення елементам необхідних електрофізичних властивостей підкладку піддають багаторазовому температурному впливу. (Схема технологічного процесу виготовлення товстоплівкових ГІС представлена на рис.35.) Це позначається на **термостійкості** підкладок. А якщо згадати, що за температури впікання $800...1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ компоненти пасту стають агресивними, то дуже важливою вимогою виявиться **хімічна стійкість** підкладок, яка ще більше необхідна, коли під час формування елементів мікросхем застосовують фотолітографію.

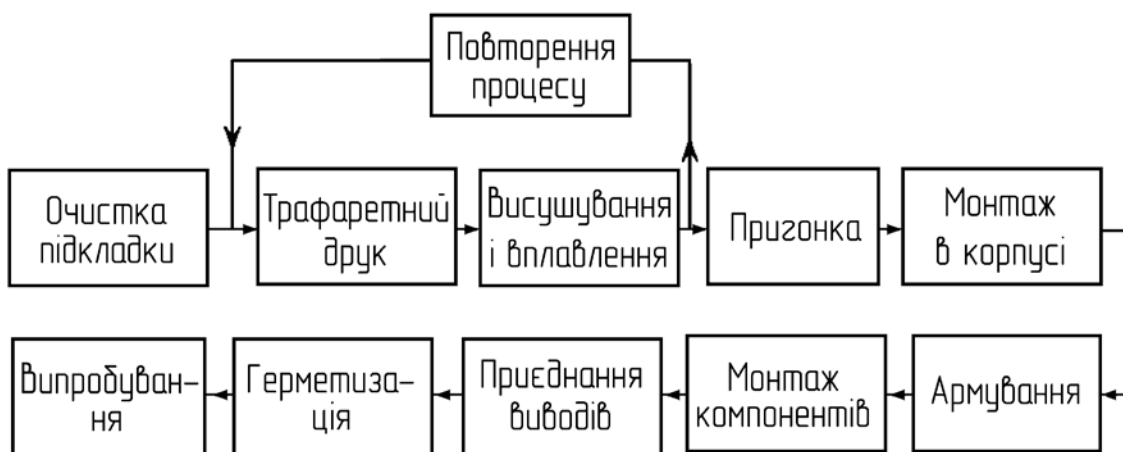


Рис. 35. Схема технологічного процесу виготовлення товстоплівкових ГІС

До сказаного слід додати, що необхідно мати **мінімальне газовиділення**, **ідентичність температурного коефіцієнта лінійного розширення** матеріалу підкладки і сформованої плівки, щоб уникнути розриву останньої, **площинність** поверхні підкладки та низку інших властивостей, без яких неможливо отримати високоякісну мікросхему.

Усі ці вимоги не може задовольнити жоден матеріал. Наприклад, оксид берилію має високі теплопровідні властивості, але міцністю поступається оксиду алюмінію. Маючи хороші діелектричні властивості, фарфор разом із тим менш теплопровідний, аніж більшість матеріалів, і, крім того, міцність матеріалу досить низька. Підкладки зі скла і пластиків не витримують високих температур і не мають достатньої теплопровідності. З огляду на сказане найбільшу перевагу наразі надають **керамічним підкладам**, що містять 94...96% оксиду алюмінію і 4...6% оксидів кремнію, кальцію, магнію та інших елементів. Саме ці з'єднання забезпечують на середньому рівні практично всі необхідні властивості і сприяють надійній адгезії товстих плівок до підкладки. Для товстоплівкових схем застосовують підкладки у 5...10 разів менш гладкі, ніж для тонкоплівкових. Пояснюється це підвищенням адгезії товстоплівкових елементів до кераміки за більш високої шорсткості поверхні (0,5...0,75 мкм).

Перш ніж формувати елементи на поверхні підкладок останні ретельно відмивають у спеціальних ваннах із мильним розчином. Після промивання у проточній дистильованій воді та відпалювання у печах з температурою 600 °С підкладки надходять на наступну операцію технологічного процесу.

4.2. Виготовлення елементів та монтаж ГІС

Вихідні матеріали для виготовлення товстоплівкових елементів мікросхем прийнято називати **пастами**. Вони являють собою суспензії порошків благородних металів, оксидів і скла в органічних сполучних речовинах. Нагадаймо, що **суспензія** – це суміш двох чи більше речовин, з яких одна, наприклад тверда речовина (тверда фаза) розподілена у вигляді найдрібніших частинок в іншій – рідині (рідкої фазі) – у підвішеному стані. Наприклад, каламутна вода, у якій дрібні частинки глини, мулу перебувають у підвішеному стані, – суспензія.

У пастах тверда фаза становить 75% за обсягом, решта 25% – рідка фаза. Залежно від призначення пасти тверда фаза включає компоненти, що визначають електрофізичні параметри (електропровідність чи опір, діелектричні властивості, можливість пайки або зварювання), а також порошок легкоплавкого скла (до 5%). Останній необхідний для забезпечення надійного зчеплення плівки з підкладкою після відпалу. Під час впікання компоненти скляного порошку (оксиди кремнію, бору, вісмуту, кадмію та ін.) тією чи іншою мірою взаємодіють із поверхнею підкладки, створюючи проміжний шар і покращуючи адгезію.

До складу рідкої (сполучної) фази входять органічні розчинники (17%) і смолоподібні речовини (3,5%), необхідні для отримання пасти певної густоти і в'язкості. Текучість пасти і її змочувальні властивості регулюють за допомогою введення спеціальних рідких компонентів (1,5%). Крім того, до паст додають до

3% поверхнево-активних речовин (ПАР), дуже необхідних для кращого змочування основного порошку (металу або оксидів) і поверхні підкладки розплавленим склом.

Залежно від призначення розрізняють **пасти провідникові, припойні, резистивні, діелектричні і для створення багатошарової комутації**.

Основним компонентом **провідникових паст**, призначених для виготовлення з'єднань між елементами схеми, контактних майданчиків, виводів резисторів і обкладок конденсаторів є на сьогодні благородні метали – золото, платина, паладій і срібло. Це зумовлене тим, що за високих температур впікання та застосування хімічно активного скла багато інших металів і сплавів, що взаємодіють із компонентами пасти, утворюють хімічні сполуки і значною мірою змінюють електрофізичні властивості товстих плівок. У низці випадків відбувається розчинення металів у рідкому припої.

Найбільш поширеними для виготовлення товстоплівкових ГІС є пасти на основі срібла і системи паладій – срібло. Міцність зчеплення з підкладкою за низьких температур впікання (500...850 °С) у поєднанні з високими електрофізичними параметрами дає змогу використовувати їх для широкої номенклатури виробів. Крім того, це найдешевші пасти порівняно з пастами на основі золота і систем золото – платина, золото – паладій. Однак, коли необхідні висока електрична провідність і підвищена надійність (безаварійність роботи виробу протягом певного відрізка часу) в екстремальних умовах (висока температура, вологість тощо), пасти на основі золота і його сполук є незамінними, і це незважаючи на їх високу вартість і температуру впікання, що сягає 900...1000 °С.

Наразі досліджують провідні композиції, що не містять дорогоцінних металів, зокрема, оцінюють можливість використання міді, нікелю та алюмінію. Ретельне відпрацювання режимів впікання (температура, середовище, час) дало змогу отримати обнадійливі результати.

У виробництві товстоплівкових ГІС, як ви дізнаєтеся з наступного розділу книжки, важливе місце посідає монтаж компонентів. Його трудомісткість за ручної праці становить до 50% загальної трудомісткості виготовлення ГІС. Спрощенню монтажних операцій значною мірою сприяє використання так званих **припайних паст**, що складаються з порошкоподібного припою (суміш олова, свинцю, сурми, вісмуту) та органічної сполучної речовини, до складу якої входить флюс (наприклад, каніфоль). Останній необхідний, як відомо, для видалення оксидної плівки з поверхні металів і припою, захисту поверхонь від окислення в процесі пайки.

Як і провідні пасти, у товстоплівкових ГІС знайшли широке застосування **резистивні композиції**, оскільки в схемах до 60% загальної кількості елементів і компонентів становлять резистори. Строго кажучи, резистивні пасти близькі за складом до провідникових. З будь-якої суміші металевого порошку і скла

можна виготовити резистор. Однак незначне відхилення їх співвідношення призводить до істотного змінювання опору, що ускладнює виготовлення резисторів з необхідними властивостями. Наприклад, зменшення кількості срібла або золота в пастах на їх основі лише на 2...2,5% збільшує опір товстоплівкових резисторів у 10 і більше разів.

Для більш «тонкого» регулювання і керування властивостями резисторів застосовують пасти на основі оксиду рутенію з температурою впікання 650...850 °С, оксидів талію (550...600 °С), кадмію (700...900 °С), індію (900...1000 °С) тощо. Опір резисторів може відрізнятися залежно від матеріалу й умов термообробки паст у $10^4...10^6$ разів. Саме умови термічної обробки (відпалу, впікання) паст дають змогу використовувати для виготовлення резисторів систему срібло – паладій, відому як провідникова композиція. Проведення впікання на повітрі, варіювання температури, часу і співвідношення компонентів дають змогу врешті-решт отримати необхідний склад плівки та електрофізичні параметри резистора. Вихідними компонентами є паладій (Pd), його оксид (PdO), срібло (Ag), боросилікатне скло ($n\text{SiO}_2 \cdot m\text{B}_2\text{O}_3$) та органічний розчинник. Механізм утворення плівки з цього матеріалу досить складний і остаточно не з'ясований, але передбачається, що за температури 300...400 °С проходить реакція окислення $2\text{Pd} + \text{O}_2 = 2\text{PdO}$ і сплавлення паладію із сріблом $\text{Pd} + \text{Ag} = \text{PdAg}$. У разі подальшого нагрівання до температури 750...850 °С відбувається часткове розкладання PdO. Кінцеві властивості залежать від співвідношення компонентів. Кількість срібла визначає рівень, до якого йде реакція, і регулює вміст оксиду паладію в плівці. Оскільки плівка містить PdO, PdAg, Ag і скло, електропровідність є комплексною величиною і залежить від провідності срібла і сплаву PdAg, напівпровідності PdO і діелектричних властивостей скла.

Діелектричні пасти застосовують для виготовлення конденсаторів, багатошарової комутації **великих гібридних інтегральних мікросхем** (ВГІС) і як захисний шар від зовнішніх впливів для пасивних елементів. **Пасти для конденсаторів** поряд із надійною адгезією до підкладки і обкладки (електродів), хімічною інертністю за високих температур і необхідними діелектричними властивостями повинні мати **температурний коефіцієнт лінійного розширення**, близький до ТКЛР підкладки і матеріалів обкладок. Інакше у тришаровій конструкції (метал – діелектрик – метал) виникатимуть механічні напруги, а також можливі утворення мікротріщин в діелектрику і пробою конденсатора.

Схема технологічного процесу виготовлення **товстоплівкових конденсаторів** передбачає послідовне формування (нанесення пасти, висушування, впікання) нижньої обкладки, діелектрика і верхньої обкладки. Це певною мірою позначається на властивостях використовуваних діелектричних

паст. По-перше, вони повинні бути стійкими до багаторазових температурних впливів, позаяк раніше виготовлені шари в процесі формування наступних знову і знову нагрівають до високих температур. По-друге (і це впливає з щойно сказаного), температури наступних впікань повинні бути якомога більш низькими. Звідси зрозуміла вимога до паст під час виготовлення товстоплівкових конденсаторів: температура впікання діелектричних матеріалів повинна бути нижчою за температуру впікання нижніх обкладок і вищою – верхніх.

Для виготовлення конденсаторів невеликої ємності застосовують різні сорти скла. Збільшення ємності і поліпшення діелектричних властивостей паст можна досягти, застосовуючи пасти на основі титанату барію ($\text{TiO}_2\text{-BaO}$) з добавкою 20...30% скла, що дає змогу зменшити різницю в ТКЛР діелектрика і підкладки. Крім того, істотним недоліком використання титанату барію є те, що під час накладення постійного електричного поля в умовах підвищених температур він зазнає **старіння** – змінюються параметри діелектрика в часі. Більш перспективним щодо цього є оксид ітрію (Y_2O_3).

Особливе місце серед діелектричних матеріалів, що їх застосовують у технології товстоплівкових мікросхем, посідають пасти для створення **багат шарової комутації** (електричні з'єднання, розташовані в кількох шарах). Безперервна тенденція до збільшення кількості елементів в одній мікросхемі та перехід до БІС висунули нові вимоги до комутації елементів. **Одношарова комутація** (електричні провідники на одній поверхні та в одному шарі) не може забезпечити необхідного об'єднання елементів у схему. Виникла необхідність перетину з'єднувальних металевих шин і відповідно введення в місцях перетину ізолювальних діелектричних шарів (див., наприклад, схему комутації з трьома провідними плівковими шарами на рис. 36). Діелектричний шар у перетинах повинен мати високий опір і низьке значення діелектричної проникності. Позаяк два металеві провідники і шар діелектрика між ними утворюють конденсатор, для багат шарової комутаційної плати характерне виникнення паразитних ємностей, що впливають на роботу мікросхеми.

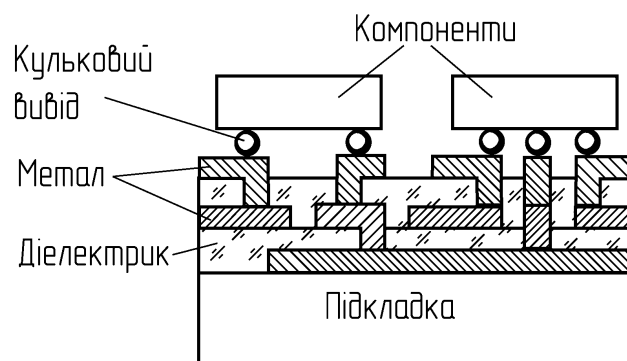


Рис. 36. Конструкція схеми комутації з трьома провідними плівковими шарами

Донедавна вважали, що найкращим ізолювальним матеріалом у місцях перетинів є скло, а не кераміка, яка має пористу структуру і насичується газами й вологою. Це призводить до зниження опору ізоляції між провідниками. Разом із тим використання скла також є обмеженим через деформацію його під час багаторазових термообробок, розтікання і труднощі контролю товщини.

Застосування для ізоляційних шарів композицій скла з керамічним наповнювачем дає можливість отримувати плівки, що витримують багаторазовий температурний вплив, позаяк кераміка створює досить жорсткий каркас і деформація при цьому практично відсутня. Однак для отримання таких плівок необхідно використовувати композиції, які містять до 50% керамічного наповнювача, а це створює підвищену пористість і знижує опір ізоляції під дією вологи.

Найперспективнішими матеріалами для створення міжшарової ізоляції наразі визнано **ситалоцементи** (кристалізоване скло). Характерна їх особливість – створення і збереження кристалічної фази під час нагрівання, що запобігає розм'якшенню шару під час повторних термообробок, аж до температури кристалізації. Завдяки цьому можна успішно використовувати ці матеріали в багатошаровій розводці великих інтегральних мікросхем.

4.3. Друкування товстоплівкових мікросхем

Перш ніж почнемо розповідати про **трафаретний друк**, його різновиди і методи, коротко ознайомимося з **трафаретами** і способами їх виготовлення. Як у тонкоплівковій технології, так і в **технології товстих плівок** створення трафаретів для нанесення паст починається з розроблення **топології** (взаємного розташування елементів, сполук, контактних майданчиків на кресленні) за заданою електричною схемою. На основі **загальної топології** розробляють **топологію окремих шарів** і виготовляють **фотошаблони**, необхідні для виконання трафаретів. Одна з особливостей створення трафаретів для товстоплівкових мікросхем полягає в тому, що всі резистори повинні розташовуватися в одному напрямку. Інакше кажучи, довжина резистора має бути паралельна напрямку нанесення пасти, позаяк це суттєво впливає на точність їх виготовлення.

Для отримання рисунка **товстоплівкових мікросхем** за допомогою пристроїв трафаретного друку використовують різні типи трафаретів, серед яких найбільшого поширення набули сітчасті та фольгові. Трафарет не лише забезпечує конфігурацію елементів, а й допомагає дозувати пасту, що надходить на підкладку.

Фольговий трафарет – це фольга з одного або двох металів; вона має товщину, що дорівнює заданій товщині шару пасти, і закріплена на жорсткій рамці.

Сітчастий трафарет складається із сталевий (шовкової, капронової та ін.) сітки, рівномірно натягнутою на рамку (див. кольорову вклейку V). Зазвичай використовують сітки з діаметром дроту 0,1–0,02 мм і розміром комірки до сотих часток міліметра. Дрібні комірки забезпечують чіткість краю рисунка, великі – високу однорідність плівки за товщиною, бо отвори дрібнопористих сіток часто закупорюються пастою.

Трафарети виготовляють за допомогою фотолітографії, шар фоторезиста наносять на сітку або фольгу. Далі йдуть звичайні операції, характерні для цього процесу: висушування, експонування, проявлення, задублення. Процес виготовлення сітчастого трафарету на цьому закінчується, а для фольгового – необхідні ще операції травлення фольги через вікна у фоторезисті та його подальше видалення. Як правило, проводять двостороннє травлення, а для цього необхідне нанесення фоторезисту з обох боків заготовки і двостороннє експонування (аналогічно виготовленню трафарету для напилення тонких плівок).

Застосування **фольгових біметалічних трафаретів** підвищує точність розмірів рисунка і дає можливість отримувати лінії і проміжки між ними завширшки 75...100 мкм, тоді як у разі використання сітчастих трафаретів – лише 125...150 мкм.

Для нанесення пасти підкладку встановлюють під трафаретом на деякій відстані від нього (0,25...1,5 мм). Процес трафаретного друку полягає у дозуванні пасти на підкладку шляхом продавлювання її через трафарет за допомогою **ракеля**. При цьому паста розміщується поверх трафарету і пересуванням ракеля переноситься на підкладку через отвори у трафареті у вигляді стовпчиків, які копіюють отвори в сітці. Розтікаючись, ці стовпчики з'єднуються у утворюють такий самий рисунок, як на трафареті (див. кольорову вклейку V). **Ракель** – це пластина з гуми, поліуретану, фторопласту й інших матеріалів, що має певний кут загострення (кут атаки – α), який з огляду на в'язкість пасти і розмір комірок у сітці дорівнює 45...60°.

Якість одержуваних товстоплівкових елементів багато в чому залежить від властивостей пасти (в'язкості, текучості), тиску ракеля, швидкості його руху та кута нахилу до поверхні, а також від щільності прилягання ракеля до трафарету і зазору між трафаретом і підкладкою. Цих технологічних чинників дуже важливо дотримуватися, інакше рисунок може не надрукуватися, може бути мала або надмірно велика товщина плівок, розтікання пасти й інше.

Важливою властивістю паст, на якій заснований трафаретний друк, є їхня здатність змінювати під тиском в'язкість і плинність – **тиксотропія**. Паста на трафареті не буде мимовільно просочуватися крізь сітку на підкладку, поки до

неї не докладуть певних зусиль за допомогою ракеля. За швидкості переміщення ракеля близько 15 м/с і заданого зусилля на нього зменшується в'язкість пасти і збільшується плинність, тобто, паста починає надходити на підкладку. Після зняття зусилля ракеля в'язкість і плинність відновлюються до вихідних значень, і паста практично не розтікається поверхнею підкладки. Розтікання, в результаті якого нанесений шар вирівнюється за товщиною, відбувається лише в межах сформованого рисунка.

Так наноситься плівка у разі застосування **безконтактного методу трафаретного друку**, коли сітка трафарету рівномірно натягнена та закріплена на жорсткій рамці і знаходиться на деякій відстані від підкладки, що утворює зазор, який вибирають з огляду на зусилля продавлювання пасти. Після проходу ракеля зазор відновлюється завдяки пружності сітки.

Контактний метод нанесення паст передбачає безпосередній контакт трафарету і підкладки без зазору. Це дає можливість підвищити точність виготовлення товстоплівкових елементів. Наприклад, під час виконання резисторів розкид значень зменшується удвічі-втричі і сягає $\pm (2...3) \%$. Однак застосування цього методу може призвести до різкого збільшення браку в разі недотримання технологічних режимів нанесення й особливо у разі використання паст із підвищеною плинністю й малою в'язкістю. Паста затікає під трафарет подібно до того, як під час креслення рисунка на папері тушшю вона потрапляє під лінійку.

4.4. Гончарне мистецтво у технології виготовлення товстоплівкових мікросхем

У давні-давні часи дивовижну здатність вогню надавати певні властивості глині в результаті її випалення люди використовували для створення гончарних виробів. Після випалювання предмети ставали майже такими само твердими, як камінь або кістка. Не обійшлося без високотемпературного випалювання (відпалювання) і під час виготовлення розмальованих і дуже барвистих ваз, глечиків, керамічних плиток тощо. Інакше кажучи, висока температура, властива вогню, видозмінює предмети, надає їм дивовижних якостей.

Цю здатність високої температури було використано і для виконання рисунка товстоплівкових мікросхем, під час його остаточного формування, закріплення й забезпечення необхідних фізичних та електричних властивостей. За допомогою термічної обробки нанесені на підкладку пасти спочатку висушують. Якщо з гончарних виробів під час висушування видаляється вода, за додавання якої глина здатна набувати необхідну форму, то під час висушування паст з них виділяється рідка органічна складова, від якої залежать в'язкість і плинність пасти. Але висушування – це не остаточний, а початковий етап температурного впливу. Після нього на сонці глиняний глечик зберігає

форму, але не спроможний утримувати воду. Така, наприклад, чашка швидко намокає і руйнується. Точно так само і з елементами товстоплівкових мікросхем. Після висушування паста зберігає форму, задану в результаті трафаретного друку, але легко відшаровується і поки не має потрібних електричних властивостей (провідних, резистивних, діелектричних). Висушуванню зазвичай передують витримка підкладок із нанесеною пастою за кімнатної температури протягом 5...15 хв для вирівнювання поверхневого шару плівки та усунення відбитка комірок сітки. Залежно від типу паст висушування триває 5...20 хв за температури 100...200 °С, що ви і бачите на кольоровій вклейці V, де показані криві термообробки двох видів паст – для провідників і резисторів. Цю стадію термообробки проводять за сповільненого збільшення температури від кімнатної до 200 °С, позаяк у разі форсованого (прискореного) режиму нагрівання можливі швидке випаровування рідкої органічної зв'язки, створення великої пружності пари, виникнення тиску всередині плівки, що призводить до її розтріскування. Для такої термообробки застосовують спеціальні печі з постійною швидкістю переміщення підкладок на конвеєрі через всі зони термічної дії. При цьому температури в цих зонах печі залишаються постійними, і кожній точці відповідає своя цілком певна температура. Як це видно з графіка (див. кольорову вклейку V), підкладка з пастою повинна поступово нагрітися від кімнатної температури до максимально необхідної та знову охолонути до кімнатної. У будь-якому випадку висушування починається з поверхні, на якій швидко утворюється кірка підсушеної пасти. Цей недолік термічної обробки ускладнює вихід пари органіки і призводить до спучування і відшарування плівки.

Останніми роками для висушування широко використовують **інфрачервоні промені** з довжиною хвилі, більшою за 5 мкм. Маючи високу проникну здатність, інфрачервоні промені проходять крізь шар пасти і нагрівають підкладку. Кірка не утворюється, позаяк плівка сушиться зсередини. Підвищується якість елементів і зменшується кількість бракованих мікросхем.

Випалювання (відпалювання, впікання) паст здійснюється у дві стадії і є однією з відповідальних операцій, від режиму якої (час і температура процесу, швидкість переміщення підкладок, середовище тощо) залежать параметри товстоплівкових елементів, їх відтворюваність, стабільність і надійність у робочих умовах.

У **першій фазі відпалювання** за температури 300...400 °С остаточно видаляється органічна зв'язка, її залишки вигорають. Як і на попередній стадії, дуже важливо, як швидко підвищується температура. Щоб не відбувалося швидкого випаровування і не утворювалися бульбашки, що розривають плівку, швидкість збільшення температури має становити не більше ніж 20 градусів за хвилину.

Не менш важлива (особливо для резистивних паст) **друга фаза відпалювання**, в результаті якої скляний порошок розплавляється, змочує частинки наповнювача (порошку, що визначає властивості пасти) і поверхню підкладки. Залежно від середовища в печі (повітря, аргон) відбувається окислення наповнювача, і порошки спікаються. Надруковані частини елементів набувають міцності й необхідних електрофізичних властивостей. Якщо на першій фазі відпалювання температура не дуже важлива і точність її регулювання може бути невисокою, то на цьому етапі відхилення від заданої температури не повинне бути більше ніж ± 1 °C. Хімічні реакції, які визначають кінцевий склад плівки та її характеристики, протікають зі швидкістю, яка подвоюється в разі підвищення температури на кожні десять градусів.

Усі хімічні процеси можна контролювати й регулювати в широких межах, змінюючи склад газового середовища печі. Повітря по суті є ефективним окисником, і склад його досить стабільний. Але дуже важливо, щоб гази, що виділяються під час вигорання сполучних речовин, вилучалися із системи, не впливаючи на процес відпалювання плівок. Наприклад, водень може взаємодіяти з оксидами металів, відновлюючи їх до металів, збільшуючи провідність і зменшуючи опір плівок. А це не завжди потрібно! З цієї самої причини необхідно також контролювати вологість атмосфери. Надлишок вологи, навпаки, сприяє швидшому окисленню.

Завершальна стадія відпалу – повільне охолодження, необхідне для формування бездефектних і ненапружених плівок. Як і у випадку тонких плівок, механічні напружки, що виникають у результаті швидкого охолодження, призводять до деформації структур, розтріскування і відшаровування плівок.

Сучасні печі для відпалювання плівок мають довжину 3...14 м і складаються з 3...8 зон плавного регулювання процесу. При цьому температуру контролюють і регулюють як по довжині печі, так і по її перетину.

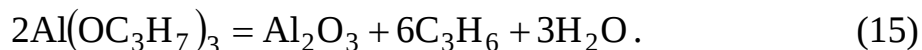
Однак навіть у разі досконально відпрацьованої технології виготовлення товстоплівкові резистори після відпалювання мають розкид опорів до $\pm (10...20) \%$, що у низці випадків нас не влаштовує. Отже, не менш важливою операцією у виробництві товстоплівкових ГІС є **пригонка елементів**, про яку говорилося у главі III.

4.5. Нові варіанти технології товстоплівкових мікросхем

Значні успіхи, досягнуті останніми роками в галузі синтезу складних хімічних сполук, досліджень і практичного застосування **елементоорганічних сполук** (ЕОС), відкривають широкі можливості для їх використання в мікроелектроніці. Сучасна хімія забезпечує синтез органічних сполук майже всіх елементів періодичної системи Д. І. Менделєєва, що дає змогу отримувати металеві, напівпровідникові та діелектричні плівки, які використовують у

виробництві активних і пасивних елементів мікросхем. У випадку металів застосовують **металоорганічні сполуки (МОС)**.

Одним з найпоширеніших методів виготовлення таких плівок є **піроліз** (від грецьких слів *pyr* – *вогонь* і *lysis* – *розкладання*), заснований на термічному розкладанні ЕОС (МОС). Наприклад, нагріваючи ізопропілат алюмінію $\text{Al}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$ до температури $450\text{ }^\circ\text{C}$, можна отримати діелектричну плівку оксиду алюмінію:



В аналогічний спосіб одержують інші металеві плівки з металоорганічних сполук (МОС).

Таким чином, одним із компонентів пасти може бути ЕОС (або МОС) у суміші з органічним зв'язувальником. Під час нагрівання відбувається розкладання ЕОС з виділенням необхідної металевої, напівпровідникової або діелектричної складової. Цей метод дає змогу в низці випадків унеможливити приготування заздалегідь тонкодисперсних порошків для створення необхідних композицій. Крім того, завдяки застосуванню ЕОС можна виготовити щільні, високої якості плівки з точним дозуванням компонентів.

Одним з обмежень використання товстоплівкових технологій є зменшення точності виготовлення рисунка мікросхеми внаслідок розтікання паст після їх нанесення через трафарет. Застосування традиційної фотолітографії, з якою ми вже познайомилися, деякою мірою покращує становище, але не набагато. Травлення термообробленої плівки крізь фоторезистивну маску не дає змоги отримати точний і рівний край елемента, оскільки після відпалювання у плівці присутні основний компонент і скляна зв'язка, які травляться одним і тим самим хімічним реактивом з різною швидкістю.

Виходом із ситуації стало введення у пасти спеціальних світлочутливих добавок. Це дало можливість підвищити точність виготовлення елементів завдяки вилученню трафаретів складної геометричної форми і застосуванню фотолітографії.

Після нанесення пасти відбиток підсушують для видалення розчинників, потім проводять **експонування**, під час якого в **ультрафіолетовому світлі** світлочутливі з'єднання полімеризуються, і проекспоновані ділянки стають нерозчинними в органічних розчинниках. Наступною є операція проявлення – змивання неекспонованих ділянок. Після проявлення проводять висушування на повітрі, щоб уникнути розм'якшення експонованої ділянки. Процес обробки завершується випалюванням плівки на повітрі за температури $800\ldots 900\text{ }^\circ\text{C}$.

Ці та інші нетрадиційні для товстоплівкової технології матеріали і методи дають їй змогу впритул наблизитися до тонкоплівкової технології за точністю виготовлення. У поєднанні з відносно низькою вартістю, малими термінами розробки та випуску, універсальністю застосування і високою надійністю нові

перспективні матеріали і технологічні прийоми забезпечують потребу в товстоплівкових гібридних інтегральних мікросхемах.

5. ЗБИРАННЯ (МОНТАЖ) МІКРОСХЕМ

Отже, ми познайомилися з технологічними процесами виготовлення різних типів інтегральних мікросхем. Процес формування їх близький до завершення. Не вистачає завершальних операцій, які б дали змогу представити мікросхему як цілком закінчений самостійний виріб. Саме цьому і присвячена ця глава, з якої ми дізнаємося про те, як розрізають пластини на окремі кристали (чіпи) і підкладки на плати, про способи кріплення і з'єднання складових частин мікросхеми, їх захист від зовнішніх впливів, надійність мікросхем та необхідність їх випробування.

Чіп – це транслітерація англійського слова *chip*, яке означає «шматочок»; термін «чіп» дуже часто використовують у сучасній мові.

5.1. Зондовий контроль і скрайбування чіпів

Як відомо, **інтегрально-груповий метод виготовлення мікросхем** дає змогу одночасно в єдиному технологічному процесі та на одній підкладці або пластині виготовити десятки і сотні кристалів або чіпів, що включають сотні, тисячі й навіть мільйони елементів. Кожну з таких плат або кристалів необхідно виокремити, для чого підкладки і пластини слід розрізати (розпиляти) на складові.

Цій операції передуює контроль електричних параметрів елементів мікросхем, сформованих на пластині (підкладці). Мимоволі виникає запитання: чи можна сотні, тисячі й десятки тисяч елементів проконтролювати з достатньою точністю і швидко? Зрозуміло, вручну це зробити практично неможливо. Мало допомагають і спеціальні лінзи, що збільшують розміри елементів. Очі контролерів швидко втомлюються, точність вимірювань падає. Але ж йдеться про величезну кількість елементів мікронних розмірів! Як бути?

Виручає автоматична **установка багатозондового контролю**. **Зондом**, як відомо, називають металевий щуп – вістря, приєднане до приладу. За допомогою зонда вимірюють електричні параметри (опір, струм, напругу). Контрольовану заготовку за допомогою вакуумного тримача (див. кольорову вклейку VI) закріплюють на предметному столику під зондовою і маркувальною головками. Кількість зондів, які одночасно контролюють електричні параметри, може сягати шістдесяти і більше штук. У разі виявлення браку за сигналом з контрольної апаратури маркувальна головка ставить позначку на непридатній мікросхемі або фарбою певного кольору, або магнітною фарбою. Предметний столик відповідно до заданої програми вимірювань автоматично переміщується спочатку на встановлений крок горизонталлю, а після завершення вимірювань у першому рядку за вертикаллю, і таким чином зондова головка опиняється на другому рядку.

Перед початком чергового переміщення предметний столик опускається, і пластина відводиться від зондів. Завершивши переміщення, столик піднімається, забезпечуючи таким чином контакт зондів із наступною мікросхемою. Продуктивність сучасних автоматів розбракування мікросхем становить 12 тис. і більше штук за годину.

Поділ напівпровідникових пластин на кристали (чіпи), а підкладок зі скла і ситалу – на плати виконують різними методами, один з яких – **скрайбування**. Вам, мабуть, доводилося бачити, як скляр вирізає скло необхідного розміру. Спочатку алмазним різцем по лінійці він наносить на поверхні скла проріз (подряпину), після чого швидким рухом відламує шматок скла. Скло розламується точно по прорізу, що цілком природно, оскільки саме в цьому місці виникли мікротріщинки, що йдуть вглиб скла. Саме тут найбільша концентрація дефектів, отже, і найнижча міцність. Це і є скрайбування. Тільки проріз завширшки 20...40 мкм і завглибшки 10...15 мкм виконується алмазним різцем не вручну, а на спеціальних автоматичних установках з вакуумним закріпленням пластин, точною установкою різця, дозованим навантаженням і переміщенням різця у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Потім пластину (підкладку) розламують на кристали (плати) за лініями скрайбування. Виконують це або вручну, пропускаючи заготовку через гумові валики, або на спеціальному пристрої машинним способом, для чого пластини чи підкладки укладають прорізами вниз на гумову подушку і валиком послідовно прокочують пластини у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Саме так пластини спочатку розламуються на смужки, а потім на окремі прямокутники чи квадрати. Браковані мікросхеми з відповідною кольоровою чи магнітною міткою відсортовуються й на наступний монтаж не надходять.

Механічне скрайбування – досить економічний метод, що дає змогу ефективно використовувати площу заготовки. Він характеризується високою продуктивністю і швидким переналаштуванням обладнання з одного розміру кристала (плати) на інший. Однак точність геометричних розмірів виробів після розламування відносно невисока, оскільки виходить нерівний край із щербинами і відколами. Якість ламання залежить від співвідношення між шириною і товщиною кристалу (плати), яке має бути 6:1, мінімум 4:1. Якщо ж товщина пластини дорівнює ширині (довжині) кристала, то розламування пластини після скрайбування відбувається у довільному напрямку. Остання обставина особливо важлива, оскільки перехід до виробництва НВІС і пластин діаметром 150 мм і більше потребує застосування пластин завтовшки більше ніж 200...400 мкм. Щоб розділити такі пластини, необхідно попередньо створити більш глибокі прорізи, а це пов'язано зі збільшенням навантаження на різець і зниженням його стійкості, збільшенням кількості дефектів у зоні прорізів, втратою корисної площі пластини і підвищенням дефектів на цій операції. Використання пластин великих діаметрів і товщин потребує

застосування **немеханічних способів поділу**. Наприклад, лазерний промінь, що сфокусований до плями діаметром 25 мкм і працює в режимі «гіперболоїда інженера Гаріна» (з великою потужністю імпульсів за високої частоти їх випромінювання), дає змогу значно поліпшити якість різання пластин і в кілька разів підвищити швидкість їх розділення. Завдяки багаторазовим проходкам лінією розрізу можна повністю розділити пластини на кристали. Цей метод успішно застосовують і для поділу керамічних підкладок товстоплівкових мікросхем.

Пластину або підкладку можна розділити на складові частини ще й **алмазним диском**. Цей спосіб застосовують для різання пластин, товщина яких не дає змоги виконувати скрайбування, а також заготовок з особливо міцних матеріалів. Так розрізають напівпровідникові матеріали з карбіду кремнію SiC, керамічні підкладки товстоплівкових ПС, що відрізняються високою твердістю і нерівним сколом. Якщо на одній осі закріпити декілька дисків на певній відстані один від одного, можливо отримувати велику кількість паралельних розрізів з досить високою точністю. Зазвичай мають два набори дисків для різання у взаємно перпендикулярних напрямках. Цей метод потребує міцного закріплення заготовки на предметному столику за допомогою спеціальної мастики, для висушування якої необхідне нагрівання протягом певного часу.

Перспективним є метод швидкісного різання поодиноким алмазним диском, де пластину можна досить швидко закріпити на вакуумному столику, швидкість переміщення якого 50...250 мм/с, швидкість обертів диска – 50 тис. об/хв.

Існує низка інших способів поділу пластин і підкладок, не лише оригінальних, а й потрібних для мікроелектроніки. Засновані вони або на фізичних явищах (наприклад, дії ультразвуку), або на хімічних. Докладніше читач може дізнатися про них зі спеціальної технічної літератури.

5.2. Продовжуємо монтаж мікросхем

Як впливає з попередніх розділів, основні електричні параметри елементів визначаються характеристиками *p-n*-переходів і МДН-структур (у напівпровідникових мікросхемах), а також властивостями резистивних смужок і конденсаторних структур у гібридних інтегральних мікросхемах. Щоби *p-n*-переходи, шари і структури перетворилися на відповідні елементи – транзистори, діоди, резистори, конденсатори, необхідно приєднати до них металеві провідники – виводи (гнучкі і жорсткі), за допомогою яких їх вмикають в електричний ланцюг.

Стосовно мікросхем **виводом** називають провідник, з'єднаний з **контактним майданчиком** кристала або плати і призначений не лише для

з'єднання їх із зовнішніми електричними ланцюгами, а й для механічного кріплення (див. кольорову вклейку VI).

Гнучкі виводи (дротові, балкові) застосовують тільки для електричного з'єднання, а для механічного кріплення необхідні **жорсткі виводи**: кулькові, у вигляді виступів тощо.

Для **мікроконтактування** виводів необхідно, щоб міцність з'єднання була не менше за 75% міцності провідників. Матеріали та режими мікроконтактування (температура, тиск, час) повинні забезпечувати мінімальний опір самого контакту (елемент і провідник). Інакше кажучи, на місці мікроконтактування не повинно бути підвищеного опору, перегріву і створення умов для виходу з ладу мікросхеми внаслідок утворення сплавів і з'єднань з іншими властивостями. Параметрів процесу мікроконтактування важливо дотримуватися ще й тому, наприклад, що тривалий температурний вплив небажано позначиться не тільки на **мікроконтактах**, а й на сусідніх елементах мікросхеми. Велике співвідношення товщин мікроконтактуючих матеріалів ускладнює становище. Так, товщина контактних майданчиків залежно від матеріалу (золото, мідь, алюміній) перебуває у межах 0,6...2 мкм, а виводи компонентів і провідники з тих самих матеріалів мають товщину від 25 до 150 мкм, тобто співвідношення становить 1:10 і навіть 1:250. Це призводить до того, що температура і час розігрівання під час зварювання або пайки, цілком задовільні для тонкого контактного майданчика, абсолютно недостатні для товстого провідника. У підсумку маємо нетривке і ненадійне з'єднання. Якщо ж орієнтуватися на провідник, то через перегрівання контактний майданчик перегорить або розчиниться в припої. І, на жаль, це цілком реальна картина, що визначає надійність мікросхем. Найбільша кількість відмов мікросхем пов'язана з мікроконтактуванням. Виходить, замкнене коло?

Нічого подібного! Наших знань у галузі фізики, хімії, матеріалознавства та інших наук цілком достатньо для грамотного визначення й правильного вибору методів, режимів і матеріалів для мікроконтактування.

У технології виготовлення мікросхем основними методами приєднання є **пайка** та **мікрозварювання**.

Пайкою називають процес з'єднання матеріалів шляхом введення між ними у розплавленому стані сплаву, названого припоєм. Самі матеріали не розплавляються, а лише нагріваються до температури плавлення припою, за якої він, розтікаючись, змочує з'єднувальні поверхні, заповнює зазори між ними і з'єднує їх завдяки кристалізації. Процес пайки характеризується розчиненням основного металу в рідкому припої і взаємною дифузією металів. При цьому можливе утворення хімічної сполуки.

З огляду на малу товщину й об'єм плівки, а також слабку адгезію, доцільно застосовувати припої, які практично не розчиняють плівку металу, не вступають у хімічну взаємодію, але добре змочують контактний майданчик.

У мікросхемах використовують, в основному, припої на основі олова і свинцю. Домішки сурми і срібла знижують взаємне розчинення металів.

Для поліпшення змочування поверхні з'єднаних припоєм матеріалів, видалення з цих поверхонь забруднень, оксидних плівок і для захисту їх від окислення застосовують флюси, що складаються з каніфолі та етилового спирту.

Основна перевага пайки полягає в тому, що за відсутності плавлення металів і відносно низького нагрівання забезпечується незмінність їх хімічного складу, збереження структури і механічних властивостей.

Однак пайку виводів і перемичок застосовують далеко не для всіх матеріалів мікроелектроніки. Найчастіше пайку використовують, коли мають справу із золотом, міддю, сріблом, нікелем, позаяк вони добре змочуються низькотемпературними припоями (до 450 °C). Складність дозованої подачі припою і значні розміри контактних майданчиків також обмежують застосування пайки.

Найбільшого поширення в мікроконтактуванні отримало зварювання, під час якого нероз'ємне з'єднання двох матеріалів утворюється за допомогою локального сплавлення (**зварювання плавленням**) або спільного деформування (**зварювання тиском**). У результаті виникають міцні зв'язки між атомами з'єднаних об'єктів. Ширшого застосування дістало зварювання тиском, бо на відміну від плавлення за цього методу немає сильного місцевого нагрівання, не виникають хімічні сполуки й не погіршується адгезія тонких плівок. Можливість керування параметрами технологічного процесу (температурою, силою тиску деталей, що з'єднуються, часом, середовищем), його механізації та автоматизації, висока якість з'єднання забезпечили для зварювання тиском головну позицію у мікроелектроніці.

Залежно від матеріалу виводу і контактного майданчика, а також конструктивних особливостей мікросхеми застосовують такі види зварювання матеріалів тиском.

Термокомпресійне зварювання існує у кількох варіантах, один з яких представлений на кольоровий вклейці VII. У результаті підігрівання і стиснення поверхонь, що з'єднуються, виникає пластична деформація в зоні контакту. **Пластичною деформацією** називають незворотне змінювання форми матеріалу під впливом зовнішніх сил без змінювання маси. За такої деформації адсорбовані гази і поверхневі забруднення витісняються з контактної зони. На чистих поверхнях виявляється можливість електронної взаємодії з'єднаних матеріалів, тобто утворення міжатомних зв'язків. Взаємна дифузія матеріалів та утворення сплаву в перехідній області від одного металу до іншого сприяють отриманню міцного з'єднання. Термокомпресійне зварювання здійснюється за температури 300...400 °C, що нижче за температуру плавлення металів і виникнення легкоплавких сполук (евтектики). Тиск, за якого інструмент

деформує дріт на 25...75% після його нагрівання, зазвичай дорівнює 100 МПа. Час витримки різних пар зварюваних матеріалів під тиском за заданої температури становить 0,5...10 с. Як матеріал інструмента використовують зносо- і термостійкі тверді сплави, нержавіючі сталі, оксиди берилію, синтетичний корунд. Таким чином, до контактних майданчиків із золота, міді, нікелю та алюмінію добре приварюються виводи із золота, дещо гірше – з алюмінію. Мідні провідники до названих матеріалів практично не приварюються, позаяк пластичність міді за цих режимів зварювання є низькою. Необхідна чіткіша локалізація нагрівання у зоні зварювання.

Метод, що передбачає розігрівання в момент зварювання імпульсом струму, що проходить через інструмент, називається **зварюванням непрямим імпульсним нагріванням**. Спеціальна V-подібна форма інструмента (див. кольорову вклейку VII) дає змогу зосередити виділення теплоти на його торцевій частини (жалі електрода), збільшити пластичність виводів матеріалу, локально деформувати їх та утворити міцне з'єднання. Під час зварювання непрямим імпульсним нагріванням процес взаємного проникнення зварюваних матеріалів (дифузія) відіграє не менш істотну роль, ніж у разі термокомпресії. Залежно від матеріалу контактного майданчика і виводу тиск інструмента становить 30...200 МПа, температура – 300...650 °С, тривалість імпульсу – 0,1...1,0 с, ступінь деформації провідника сягає 50...70%, його товщина в місці зварювання зменшується, але площа контакту збільшується. Інструмент, виготовлений з твердосплавних матеріалів на основі вольфраму, молібдену та інших металів, дає змогу виконати 40...50 тис. зварних точок. Ці такі способи можна зварювати всі названі вище метали, крім пари алюміній – алюміній. Справа в тому, що на поверхні алюмінію практично завжди утворюється тонка, але дуже міцна плівка оксиду алюмінію (Al_2O_3), що перешкоджає надійному контакту й утворенню зварного з'єднання.

І знову запитання: що робити? Як вийти із цього скрутного становища, тим більше, що алюміній, як відомо, має електрофізичні параметри, радіаційну стійкість та інші властивості та вельми придатний для мікроелектронних виробів. Відповіддю на це запитання став винахід **ультразвукового зварювання**.

Під час ультразвукового зварювання (див. кольорову вклейку VII) інструмент з металокерамічного сплаву або карбіду титану (TiC) тиском 20...150 Н/мм² притискають до зварюваних матеріалів. Від перетворювача через хвилевід електричні коливання передаються до інструмента і трансформуються (перетворюються) на механічні коливання вздовж зварюваної поверхні. Під дією поздовжніх ультразвукових коливань на частоті 20...60 кГц з амплітудою 0,5...5 мкм стираються і зрізаються мікронерівності зварюваних поверхонь, оксидна плівка руйнується, і тертя призводить до інтенсивного виділення тепла в зоні контакту. Температура зварювання дорівнює 0,3...0,5 від

температури плавлення металів і дає змогу менше ніж за одну секунду перевести їх у пластичний стан і зварити. Зварювання різноманітних матеріалів (навіть діелектриків), що значно відрізняються за товщиною, і при цьому невисокі вимоги до чистоти зварюваних матеріалів, а також відсутність структурних змінювань у зоні зварювання за рахунок незначного локального нагрівання відкривають великі перспективи цього методу.

Особливістю збирання кристалів з кульковими, стовпчастими, балочними виводами і контактними виступами є монтаж їх у перекинутому вигляді, тобто, робочим боком кристала до підкладки (див. кольорову вклейку VI). Це створює певні труднощі під час орієнтування кристалів і суміщення їх контактних майданчиків із контактними майданчиками підкладки. Спеціальні оптичні системи дають змогу виконувати цю операцію з великою точністю ($\pm 0,015$ мм). Малі розміри виводів (20...180 мкм) і контактних майданчиків (250 на 250 мкм) практично унеможливають індивідуальне мікрозварювання або пайку. Найбільш прийнятний **груповий монтаж**, за якого здійснюється **одночасне приєднання всіх виводів**. Автомати зі спеціальним інструментом дають змогу мікроконтактувати до чотирьохсот штук на годину, що у 20 разів продуктивніше за звичайні методи індивідуальної пайки та зварювання.

Розглянуті способи мікроконтактування є основними серед великої різноманітності методів, що їх застосовують у мікроелектроніці.

5.3. Створення будиночка для мікросхем – корпусування чіпів

Виготовлені у такий спосіб мікросхеми носять назву **безкорпусних інтегральних мікросхем**. Для захисту від зовнішніх впливів (механічних, бруду і пилу, вологи, температури тощо), а також для надійного механічного та електричного приєднання під час монтажу радіоелектронної апаратури мікросхеми потрібно розміщувати у спеціальні захисні оболонки. Інакше кажучи, необхідна **герметизація мікросхем**.

Найбільш простий, дешевий та ефективний метод герметизації – **залівка компаундом** (ізоляційним матеріалом на основі епоксидних або кремнійорганічних смол, поліефірів і полісульфідів). Низькі вологостійкість, теплопровідність і механічна міцність обмежують застосування такого виду захисту.

Кращі властивості має **пластмасовий корпус** (див. кольорову вклейку VIII), що складається з пластмасової підставки з металевими виводами, до якого приварюють або приклеюють кришку з пластмаси. Однак через значну різницю в **температурних коефіцієнтах лінійного розширення (ТКЛР)** пластмаси та металу волога проникає уздовж межі «метал – полімер» і не заважає надійній герметизації мікросхеми.

Позаяк **вологопроникність** металів і кераміки в багато разів менша, ніж полімерів, були запропоновані конструкції **металоскляних** і **металокерамічних** корпусів (кольорова вклейка VIII).

Металоскляний корпус має металеву основу і кришку, а ізоляцію виводів від основи здійснюють за допомогою пайки склом із **ТКЛР**, близьким до **ТКЛР** металу. Найбільш задовільно узгоджуються, наприклад, залізо-нікелево-мідні сплави і скло з температурою розм'якшення 530...550 °С.

Металокерамічний корпус являє собою керамічну основу з выводами і металевою кришкою. Оскільки через високу температуру спікання кераміки її неможливо армувати металевими выводами, їх впаюють у пази керамічної підставки за допомогою скла. Так само склом припаюють до бортика підставки металеву рамку, необхідну для пайки або приварювання кришки. У корпусах частіше за інші матеріали використовують кераміку на основі оксиду алюмінію.

Інші **види корпусів (металополімерні, скляні, керамічні)** є фактично різновидами перелічених. Їх застосування залежить від типу мікросхем та умов експлуатації.

Напівпровідникові кристали і діелектричні плати після різання, хімічної обробки і перед приєднанням виводів необхідно закріпити на підставці корпуса. Будучи досить простим, **метод кріплення** повинен забезпечувати відтворюваність параметрів і полегшувати подальше приєднання виводів без значних механічних і термічних впливів. Для цих потреб найчастіше **застосовують пайку, приклеювання, закріплення склом**. Дуже важливим для приєднуваного шару (металу, клею, скла) є ефективне відведення тепла, що його виділяє мікросхема у процесі роботи, узгодження за **ТКЛР** з матеріалом корпуса, стійкість до динамічних навантажень (вібрації, ударів тощо), електропровідність.

Пайка металевими сплавами забезпечує високу тепло- й електропровідність, механічну міцність, добре узгодження за **ТКЛР**. Її частіше застосовують для монтажу напівпровідникових кристалів. Можливе приєднання у такий спосіб плат із кераміки і ситалу з попередньо металізованою зворотною поверхнею.

За допомогою **пайки склом** закріплюють, в основному, керамічні, ситалові й інші плати з оксидів металів та їх сумішей. Узгодження таких плат за **ТКЛР** зі склом, що є сумішшю оксидів, забезпечує відмінну адгезію, міцність і надійність з'єднання.

Склеювання матеріалів дає можливість з'єднувати найрізноманітніші матеріали в різних поєднаннях, але в основному, його використовують для мікросхем і компонентів малої потужності. Відрізняючись простотою виготовлення, клейові з'єднання (особливо на основі епоксидних смол) разом із тим мають низьку теплопровідність і високий **ТКЛР**, що призводить до

виникнення внутрішніх напружень. Певною мірою ці недоліки можна зменшити, вводючи до клею металеві порошки (наповнювачі).

5.4. Випробування та перевірка мікросхем

Познайомившись із повним технологічним циклом виготовлення напівпровідникових і гібридних мікросхем, вважатимемо, що в наших руках закінчений виріб із цілком певними характеристиками і функціональними можливостями. Чи означає це, що його можна рекомендувати для повсюдного застосування? Чи однаково надійно він працюватиме у стаціонарній (нерухомій) радіоелектронній апаратурі та на літаку в умовах вібрації, за високої (100 і більше градусів) і низької температури, в абсолютно сухому повітрі та в умовах 100%-вої вологості? Також морський туман з великою кількістю солі, сонячна радіація, різні мікроорганізми й інші фактори тією чи іншою мірою можуть, ймовірно, вплинути на роботу мікроелектронної апаратури, виводячи її з ладу. Але як і коли це станеться? Чи потрібно брати до уваги подібні фактори? Відповідь можна отримати лише в результаті перевірки (контролю) та випробувань мікросхем на працездатність за відповідних умов.

І тут немає нічого дивного і незвичайного. Наприклад, із плином часу організм людини починає болісно реагувати на зовнішні впливи – переохолодження, перегрівання, змінювання вологості тощо. У телевізійному приймачі з часом погіршується якість звуку та зображення. Виникають збої в роботі і відмови, що зумовлені змінюванням фізико-хімічного стану системи через хімічні реакції або фазові перетворення в об'ємі тіл і на поверхні. При цьому параметри апаратури істотно змінюються, виходячи за межі допустимих значень.

Зовнішні впливи (фактори) можна умовно поділити на дві основні групи: механічні та кліматичні. **Механічні фактори** характеризуються прискоренням, частотою та амплітудою вібрації, тривалістю ударів тощо. Зауважимо: якщо з такою фізичною величиною, як прискорення, ви знайомі давно, то із постійним прискоренням, вібраційним й ударним, зустрічаєтесь вперше. Але не сказати про них не можна, позаяк ці прискорення впливають на роботу мікросхем. **Постійне прискорення** виникає під час плавного розгону, поворотів і гальмування транспорту, і дорівнює воно прискоренню вільного падіння тіла, тобто $g = 9,816 \text{ м/с}^2$. **Вібраційне** з'являється під час коливань, спричинених роботою двигуна, гвинта судна, їздою бруківкою, і може сягати 5...10 g. **Ударне прискорення** виникає під час різкої зміни швидкості або в разі зіткнення і має імпульсний характер. Таких впливів зазнає, наприклад, апаратура у залізничних потягах унаслідок коливання вагонів, їх поштовхів на стиках рейок і різкого гальмування. Максимальні ударні прискорення можуть сягати 10...20 g.

Усі ці дії, як свідчить практика, справляють вплив на цілісність електронної апаратури і мікросхем. Так, вібрації призводять до коротких замикань та обривів у електричних ланцюгах, розгерметизації, руйнування зварних і паяних з'єднань. Найнебезпечніший – резонанс, коли частота власних коливань елементів апаратури збігається із частотою зовнішньої вібрації, і прискорення збільшується у декілька разів. Під дією удару можуть розтріскуватися кристали напівпровідника, плати, скляні ізолятори в корпусах, обриватися внутрішні дратові з'єднання тощо.

Кліматичні чинники визначаються особливостями тих чи інших кліматичних зон земної кулі. Виділяють зони сухого, тропічного, холодного, морського і висотного клімату. Наприклад, в Африці та Азії **температура** змінюється від 60 °С вдень до мінус 10 °С вночі за низької вологості, підвищеного ультрафіолетового опромінювання, надлишку піску і пилу. У тропіках кількість опадів сягає 1500 мм в рік, **відносна вологість** становить 98...100%. Для морського клімату характерні підвищена вологість, велика кількість дощів, туману, **соляно-водяний пил**, що сприяє інтенсивній **корозії**. Низькі температури, що панують у північних районах, до мінус 80 °С погіршують умови роботи мікроелектронної апаратури. Верхні шари атмосфери і космічного простору характеризуються **глибоким вакуумом**, низькою температурою (до мінус 55 °С) і значними її перепадами, що призводить до руйнування ізоляції та виробів із пластмаси. Порушуються паяні з'єднання, можливі відмови в електричному монтажі.

Волога, створюючи на апаратурі плівку і забруднюючи її, сприяє підвищеній електропровідності, стає електролітом і може спричинювати короткі замикання. Потрапляючи між двома різними металами, електроліт утворює гальванічну пару, виникає електричний струм, що сприяє прискоренню корозії металів. Оскільки діаметр молекул води становить 0,0003 мкм, волога здатна проникати крізь мікропори, мікротріщини й навіть крізь досить щільну плівку захисного компаунду або пластмасового корпуса. В умовах підвищених температур та електричних навантажень ця волога всередині корпуса на поверхні плати або кристала хімічно взаємодіє з матеріалами елементів мікросхеми, утворюючи концентрований розчин солей. Позаяк із зовнішнього боку корпуса розчин менш концентрований і практично має чистий розчинник, тобто воду, а всередині корпуса розчин більш концентрований, виникають умови, сприятливі для **осмосу** – проникнення води під захисну плівку. Унаслідок цього під плівкою виникає значний тиск, що призводить до її спучування і відшарування. Щоб картина була яснішою, уявімо посудину, об'єм якої розділений напівпроникною плівковою перегородкою (кольорова вклейка VIII). Під плівкою перебуває концентрований розчин солі, над нею – чиста вода. Загалом система нерівноважна, оскільки концентрація (c_2) солі в розчині набагато більша, ніж у

чистій воді (c_1). Система прямує до рівноважного стану, і вода з верхньої частини просочуватиметься крізь перегородку в нижню, намагаючись таким чином зменшити концентрацію солі під плівкою. У результаті об'єм верхнього розчину зменшуватиметься, а нижнього – збільшуватиметься, створюючи тиск на плівку і вигинаючи її вгору.

Вплив сонячної радіації призводить до хімічного розкладання пластмас, їх розтріскування, погіршення електричних і механічних властивостей синтетичних матеріалів. **Цвіль** сприяє поглинанню вологи й адсорбує її. У запиленій апаратурі виникають витоки струму, знижується опір ізоляції тощо.

Таким чином, для мікросхем виявляється дуже важливою оцінка їхньої поведінки в різних умовах до того моменту, коли їх буде включено до складу апаратури. Інакше кажучи, дуже необхідні заздалегідь сплановані випробування мікросхем з огляду на умови їх подальшої експлуатації. Так, **механічні випробування** передбачають виявлення резонансних частот, перевірку на вібростійкість і віброміцність, стійкість до впливу одиночних ударів, відцентрових навантажень, акустичних шумів. До **кліматичних** належать випробування на тепло- і холодостійкість під час експлуатації і транспортування, вплив зміни температур, вологостійкість, вплив інею, сонячної радіації, соляного туману, грибостійкість і водонепроникність. Такому досить складному і трудомісткому комплексу випробувань піддають мікросхеми після їх виготовлення. За результатами випробувань доопрацьовують конструкцію мікросхеми, переглядають матеріали, що їх використовують, корегують технологію виготовлення, складання, монтажу і герметизації.

Дуже важливо також не лише знати умови, допустимі для роботи мікросхем, а й оцінити їх здатність виконувати певні функції, зберігаючи необхідні значення під час експлуатації, зберігання, транспортування, тобто, те, що називають надійністю мікросхем.

Після оцінки якості і надійності мікросхеми на неї заповнюють **технічний паспорт**, у якому обумовлюють функціональні можливості, граничнодопустимі значення параметрів та умови експлуатації. На цьому технологічний процес виробництва завершується.

Тільки тепер можемо сказати – мікросхема готова до застосування!

ПІСЛЯМОВА

Отже, завершується наша розмова про мікросхеми і методи їх виготовлення. Можливо, часом комусь вона здавалася надмірно докладною і стомливою, потребувала уваги та зосередженості, але інакше й не можна. Мікросхеми – справа важлива, потрібна, дуже відповідальна і не припускає несерйозного, поверхневого ставлення до себе. Одне є безсумнівним: якщо ви набралися терпіння й прочитали книжку до кінця, перед вами відкрився світ цікавих і часом складних явищ, без яких неможлива сучасна мікроелектроніка. Якщо ж виникли інтерес і бажання присвятити себе мікроелектроніці, дослідженням і розробкам мікросхем, автори вважають своє завдання виконаним.

Тим, хто хотів би здобути освіту і фах в цій галузі, радимо продовжити навчання в коледжі (технікумі), інституті чи університеті. Тепер вам набагато простіше орієнтуватися у спеціальностях, перелік яких можна знайти в довідниках «Куди піти вчитися?»

Наприклад, щоби стати кваліфікованим робітником, найкраще вступити до технічного училища чи коледжу; закінчивши їх, можна отримати розряд за вибраною спеціальністю з електроніки. Їх налічується більше ніж 20 назв.

Не менш чисельним загоном фахівців нашого народного господарства є вихованці середніх спеціальних навчальних закладів – коледжів або технікумів. Питання, описані в цій книжці, не залишаться поза ваших інтересів, якщо ви вступите до коледжу за спеціальностями: виробництво електронної техніки, мікроелектронних пристроїв, напівпровідникових приладів, радіотехнічних пристроїв, електронних обчислювальних машин.

Якщо ж ви твердо вирішили здобути вищу освіту з радіоелектроніки і вступити до вищого навчального закладу (університету), радимо вам звернути увагу на спеціальності: електронні прилади і пристрої, напівпровідникові й мікроелектронні прилади, промислова електроніка, фізична електроніка, радіофізика та електроніка, конструювання та виробництво радіоапаратури, конструювання і виробництво електронно-обчислювальної апаратури.

Якщо ви вже студент-електронік і вибрали напрям своєї майбутньої діяльності, цю книжку можна використати як навчальний посібник з дисципліни «Технологічні основи електроніки» для студентів бакалаврського рівня навчання і як довідник для студентів старших курсів.

Автори посібника бажають вам успіхів на вашому шляху до професіоналізму.

ГЛОСАРІЙ
термінів, аналогів російською та англійською мовами,
їх скорочень та умовних позначень

Український термін	Сторінка, на якій дано пояснення	Російський термін	Англійський термін	Примітки (скорочення терміна)
абсорбція	27	абсорбция	absorption	
адгезійний підшар	68	адгезионный подслоя	adhesion sublayer	
адгезія	32, 58, 59	адгезия	adhesion	
адсорбція	27, 58	адсорбция	adsorption	
адсорбція під час конденсації пари і формування плівки	55, 56, 58	адсорбция при конденсации пара и формировании плёнки	adsorption at vapor condensation and film formation	
активний елемент інтегральної схеми	43	активный элемент интегральной схемы	active element of integrated circuit	
алмазне розрізання злитка кремнію на пластини	25, 93	алмазная резка слитка кремния на пластины	diamond cutting of Silicon bar (billet, boule, ingot) by wafers	
анізотропія	24	анизотропия	anisotropy	
анодне окислення	53, 65, 66	анодное окисление	anodic oxidation	
анодування	65, 66	анодирование	anodization	
атом (зайвий) у міжвузловині ґратці	24	атом (лишний) в междоузлии решётки	interstitial atom in lattice	
атом заміщення у ґратці	24	атом замещения в решётке	substitution(al) atom in lattice	
багатошарова комутація	82. 84	многослойная коммутация	multilayer (multilevel) interconnections (wiring)	
багатошарове розведення	66	многослойная (многоуровневая) разводка	multilayer (multilevel) wiring (interconnections)	

багатошарові комутаційні плати	66	многослойные коммутационные платы	multilevel interconnection plates	
база	13, 47	база	base	електрод транзистор- ра, від слова основа
безпористість підкладок	67	беспористость подложек	non-porosity of substrate	
вакансія	24	вакансия	vacancy	
виводи мікросхем	94	выводы микросхем	microcircuit contacts (leads)	
випаровування вибухове (миттєве)	56	испарение взрывное (мгновенное)	flash evaporation	
випаровування дискретне з вібродозуванням	56	испарение дискретное с вибродозированием	discrete (pulse) evaporation with vibration doser	
випаровування за допомогою сфокусованого пучка електронів	56	испарение с помощью сфокусированного пучка электронов	focused electron beam evaporation	
випаровування методом трьох температур	56	испарение методом трёх температур	evaporation by three temperatures method	
випробування мікросхем	99	испытание микросхем	testing of microcircuit	
вологонепроникність корпусів мікросхем	97, 98, 100	влагонепроницаемость корпусов микросхем	water-tight microcircuit encapsulation (waterproof microcircuits)	
газотрон	12	газотрон	gasotron	
герметизація мікросхем	97	герметизация микросхем	microcircuit capsulation	
герметизація мікросхем в корпусі	97, 98	герметизация микросхем в корпусе	package closure of microcircuits	
герметизація мікросхем компаундом	97	герметизация микросхем компаундом	compound encapsulation of microcircuits	
гібридні товстоплівкові схеми	78, 79	гибридные толстоплённые схемы	thick-film hybrid circuit	
глибина залягання <i>p-n</i> - переходу	36	глубина залегания <i>p-n</i> - перехода	junction depth	
градієнт концентрації	36, 40	градиент концентрации	concentration gradient	

груповий монтаж приєднання всіх виводів мікросхем	97	групповой монтаж всех выводов микросхем	group connection of all microcircuit leads	
детектор	12	детектор	detector	демодулювальний електронний прилад у радіоприймачах
дислокація	25	дислокация	dislocation	
дислокація гвинтова	25	дислокация винтовая	screw dislocation	
дифракція	32	дифракция	diffraction	
дифузанти	37	диффузанти	diffusant	
дифузія	27, 37, 38	диффузия	diffusion	
дифузія розділювальна	49, 50	диффузия разделительная	separation diffusion	
діелектрична ізоляція структур (елементів, транзисторів IC)	50, 51	диэлектрическая изоляция структур (элементов, транзисторов ИС)	dielectric isolation of structures (transistors in microcircuits)	
діод	12, 14, 16, 21	диод	diode	
діод вакуумний	12	диод вакуумный	vacuum (thermionic) diode	
експонування електронно-промене_ве	34, 35	экспонирование электронно-лучевое	electron-beam exposure (imaging)	
експонування контактним методом	34, 75	экспонирование контактным методом	contact exposure (imaging)	
експонування проєкційне	34	экспонирование проекционное	projection exposure (imaging)	
експонування рентгенівське	34, 35	экспонирование рентгеновское	X-ray exposure	
експонування ультрафіолетовим світлом	30-33, 73, 90	экспонирование ультрафиолетовым светом	ultraviolet exposure	
експонування фоторезиста	31	экспонирование фоторезиста	exposure of photoresist	див. також опромінювання
електричний опір тонких плівок	54	электрическое сопротивление тонких плёнок	electrical resistance of thin films	
електроніка	11	электроника	electronics	
електроніка першого періоду розвитку	10, 12	электроника первого периода развития	first generation of electronics	

електроніка другого період розвитку	10, 15	электроника второго периода развития	second generation of electronics	
електроніка третього період розвитку	10, 15	электроника третьего периода развития	third generation of electronics	
електроніка четвертого період розвитку	10, 20	электроника четвёртого периода развития	forth generation of electronics	
електронна літографія зі скануванням (розгорткою) електронним променем	35	электронная литография со сканированием (развёрткой) электронным лучом	scanning electron-beam lithography	
електронно-промене_ва проєкційна літографія	34, 35	электронно-лучевая проекционная литография	projection electron-beam lithography	
електронно-промене_ве випарування	61	электронно-лучевое испарение	electron-beam evaporation	
електронорезист	35	электронорезист	electron-resist	
елемент гібридної інтегральної мікросхеми	19	элемент гибридной интегральной микросхемы	hybrid integrated microcircuit element	
елемент напівпровідникової інтегральної мікросхеми	18, 19	элемент полупроводниковой интегральной микросхемы	semiconductor integrated microcircuit element	
елементоорганічні сполуки	89	элементоорганические соединения (ЭОС)	element-organic compounds (EOC)	(EOC)
емітер	14, 47	эмиттер	emitter	електрод транзистор_ра
ЕОМ	12	ЭВМ	EC (electronic computer)	електронна обчислю_вальна машина
епік-процес	50, 51	эпик-процесс	EPIC-process (Epitaxial Passivated Integrated Circuit process)	
епітаксіальна плівка	40-42	эпитаксиальная плёнка	epitaxial (epitaxially grown) film	
епітаксіальне нарощування	40, 41	эпитаксиальное наращивание	epitaxial growth	
епітаксія	40	эпитаксия	epitaxy	
епітаксія газофазна (з газової фази)	41-43	эпитаксия газофазная (из газовой фазы)	gas (vapor)-phase epitaxy	

епітаксія рідиннофазна (з рідинної фази)	41	эпитаксия жидкофазная (из жидкой фазы)	liquid (-phase) epitaxy	
задублення (зміцнення) фоторезисту	33	задубливание (закрепление) фоторезиста	photoresist hardening, postcuring	
зародок кристала	56, 57	зародыш кристалла	crystal nucleus	
затравка кристалічна, затравочний кристал	24	затравка кристаллическая, затравочный кристалл	seed crystal	
зварювання	95, 96	сварка	bonding, welding	
зварювання непрямым імпульсним нагріванням	96	сварка непрямым импульсным нагревом	bonding (welding) with indirect pulse heating	
зварювання плавленням	95	сварка плавлением	fusion welding	
зварювання термокомпресійне	95	сварка термокомпрессионная	thermocompression bonding	
зварювання тиском	95	сварка давлением	cold compression bonding	
зварювання ультразвуком	96	сварка ультразвуком	ultrasonic welding	
зерно (зернистість) кристалічної структури тонкої плівки	59	зерно (зернистость) кристаллической структуры тонкой плёнки	grain (graininess) of thin film crystal structure	
зонд	91	зонд	probe, prober	
ізолювання елементів ІС	49	изолирование элементов ИС	IC element (device) isolation	
ізоляція діодна	49	изоляция диодная	diode(-type) isolation	
індикаторна лампа	12	индикаторная лампа	indicator tube	
індуктивності тонкоплівкові	71	индуктивности тонкоплёночные	thin film inductance	
інтегрально-груповий метод виготовлення мікросхем	91	интегрально-групповой метод изготовления микросхем	integrated technique (technology, process) of microcircuit fabrication	
інтеграція	16, 19	интеграция	integration	
іонна імплантація	38, 39	ионная имплантация	ion implantation	
іонне введення	38, 39	ионное введение	ion insertion	
іонне легування	38, 39	ионное легирование	ion doping	
іонне очищення	62	ионная очистка	ion cleaning	

іонне розпилення	53, 63	ионное распыление	ion sputtering	
іонно-електронна емісія	63	ионно-электронная эмиссия	ion-electron emission	
катодне розпилювання	62, 63	катодное распыление	cathode (diode) sputtering	
кермет	69	кермет	cermet	кераміка + метал
кислотостійкість фоторезиста	32	кислотостойкость фоторезиста	acid durability of photoresist	
коалесценція під час формування плівки	57	коалесценция при формировании плёнки	coalescence during film formation	
коефіцієнт іонного розпилення	63	коэффициент ионного распыления	ion sputtering coefficient	
коефіцієнт конденсації під час осадження плівки	57	коэффициент конденсации при осаждении плёнки	condensation coefficient at film deposition	
коллектор	14, 47	коллектор	collector	електрод транзистора
компаунд	79, 97	компаунд	compound	
комплементарні структури	52	комплементарные структуры	complementary structures	
компонент гібридної інтегральної мікросхеми	19	компонент гибридной интегральной микросхемы	hybrid integrated microcircuit component	
комутація інтегральних схем багатопшарова	66, 82, 84	коммутация интегральных схем многослойная	multilayer (multilevel) interconnection in integrated circuits	
комутація інтегральних схем одношарова	84	коммутация интегральных схем однослойная	one-layer (one-level) interconnection in integrated circuits	
конденсатор дифузійний (на основі <i>n-p</i> -переходу)	45, 46	конденсатор диффузионный (на основе <i>n-p</i> -перехода)	diffused (junction) capacitor	
конденсатор ІС	45, 46	конденсатор ИС	IC-capacitor	
конденсатор (МДН, МОН)	45, 46	конденсатор (МДП, МОП)	(MDS, MIS MOS) capacitor	
конденсатор тонкоплівковий	45, 46, 66, 69-71	конденсатор тонкоплёночный	thin-film capacitor	
конденсація пари під час випаровування	55-57	конденсация пара при испарении	vapor condensation after evaporation	
контактний майданчик	44, 47, 50, 52,	контактная площадка	contact land, bonding island,	

	68, 94		signal connect portion, terminal land (portion)	
контактний метод нанесення паст	87	контактный метод нанесения паст	contact method of paste coating	
контроль багатогозондовий	91	контроль многозондовый	multi-point probing (testing, measurement)	
корпусування	97, 98	корпусирование	package	
кремнезем	22	кремнезём	silica	(SiO ₂)
кремній	22	кремний	silicon	(Si)
кремній полікристалічний	24	кремний поликристаллический	microcrystalline silicon, polysilicon	
кремнію діоксид	22, 26, 70	кремния диоксид	silica, silicon dioxide	(SiO ₂)
кремнію монооксид	70	кремния монооксид	silicon monoxide	(SiO)
кремнію тетрахлорид	22, 41	кремния тетрахлорид	silicon tetrachloride	(SiCl ₄)
кристал (чіп)	91	кристалл (чип)	crystal (chip)	
критична температура підкладки для конденсації пари	56	критическая температура подложки для конденсации пара	critical substrate temperature for vapor condensation	
критичний розмір зародка кристала під час конденсації пари	57	критический размер зародыша кристалла при конденсации пара	critical dimension of vapor condensation nucleus	
літографія електронна зі скануванням (розгорткою) електронним променем	35	литография электронная со сканированием (развёрткой) электронным лучом	scanning electron-beam lithography	
літографія проєкційна електронно-променева	34, 35	литография проекционная электронно-лучевая	projection electron-beam lithography	
літографія рентгенівська	35	литография рентгеновская	X-ray lithography	
маска	26, 34, 72-75	маска	mask	
маска контактна	75	маска контактная	mask for contact exposure (printing)	
маска фоторезистивна	34	маска фоторезистивная	photoresist mask	
МДН	46	МДП (Металл – Диэлектрик – Полупроводник)	MDS, MIS (Metal – Dielectric/-/Isolator – Semiconductor)	Метал – Диэлектрик – Непроводник
МДН-конденсатор	46	МДП-конденсатор	MDS(MIS)-capaci-	

			tor	
МДН-структура	46	МДП-структура	MDS(MIS)-structure	
МДН-транзистор	48, 52	МДП-транзистор	MDS(MIS)-transistor	
металоорганічні сполуки	89	металлоорганические соединения	metallo-organics (MO), organometallic compounds	(MOC)
метод вільних масок для тонкоплівкових ІС	72-75	метод свободных масок для тонкоплёночных ИС	free-mask method (technique) for thin-film IC	
метод контактної маски для тонкоплівкових ІС	75	метод контактной маски для тонкоплёночных ИС	contact-mask method (process, technique) for thin-film IC	
метод подвійної фотолітографії для тонкоплівкових ІС	76	метод двойной фотолитографии для тонкоплёночных ИС	double-photolithography method (process, technique) for thin-film IC	
методи кріплення кристалів та плат-підкладок в корпусах мікросхем	98	методы крепления кристаллов и плат-подложек в корпусах микросхем	microcircuit chip-and plate/substrate packaging	
механічна міцність підкладок	66, 80	механическая прочность подложек	mechanical stability (durability)	
мігрування атомів поверхнею підкладки (пластини)	41, 56, 59	миграция атомов по поверхности подложки (пластины)	atom migration over substrate (plate, wafer) surface	
мікроелектроніка	15	микроэлектроника	microelectronics	
мікроелектроніка інтегральна	20	микроэлектроника интегральная	integrated microelectronics	
мікроелектроніка функціональна	20	микроэлектроника функциональная	functional microelectronics	
мікрозбірка	53	микросборка	microassembly	
мікрозварювання	94-96	микросварка	microwelding	
мікроконтактування	94	микроконтактирование	microcontacting	
мікромініатюризація	16	микроминиатюризация	microminiaturization	
мікропроцесор	19	микропроцессор	microprocessor	
мікросхема багатокристална гібридна інтегральна	53	микросхема многокристалльная гибридная интегральная	hybrid multi-chip integrated microcircuit	

мікросхема велика	19	микросхема большая (БИС)	large-scale (grand-, high-scale) microcircuit (LSI, LSIC)	$2 < K \leq 4$ (BIC)
мікросхема велика гібридна інтегральна	66, 83	микросхема большая гибридная интегральная (БГИС)	large-scale hybrid integrated microcircuit (LSHIC)	(BГIC)
мікросхема гібридна інтегральна	19, 53, 66, 78, 79	микросхема гибридная интегральная (ГИС)	hybrid integrated microcircuit (HIC)	(ГIC)
мікросхема гібридно-плівкова інтегральна	53	микросхема гибридно-плёночная интегральная	hybrid film integrated microcircuit	
мікросхема інтегральна	16-19	микросхема интегральная (ИС)	integrated microcircuit (IC)	(IC)
мікросхема інтегральна безкорпусна	97	микросхема интегральная бескорпусная	packageless (chip, die, naked) integrated microcircuit	
мікросхема інтегральна надвелика	19	микросхема интегральная сверхбольшая (сверхкрупная?) (СБИС)	very (extra, super ultra) large-scale integrated microcircuit (integrated microcircuit (VLSI, VLSIC)	$K \geq 4$ (HBIC), $K \geq 6$ – mega-scale IC, $K \geq 9$ – giga-scale IC
мікросхема напівпровідникова інтегральна	16, 18	микросхема полупроводниковая интегральная	semiconductor (monolithic) integrated microcircuit	
мікросхема плівкова інтегральна	18	микросхема плёночная интегральная	film integrated microcircuit	
мікросхема проста	19	микросхема простая	small-scale integrated microcircuit	$K \leq 1$
мікросхема середня	19	микросхема средняя (СИС)	medium-scale integrated microcircuit (MSIC)	$1 < K \leq 2$ (CIC)
мікросхема суміщена інтегральна	19, 44	микросхема совмещённая интегральная	combined integrated circuit	
мікросхема товстоплівкова	18, 78	микросхема толстоплёночная	thick-film microcircuit	
мікросхема	18, 19,	микросхема	hybrid thick film	

товстоплівкова гібридна інтегральна	78	толстоплёночная гибридная интегральная	integrated microcircuit	
мікросхема тонкоплівкова	18	микросхема тонкоплёночная	thin-film microcircuit	
мініатюризація	16	миниатюризация	miniaturization	
мішень	62, 69	мишень	target	
молекулярний потік	55	молекулярный поток	molecular flow	
молекулярний режим випарування	55	молекулярный режим испарения	molecular evaporation	
МОН	46, 52	МОП (Металл – Оксид – Полупроводник)	MOS (Metal – Oxide – Semiconductor)	Метал – Оксид – Напівпро- відник
МОН-конденсатор	46	МОП-конденсатор	MOS-capacitor	
монокристалічна плівка	40, 41	монокристаллическая плёнка	monocrystal film	
монокристалічний злиток кремнію	24	монокристаллический слиток кремния	monocrystal silicon bar (billet, boule, ingot)	
МОН-структура	46, 48, 52	МОП-структура	MOS-structure	
МОН-транзистор	48, 52	МОП-транзистор	MOS-transistor	
нанесення фоторезисту на центрифузі	32	нанесение фоторезиста на центрифуге	spin-on photoresist coating	
напилення тонких плівок	45, 53, 57, 59, 72, 73	напыление тонких плёнок	thin film deposition	див. осадження
напівпровідник дірковий	14	полупроводник дырочный	hole (acceptor- type) semiconductor	
напівпровідник електронний	14	полупроводник электронный	electronic (donor- type) semiconductor	
напівпровідник <i>n</i> - типу	14	полупроводник <i>n</i> -типа	<i>n</i> -type semiconductor	
напівпровідник <i>p</i> - типу	14	полупроводник <i>p</i> -типа	<i>p</i> -type semiconductor	
несамостійний газовий розряд	69	несамостоятельный газовый разряд	non-self- maintained discharge	
насичення пари	55	насыщение пара	vapor saturation	
однокристална ЕОМ	53	однокристалльная ЭВМ	one-chip EC	
однокристалні електронні пристрої	53	однокристалльные электронные устройства	one-chip electron devices	

одношарова комутація інтегральних схем	84	однослойная коммутация интегральных схем	one-layer (one-level) interconnection in integrated circuits	
окислення анодне	53, 65, 70	окисление анодное	anodic oxidation	
окислення кремнію термічне	26-28	окисление кремния термическое	thermal silicon oxidation	
оксиди для конденсаторів ГИС	70, 71, 83, 84	оксиды для конденсаторов ГИС	oxides for HIC capacitors	
опір плівки	54	сопротивление плёнки	film resistance	
опромінення	30	облучение	irradiation	див. також експонування
осадження тонких плівок гальванічне	65	осаждение тонких плёнок гальваническое	galvanic thin film deposition (plating)	
осадження тонких плівок електролітичне	65	осаждение тонких плёнок электролитическое	electrolytic thin film deposition (plating)	
осадження тонких плівок електрохімічне	65	осаждение тонких плёнок электрохимическое	electrochemical thin film deposition (plating)	
осадження тонких плівок піролітичне	53, 89	осаждение тонких плёнок пиролитическое	pyrolytic thin film deposition	
осадження тонких плівок плазмово-хімічне	53	осаждение тонких плёнок плазмово-химическое	plasma-chemistry thin film deposition	
осадження тонких плівок термовакuumне	53, 60, 70	осаждение тонких плёнок термовакuumное	(thermo-) vacuum thin film deposition	див. також випаровування
осадження тонких плівок фізичне	53	осаждение тонких плёнок физическое	physical thin film deposition	
осадження тонких плівок хімічне	53, 65	осаждение тонких плёнок химическое	chemical thin film deposition (plating)	
острівкова структура тонкої плівки	57	островковая структура тонкой плёнки	island thin film structure	
пайка	94, 98	пайка	soldering	
паразитні елементи ІС	50	паразитные элементы ИС	parasitic IC elements	
паразитні транзистори	50	паразитные транзисторы	parasitic transistors	
пасивний елемент інтегральної схеми	43	пассивный элемент интегральной схемы	passive element of integrated circuit	
паста для формування товстих плівок	78, 81-84	паста для формирования толстых плёнок	thick-film paste	

паста припайна	78, 82	паста припойная	solder paste	
пентод	12	пентод	pentode	
перехід електронно-дірковий	14	переход электронно-дырочный	junction, diode junction	
перехід (<i>n-p</i> або <i>p-n</i>)	14	переход (<i>n-p</i> или <i>p-n</i>)	(<i>n-p, p-n</i>) junction	
підкладка	18, 41, 54-64, 66-68, 79-81	подложка	substrate	
підкладка керамічна	67, 81	подложка керамическая	ceramic substrate	
підкладка ситалова	68	подложка ситалловая	sitall substrate	
підкладка скляна	67	подложка стеклянная	glass substrate	
піроліз	89	пиролиз	pyrolysis, pyrolization, pyrolytic action	
плавка зонна	23	плавка зонная	floating-zone melting	
плазма газового розряду	63-65	плазма газового разряда	gas discharge plasma	
планарна структура	16	планарная структура	planar structure	
пластина напівпровідникова	17-19	пластина полупроводниковая	wafer, semiconductor plate	
пластична деформація	95	пластическая деформация	plastic deformation	
плівка епітаксіальна	42	плёнка эпитаксиальная	epitaxial film	
плівка монокристалічна	40	плёнка монокристаллическая	monocrystalline film	
плівка оксидна	26, 66, 95	плёнка оксидная	oxide film	
плівка оксиду кремнію	26-29	плёнка оксида кремния	silicon oxide film	
плівка полікристалічна	41	плёнка поликристаллическая	polycrystalline film	
площинність підкладок	67, 80	плоскостность подложек	substrate flatness (planarity)	
пошкоджений (порушений) поверхневий шар	25, 42	повреждённый поверхностный слой	defect (destructured) surface layer	
пригонка резисторів групов	77	подгонка резисторов групповая	group (batch) resistor fit	
пригонка резисторів індивідуальна	77, 89	подгонка резисторов индивидуальная	individual resistor fit	
провідники	68, 71,	проводники	thin film conductor	

тонкоплівкові	74	тонкоплёночные		
ракель	86	ракель	printer squeegee	
реактивне (реакційне) катодне розпилювання	63	реактивное (реакционное) катодное распыление	reactive cathode sputtering	
резистивні композиції для ГИС	68, 69, 82, 83	резистивные композиции для ГИС	resistive composition (composite, compound) for HIC	
резистор дифузійний	44	резистор диффузионный	diffused resistor	
резистор епітаксiальний	44	резистор эпитаксиальный	epitaxial resistor	
резистор зі змінним опором	44	резистор с переменным сопротивлением	variable resistor	
резистор з полікристалічного кремнію	44	резистор из поликристаллического кремния	polysilicon resistor	
резистори для IC	44, 61, 68, 69, 82, 83	резисторы для IC	IC (integrated) - resistor	
резистор польовий	44	резистор полевой	field-effect resistor	
резистор тонкоплівковий	68, 69	резистор тонкоплёночный	thin-film resistor	
рекристалізація в тонкоплівкових елементах	59	рекристаллизация в тонкоплёночных элементах	recrystallization of thin-film elements	
рентгенолітографія	35	рентгенолитография	X-ray lithography	
рентгенорезист	35	рентгенорезист	X-ray resist	
рентгеношаблон	35	рентгеношаблон	X-ray exposure mask	
розділення пластин на кристали	92, 93	разделение пластин на кристаллы	dice(-ing)	
роздільна здатність фоторезиста	31	разрешающая способность фоторезиста	photoresist imaging capability (resolving power)	
розсіювання світла на межах зерен	32	рассеивание света на границах зёрен	grain boundary scattering of light	
світлочутливість фоторезиста	31	светочувствительность фоторезиста	light susceptibility of photoresist	
силан	22	силан	silane	(SiH ₄)
ситал	68	ситалл	sitall	
ситалоцемент	85	ситаллоцемент	sitallocement	
скрайбування	92	скрайбирование	scribing	
сорбція	27	сорбция	sorption	

сплави металосилицидні	69	сплавы металлосилицидные	metal silicide (alloy)	
стабілітрон	12	стабилитрон	stabilivolt	
старіння елементів ГИС	84	старение элементов ГИС	HIC element aging*	
стехіометрія	66	стехиометрия	stoichiometry	
ступінь інтеграції	19	степень интеграции	integration (level)	(K)
суспензія	81	суспензия	suspension	
температура випарування	55	температура испарения	evaporation temperature	
температура підкладки під час осадження плівки	56, 59	температура подложки при осаждении плёнки	substrate temperature at film deposition	
температурний коефіцієнт ємності	46	температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ)	thermal capacitance coefficient (TCC)	(ТКЕ)
температурний коефіцієнт лінійного розширення	67, 80, 83, 97, 98	температурный коэффициент линейного расширения	thermal expansion coefficient (TCE)	(ТКЛР)
температурний коефіцієнт опору	44	температурный коэффициент сопротивления (ТКС)	thermal resistance coefficient (TCR)	(ТКО)
теплопровідність підкладок	66, 79	теплопроводность подложек	substrate thermal conduction	
термістор	18, 44	термистор	thermistor	резистор напівпровідниковий, чутливий до тепла
термічне випаровування у вакуумі	53	термическое испарение в вакууме	thermal evaporation in vacuum	
термовакuumне випаровування	53	термовакuumное испарение	(thermo-) vacuum evaporation	див. також випаровування та осадження
термовакuumне осадження плівок	60	термовакuumное осаждение плёнок	(thermo-) vacuum film deposition (by evaporation)	див. також випаровування
термоелектронна емісія	12, 64	термоэлектронная эмиссия	thermoelectron emission	
терморезистор	18	терморезистор	thermoresistor	резистор, чутливий до тепла
термостійкість підкладок	66, 80	термостойкость подложек	substrate thermostability	

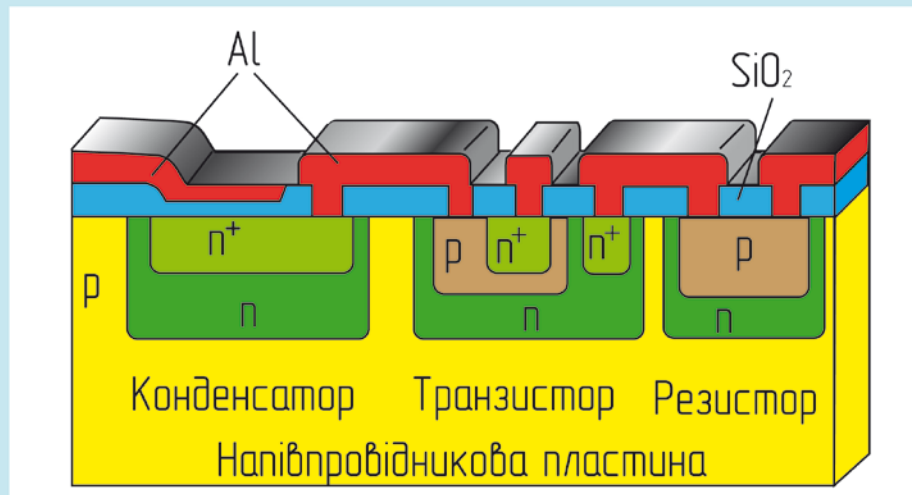
тестування мікросхем	99	тестирование микросхем	testing of microcircuits	
тетрод	12	тетрод	tetrode	
технічний паспорт мікросхеми	101	технический паспорт микросхемы	technical passport	
технологія	9	технология	technology	
технологія гібридно-плівкова	53	технология гибридно-плёночная	hybrid film technology	
технологія дифузійна	38	технология диффузионная	diffusion technology	
технологія епітаксіальна	40-43	технология эпитаксиальная	epitaxial technology	
технологія епітаксіально-дифузійна	43	технология эпитаксиально-диффузионная	diffusion-epitaxial technology	
технологія іонна	62	технология ионная	ion technology	
технологія іонно-плазмова	62	технология ионно-плазменная	ion-plasma technology	
технологія напівпровідникова	18	технология полупроводниковая	semiconductor technology	
технологія плазмова	62	технология плазменная	plasma technology	
технологія планарна	15, 16	технология планарная	planar plasma technology	
технологія плівкова	18	технология плёночная	film technology	
технологія товстоплівкова	18, 78-80, 90	технология толстоплёночная	thick-film technology	
технологія тонкоплівкова	18, 53, 72, 78	технология тонкоплёночная	thin-film technology	
тиратрон	12	тиратрон	thyatron	
тиск залишкових газів	55, 57-60, 64	давление остаточных газов	rest gas pressure	
тиксотропія	86	тиксотропия	thixotropy	
тліючий газовий розряд	62	тлеющий газовый разряд	gas glow discharge	
товсті плівки	18, 78	толстые плёнки	thick films	
тонкі плівки	18, 53	тонкие плёнки	thin films	аналог – тонкі шари, нанесені на підкладку
тонкоплівкові елементи	66-72	тонкоплёночные элементы	thin-film elements	
топологія мікросхем	72, 74, 85	топология микросхем	microcircuit topology	
точка інверсії типу	37, 38	точка инверсии типа	conductivity-type	

провідності		проводимости	inversion point	
транзистор	13, 14, 16, 47, 48, 52	транзистор	transistor	
транзистор біполярний	46, 47	транзистор биполярный	bipolar transistor	
транзистор дифузійний	48	транзистор диффузионный	diffused transistor	
транзистор епітаксіальний	48	транзистор эпитаксиальный	epitaxial transistor	
транзистор з діелектричною ізоляцією для ІС	50, 51	транзистор с диэлектрической изоляцией для ИС	isolated integrated transistor	
транзистор з ізолюваним затвором	48	транзистор с изолированным затвором	isolated-gate transistor	
транзистор МДН	48	транзистор МДП	MDS transistor	
транзистор МОН	48	транзистор МОП	MOS transistor	
транзистор напівпровідникової ІС	47	транзистор полупроводниковой ИС	semiconductor integrated (circuit) transistor	
транзистор польовий	48	транзистор полевой	field-effect transistor	
транзистор польовий з керувальним <i>p-n</i> -переходом	48	транзистор полевой с управляющим <i>p-n</i> -переходом	junction-gate field-effect transistor with	
транзистор тонкоплівковий	72	транзистор тонкоплёночный	thin-film transistor (TFT)	
транзистор уніполярний	48	транзистор униполярный	unipolar transistor	
трафарет	72-75, 78, 85	трафарет	mask, screen	
трафаретний друк	78, 85, 87	трафаретная печать	screening, mask printing	
трафарет сітчастий	86	трафарет сетчатый	grid mask	
трафарет фольговий	86	трафарет фольговый	foil mask	
трихлорсилан	22	трихлорсилан	trichlorosilane	(SiHCl ₃)
тріод вакуумний	12	триод вакуумный	vacuum (thermionic) triode	
тріод напівпровідниковий	13, 14	триод полупроводниковый	semiconductor triode	
фактори зовнішнього впливу на мікросхеми	99-101	факторы внешнего влияния на микросхемы	external factors affecting microcircuits	
фізичне катодне	63	физическое катодное	physical cathode	

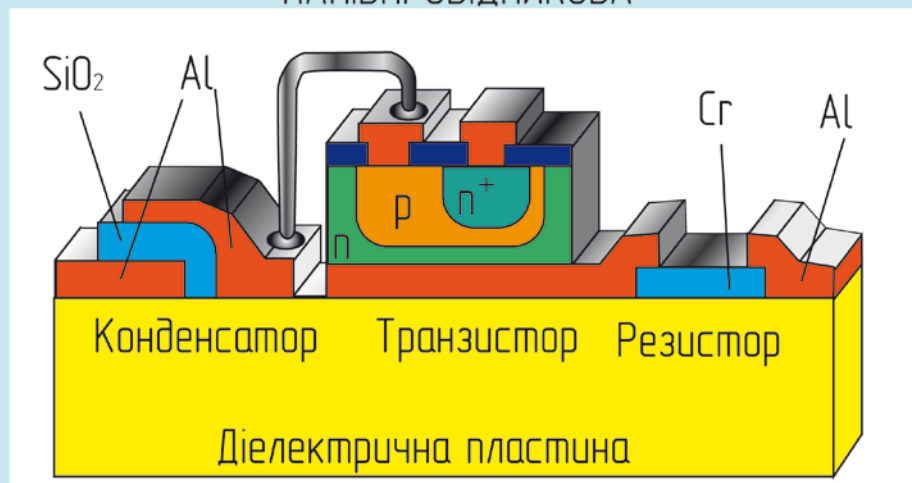
розпилювання		распыление	sputtering	
формування суцільної плівки під час конденсації пари	37	формирование сплошной плёнки при конденсации пара	continuous film formation at vapor condensation	
формування товстих плівок	78	формирование толстых плёнок	thick film formation	
фотолітографічний процес	32-34	фотолитографический процесс	photolithography process	
фотолітографія	30	фотолитография	photolithography	
фотолітографія проєкційна	34	фотолитография проекционная	projection photolithography	
фоторезист	30	фоторезист	photoresist	світлочутливий хімічно стійкий лак
фоторезиста деполімеризація	30	фоторезиста деполімеризация	photoresist depolymerization	
фоторезиста полімеризація	30	фоторезиста полімеризация	photoresist polymerization	
фоторезист негативний	31	фоторезист негативный	negative photoresist	
фоторезист позитивний	31	фоторезист позитивный	positive photoresist	
фоторезистор	12	фоторезистор	photoresistor	резистор, чутливий до світла
фотохімічний спосіб виготовлення масок	73-76	фотохимический способ изготовления масок	photochemical method of mask fabrication	
фотошаблон	30, 31, 85	фотошаблон	exposure mask, photomask	
фракціонування під час нагрівання та випаровування	60	фракционирование при нагревании и испарении	fractionation at heating and evaporation	
функціональна мікроелектроніка	20	функциональная микроэлектроника	functional microelectronics	
функціональний пристрій	16	функциональное устройство	functional device	
хемосорбція	27, 58	хемосорбция	chemisorption	
хімічна стійкість підкладок	67, 80	химическая стойкость подложек	chemical stability of substrate	
чип	91	чип	chip	кристал напівпровідниково-го приладу
шорсткість поверхні	67	шероховатость	roughness of	

підкладок		поверхности подложек	substrate surface	
-----------	--	----------------------	-------------------	--

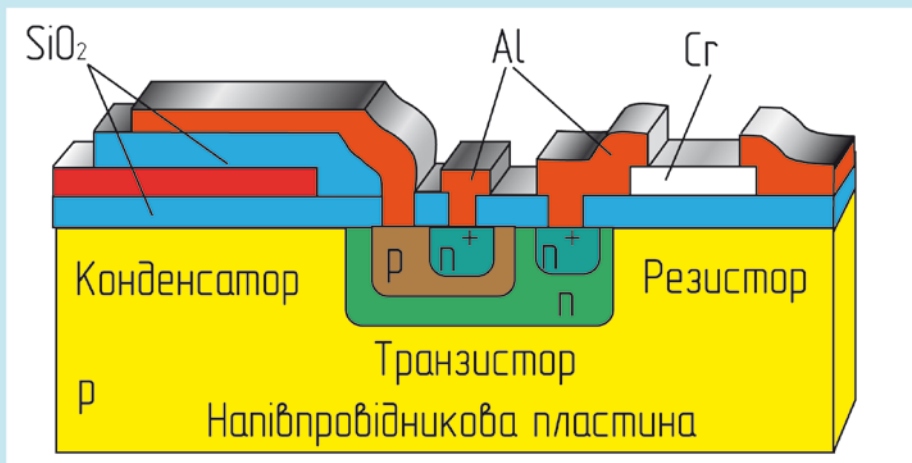
ІЛЮСТРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ



НАПІВПРОВІДНИКОВА



ГІБРИДНА

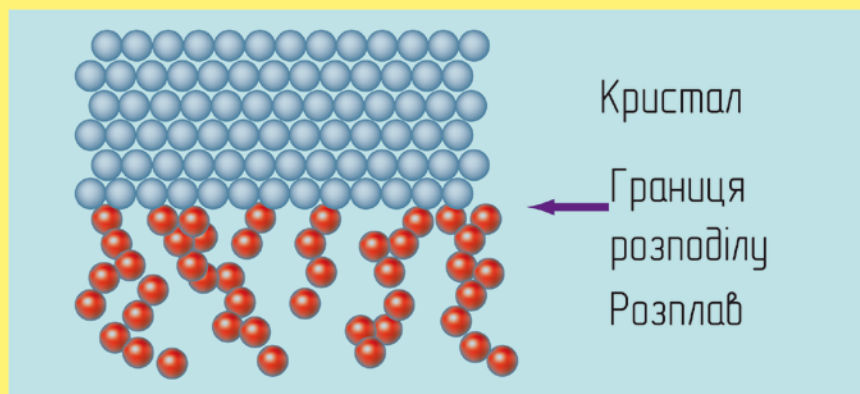
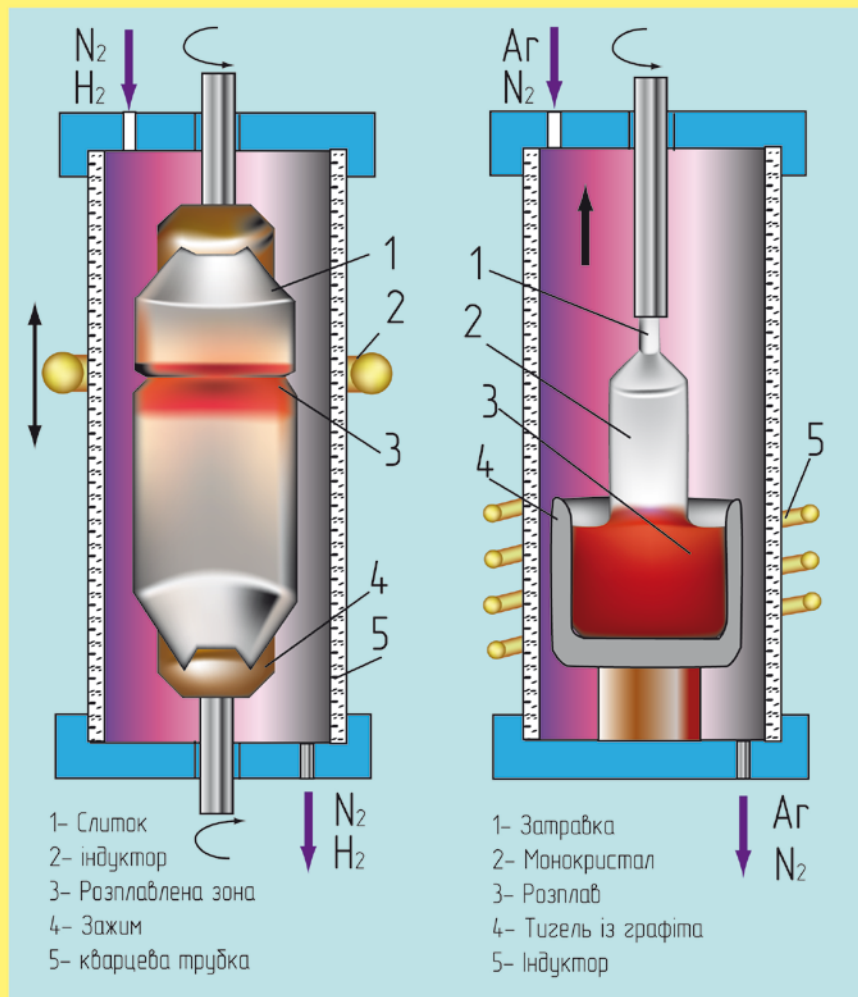


ОБ'ЄДНАНА



ЗОНА ПЛАВКА КРЕМНІЯ

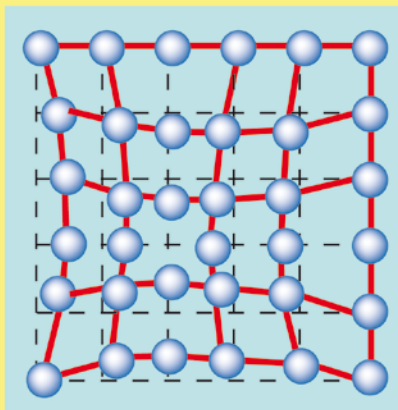
ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛА



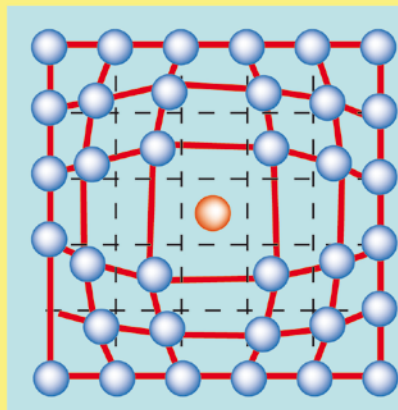
МОЛЕКУЛЯРНИЙ РЕЛЬЄФ ПОВЕРХНІ
МІЖ ТВЕРДОЮ І РІДКОЮ ФАЗАМИ



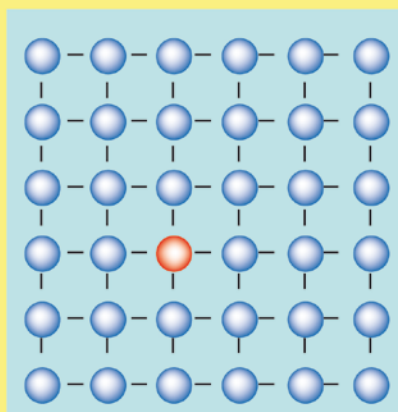
ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ



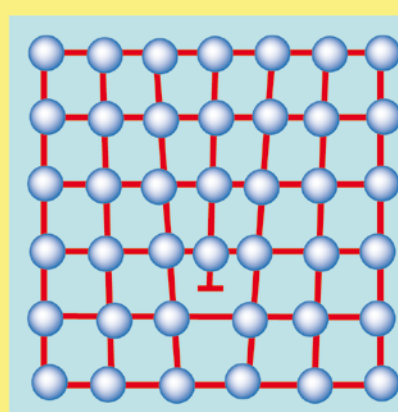
ВАКАНСІЯ



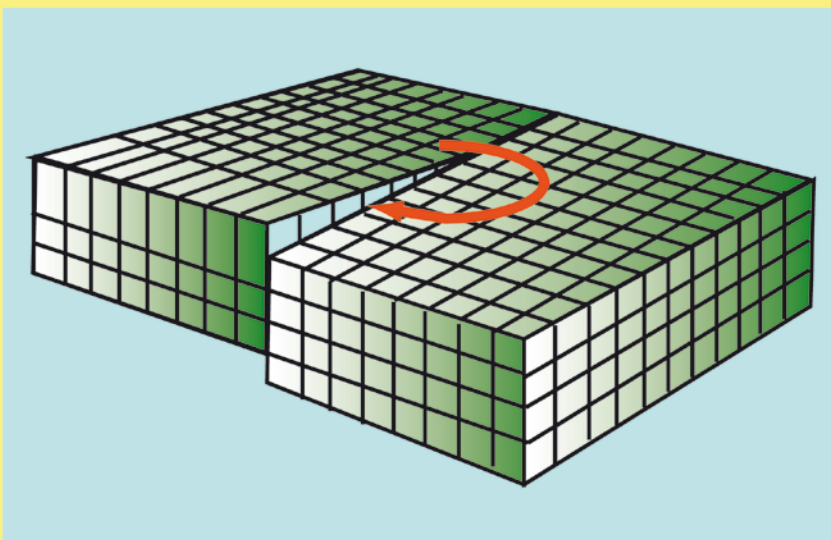
АТОМ В МІЖВУЗЛАМИ



ЗАМІНЕНИЙ АТОМ



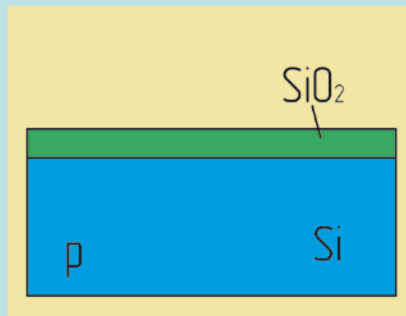
ЛІНІЙНА ДИСЛОКАЦІЯ



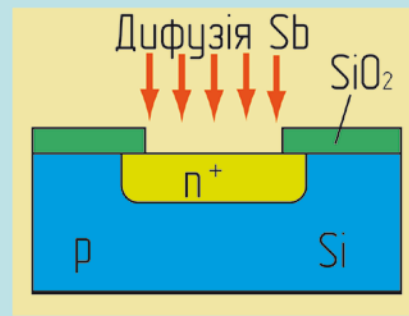
ГВИНТОВА ДИСЛОКАЦІЯ



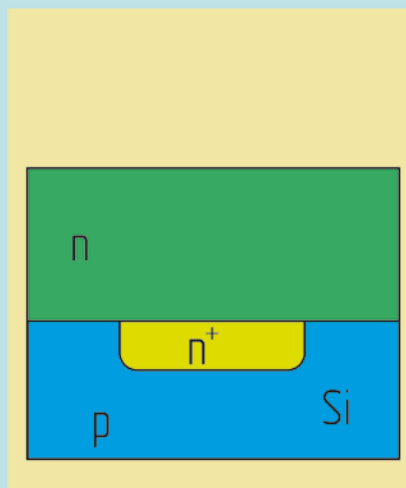
ВИГОТОВЛЕННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА



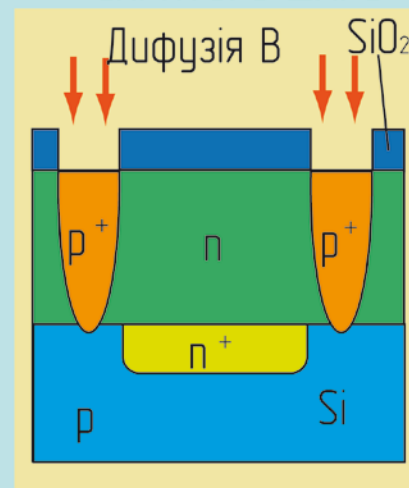
ОКИСЛЕННЯ



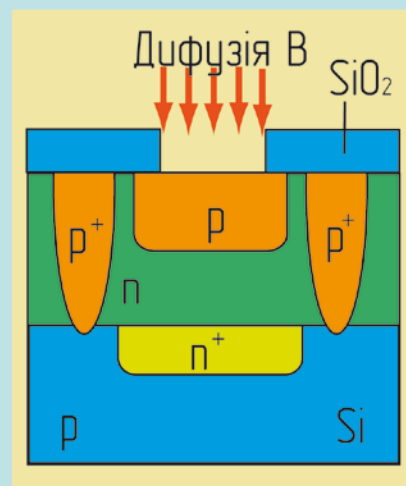
ВИГОТОВЛЕННЯ
СКРИТОГО ШАРУ



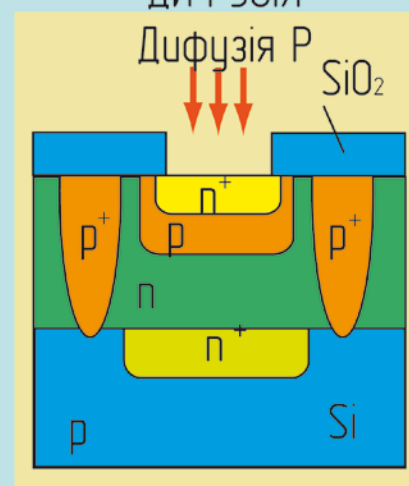
ЕПИТАКСІЯ



РОЗДІЛЬНА
ДИФУЗІЯ



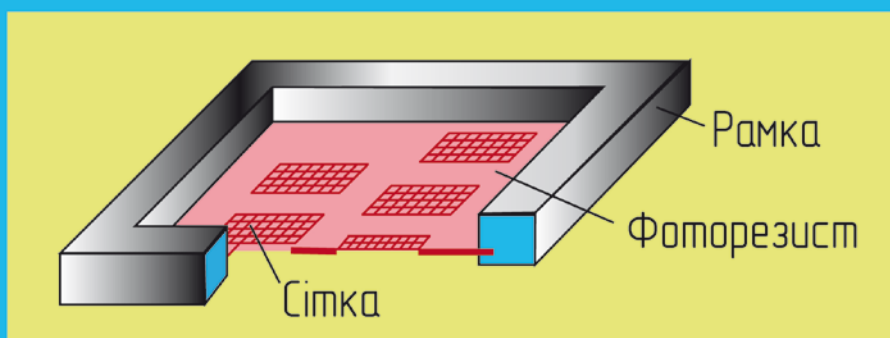
ФОРМУВАННЯ БАЗИ



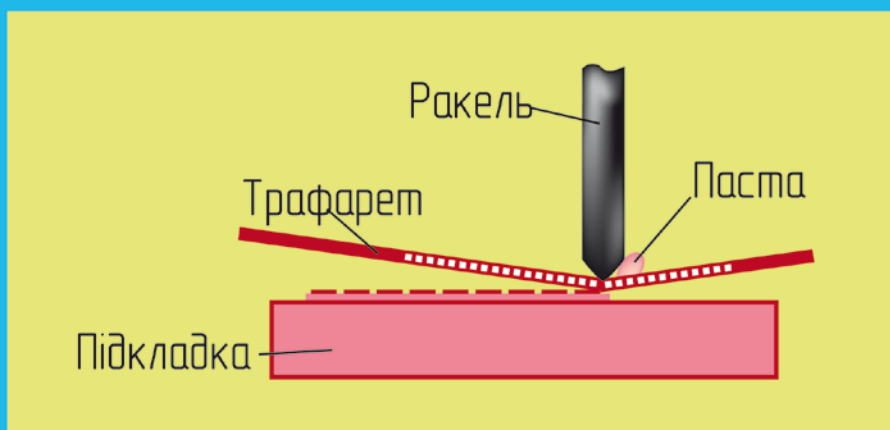
ВИГОТОВЛЕННЯ ЕМІТЕРА

IV

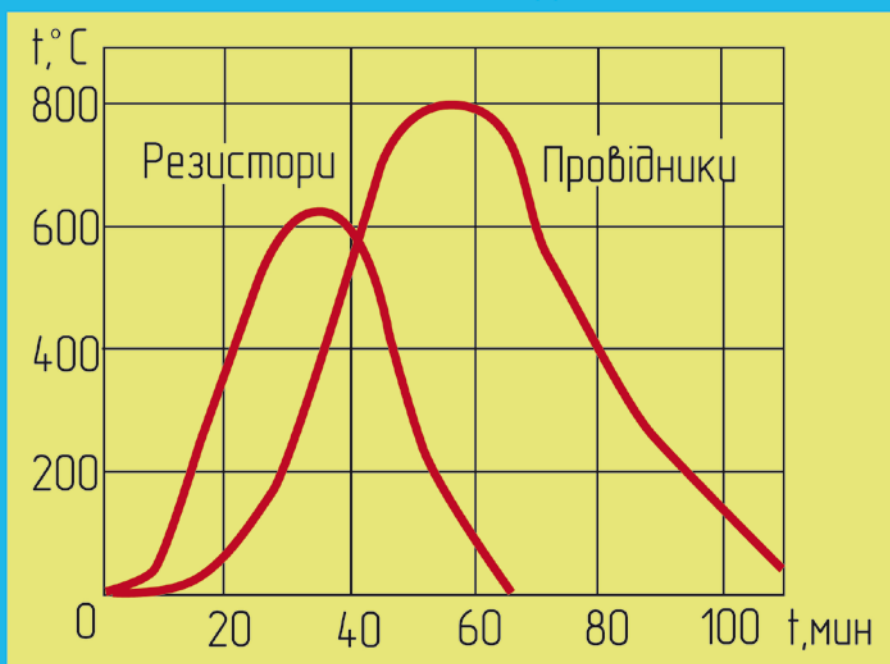
ФОРМУВАННЯ ТОВСТИХ ПЛІВОК



СІТЧАСТИЙ ТРАФАРЕТ



ТРАФАРЕТНИЙ ДРУК



РЕЖИМИ ТЕРМООБРОБКИ ПАСТ



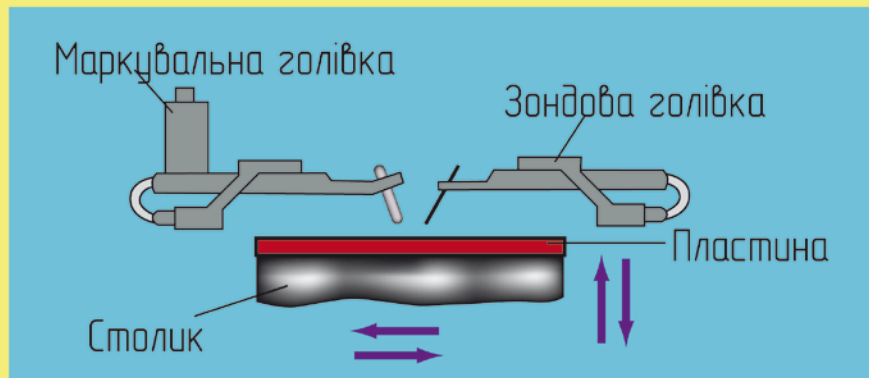
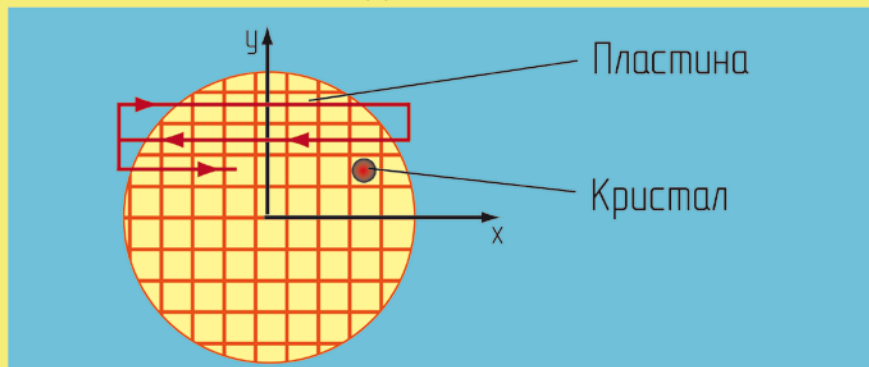
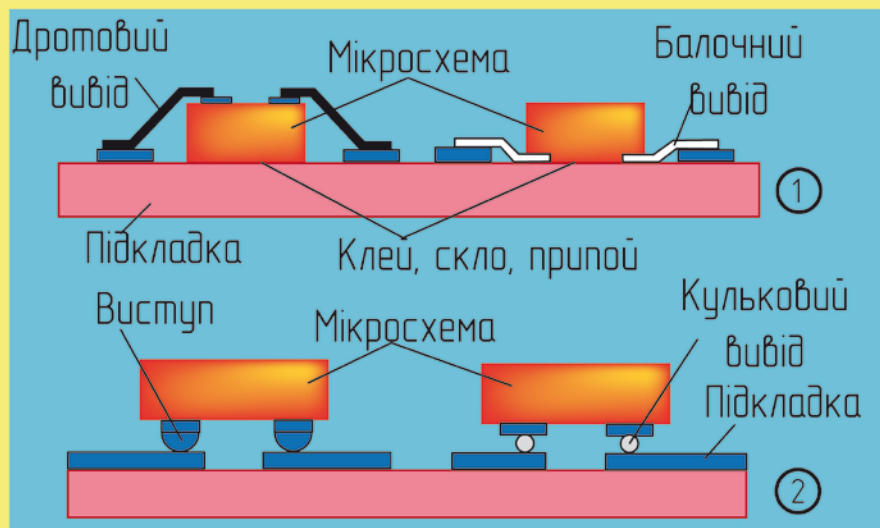


СХЕМА ЗОНДОВОГО КОНТРОЛЯ



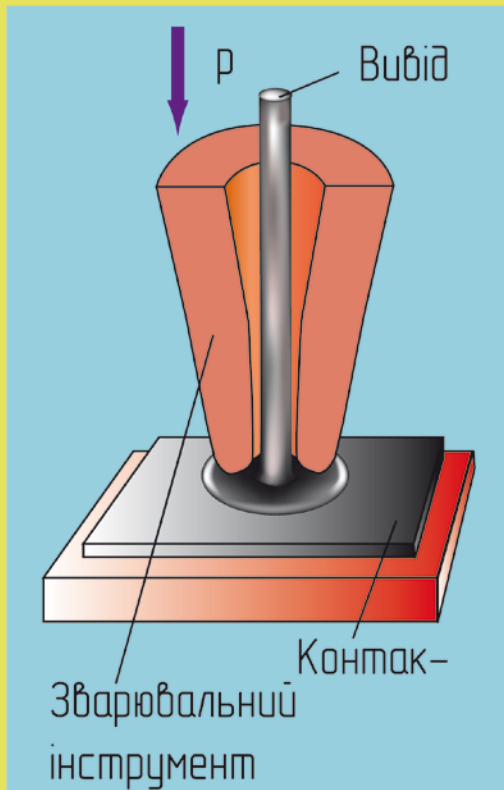
ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИМІРУ КРИСТАЛІВ НА ПЛАСТИНІ



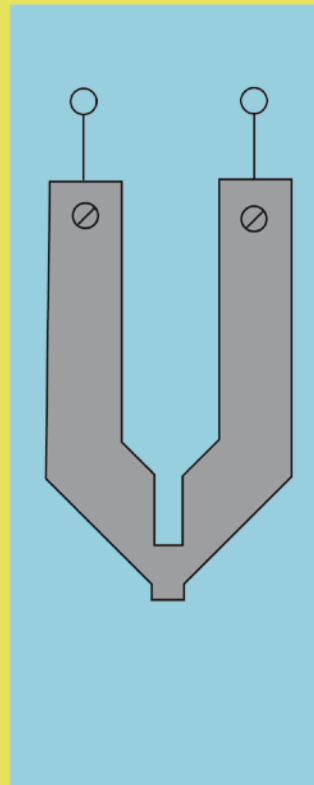
ГНУЧКІ (1) ЖОРСТКІ (2) ВИВОДИ МІКРОСХЕМ

VI

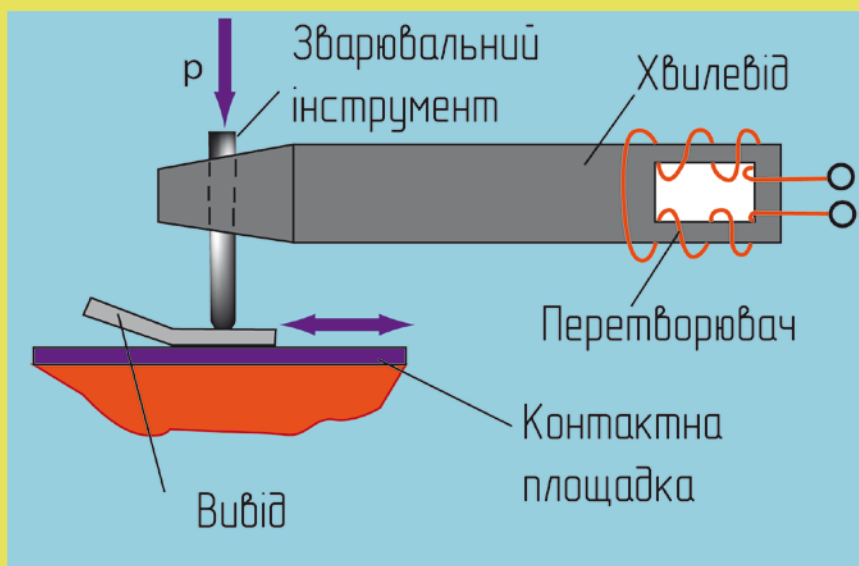
МИКРОКОНТАКТУВАННЯ ВИВОДІВ



ТЕРМОКОМПРЕСІЙНА
СВАРКА



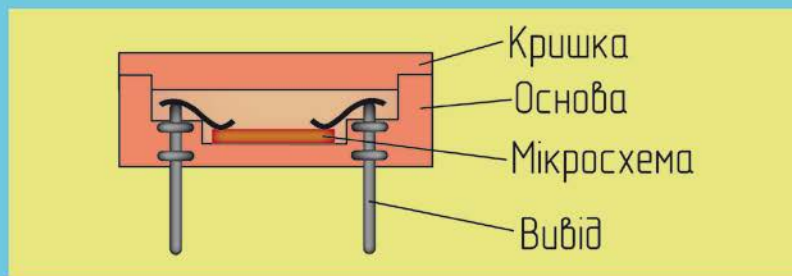
ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ
СВАРКИ НЕ ПРЯМИМ
ІМПУЛЬСНИМ
НАГРІВОМ



УЛЬТРАЗВУКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ



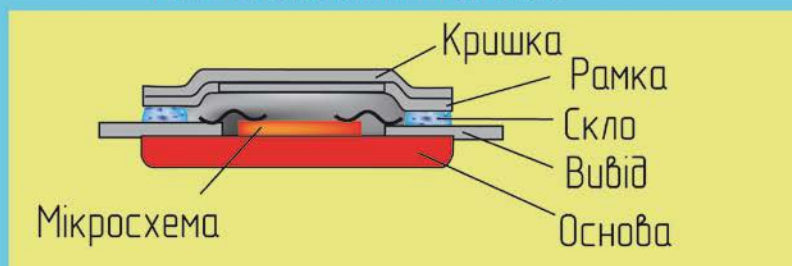
ГЕРМЕТИЗАЦІЯ МІКРОСХЕМ



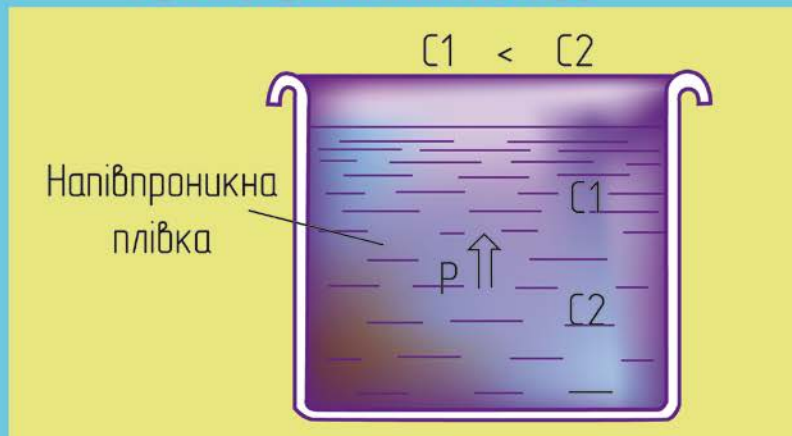
ПЛАСТМАСОВИЙ КОРПУС



МЕТАЛОСКЛЯНИЙ КОРПУС



МЕТАЛОКЕРАМІЧНИЙ КОРПУС



ВИНИКНЕННЯ ОСМОСА



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борисенко А. С. Технология и оборудование для производства микроэлектронных устройств : учебник для техникумов / Борисенко А. С., Бавыкин Н. И. – М. : Машиностроение, 1983. – 320 с.
2. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий : учебное пособие : в 2 т. / Под ред. Ю. Н. Коркишко. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – Т. 1 : Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю. Д. Чистяков, Ю. П. Райнова. – 392 с. – Т. 2 : Технологические аспекты / М. В. Акуленок и др. – 392 с.
3. Готра З. Ю. Технологія електронної техніки : навч. посібник у 2 т. / З. Ю. Готра. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2010. – Т. 1. – 888 с. – Т. 2. – 884 с.
4. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учебник для вузов / Л. А. Коледов. – М. : Лань, 2008. – 400 с.
5. Курносов А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем : учебное пособие для вузов / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – 3 изд. – М. : Высш. школа, 1986. – 368 с.
6. Малышева И. А. Технология производства интегральных микросхем : учебник для техникумов / И. А. Малышева. – М. : Радио и связь, 1991. – 344 с.
7. Николаев И. М. Оборудование и технология производства полупроводниковых приборов : учебник для техникумов / И. М. Николаев. – М. : Высш. школа, 1977. – 269 с.
8. Чернозубов Ю. С. Как рождаются микросхемы / Ю. С. Чернозубов. – М. : Просвещение, 1989. – 128 с.
9. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров : учебник для вузов / В. Н. Черняев. – М. : Радио и связь, 1987. – 464 с.
10. http://uk.wikipedia.org/wiki/Планарна_технологія
11. http://ru.wikipedia.org/wiki/Планарная_технология