

С. М. ПАВЛОВ, О. В. ВОЙЦЕХОВСЬКА

**ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ
ЗАСОБІВ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. М. ПАВЛОВ, О. В. ВОЙЦЕХОВСЬКА

**ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ
ЗАСОБІВ**

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.382
ББК 32.85я73
П12

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 23.05.2013 р.)

Рецензенти:

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор

В. С. Осадчук, доктор технічних наук, професор

С. М. Злепко, доктор технічних наук, професор

Павлов, С. М.

П12 Технологія мікроелектронних засобів : навчальний посібник. / С. М. Павлов, О. В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 169 с.

В навчальному посібнику розглянуто основні процеси технології мікроелектронних засобів, зокрема процеси механічної обробки та підготовки напівпровідникових пластин, а також такі методи отримання структур, як епітаксійне нарощування, фотолітографія, дифузія, іонна імплантація, термічне випаровування та іонно-плазмове розпилювання. Крім того, викладено питання щодо радіаційної обробки пластин та складання мікроелектронних засобів.

УДК 621.382
ББК 32.85я73

Зміст

Вступ.....	5
1 ТЕХНОЛОГІЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	7
1.1 Технологічний маршрут.....	7
Контрольні запитання.....	9
2 МЕХАНІЧНА ОБРОБКА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	10
2.1. Фізичні основи механізму руйнування крихких напівпровідникових матеріалів при механічній обробці.....	10
2.2 Абразивні матеріали.....	11
2.3. Різання напівпровідникових злитків на пластини.....	13
2.4 Різання напівпровідникових пластин на елементи (кристали).....	16
2.5 Розламування пластин після скрайбування.....	19
2.6. Шліфування напівпровідникових пластин.....	21
2.7 Полірування напівпровідникових пластин.....	23
2.8 Контроль якості механічної обробки.....	25
Контрольні запитання.....	28
3 ТЕХНОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІДГОТОВКИ ПІДКЛАДОК ІМС.....	29
3.1 Цілі технохімічних процесів підготовки підкладок.....	29
3.2 Класифікація забруднень напівпровідникових підкладок.....	30
3.3 Відмивання напівпровідникових підкладок.....	31
3.4 Хімічна обробка напівпровідникових підкладок.....	33
3.5 Хіміко-динамічна обробка напівпровідникових підкладок.....	34
3.6 Електрохімічна обробка напівпровідникових підкладок.....	35
3.7 Парогазова обробка кремнієвих підкладок.....	36
3.8 Іонно-плазмова обробка підкладок.....	37
3.9 Плазмохімічна обробка підкладок.....	40
3.10 Осадження гальванічних покриттів.....	41
3.11 Отримання особливо чистої води.....	43
Контрольні запитання.....	44
4 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ЕПІТАКСІЙНОГО НАРОЩУВАННЯ.....	45
4.1 Основні методи епітаксійного осадження.....	45
4.2 Технологічні особливості епітаксії Si і Ge.....	48
4.3 Технологічні особливості епітаксії напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$	53
4.4 Дефекти в епітаксійних структурах.....	58
4.5 Методи контролю епітаксійних шарів.....	60
Контрольні запитання.....	63
5 ФОТОЛІТОГРАФІЯ.....	64
5.1 Фотолітографія – основа планарної технології.....	64
5.2 Фоторезисти.....	65
5.3 Критерії застосовності фоторезистів.....	67
5.4 Фотошаблони і способи їх отримання.....	70

5.5 Промислове виготовлення фотошаблонів.....	76
5.6 Контактна фотолітографія.....	82
5.7 Проекційна оптична фотолітографія.....	92
5.8 Дефекти процесу фотолітографії.....	94
Контрольні запитання.....	96
6 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДИФУЗІЇ.....	97
6.1 Розподіл домішки при дифузії.....	97
6.2 Технологічні прийоми отримання дифузійних структур.....	100
6.3 Дифузійні процеси при виготовленні ІМС.....	105
6.4 Дефекти і методи контролю дифузійних структур.....	108
Контрольні запитання.....	111
7 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ.....	112
7.1 Технологічні особливості процесів іонної імплантації.....	112
7.2 Використання процесів іонної імплантації в напівпровідниковій технології.....	115
7.3 Методи контролю іонно-імплантованих структур.....	120
Контрольні запитання.....	123
8 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ВИПАРОВУВАННЯ ТА ІОННО-ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЮВАННЯ... 124	
8.1 Технологічні особливості термічного випаровування матеріалів	124
8.2 Катодне розпилювання матеріалів.....	126
8.3 Технологічні особливості іонно-плазмового розпилювання.....	126
8.4 Пасивні елементи інтегральних мікросхем.....	129
8.5 Методи контролю тонких плівок.....	135
Контрольні запитання.....	138
9 ПРОЦЕСИ РАДІАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ.....	139
9.1 Дія проникної радіації на речовину.....	139
9.2 Радіаційна літографія.....	143
Контрольні запитання.....	147
10 СКЛАДАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ.....	148
10.1 Особливості процесу складання.....	148
10.2 Приєднання кристала до основи корпусу.....	148
10.3 Приєднання виводів.....	153
10.4 Герметизація кристала.....	158
Контрольні запитання.....	164
ЛІТЕРАТУРА.....	165
ГЛОСАРІЙ.....	166

Вступ

Виникнення напівпровідникової технології зобов'язане появі транзистора. В 1947 р. був винайдений германієвий транзистор з точковими переходами. У 1950 р. був виготовлений перший площинний транзистор з *p-n-p*-структурою методом вирощування злитка германію з розплаву. Тоді ж почав розвиватися метод сплаву і в 1953 р. були виготовлені германієві сплавні транзистори з відносно тонкою (близько 5 мкм) базою, що одержується локальним струменевим електролітичним травленням пластин германію. У 1954 р. з'явилися перші кремнієві транзистори з вирощеним *p-n*-переходом. В 1958 р. були виготовлені дифузійні транзистори з *мезаструктурою*. Метод *дифузії*, на відміну від методів сплаву і вирощування злитка, дозволяв на порядок збільшити точність задавання потрібної товщини базової області і перейти до групового способу виробництва транзисторів.

В 1959 р. винайдено *планарну технологію*, яка забезпечила можливість одночасного виготовлення в єдиному технологічному процесі великої кількості дискретних напівпровідникових приладів (НП) або інтегральних мікросхем (ІМС) на одній підкладці, що дозволило суттєво знизити їх вартість. Вирощування ізолюючого шару діоксиду кремнію на поверхні кремнієвої пластини і отримання в ньому топологічного рисунка заданої конфігурації із застосуванням процесу фотолітографії дозволили добитися прецизійного контролю за розмірами елементів структури приладів. Разом з нею одним з найважливіших в технології став процес *епітаксійного нарощування шарів напівпровідника* потрібних товщини і електрофізичних властивостей на монокристалічну підкладку, розроблений в 1960 р. Епітаксійна технологія дозволила створювати транзистори з тонкою базою і низьким опором колектора, розраховані на високі частоти і великі розсіювані потужності.

Проблема складання електронного устаткування, що містить десятки і сотні тисяч компонентів – діодів, транзисторів, резисторів і ін., – привела до створення нової технології, яка дозволила позбавитися з'єднання безлічі дискретних компонентів. У 1959 р. була виготовлена перша напівпровідникова мікросхема тригера на кристалі германію за мезадифузійною технологією. У 1960 р. з'явилися інтегральні мікросхеми на кремнії, виготовлені за планарною технологією.

Отримання якісних монокристалів дозволило в 1958 р. виготовити польовий транзистор з управляючим *p-n-переходом*. У 1962 р. завдяки поліпшенню технології обробки кремнію були виготовлені польові транзистори з ізольованим затвором, а в 1963 р. – перші ІМС на таких транзисторах. Недостатня відпрацьованість технології МОН-транзисторів (метал – оксид – напівпровідник) стримувала їх широке застосування аж до 70-х років. У середині 60-х років XIX ст. в промисловості з'явився метод *іонної імплантації*, що дозволив істотно підвищити точність управління концент-

рацією і глибиною легування.

На початку 70-х років інтенсивно використовувався метод *іонно-плазмового розпилювання*, були розроблені процеси *електронної літографії*, з'явилася технологія «сухої» обробки структур, тобто без застосування рідких травників і розчинників. Почався період бурхливого розвитку мікросхем як на базі біполярних приладів, так і МОН-транзисторів. В цей же час для контролю топологічних креслень і фотошаблонів стали застосовувати обчислювальні машини, що забезпечило високу якість розробок і привело до створення систем машинного проектування мікросхем. В кінці 70-х років XIX ст. з'явилися автоматизовані технологічні процеси і установи, керовані мікро-ЕОМ.

Подальше удосконалення технології та пропорційне зменшення розмірів напівпровідникових структур сприяють покращенню характеристик (розмірів, енергоспоживання, швидкодії, вартості) напівпровідникових приладів і ІМС. Особливістю сучасного напівпровідникового виробництва є швидке підвищення ступеня інтеграції ІМС та зменшення розмірів елементів.

Навчальний посібник складається з десяти розділів. В першому розділі введено поняття про технологічний маршрут та типові операції, що входять до нього. Другий розділ присвячений механічній обробці напівпровідникових матеріалів. В третьому розділі наведено особливості технохімічних процесів підготовки підкладок ІМС, таких як хімічна, хіміко-динамічна, електрохімічна, іонно-плазмова обробка та ін. Розділи з четвертого по восьмий присвячені процесам отримання напівпровідникових структур, зокрема методами епітаксійного нарощування, фотолітографії, дифузії, іонної імплантації, термічного випаровування та іонно-плазмового розпилювання. В дев'ятому розділі описано процеси радіаційної обробки напівпровідникових структур та вплив проникної радіації на речовину. Останній розділ присвячений особливостям складання напівпровідникових мікроелектронних засобів, зокрема питанням приєднання кристалів до основи корпусу ІМС та НП, приєднанню виводів корпусу та його герметизації.

Кожен розділ посібника містить необхідний ілюстративний матеріал та контрольні запитання для кращого засвоєння матеріалу студентами.

Навчальний посібник призначений для студентів, що навчаються за освітньо-кваліфікаційними рівнями «спеціаліст» та «магістр» спеціальності «Радіоелектронні апарати та засоби», а також буде корисним для широкого кола наукових робітників, які спеціалізуються в галузі радіо- та мікроелектроніки.

Рисунок для оформлення обкладинки навчального посібника взято з [12].

1 ТЕХНОЛОГІЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Технологія напівпровідникового виробництва базується в наш час на таких складних прецизійних процесах обробки, як фото- і електронолітографія, оксидування, іонно-плазмове розпилювання, іонна імплантація, дифузія, термокомпресія та ін. До матеріалів, використовуваних у виробництві приладів і мікросхем, висувають високі вимоги за чистотою і досконалістю структури. Для здійснення більшості технологічних операцій використовують унікальне за характеристиками устаткування: оптико-механічне, термічне, іонно-променеве. Процеси здійснюються в спеціальних знепилених приміщеннях із заданими вологістю і температурою.

1.1 Технологічний маршрут

Технологічний маршрут – це послідовність технологічних операцій обробки напівпровідникових пластин, вживаних для виготовлення даного типу НП або ІМС. Документом, що містить опис маршруту, є *маршрутна карта*. Вона дозволяє судити про переміщення приладу, що виготовляється, по всіх операціях, указує устаткування, матеріали, трудові нормативи і засоби контролю. Проведення кожної технологічної операції регламентується *операційною картою*, що містить опис операції із вказанням технологічних режимів виготовлення структури або приладу і технологічного оснащення. Розглянемо приклад технологічного маршруту виготовлення НП або ІМС.

1. *Підготовка пластин*. Початкові напівпровідникові пластини – епітаксійні структури, наприклад $n-n^+$ -типу, або монокристалічні підкладки з електропровідністю n - або p -типу піддають очищенню, промивці, травленню з метою видалення з поверхні пластин забруднень і частинок пилу. Шар з електропровідністю n -типу в епітаксійній $n-n^+$ -структурі складе в розроблюваних транзисторах колекторну область (рис. 1.1, а).

2. *Створення топологічного рисунка*. Щоб в епітаксійній структурі сформувати області з електропровідністю p -типу, необхідно забезпечити проведення локальної дифузії через вікна-отвори в захисній масці. Розміри цих вікон задають за допомогою процесу фотолітографії. Маскою, що перешкоджає дифузії, слугує плівка діоксиду кремнію. Нарощування її є необхідною стадією планарного процесу. Плівка діоксиду кремнію SiO_2 товщиною 0,3–1,0 мкм надійно оберігає структуру від дії багатьох зовнішніх чинників і дифузії домішок. На плівку наносять шар фоторезисту – фотоемульсії, експонують його ультрафіолетовим світлом через фотошаблон, що містить безліч ідентичних зображень баз транзисторів із заданою конфігурацією і розмірами. Засвічені ділянки фоторезисту проявляються і оголену плівку SiO_2 видаляють. Вікно, розкрите для базової дифузії, показане на рис. 1.1, б.

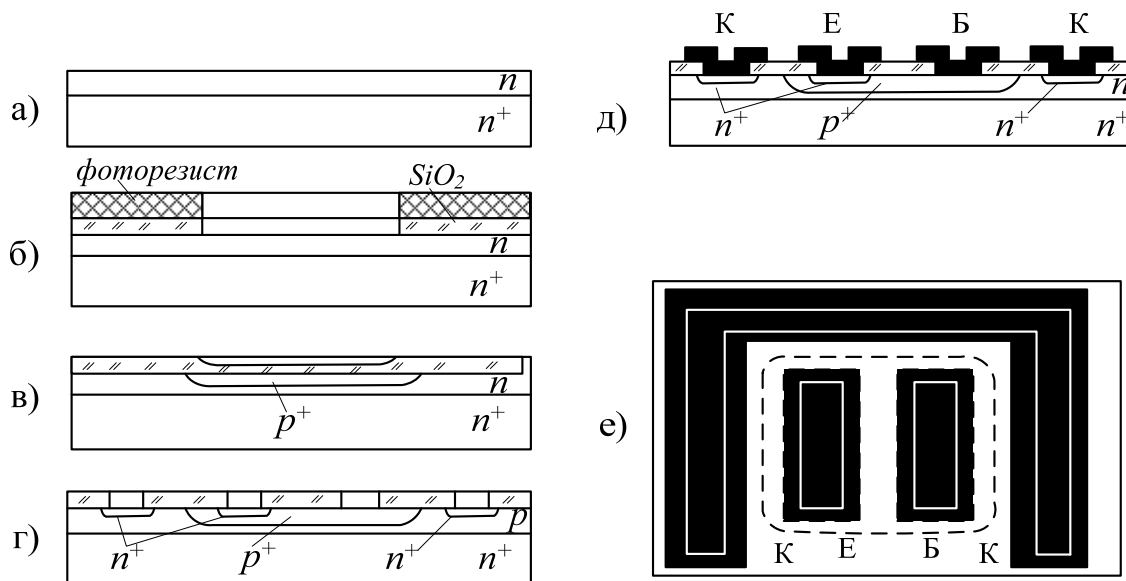


Рисунок 1.1 – Основні технологічні операції при виготовленні планарно-епітаксійного транзистора

3. *Отримання p-n-переходу база – колектор.* Для прецизійного дозування тієї кількості домішки, що вводиться в кристал – атомів бору при створенні області p-бази – використовують процес іонної імплантації, що полягає у проникненні прискорених іонів в поверхню кристала. Шар фоторезисту слугує захисною маскою, оскільки іони, прониклі у фоторезист, не досягають поверхні діоксиду. Щоб сформувати базову область і p-n-перехід колектор–база на необхідній глибині, використовують подальший дифузійний розгін прониклих атомів бору. Його проводять в окислювальному середовищі при високих температурах. В результаті формується область бази з глибиною 2–3 мкм і на поверхні базової області нарощується плівка SiO_2 завтовшки 0,3–0,5 мкм (рис. 1.1, в).

4. *Отримання p-n-переходу емітер – база.* Спочатку формують топологічний рисунок емітерних областей, використовуючи процес фотолітографії по плівці SiO_2 над базовою областю. Одночасно розкривають вікна, що задають конфігурацію колекторних контактів. Фоторезист видаляють і проводять дифузію фосфору з високою концентрацією на малу глибину (до 1–1,5 мкм) (рис.1.1, г).

5. *Контактна металізація.* Для приєднання до областей емітера, бази і колектора електричних виводів необхідно металізувати поверхні контактів. Заздалегідь проводять фотолітографічну обробку структури, для видалення плівки діоксиду з потрібних ділянок. Потім за допомогою термічного випаровування в вакуумі на всю поверхню пластини напилюють шар металу (наприклад, алюмінію) товщиною близько 1 мкм, по якому проводять ще один процес фотолітографії для видалення зайвого металу

між областями контактів. Структура з контактною металізацією показана на рис. 1.1, д. При виготовленні ІМС аналогічним чином створюють тонкоплівкові пасивні елементи – резистори, конденсатори, а також здійснюють комутацію транзисторів.

6. *Складання і герметизація.* Пластина містить від декількох сотень до десятків тисяч окремих транзисторів. Її розрізають на окремі структури, які на даному етапі називають кристалами. На рис. 1.1, е показана топологія такого кристала з контактною металізацією. Кристал напаяють на кристалотримач, здійснюють розведення – під'єднання електричних виводів до контактів бази, емітера і колектора – і герметизують, шляхом розташування в металевому корпусі або заливанням пластмасою.

7. *Випробування приладів.* Для оцінювання параметрів і надійності приладів до їх надходження у відділ технічного контролю проводять електричні, кліматичні і механічні випробування. Вони важливі для правильної інформації про якість і надійність приладів. Крім цього кожна технологічна операція супроводжується контролем якості обробки, наприклад вимірюванням глибини дифузії, товщини епітаксійного шару, питомого або поверхневого опору. Після того, як в структурі створені *p-n*-переходи, проводять контроль електричних параметрів – напруги пробою, струму витoku, ємності. У технологічному маршруті передбачені спеціальні контрольні карти.

Контрольні запитання

1. Що таке технологічний маршрут?
2. Як проводиться підготовка пластин?
3. Поясніть як відбувається створення топологічного рисунка.
4. Що треба зробити для отримання *p-n*-переходу емітер – база?
5. Для чого необхідно металізувати поверхні контактів?
6. Як відбувається випробування створених приладів?
7. Яку роль відіграє плівка діоксиду кремнію SiO_2 ?
8. Що таке операційна карта?
9. Дайте визначення маршрутної карти.

2 МЕХАНІЧНА ОБРОБКА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Фізичні основи механізму руйнування крихких напівпровідникових матеріалів при механічній обробці

Для механічної обробки напівпровідникових матеріалів не можуть бути використані звичайні токарні, фрезерні, стругальні і свердлувальні верстати, які широко застосовуються для обробки різних матеріалів. Це пов'язано з високою крихкістю напівпровідникових матеріалів. Тому основним способом їх механічної обробки є обробка з використанням абразивів як в зв'язаному стані (алмазні диски і шліфувальні апарати), так і у вільному (абразивні суспензії і алмазні пасти).

Фізична суть механізму руйнування крихкого напівпровідникового матеріалу при обробці, *вільним абразивом* полягає в тому, що частинки абразивного матеріалу, вдавлюючись в поверхню оброблюваного напівпровідникового матеріалу, викликають утворення в ній мікротріщин. Ці мікротріщини в процесі обробки збільшуються і розповсюджуються углиб від поверхні. Подальша обробка приводить до створення мережі тріщин, які, змикаючись, викликають сколення окремих ділянок напівпровідникового матеріалу. Частици, що відкололися, видаляють з поверхні початкового зразка. Таким чином відбувається пошарове видалення матеріалу і здійснюється механічна обробка початкового зразка.

Зародження мікротріщин при абразивній обробці відбувається в місцях скупчення дислокацій і інших дефектів кристалічної решітки. Особливе значення мають крайові дислокації. У місці розташування крайової дислокації найімовірніше виникнення мікротріщин.

Обробка напівпровідникових матеріалів вільним абразивом проводиться з використанням різних абразивних суспензій, складовою частиною яких є рідина. Наявність рідини сприяє процесу механічної обробки напівпровідникових матеріалів; оскільки абразивний порошок знаходиться в рідині в завислому стані і рівномірно розподілений в ній.

Наявність рідини при обробці дає можливість більш рівномірного розподілу абразивних зерен по всій оброблюваній поверхні початкового зразка. Рідина переносить нову порцію абразивних зерен, що поступають із дозатора, і виносить із зони обробки зруйновані частинки оброблюваного матеріалу. Змочені абразивною суспензією оброблювані поверхні не піддаються перегріву, який може привести до погіршення якості механічної обробки. Якщо рідиною є не чиста вода, а лужні або кислотні розчини, то така рідина при абразивній обробці хімічно діє на оброблюваний напівпровідниковий матеріал. Крім того, рідина здатна проникати в мікротріщини, що є на поверхні напівпровідникового матеріалу, і сприяти відколюванню від його поверхні окремих частинок за рахунок розклинюючої дії сил поверхневого натягу.

Фізична суть процесу механічної обробки *зв'язаним абразивом*, полягає в тому, що при обробці зв'язаним абразивом до руйнування під дією нормальної сили, направленої перпендикулярно до поверхні (випадок обробки вільним абразивом), додається руйнування оброблюваного матеріалу за рахунок зрізу мікроставів поверхні закріпленим зерном абразиву під дією зсувної сили, направленої уздовж поверхні пластини.

При обробці вільним абразивом ударна сила направлена всередину оброблюваного напівпровідникового матеріалу, і абразивні зерна викликають сильне руйнування поверхневого шару. При обробці зв'язаним абразивом основна частина зусиль направлена не всередину зразка, а уздовж його поверхні, що викликає меншу глибину руйнування початкового матеріалу при тій же товщині видаленого шару. Рідина при обробці зв'язаним абразивом використовується лише для охолодження ріжучого інструменту і оброблюваного напівпровідникового матеріалу.

2.2 Абразивні матеріали

Слово «абразив» латинського походження, в перекладі на українську мову означає «скрепти». Це поняття і визначає характер обробки, що виконується абразивними матеріалами. Головною особливістю абразивних матеріалів є їх висока твердість в порівнянні з іншими матеріалами. На використанні відмінності в твердості напівпровідникових і абразивних матеріалів побудовані всі процеси механічної обробки напівпровідникових матеріалів.

Абразивні матеріали характеризуються такими основними параметрами: твердістю, абразивною здатністю, механічною і хімічною стійкістю.

Під *твердістю* розуміють здатність абразивного матеріалу чинити опір втискуванню в нього іншого матеріалу, який не одержує залишкових деформацій. Твердість зазвичай визначають нанесенням риски (подряпини) одним матеріалом на інший. Матеріал твердіший залишає на м'якшому подряпину певної глибини. За цим принципом побудована мінералогічна шкала Мооса, за якою найтвердішому матеріалу алмазу відповідає десятий клас, корунду – дев'ятий, топазу – восьмий, кварцу – сьомий і т. п.

Точнішою характеристикою абразивного матеріалу є мікротвердість, що визначається глибиною втискування в досліджуваний матеріал алмазної голки.

Під *абразивною здатністю* розуміють можливість за допомогою одного матеріалу обробляти інший або групу різних матеріалів. Абразивна здатність визначається кількістю видаленого з поверхні оброблюваного матеріалу в одиницю часу. Якщо прийняти абразивну здатність алмазу за одиницю, то абразивна здатність інших матеріалів матиме такі значення: карбід бору – 0,6; карбід кремнію – 0,5; монокорунд – 0,25; електроко-

рунд – 0,15.

Під *механічною стійкістю* розуміють здатність абразивного матеріалу витримувати механічні навантаження і не руйнуватися при механічній обробці напівпровідникових матеріалів.

Під *хімічною стійкістю* розуміють здатність абразивних матеріалів не змінювати своїх механічних властивостей в розчинах лугів, кислот, а також у воді і органічних розчинниках.

У виробництві напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем застосовують такі види абразивних матеріалів: алмаз, карбід кремнію, карбід бору, електрокорунд, оксид хрому і аеросил. Розглянемо основні властивості цих матеріалів.

Алмаз – найтвердіший з відомих мінералів. Його мікротвердість дорівнює $9,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. У промисловості використовуються, в основному, штучні алмази, які одержують з графіту, обробленого під великим тиском і при високій температурі.

Карбід кремнію – хімічна сполука кремнію з вуглецем, що одержується нагріванням суміші кварцового піску з коксом в електричних пічках при температурі вищій за $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Хімічно чистий карбід кремнію безбарвний, а технічний залежно від кількості домішок набуває відтінків від ясно-зеленого до чорного. Твердість за шкалою Мооса 9,2. Мікротвердість дорівнює $3,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Випускають карбід кремнію двох різновидів: зелений і чорний. Чорний карбід кремнію відрізняється від зеленого більшою крихкістю і меншою твердістю.

Карбід бору – хімічна сполука бору з вуглецем. Його твердість близька до твердості алмазу і за шкалою Мооса дорівнює 9,7. Мікротвердість його $4,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

Електрокорунд – кристалічний оксид алюмінію, що одержується в результаті плавлення хімічно чистого оксиду алюмінію (глинозему). При переході з розплавленого стану в твердий оксид алюмінію кристалізується в α -корунд – речовину білого кольору. Мікротвердість електрокорунда складає $1,8 \cdot 10^{10} - 2,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Твердість за шкалою Мооса – 9. Електрокорунд, що випускається промисловістю, залежно від вмісту Al_2O_3 поділяють на три групи: електрокорунд білий (98,5–99,5% Al_2O_3), електрокорунд нормальний (91–96% Al_2O_3) і електрокорунд чорний (65–75% Al_2O_3).

Оксид хрому – порошок зеленого кольору, що одержується відновленням двохромовоокислого амонію сіркою. Одержаний сплав подрібнюють і відмивають водою від іонів SO_4 і інших водорозчинних солей. З відмитого оксиду хрому беруть фракцію з потрібним розміром зерен.

Аеросил – рихлий голубувато-білий порошок, що є чистим діоксидом кремнію. Випускається марок А-175, А-300 і А-380, в яких середній розмір частинок складає відповідно 10–40, 5–20 і 5–15 $\mu\text{м}$.

Всі абразивні матеріали відрізняються розміром зерен і поділяються на чотири групи: шліфзерна (від 200 до 16), шліфпорошки (від 12 до 3),

мікропорошки (від М63 до М14) і тонкі мікропорошки (від М10 до М5).

Кожен номер зернистості абразивних матеріалів цих груп характеризується п'ятьма фракціями: граничною, великою, основною, комплексною і дрібною.

2.3 Різання напівпровідникових злитків на пластини

Процес різання напівпровідникових злитків на пластини включає розрізання монокристалічного злитка на тонкі (250 – 600 *мкм*) плоскопаралельні пластини і є початковою операцією в загальному циклі виготовлення напівпровідникових приладів і ІМС.

Для розрізання монокристалічних злитків на пластини використовують два способи: різання диском з алмазною внутрішньою кромкою; різання металевими полотнами із застосуванням абразиву.

Різання алмазним диском з внутрішньою ріжучою кромкою широко використовується у виробничих, а різання полотнами — в лабораторних умовах.

Суть методу різання *алмазним диском з внутрішньою ріжучою кромкою* полягає в тому, що на шпindelь верстата кріплять алмазний диск і за допомогою спеціальних розтягувальних болтів регулюють його радіальне натягнення. Всередину порожнистого шпинделя поміщують утримувач з приклеєним до нього напівпровідниковим злитком. Перед початком весь злиток знаходиться усередині шпинделя, а торцева його частина трохи виступає за кромку площини алмазного диска. При включенні верстата шпindelь із закріпленим на ньому алмазним диском починає обертатися. Якщо утримувач із злитком переміщати в горизонтальному (або вертикальному) напрямку, то в певний момент злиток торкнеться своєю бічною поверхнею кромки алмазного диска і починається процес різання. При повному відрізанні пластини від злитка утримувач відводиться в початкове первинне положення і висувається із шпинделя на довжину, що дорівнює товщині відрізуваної пластини. Після цього процес різання повторюють (рис. 2.1).

Кожне алмазне зерно, закріплене на кромці металевого диска, є мікрорізець, який сколює мікрочастинки з оброблюваної поверхні напівпровідникового матеріалу. Процес різання йде при великій частоті обертання шпинделя (3000 – 5000 *об/хв*), що сприяє збільшенню його продуктивності. При різанні відбувається виділення великої кількості теплоти в місці зіткнення алмазної кромки диска з поверхнею напівпровідникового матеріалу. Тому протягом всього процесу різання в область контакту диск – злиток безперервно подають охолодну рідину.

Режим різання вибирають, виходячи з конкретних умов: виду напівпровідникового матеріалу, діаметра, товщини відрізуваної пластини, вимог за: класом і чистотою обробки, точністю геометричних розмірів і площинністю та плоскопаралельністю пластини.

Слід зазначити, що при різанні злитка частоту обертання шпинделя потрібно вибирати рівною 3000 – 5000 об/хв. При частотах обертання, менших 3000 об/хв, продуктивність процесу різання різко знижується, а при частотах, вищих 5000 об/хв, зростають вібрації верстата, які викликають биття диска, що, у свою чергу, призводить до зниження чистоти обробки поверхні напівпровідникових пластин і різкого збільшення витрати напівпровідникового матеріалу.

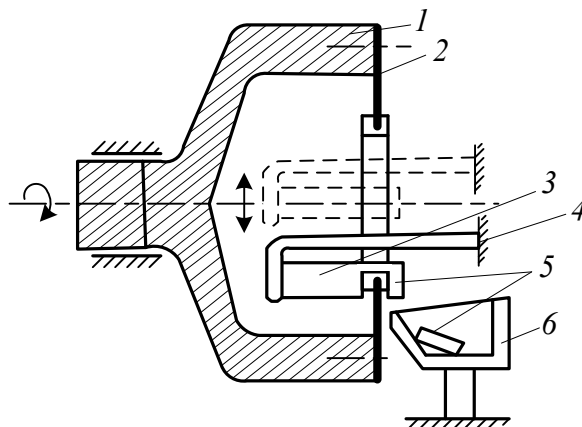


Рисунок 2.1 – Схема різання злитка на пластини алмазним диском з внутрішньою ріжучою кромкою:

- 1 – шпиндель; 2 – диск з алмазною кромкою; 3 – злиток;
4 – тримач злитка; 5 – відрізана пластина; 6 – збірник

На процес різання істотно впливає швидкість подачі злитка (сила притиснення до алмазного диска). При малих швидкостях подачі злитка продуктивність процесу різання дуже мала. Із збільшенням швидкості подачі продуктивність підвищується, а точність обробки знижується за рахунок прогинання диска. Відрізувана пластина матиме викривлену поверхню. При малій товщині пластини це може привести до її розлому в процесі різання. Тому рекомендується нижча швидкість подання (20 – 30 мм/хв) для тонких (200 мкм) пластин і вища швидкість подання (60 – 80 мм/хв) для товстіших пластин (400 мкм). На швидкість подачі також істотно впливає твердість оброблюваного матеріалу. Твердіший матеріал (наприклад, кремній) розрізають при менших швидкостях подачі ніж м'якший (германій).

Якість процесу різання великою мірою залежить від вживаної охолодної рідини і її витрати. Для цього виду механічного різання рекомендується використовувати воду або 3,5%-ний водний розчин кальцинованої соди. Найкращим способом подачі охолодної рідини в зону різання є подача її зверху вниз безпосередньо на ріжучу кромку алмазного диска, який повинен розтинати струмінь рідини навпіл. В цьому випадку диск рівномірно охолоджується з обох боків. Рекомендується вибирати витрату рідини, рівну 2 – 4 л/хв.

Стійкість алмазних дисків залежить від режимів різання, роду оброблюваного матеріалу і якості кріплення диска на шпинделі (натягнення, биття, вібрація і ін.).

Процес зношування робочої поверхні алмазного диска характеризується трьома періодами: 1) фарбування із зв'язки окремих неміцно закріплених алмазних зерен; 2) округлення вершин і розщеплювання алмазних зерен, а також часткове сколювання окремих зерен по площині спайки; 3) збільшення втомних явищ в основі диска, зерні, зв'язці.

Стійкість алмазних дисків пов'язана з основними технологічними чинниками співвідношенням

$$G = \frac{K_G v^a}{s^b},$$

де K_G - коефіцієнт, що характеризує оброблюваний матеріал;

v — частота обертання диска, об/хв;

s — швидкість подачі, мм/хв;

a і b — сталі коефіцієнти.

Теплові явища, що виникають при різанні злитка на пластини, істотно впливають на якість різання: збільшується товщина порушеного шару, створюються залишкові напруги і мікронерівності, структурні зміни поверхні напівпровідникового матеріалу і алмазного диска.

Перевагами методу різання алмазними дисками з внутрішньою ріжучою кромкою є: висока продуктивність; 7–8-й клас чистоти обробки; малий розкид за товщиною пластин (± 20 мкм); малі відходи напівпровідникового матеріалу при різанні.

Недоліком методу є складність установа алмазного диска, його натягнення і центрування.

Метод різання злитків на пластини *сталевими полотнами* має такі переваги. По-перше, для різання напівпровідникових матеріалів можуть бути використані металеві полотна досить малої товщини (менше 0,05 мм), які дозволяють одержувати дуже тонкий розріз. По-друге, якість різання значно вища, ніж при алмазній обробці. Це пояснюється певними особливостями процесу різання полотнами. Тут ріжучою речовиною є абразивний порошок, що подається у вигляді суспензії в робочу зону різання, а металеве полотно або набір полотен слугує тільки засобом перенесення абразивного порошку по площині розрізу напівпровідникового матеріалу. Абразивні частинки, рухаючись під дією металевих полотен, однією стороною своєї грані вминаються в полотно, а іншою стороною впливають на поверхню оброблюваного напівпровідникового матеріалу. Взаємодія абразивних зерен з напівпровідниковим матеріалом приводить до появи мікротріщин і виколувань в останньому і пошаровому видаленню оброблюваного матеріалу.

Таким чином, даний процес різання більше нагадує шліфування віль-

ним абразивом, яке характеризується меншою кількістю механічних пошкоджень поверхні напівпровідника.

Різання полотнами полягає в тому, що металеві полотна набирають в обойму від декількох одиниць до декількох сотень штук. Прокладки, розташовані між полотнами, дають можливість встановлювати потрібний розмір відрізуваних від злитка пластин. Набрану обойму встановлюють на робочій скобі верстата. Обойма може здійснювати зворотно-поступальні рухи в горизонтальному напрямку зі швидкістю 200 – 600 (*рух. ход/хв*) Розрізуваний злиток, заздалегідь приклеєний до робочого столика верстата, підводять до рухомих полотен знизу до зіткнення і встановлюють певну швидкість подачі злитка. У зону різання подають абразивну суспензію.

До недоліків цього методу різання слід віднести невисоку точність обробки в порівнянні з різанням алмазним диском з внутрішньою ріжучою кромкою. Це пояснюється тим, що у диска більша жорсткість конструкції, ніж у полотен. Полотна в пакеті не вдається рівномірно і сильно натягнути. Крім того, в процесі різання полотна нерівномірно зношуються і натягнення їх нерівномірно слабшає.

2.4 Різання напівпровідникових пластин на елементи (кристали)

Операція різання напівпровідникових пластин на елементи полягає в розділенні пластин на окремі елементи (кристали) і проводиться (при виготовленні ІМС за планарною технологією) не на початку загального циклу, а в його кінці, безпосередньо перед процесом складання.

Для розділення напівпровідникових пластин на кристали використовують такі способи: різання алмазним диском із зовнішньою ріжучою кромкою; різання металевими полотнами із застосуванням абразиву; різання металевими полотнами з алмазною ріжучою кромкою (штрипсами); різання дротом із застосуванням абразиву; різання з використанням ультразвукових установок; алмазне скрайбування з подальшим розламуванням; електронно-променево скрайбування з подальшим розламуванням; лазерне скрайбування з подальшим розламуванням.

Використання вказаних способів різання пластин на кристали обумовлене вимогами до конкретного типу ІМС і технології її виготовлення.

Різання *алмазним диском із зовнішньою різальною кромкою* відрізняється від розглянутого різання злитка на пластини. Відмінність полягає в конструкції алмазного диска, у якого різальна алмазна кромка нанесена на його периферійну частину. Конструкція такого диска принципово не може бути використана для розрізання злитка на пластини через малу жорсткість конструкції, що не дозволяє одержувати глибокі прорізи без порушення якості обробки.

Проте для розрізання пластин на кристали, коли глибина прорізу не перевищує 0,5 мм, успішно використовують алмазні диски із зовнішньою різальною кромкою. Більш того, для збільшення продуктивності процесу

часто використовують не одинарні диски (як при різанні злитків), а набори дисків, причому прокладки між дисками задають розмір відрізаного елемента (кристал). При використанні набору дисків можна істотно зменшити їх товщину (до 0,1 мм) і, отже, ширину прорізу (до 0,2 мм). При добре налаштованому устаткуванні розкид кристалів за геометричними розмірами не перевищує $\pm 0,03$ мм, що дає можливість окремі розрізані цим способом кристали з напівпровідниковими приладами і ІМС скласти і комплектувати в обойми.

Різання металевими полотнами з використанням абразиву, використовуване для розрізання пластин на кристали, не відрізняється від розглянутого аналогічного способу різання злитка на пластини.

Різання полотнами з алмазною різальною кромкою (штрипсами) включає зворотно-поступальний рух металевих полотен і взаємодію алмазних зерен з напівпровідниковим матеріалом. Тому різання напівпровідникових пластин на кристали здійснюється без застосування абразиву з використанням охолодної рідини.

Різання дротом із застосуванням абразиву використовується для отримання кристалів квадратної і прямокутної форм з пластин початкового матеріалу. Різання дротом має два різновиди. У одному випадку дріт намотується на ролик, укріплений на спеціальній вилці, яка приводиться в зворотно-поступальний рух кривошипно-шатунним механізмом. Різання в цьому випадку проводиться аналогічно різанню полотнами з тією лише різницею, що замість полотен натягнуто дріт. При цьому виді різання дріт, здійснюючи зворотно-поступальний рух з вилкою, поволі перемотується. Перемотування необхідне для рівномірного зносу дроту по всій робочій довжині.

У іншому випадку різання відбувається за принципом перемотування дроту з одного ролика на інший з великою швидкістю. В процесі перемотування відбувається різання пластин на кристали. При різанні в обох випадках на дріт безперервно подається абразивна суспензія.

Метод різання дротом має такі переваги. Для малих швидкостей подачі оброблюваного матеріалу відбувається незначне його руйнування, що дозволяє різати напівпровідникові пластини з покриттями із золота, алюмінію, нікелю, міді і інших металів без їх відшарування від підкладки.

Крім того, якщо заміна зношених полотен трудомістка, то на заміну дроту витрачається значно менше часу. Метод різання дротом забезпечує отримання кристалів правильної геометричної форми з бічними гранями, перпендикулярними до робочої поверхні. Мінімальний розмір кристала, що одержується цим способом різання, дорівнює $0,5 \times 0,5$ мм.

Для різання напівпровідникових пластин зазвичай використовують дріт з вольфраму, сталі, нікелю, ніхрому і сплаву МВ-50. Діаметр дроту вибирають в межах 0,05–0,15 мм, при цьому ширина прорізу відповідно змінюється від 0,08 до 0,2 мм.

До основної переваги методу різання дротом слід віднести: можли-

вість отримання вузьких прорізів в напівпровідниковій пластині і високу якість обробки поверхні (відсутність відколків на кутах кристалів).

Різання пластин на елементи з використанням ультразвукових установок застосовується в тих випадках, коли необхідно одержати елемент круглої або складнішої геометричної форми. Суть процесу ультразвукового різання полягає в тому, що струм від генератора ультразвукових коливань з частотою 15 – 70 кГц подається на обмотку електричного перетворювача-вібратора, який перетворює їх в пружні механічні коливання. Ці коливання посилюються концентратором і передаються на ріжучий інструмент, який приводиться в зіткнення з поверхнею напівпровідникової пластини, що розрізається. В область різання безперервно подається абразивна суспензія. Зерна абразиву, набуваючи значних прискорень під дією ультразвукових коливань ріжучого інструменту, впливають на напівпровідниковий матеріал, руйнуючи його точно під робочою частиною ріжучого інструменту. При ультразвуковому різанні відбувається руйнування ріжучого інструменту за рахунок стирання. Форму ріжучого інструменту вибирають залежно від необхідної форми кристала.

Алмазне скрайбування найширше застосовується для розділення пластин на кристали квадратної і прямокутної форм. Суть способу полягає в тому, що на поверхні напівпровідникової пластини алмазним різцем наносять прорізи в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Глибина прорізів не перевищує 5 – 10 мкм, а ширина – 20 – 40 мкм. Навколо нанесеного прорізу на поверхні напівпровідникової пластини виникають механічні напруги, що послаблюють матеріал в локальних ділянках. При прикладенні до пластини згинальної сили вона розламується вздовж нанесених рисок.

Основною перевагою способу алмазного скрайбування є відсутність пропилю в напівпровідниковій пластині і, як наслідок цього, немає відходів напівпровідникового матеріалу при різанні.

Мінімальний крок (сторона кристалу) нанесення прорізу для германію складає 0,4 мм, а для кремнію – 0,5 мм. Мінімальний розмір кристала h і товщина початкової напівпровідникової пластини l пов'язані співвідношенням $h = kl$, де $k = 4$ – для кремнію і $k = 3,2$ – для германію.

Для алмазного скрайбування застосовують різці з алмазним наконечником. Залежно від геометричної форми різальної частини алмазного наконечника, всі різці поділяють на три основні типи: з робочою частиною у вигляді тригранної піраміди, чотиригранної піраміди та чотиригранної усіченої піраміди. Кожен тип алмазного різця використовується для обробки певного напівпровідникового матеріалу. Так, для різання пластин з германію товщиною 100–250 мкм застосовують різці з ріжучою частиною у вигляді тригранної піраміди, а для різання пластин з кремнію товщиною 200–500 мкм – різці з алмазним наконечником, що має форму чотиригранної піраміди з гострою вершиною.

Електронно-променево скрайбування. Нанесення рисок на поверхні

напівпровідникової пластини, разом з алмазним різцем, можна проводити, гострофокусованим *електронним променем*. Суть способу полягає в скануванні електронного променя по поверхні напівпровідникової пластини з певним кроком, що дорівнює стороні кристала. Електронний промінь, маючи достатню енергію, проводить мікророзплавлення локальної ділянки поверхні напівпровідникової пластини. Процес нагрівання і охолодження локальних областей (борозенок) напівпровідникової пластини відбувається протягом короткого часу, що викликає виникнення термо-механічних напруг в області створених електронним променем борозенок. При подальшому прикладенні до пластини згинальної сили пластини розколюється по борозенках.

За певних умов (товщина розрізувальної пластини, діаметр променя, потужність установки й ін.) метод електронного променя дозволяє проводити наскрізне розрізання напівпровідникового матеріалу за рахунок розплавлення і подальшого випаровування локальної ділянки напівпровідникової пластини.

Лазерне скрайбування застосовується для розділення пластин на кристали. При лазерному скрайбуванні різання на поверхні напівпровідникової пластини проводиться не механічним, а електрофізичним способом (подібно до електронного променя) шляхом нагрівання і випаровування вузької смуги напівпровідникового матеріалу. Даний метод дозволяє проводити скрайбування пластин з будь-яким покриттям на будь-яку глибину і наскрізне розділення.

Розміри прорізу (ширина і глибина), зона термічного впливу лазерного променя, а також швидкість скрайбування і рівномірність видалення напівпровідникового матеріалу по всій довжині прорізу визначаються швидкістю переміщення пластини щодо лазерного променя, потужністю, частотою і тривалістю імпульсу лазерного випромінювання, а також розміром сфокусованої плями.

2.5 Розламування пластин після скрайбування

Процес розламування пластин після скрайбування є важливою операцією в загальному циклі розділення пластин на елементи. Неточне розламування навіть добре проскрайбованих пластин може привести до значного браку одержуваних кристалів: відколів, нерівних граней, спотворення геометричної форми.

Розламування пластин з нанесеними на її поверхню прорізами базується на створенні розтягувальних зусиль, які викликають появу тріщин вздовж нанесених прорізів. В цьому випадку критичним є значення кута розколювання, від якого залежать відхилення геометричних розмірів розрізувальних елементів.

Застосовують різні способи розламування пластин на окремі кристали. Розглянемо три найбільш широко використовуваних.

При *першому способі* (ручному) пластину поміщають на м'яку підкладку (гуму, поролон і ін.) прорізами вниз і зверху прокатують гумовим валиком в двох взаємно перпендикулярних напрямках, причому вісь валика повинна бути строго паралельна прорізам, по яких йде розламування, інакше ламання пластини може відбутися не по прорізах, а в довільних напрямках.

Таким чином, при першому прокатуванні валика по поверхні пластини з прорізами вона розламується на смуги, а при другому прокатуванні в перпендикулярному напрямі смуги розколюються на квадратні або прямокутні кристали.

Для усунення зсуву смуг і кристалів в процесі розламування перед початком процесу пластину наклеюють на папір або поліетиленову плівку. Це дозволяє зберегти орієнтацію кристалів щодо розташування їх в початковій пластині і уникнути їх довільного розламування і шкрябання один об один.

Другий спосіб передбачає механізацію процесу розламування пластин з прорізами. Суть способу полягає в тому, що після наклеювання пластини її пропускають через простір між двома рухомими металевими стрічками, які мають певний радіус закруглення. Проходячи ділянку закруглення, пластини розколюються по прорізах на кристали.

Третій спосіб базується на притисненні пластини з прорізами до сферичної поверхні лінзи, внаслідок чого відбувається одночасне розламування пластини в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Пристрій для розламування складається з лінзи з сферичною поверхнею і гумової мембрани. Пластину розташовують на гумовій мембрані прорізами вниз, а зверху до пластини підводять сферичну поверхню лінзи. При певному тиску повітря на гумову мембрану відбувається притиснення напівпровідникової пластини до сферичної поверхні лінзи і розламування.

Перевагами цього способу є простота, можливість автоматизації і висока продуктивність. Розламати пластини цим способом можна тільки на кристали квадратної форми; крім того, кожен розмір квадратного кристала потребує певної кривизни лінзи.

Якість розламування напівпровідникових пластин для всіх трьох розглянутих способів залежить від згинальної напруги. Згинальну напругу, необхідну для розламування пластин, можна визначити з виразу:

$$H = \frac{mh^2}{bl^2} = \frac{m}{b} \left(\frac{h}{l} \right)^2,$$

де m – згинальний момент;

h – товщина ребра кристала, що одержується при скрайбуванні;

b – довжина кристала;

l – ширина кристала.

Величину h/l в цьому виразі називають показником здатності до розламування.

2.6 Шліфування напівпровідникових пластин

Одержані після розрізання злитка напівпровідникові пластини мають ряд порушень, до яких відносяться: наявність механічно порушеного шару, неплоскостність і неплоскопаралельність сторін, вигин і великий розкид за товщиною. Тому після проведення процесу різання обов'язковою технологічною операцією є шліфування.

Для отримання хороших результатів шліфування слід дотримуватися таких вимог: шліфування потрібно проводити в чистих, вільних від пилу приміщеннях і під захисними кожухами з надмірним тиском повітря; всі установки для проведення процесів шліфування повинні бути розділені за видом обробки і типом використовуваного абразиву; всі матеріали (шліфувальні апарати, абразивні порошки) повинні бути ретельно розсортовані і зберігатися в окремих герметичних скафандрах.

Під процесом шліфування розуміють обробку напівпровідникових пластин на твердих довідних дисках-шліфувальниках абразивними мікропорошками. Шліфувальники зазвичай виготовляють з чавуну, скла, сталі, міді або латуні. Зернистість мікропорошків для шліфування напівпровідникових пластин вибирають від M14 до M5. Процес шліфування дозволяє одержувати 9 – 12-й клас чистоти обробки.

Процес шліфування класифікують за технологічними і конструктивними ознаками, а також за видом використовуваного абразивного матеріалу.

За технологічними ознаками шліфування поділяють на попереднє і остаточне; за конструктивними ознаками – на одностороннє і двостороннє, за виглядом використовуваного матеріалу – на шліфування вільним і зв'язаним абразивом.

Попередня і остаточна обробка (шліфування) це два процеси, що відрізняються один від одного цілями, режимами і вживаними матеріалами.

Мета *попереднього шліфування* – швидко вирівняти площини пластин і видалити припуск. Режими проведення цього процесу відрізняються більшими частотою обертання шліфувальників і тиском абразивного порошку на поверхню напівпровідникової пластини. Для попереднього шліфування вибирають абразивні порошки з крупним зерном (M14, M10).

Остаточне шліфування (тонке) характеризується м'якшими режимами обробки і застосуванням абразивних порошків з дрібним зерном (M7, M5). Метою остаточного шліфування є подальше поліпшення геометричних параметрів і якості поверхні оброблюваних пластин.

Принцип зняття напівпровідникового матеріалу з поверхні пластин при *односторонньому* і *двосторонньому шліфуванні* однаковий. Різниця між цими процесами полягає лише в конструктивних особливостях шліфувальних верстатів, які дають можливість проводити процес шліфування або з однієї сторони пластини, або відразу з двох. Якщо для шліфування пластини з двох сторін використовують устаткування для односторонньо-

го шліфування, процес повторюють, а пластину перевертають на іншу сторону.

При *односторонньому шліфуванні* напівпровідникові пластини наклеюють на спеціальні пристосування – головки, які розташовують на робочій поверхні шліфувального круга так, щоб напівпровідникові пластини стикалися з поверхнею шліфувальника. На шліфувальнику, як правило, розташовують три головки з наклеєними пластинами. При обертанні головки шліфувальника самовстановлюються і поверхні шліфувальника і напівпровідникових пластин щільно прилягають одна до одної. У зону шліфування подають абразивну суспензію.

Двостороннє шліфування проводять на верстатах, які мають два шліфувальники. Оброблювані напівпровідникові пластини розташовуються в спеціальних гніздах сепараторів, які разом з пластинами розміщують між двома шліфувальниками. Нижній шліфувальник зазвичай нерухомий, а верхній вільно самовстановлюється при обертанні. Пластини, завантажені в гніздах сепаратора, здійснюють складний рух, який складається з обертання шліфувального круга, обертання сепаратора і обертання самої пластини усередині гнізда сепаратора. Такий рух дає можливість знімати шар матеріалу рівномірно зі всієї поверхні пластини з високою точністю. Абразивна суспензія подається через верхній шліфувальник і рівномірно обволакує напівпровідникову пластину з усіх боків. При роботі верстата абразивні зерна перекочуються по верхній і нижній поверхнях пластини, створюючи певний тиск, який приводить до виколювання мікрочастинок напівпровідникового матеріалу. Шліфована поверхня оброблених пластин має матову фактуру і складається з великої кількості кратероподібних виколювань. Розміри виколювань знаходяться в прямій залежності від розміру зерен абразиву, тиску на них шліфувальника і швидкості шліфування.

Шліфування *вільним абразивом* виконують на верстатах односторонньої і двосторонньої обробки напівпровідникових пластин з використанням різних суспензій і паст. В процесі обробки зерна абразиву знаходяться у вільному стані, тобто не пов'язані жорстко одне з одним. Абразивна суспензія створює тонкий прошарок між шліфувальником і оброблюваною напівпровідниковою пластиною, в якому абразивні зерна вільно перекочуються. Звідси і з'явилася назва «вільний абразив».

Шліфування *зв'язаним абразивом* істотно відрізняється від шліфування вільним абразивом як за фізичним принципом видалення напівпровідникового матеріалу в процесі обробки, так і за кінематикою процесу. Шліфування зв'язаним абразивом виконують на верстатах з жорсткими осями, особливістю яких є незмінність положення осей обертання шліфувальника і оброблених пластин. Головною особливістю цього процесу є конструкція шліфувального круга, який є металевим диском з нанесеним на його поверхню алмазним шаром. Алмазні зерна міцно сполучені з поверхнею шліфувального диска спеціальною скріплювальною зв'язкою.

Оброблювані напівпровідникові пластини наклеюють на головку верстата, яка в процесі шліфування обертається навколо своєї осі. Шпіндель шліфувального круга, обертаючись з частотою 15000–18000 об/хв, приходить в контакт з поверхнею пластин. Алмазні зерна шліфувальника, ударяючись з високою швидкістю об пластини, знімають з поверхні напівпровідникового матеріалу мікростружку. Оброблена цим способом напівпровідникова пластина має специфічний рисунок поверхні, який є сіткою з безлічі пересічних рисок. Процес шліфування зв'язаним абразивом характеризується виділенням великої кількості теплоти. Тому для запобігання перегріву шліфувальника, і оброблюваних пластин в зону шліфування подають охолодну рідину. Зменшення частоти обертання шліфувального круга призводить до зниження якості обробки поверхні пластин.

Точність обробки зв'язаним абразивом залежить в першу чергу від настроювання верстата і жорсткості кріплення його елементів (предметної головки, шпинделя шліфувальника). Похибки геометричних розмірів і форм оброблюваних пластин виникають унаслідок непаралельності осей шпинделя, шліфувального круга і наочної головки верстата.

2.7 Полірування напівпровідникових пластин

Для покращення якості обробки поверхні напівпровідникових пластин і зменшення глибини механічно порушеного шару проводять полірування.

Процес полірування відрізняється від процесу шліфування технологічним режимом, розміром зерна і видом абразиву, а також матеріалом полірувальника. Спільним у цих процесів є вид обробки – одностороння з використанням вільного абразиву.

Процес полірування проводять, як правило, на м'яких полірувальниках, які є жорсткими дисками, обтягнутими м'яким матеріалом: фланеллю, замшею, батистом, фетром, велюром, сукном, шовком і ін. Як абразив використовують мікропорошки (із зернистістю не вище 3 мкм) синтетичного алмазу, оксиду алюмінію, оксиду хрому, діоксиду кремнію або діоксиду цирконію.

Вибір полірувальної тканини залежить від сумісності її з використовуваним абразивним середовищем. Полірувальна тканина повинна утримувати своїм ворсом частинки абразивного матеріалу в процесі обробки напівпровідникових пластин. Полірувальна тканина повинна бути стійкою до стирання і мати низьку вартість. Зазвичай для попередньої поліровки використовують безворсові тканинні матеріали з крупнішими алмазними зернами. Ворсисті матеріали застосовуються для остаточної обробки з використанням алмазних зерен, зернистістю менше 1 мкм.

До якості полірувальників висувають такі вимоги: вони не повинні мати складок, порізів, потовщень, розірваних ниток, горбів і западин, сторонніх включень і інших дефектів поверхні. Стійкість м'яких поліру-

вальників невелика. Так, батистовий полірувальник придатний для обробки 20–30 пластин, сатиновий – для 50–70, замшевий – для 100–120, велюровий – для 500–600 пластин.

Процес поліровки напівпровідникових пластин складається з трьох основних етапів.

Перший етап (попередня поліровка) полягає в приготуванні абразивної суспензії і підготовці полірувального круга. На скляний диск натягують м'який матеріал (батист) за допомогою металевих п'ялець. Поверхню батисту змочують спиртом або приладовим маслом для рівномірного розподілу абразивних зерен. На поверхню допоміжного скляного диска наносять алмазний порошок АСМЗ, загальна вага якого не перевищує одного карата, і декілька крапель приладового масла. Одержану суміш розтирають іншим таким же скляним диском до рівномірного розподілу алмазного порошку по всій поверхні скляних дисків. Після цього по черзі кожен диск переносять на приготований батистовий полірувальник і проводять втирання алмазного порошку в батист. Втирання ведуть до тих пір, доки весь алмазний порошок не перейде на поверхню батисту.

На приготований таким чином полірувальник поміщають робочі головки з наклеєними на них напівпровідниковими пластинами. Оскільки процес алмазної обробки пов'язаний з тепловиділенням, то не рекомендується встановлювати інтенсивний режим полірування. Підвищення температури процесу полірування може привести до відклеювання напівпровідникових пластин, відриву їх від робочої головки і їх механічного пошкодження. Тому частота обертання полірувальника не повинна перевищувати 30–40 об/хв.

Другий етап (проміжна поліровка) характеризується зміною матеріалу полірувальника і використанням алмазного порошку АСМ1. Для цього на скляний диск натягують інший м'який матеріал (велюр), змочений гарячою водою або спиртом. На поверхню велюру розглянутим способом наносять алмазний порошок з приладовим маслом. Після проведених операцій очищені від слідів попередньої обробки головки з напівпровідниковими пластинами розташовують на знову приготовленому полірувальнику і процес поліровки продовжується. На другому етапі навантаження на напівпровідникові пластини дещо збільшується, а частота обертання полірувальника знижується до 25–30 об/хв.

Третій етап (остаточна тонка поліровка) включає зміну полірувальника і абразивного матеріалу. Як матеріал полірувальника використовують нову партію батисту, а абразивним матеріалом можуть слугувати оксид хрому, діоксид кремнію і діоксид цирконію.

Найчастіше тонку поліровку напівпровідникових пластин проводять з використанням оксиду хрому з величиною зерна менше 1 мкм. Зазвичай застосовують оксид хрому двох сортів: *грубий* розміром зерна 0,6–0,8 мкм, одержуваний шляхом відновлення біхромата калію сіркою, і *тонкий* розміром зерна 0,2–0,4 мкм, одержуваний термічним розкладанням

біхромата амонію.

Слід зазначити, що поліровка оксидом хрому є малопродуктивним процесом, що продовжується декілька годин.

Продуктивнішим є процес поліровки з використанням на останньому етапі як абразивного матеріалу діоксидів кремнію або цирконію.

Зазвичай використовують діоксид кремнію з розміром зерна не більше 0,1 *мкм*. Водну суспензію діоксиду кремнію складають в співвідношенні: 1 *г* порошку діоксиду кремнію і 5 *г* води. Суспензія протягом всього процесу поліровки повинна ретельно перемішуватися. Процес поліровки з використанням суспензії з діоксиду кремнію проводять на полірувальнику із заміною частотою обертання до 100 *об/хв*.

Діоксид цирконію у вигляді водної суспензії із співвідношенням компонентів 1 : 10 і величиною зерна не більше 0,1 *мкм* з успіхом використовується на остаточному етапі процесу поліровки.

Останній етап поліровки має велике значення. Він дає можливість видалити так званий алмазний фон з поверхні напівпровідникових пластин, що виникає на перших двох етапах, і значно зменшити глибину механічно порушеного шару. Останній етап поліровки дозволяє одержати поверхні напівпровідникових пластин з чистотою обробки, що відповідає 13 – 14-му класу.

Подальше вдосконалення і поліпшення методів поліровки напівпровідникових матеріалів передбачає дослідження шляхів підвищення продуктивності процесу, створення нових полірувальних матеріалів, що забезпечують разом з високою якістю обробки поверхні хорошу геометричну форму пластин.

До сучасних методів поліровки слід віднести хіміко-механічні способи, які відрізняються високою хімічною активністю відносно оброблюваного напівпровідникового матеріалу.

2.8 Контроль якості механічної обробки

Електричні параметри готових ІМС істотно залежать від ступеня досконалості поверхні, якості обробки і геометричної форми оброблених напівпровідникових пластин, оскільки недосконалості механічного різання, шліфування і полірування несприятливо позначаються на подальших технологічних процесах: епітаксії, фотолітографії, дифузії і ін. Тому після проведення процесів механічної обробки напівпровідникові пластини піддаються контролю. Оцінювання якості проводять за такими основними критеріями придатності: 1) геометричні розміри і форма напівпровідникових пластин; 2) чистота обробки поверхні пластин; 3) глибина механічно порушеного шару.

Контроль геометричних розмірів і форм пластин передбачає визначення товщини, стріли прогину, клиновидності і площинності пластин після кожного виду механічної обробки.

Товщину пластин визначають шляхом вимірювання її в декількох точках поверхні за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 1 мкм.

Стрілу прогину пластин визначають як різницю значень товщини пластини в двох точках, розташованих в центрі пластини на протилежних її сторонах, тобто вимірюють товщину пластини в центральній точці, а потім пластину перевертають на іншу сторону і знову вимірюють товщину в центральній точці. Різниця цих значень товщини дасть стрілу прогину.

Клиновидність визначають як різницю значень товщини пластини в двох точках, але розташованих не в центрі пластини, а по її краях на протилежних кінцях пластини, віднесено до діаметру пластини. Для повнішої картини рекомендується повторити вимірювання для двох точок, розташованих на кінцях діаметра, перпендикулярного діаметра, який був вибраний для першого вимірювання.

Площинність визначають вимірюванням товщини пластини в декількох точках, розташованих по діаметру пластини.

Контроль чистоти обробки поверхні пластин включає визначення шорсткості, наявності на поверхні відколів, рисок, западин і виступів.

Шорсткість оцінюють висотою мікрорізиступів і мікрозападин на поверхні напівпровідникової пластини. Оцінювання шорсткості проводять або порівнянням поверхні контрольованої пластини з еталонною поверхнею, або вимірюванням висоти мікронерівностей на мікроінтерферометрі МІІ-4 або на профілографі-профілометрі.

Наявність на поверхні пластин відколів, рисок, западин і виступів контролюється візуально за допомогою мікроскопа.

Контроль глибини механічно порушеного шару. Глибина механічно порушеного шару є основною характеристикою якості обробки напівпровідникових пластин. Недосконалість кристалічної ґратки приповерхневого шару напівпровідникової пластини після різання, шліфування і поліровки прийнято називати механічно порушеним шаром. Цей шар розповсюджується від обробленої поверхні в глиб об'єму напівпровідникового матеріалу. Найбільша глибина залягання порушеного шару утворюється при різанні злитка на пластини. Процеси шліфування і поліровки приводять до зменшення глибини залягання цього шару.

Структура механічно порушеного шару має складну будову і може бути поділена за товщиною на три зони.

Перша зона є порушеним рельєфним шаром, що складається з хаотично розташованих виступів і западин.

Під цією зоною розташована *друга* (найбільша) *зона*, яка характеризується одинарними виколюваннями і тріщинами, що йдуть від поверхні зони в її глибину. Ці тріщини починаються від нерівностей рельєфної зони і тягнуться по всій глибині другої зони. У зв'язку з цим шар напівпровідникового матеріалу, утворений другою зоною, одержав назву «тріщинуватий».

Третя зона є монокристалічним шаром без механічних пошкоджень, але має пружні деформації (напружений шар).

Товщина порушеного шару пропорційна розміру зерна абразиву і може бути визначена за формулою

$$F = k\delta,$$

де $k=1,7$ для кремнію і $k=2,2$ для германію;

δ – розмір зерна абразиву.

Для визначення глибини механічно порушеного шару використовують три способи.

Перший спосіб полягає в послідовному стравлюванні тонких шарів порушеної області і контролі поверхні напівпровідникової пластини на електроннографі. Операцію стравлювання проводять до того моменту, коли знову одержана поверхня напівпровідникової пластини знайде довершену монокристалічну структуру. Роздільна здатність даного методу лежить в межах ± 1 мкм. Для збільшення роздільної здатності необхідно зменшувати товщину шарів, що знімаються кожного разу. Процес хімічного травлення не може забезпечити зняття надтонких шарів. Тому тонкі шари знімають травленням не напівпровідникового матеріалу, а заздалегідь окисненого шару. Метод окиснення поверхні з подальшим підбурюванням шару оксиду дає можливість одержати роздільну здатність менше 1 мкм.

Другий спосіб базується на залежності граничного струму анодного розчинення напівпровідникової пластини від наявності дефектів на її поверхні. Оскільки швидкість розчинення шару з дефектами структури значно вища, ніж монокристалічного матеріалу, то значення анодного струму при розчиненні пропорційно цій швидкості. Тому при переході від розчинення порушеного шару до розчинення монокристалічного матеріалу спостерігатиметься різка зміна як швидкості розчинення, так і значення анодного струму. За моментом різкої зміни анодного струму судять про глибину порушеного шару.

Третій спосіб базується на тому, що швидкість хімічного травлення напівпровідникового матеріалу порушеного шару значно вища за швидкість хімічного травлення початкового непорушеного монокристалічного матеріалу. Тому товщину механічно порушеного шару можна визначити за моментом стрибкоподібної зміни швидкості травлення.

Критеріями придатності напівпровідникової пластини після певного виду механічної обробки є такі основні параметри.

Після різання злитків на пластини діаметром 60 мм поверхня не повинна мати відколів, великих рисок, клас чистоти обробки повинен бути не гірше 7–8; розкид за товщиною пластини не повинен перевищувати $\pm 0,03$ мм; прогин не більше 0,015 мм; клиновидність не більше 0,02 мм.

Після процесу шліфування поверхня повинна мати матовий однорід-

ний відтінок, не мати відколів і подряпин; клиновидність не вище 0,005 мм; розкид за товщиною не вище 0,015 мм; чистота обробки повинна відповідати 11–12-му класу.

Після процесу поліровки чистота поверхні повинна відповідати 14-му класу, не мати алмазного фону, відколів, рисок, подряпин; прогин повинен бути не гірше 0,01 мм; відхилення від номіналу товщини не повинно перевищувати $\pm 0,010$ мм.

Слід відзначити, що контроль якості напівпровідникових пластин (підкладок) має велике значення для всього подальшого комплексу технологічних операцій виготовлення напівпровідникового приладу або складної інтегральної мікросхеми. Це пояснюється тим, що механічна обробка підкладок є, по суті, першою з циклу операцій всього процесу виробництва приладів і тому дозволяє виправити відхилення параметрів від норми забракованих при контролі пластин (підкладок). При неякісному проведенні контролю пластини, що мають будь-які дефекти або невідповідність необхідним критеріям придатності, потрапляють на подальші технологічні операції, що приводить, як правило, до непоправного браку і різкого зниження відсотка виходу придатних виробів на етапі їх виготовлення.

Контрольні запитання

1. Який основний спосіб механічної обробки напівпровідникових матеріалів?
2. Проаналізуйте абразивні матеріали та їх характеристики.
3. Вкажіть способи розрізання монокристалічних злитків на пластини.
4. Вкажіть способи різання напівпровідникових пластин на кристали.
5. Поясніть процес розламування пластин після скрайбування.
6. В чому полягає шліфування напівпровідникових пластин?
7. Які матеріали можна використовувати для шліфування?
8. В чому полягає процес полірування напівпровідникових пластин?
9. Які вимоги висуваються до полірувальної тканини?
10. Як відбувається контроль якості механічної обробки?

3 ТЕХНОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІДГОТОВКИ ПІДКЛАДОК ІМС

3.1 Цілі технохімічних процесів підготовки підкладок

Основними цілями технохімічних процесів підготовки підкладок ІМС є: отримання чистої поверхні напівпровідникової пластини; видалення з поверхні напівпровідникової пластини механічно порушеного шару; зняття з напівпровідникової пластини шару початкового матеріалу певної товщини; локальне видалення початкового матеріалу з певних ділянок поверхні підкладки; створення певних електрофізичних властивостей оброблюваної поверхні підкладки; виявлення структурних дефектів кристалічної ґратки початкової підкладки; отримання мезаструктур; осадження гальванічних покриттів.

Отримання чистої поверхні напівпровідникових підкладок пов'язане з вимогою неприпустимості будь-яких забруднень при проведенні процесів дифузії, епітаксійного нарощування і ін. Отримання чистої поверхні підкладок пов'язане з великими труднощами і, як правило, досягається проведенням комплексу різних технохімічних процесів: промивання у воді, ультразвукове промивання в розчинниках, хімічне або газове травлення і т. п.

Видалення з поверхні підкладки механічно порушеного шару, що утворився в результаті шліфування і полірування з використанням абразивних або алмазних мікропорошків, необхідне для отримання атомарно довершеної структури поверхневого шару, який, у свою чергу, дозволяє створити в підкладці активні структури ІМС з високими електрофізичними параметрами. Видалення механічно порушеного шару з поверхні підкладок можна здійснювати хімічним і газовим травленням, а також іонно-плазмовою і плазмохімічною обробкою.

Зняття з підкладок шару певної товщини проводять для отримання потрібної товщини підкладок, що поступають на подальші технологічні операції. Необхідна товщина підкладок визначається конкретним типом ІМС. Найчастіше для цієї мети використовують хімічне травлення напівпровідникових матеріалів в різних травниках.

Локальне видалення напівпровідникового матеріалу з певних ділянок поверхні початкової підкладки проводять для створення рельєфу, який дає можливість вирішувати складні технологічні питання конструювання і виготовлення мікроелектронних засобів. Локальне видалення початкового матеріалу підкладки зазвичай здійснюють електрохімічною обробкою в електроліті або хімічним травленням через захисну маску.

Технохімічні процеси дають можливість регулювати і змінювати *електрофізичні властивості* поверхні оброблюваної напівпровідникової підкладки. До цих властивостей в першу чергу слід віднести зміну поверхневої провідності і швидкості поверхневої рекомбінації. Найефективнішими в цьому випадку є процеси хімічного травлення в різних травниках, іонно-плазмової і плазмохімічної обробки.

Великий практичний інтерес технохімічні процеси мають при дослідженні *структурних дефектів кристалічної ґратки напівпровідникових підкладок* на різних етапах їх обробки. До таких дефектів слід віднести дислокації, дефекти пакування, двійникування і ін. Виявлення дефектів найчастіше проводять з використанням селективного хімічного травлення.

Отримання мезаструктур є широкопоширеним технологічним прийомом при виготовленні ІМС. Форма і геометричні розміри мезаструктури визначаються рисунком захисного рельєфу, а глибина травлення – типом хімічного травильного складу і технологічним режимом травлення.

Осадження гальванічних покриттів з металів дозволяє створювати на поверхні напівпровідникової підкладки струмопровідні доріжки, омичні контакти і пасивні елементи ІМС.

Таким чином, технохімічні процеси дають можливість підготувати напівпровідникову підкладку з певною чистотою поверхні і певним її рельєфом для подальших технологічних операцій: осадження епітаксійних плівок і захисних діелектричних плівок, дифузійних процесів, процесів іонного легування і ін.

Вибір того або іншого технохімічного процесу обробки напівпровідникових підкладок залежить від вимог конкретного технологічного процесу виготовлення певного типу ІМС.

3.2 Класифікація забруднень напівпровідникових підкладок

Наявність на поверхні напівпровідникової підкладки різного роду забруднень призводить до різкого зниження відсотка виходу придатних виробів на подальших технологічних операціях.

Забруднення підкладок зазвичай відбувається при механічній обробці напівпровідникових злитків і пластин (різанні, шліфуванні і поліровці), а також за рахунок адсорбції різних речовин з технологічних середовищ.

Всі забруднення можна класифікувати за двома ознаками: їх фізико-хімічними властивостями і характером їх взаємодії з основними напівпровідниковими матеріалами, на яких вони знаходяться.

За фізико-хімічними властивостями забруднення можуть бути органічні, неорганічні, сольові, іонні, механічні і ін.

За характером взаємодії з матеріалом підкладки забруднення поділяють на *фізично і хімічно адсорбовані*.

До *фізично адсорбованих забруднень* відносяться всі види механічних частинок (пил, волокна, абразив, метали вклучення й ін.), а також всі види органічних матеріалів, що зв'язані з поверхнею підкладки силами фізичної адсорбції. Механічні частинки достатньо легко видаляються різними технологічними промиваннями у водних проточних і ультразвукових ваннах. Для видалення органічних забруднень потрібний складніший процес відмивання підкладок.

Серед усіх видів забруднень особливу увагу слід приділяти органічним забрудненням, оскільки вони при нагріванні розкладаються і виділя-

ють газоподібні речовини (кисень, оксид і діоксид вуглецю, пари води й ін.), які значною мірою погіршують подальші технологічні процеси (дифузії, епітаксії, осадження захисних діелектричних плівок і ін.).

Органічні забруднення, у свою чергу, можуть бути *полярними* і *неполярними*. До полярних органічних забруднень відносяться головним чином олеїнова і стеаринова кислоти, каніфоль, синтетичні речовини і смоли. До неполярних органічних забруднень відносяться мінеральні масла, вазелін, нафтові парафіни й віск.

До *хімічно адсорбованих забруднень* в першу чергу слід віднести різні види оксидних і сульфідних плівок на поверхні напівпровідникових підкладок, а також катіони і аніони хімічних речовин. Найбільш важкоусувними хімічними забрудненнями є електроосаджені в порах підкладки метали і важкорозчинні оксиди. Такі види забруднень видалити за допомогою навіть найскладнішого процесу промивання підкладки не можна. Їх видаляють проведенням комплексу хімічних реакцій з використанням певних типів і складів травильних розчинів.

Таким чином, для повного очищення підкладки від забруднень необхідно вибрати технологічний процес, який включав би ряд послідовних операцій, кожна з яких дозволяла б видаляти з поверхні один або декілька видів забруднень. При цьому необхідно керуватися загальними закономірностями: механічні забруднення видаляють промиванням у водних ваннах з використанням ультразвуку або гідродинамічною обробкою; органічні забруднення – обробкою в киплячих розчинниках; хімічні забруднення – шляхом хімічного травлення в лужних або кислотних травниках; соляні і іонні забруднення — іонним обміном або промиванням в особливо чистій високоомній деіонізованій воді і т. д.

При виборі остаточного технологічного процесу очищення напівпровідникових підкладок слід пам'ятати про економічні аспекти цього процесу і будувати його так, щоб при мінімальних витратах одержати чистішу поверхню. У цьому, випадку треба завжди виходити з вимог за чистотою поверхні підкладки, що диктуються тією технологічною операцією, на яку поступають ці підкладки. Так, вимоги за чистотою до підкладок, що поступають з механічної на хімічну обробку, різко відрізняються від вимог за чистотою до підкладок, що поступають з хімічної обробки на епітаксійне нарощування, і т. п.

3.3 Відмивання напівпровідникових підкладок

Однією з відповідальних операцій в загальному циклі підготовки напівпровідникових підкладок для виготовлення ІМС є операція відмивання, яка складається з двох етапів: знежирення підкладок в органічних розчинниках і промивання в особливо чистій воді.

Знежирення підкладок проводять для видалення органічних фізичних забруднень. Для видалення неполярних органічних забруднень використовують такі розчинники, як толуол, чотирихлористий вуглець,

фреони, а для видалення полярних органічних забруднень – ацетон, спирти та трихлоретилен. У промисловому виробництві для процесу відмивання підкладки часто використовують різні суміші розчинників, які дозволяють проводити відмивання полярних і неполярних органічних забруднень в одному технологічному циклі знежирення. До таких сумішей відносяться: фреон – хлористий метилен, фреон – ізопропіловий спирт, фреон – ацетон і ін.

Процес знежирення в органічних розчинниках сильно залежить від режиму його проведення (температури, тривалості і швидкості зміни відпрацьованого розчинника). Так, з підвищенням температури процесу швидкість розчинення органічних забруднень зростає. На якість знежирення впливає час проведення процесу, необхідний для повного розчинення певного виду забруднення в розчиннику. Під час проходження процесу знежирення підкладок сам розчинник поступово забруднюється за рахунок переходу в нього продуктів речовини, яка розчиняється, що призводить до зниження ефективності процесу розчинення і до неякісного знежирення підкладок. Тому для якісного знежирення слід своєчасно і швидко видаляти забруднений розчинник.

Для прискорення процесу знежирення і поліпшення якості відмивання широко використовують ультразвукові ванни.

При проведенні процесів знежирення слід дотримуватись правил техніки безпеки, оскільки використовувані розчинники є отруйними речовинами і негативно впливають на організм і здоров'я людини. Всі роботи зі знежирення необхідно проводити в приміщеннях, обладнаних припливно-витяжною вентиляцією з використанням спеціальних скафандрів або герметичних установок.

Технологічний процес знежирення включає завантаження напівпровідникових підкладок у фторопластові касети, які послідовно опускаються в декілька ванн (від двох до чотирьох) з розчинником або сумішшю розчинників. У першій ванні відбувається видалення найбільш грубих жирових забруднень, в другій ванні знімаються ділянки жирових покриттів, що залишилися не розчиненими при першій обробці, а в подальших ваннах відбувається остаточне ретельніше відмивання підкладок.

Найбільш перспективним є спосіб знежирення, в якому як реагенти використовуються не рідкі розчинники, а пари киплячих розчинників. Суть способу полягає в тому, що пари розчинника активніше взаємодіють із забрудненнями на поверхні напівпровідникової підкладки і ефективніше їх розчиняють. Крім того, в процесі знежирення у великих межах і з великою швидкістю можна проводити зміну відпрацьованої пари на нову свіжу порцію пари. Важливою перевагою цього способу є те, що весь процес проводиться в герметичній камері і може бути повністю автоматизований.

В процесі знежирення відбувається взаємодія розчинника з різними видами забруднень і в результаті десорбції молекули цих забруднень пере-

ходять з поверхні напівпровідникової підкладки в приповерхневий шар розчинника (рідини або пари), а молекули розчинника осідають на поверхні підкладки. Відбувається неначе заміщення адсорбованих молекул забруднень молекулами розчинника. Процес заміщення залежить від багатьох фізичних чинників, наприклад від енергії зв'язку молекули забруднюючої речовини з поверхнею напівпровідникової підкладки або з розчинником.

Таким чином, в процесі знежирення на поверхні напівпровідникової підкладки створюються шари розчинника, які необхідно видалити. Тому другим етапом в процесі відмивання підкладок після їх знежирення є процес промивання їх в особливо чистій воді.

Процес промивання в особливо чистій воді слугує для видалення з поверхні підкладок залишків розчинника і частинок продуктів розчинення. Залежно від вимог подальших технологічних процесів промивання напівпровідникових підкладок проводять в деіонізованій воді, питомий опір якої вибирають рівним 1–20 МОм·см. Промивання підкладок проводять в ультразвукових ваннах з підігрівом і без підігріву води.

Для підвищення ефективності процесу промивання підкладок разом з ультразвуковими ваннами часто використовують гідромеханічні пристосування у вигляді кистей і щіток, а також гідродинамічні пристрої з інтенсивною подачею струменя проточної води.

Про якість промивання підкладок судять за значенням питомого опору води на вході і виході промивальної камери. Опір води на виході тим вищий, чим менше в ній забруднень. Зазвичай промивання проводять до тих пір, доки опір води на виході не порівняється з опором води на вході промивальної камери.

3.4 Хімічна обробка напівпровідникових підкладок

Процес хімічної обробки напівпровідникових підкладок полягає в розчиненні їх поверхневого шару під дією кислотних або лужних травників. Даний процес є гетерогенним, оскільки взаємодія напівпровідникового матеріалу з травником здійснюється на межі поділу двох різних середовищ: твердого (підкладка) і рідкого (травник). Інша особливість хімічної взаємодії підкладки з травником полягає в тому, що процес травлення підкладки не є рівноважним – об'єм напівпровідникового матеріалу, що видаляється, менший, ніж травника. Надлишок травника і фіксація його температури дозволяють проводити процес хімічної обробки з постійною швидкістю і таким чином точно розрахувати товщину шару напівпровідникового матеріалу, що видаляється.

Проте слід враховувати, що швидкість травлення шару, порушеного при механічній обробці, значно вища за швидкість травлення початкового непорушеного матеріалу. Це пояснюється наявністю в механічно порушеному шарі великої кількості структурних порушень, які збільшують ефективну площу взаємодії напівпровідникового матеріалу з травником,

що приводить до зростання швидкості травлення.

Існує дві теорії саморозчинення напівпровідникових матеріалів: хімічна і електрохімічна. Згідно з хімічною теорією, розчинення напівпровідникового матеріалу відбувається в дві стадії: спочатку він окислюється, а потім оксид, що утворився, переходить в розчин (розчиняється). Згідно з електрохімічною теорією, взаємодія між напівпровідниковим матеріалом і травником не обмежується чисто хімічними процесами окиснення і розчинення оксиду, а складається з анодного і катодного процесів, що супроводжуються протіканням локальних струмів, між окремими ділянками напівпровідникової пластини. При зануренні напівпровідникової підкладки в травник на поверхні поділу підкладка – травник утворюється подвійний електричний шар і між електролітом і підкладкою виникає різниця потенціалів, яка і приводить до електрохімічного процесу розчинення напівпровідника.

3.5 Хіміко-динамічна обробка напівпровідникових підкладок

Якщо проводити процес хімічної обробки таким чином, що початкова напівпровідникова підкладка знаходитиметься в статичному (нерухомому) положенні, то процес розчинення напівпровідникового матеріалу проходитиме нерівномірно по всій поверхні підкладки. Нерівномірність стравлювання напівпровідникового матеріалу пояснюється такими чинниками: 1) в статичному положенні підкладки концентрація травильного розчину різна для різних ділянок поверхні; 2) за рахунок нерівностей (виступів і западин) поверхні підкладки в різних її частинах виділяється неоднакова кількість теплоти, що приводить до локального перегріву окремих ділянок підкладки і різкого збільшення швидкості розчинення напівпровідникового матеріалу; 3) периферійні ділянки підкладки (її крайові частини), до яких швидше поступає свіжий травник, знаходяться не в однакових термодинамічних умовах і в результаті цього піддаються інтенсивнішому травленню.

Вказані чинники призводять до того, що в результаті хімічної обробки підкладки, що знаходиться в статичному положенні, різко погіршується її плоскопаралельність і виникають завали на її крайових ділянках.

Для усунення цих небажаних ефектів в напівпровідниковій технології застосовують хіміко-динамічну обробку напівпровідникових підкладок, яка полягає в активному перемішуванні травника безпосередньо біля поверхні підкладки і постійному обертанні підкладки в об'ємі травника.

Відомо, що швидкість стравлювання напівпровідникового матеріалу в першу чергу залежить від швидкості видалення продуктів реакції від поверхні підкладки і швидкості доставки нових порцій травильного розчину до межі поділу підкладка – травник. Перемішування травника безумовно сприяє якнайшвидшому вирівнюванню складу травника за всім об'ємом травильної камери і, як наслідок, приводить до рівномірності процесу хі-

мічної обробки напівпровідникової підкладки.

Хіміко-динамічний процес обробки підкладок дозволяє одержувати поверхню з високою однорідністю за плоскопаралельністю, потребує менших витрат часу і реактивів і легко піддається автоматизації. В наш час в напівпровідниковій технології застосовують установки хіміко-динамічної обробки, що дозволяють добиватися гладкої дзеркальної поверхні напівпровідникових підкладок, відповідної 14-му класу чистоти обробки.

Установка хіміко-динамічного травлення напівпровідникових підкладок включає як основний вузол фторопластовий барабан-стакан, в якому поміщені касети з підкладками. Барабан-стакан нахилений до площини нормалі під кутом $20 - 40^\circ$ і з'єднаний через редуктор з валом двигуна. При включенні двигуна барабан-стакан починає обертатися із заданою швидкістю, а касети з підкладками всередині барабана-стакана перекочуються по його внутрішній поверхні.

Установка має автоматичний пристрій для завантаження і вивантаження касет з підкладками, а також для плавного регулювання швидкості переміщення підкладок в процесі травлення. Ванни для травлення, а також ємності із запасом кислот повністю ізольовані від оператора, що гарантує безпеку проведення хіміко-динамічного процесу обробки підкладок.

Спосіб хіміко-динамічного травлення напівпровідникових підкладок широко використовується в різних типах ІМС та при створенні мезаструктур, які знаходять застосування при виготовленні діодів і транзисторів.

3.6 Електрохімічна обробка напівпровідникових підкладок

Електрохімічна обробка напівпровідникових підкладок включає два процеси: електролітичне анодне розчинення і анодно-механічне травлення напівпровідникових матеріалів.

Процес *електролітичного анодного розчинення* здійснюють, подаючи на оброблюваний напівпровідниковий матеріал (підкладку) позитивний потенціал. Якщо через підкладку і металевий електрод, які занурені в електроліт, пропускати електричний струм, то починається процес електролізу, при якому хімічні перетворення відбуваються на електродах, тобто там, де іонний механізм електропровідності в розчині змінюється на електронний в напівпровіднику і металі.

Весь процес є окиснювально-відновною реакцією, причому анод слугує окиснювачем, оскільки він приймає електрони, а катод – відновником, оскільки він віддає їх. Отже, електрохімічне травлення напівпровідникових матеріалів складається з двох електродних процесів: анодного розчинення і катодного відновлення. Аніони і катіони, втрачаючи свій заряд на електродах, вступають у вторинну взаємодію з електродами, розчином і між собою.

Процес електролітичного анодного розчинення кремнію має переваги, які дозволяють використовувати цей процес для підготовки підкладок: відсутність завалів по краях пластини, висока плоскопаралельність пластин і високий клас чистоти обробки.

Процес *анодно-механічного травлення* напівпровідникових підкладок базується на використанні одночасно двох способів: анодного розчинення напівпровідникового матеріалу в електроліті і механічної дії поліровки. Суть цього процесу полягає в тому, що на оброблювану напівпровідникову підкладку подають позитивний потенціал, а на полірувальний круг – негативний потенціал (полірувальний круг слугує другим електродом), а між підкладкою і полірувальним кругом поміщають шар електроліту. У полірувальному крузі є радіальні пази, по яких електроліт розтікається по всій оброблюваній поверхні. Для інтенсифікації процесу сторона оброблюваної напівпровідникової підкладки, дотична з полірувальником, освітлюється для генерації необхідних при анодному розчиненні дірок.

Продуктивність анодно-механічного процесу залежить від частоти обертання полірувального диска-катода, складу і властивостей електроліту, щільності анодного струму, швидкості подачі електроліту в робочий простір і температури проведення процесу.

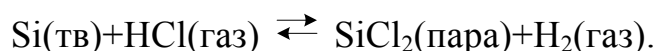
3.7 Парогазова обробка кремнієвих підкладок

Особливе практичне значення процес парогазової обробки має для підготовки підкладок перед епітаксійним нарощуванням кремнієвих шарів, оскільки виключається можливість проміжного забруднення.

Цей процес може проводитися після механічної поліровки, хімічного травлення і інших видів технохімічної обробки. Дії парогазових сумішей піддаються поверхневі шари кремнієвих підкладок, які в процесі обробки видаляються разом із забрудненнями, що є на них, і порушеннями.

Розглянемо декілька способів парогазової обробки, які застосовують в напівпровідниковій технології.

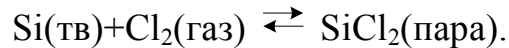
Обробка в суміші (HCl+H₂). Процес проводять в герметичній камері при температурі 1200 °С. Кремнієві підкладки розташовують в реакторі робочої камери і прогрівають протягом декількох хвилин в потоці очищеного водню. Після цього в потік водню додають невелику кількість (0,5–2% за об'ємом) безводного хлористого водню. Реакція взаємодії кремнію з парогазовою сумішшю йде з утворенням продуктів реакції у вигляді легколетких сполук SiCl₂ або SiCl₄:



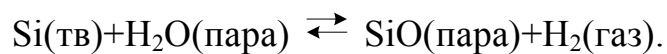
Аналогічні результати за якістю обробки можна одержати з використанням сумішей (HBr+H₂) і (HI+H₂). Якщо обробку в цих сумішах проводити при температурах і концентраціях таких же, як і в суміші (HCl+H₂),

то швидкості видалення кремнію будуть одного порядку.

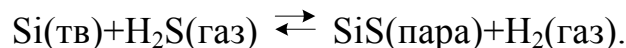
Обробка в сумішах (Cl_2+H_2), (Br_2+H_2) та (J_2+H_2). Основною перевагою даного способу обробки над попереднім є зниження температури робочого процесу з 1200 °С для суміші ($HCl+H_2$) до 1100 °С. Процес обробки кремнієвих підкладок проводять в розглянутих установках. Реакція взаємодії кремнію з хлором має вигляд:



Обробка в суміші (H_2O+H_2). Обробку кремнію парами води проводять при високій температурі (1250—1270 °С). У робочу камеру поступає потік водню, в який додаються пари води в кількості, що не перевищує 0,02–0,1%. Реакція взаємодії кремнію з парами води має вигляд:



Обробка в суміші (H_2S+H_2). Взаємодія кремнію з сірководнем відбувається при високих робочих температурах (порядку 1200 °С). Реакція має вигляд:



Обробка в суміші (SF_6+H_2). На відміну від сірководню гексафторид сірки є речовиною нетоксичною. Використання гексафториду сірки для парогазової обробки кремнію дає можливість знизити робочу температуру процесу до 1000 °С. Реакція взаємодії кремнію з гексафторидом сірки має вигляд:



Процес обробки в суміші (SF_6+H_2) використовують для локального травлення кремнію. Він дозволяє отримувати заглиблення (лунки) з плоским дном і перпендикулярними бічними гранями.

Для всіх розглянутих процесів обробки кремнію (окрім обробки в парах води) наявність домішок в робочих сумішах приводить до утворення небажаних сторонніх включень на поверхні оброблюваної підкладки.

При попаданні в робочу камеру кисню на поверхні кремнію можуть утворюватися включення SiO або SiO_2 , а при попаданні в камеру азоту спостерігаються окремі включення з нітриду кремнію (Si_3N_4) розміром в декілька ангстремів.

3.8 Іонно-плазмова обробка підкладок

Іонно-плазмова обробка підкладок є одним із специфічних процесів в напівпровідниковій мікроелектроніці, який не потребує використання рі-

дких травників. Суть процесу полягає у взаємодії прискореного потоку іонів інертного газу з поверхнею оброблюваної підкладки.

Для здійснення цього процесу початкову напівпровідникову підкладку поміщають в робочу камеру, де створюється певний тиск інертного газу. За допомогою розташованих усередині камери (недалеко від підкладки) електродів добиваються стабільного тліючого розряду. Простір тліючого розряду заповнений квазінейтральною електронно-іонною плазмою. На оброблювану напівпровідникову підкладку відносно плазми подається достатньо велика негативна напруга (2–3 кВ). В результаті позитивно заряджені іони плазми бомбардують поверхню підкладки і шар за шаром вибивають атоми з поверхні, тобто обробляють (травлять) її.

Іонно-плазмова обробка, як і хімічна, може бути загальною і локальною. Перевагою локальної іонно-плазмової обробки є відсутність «підтравлення» під маску: стінки витравленого рельєфу практично перпендикулярні до поверхні оброблюваної підкладки, а площі заглиблень (лунок) дорівнюють площі вікон в захисній масці. Крім того, процес іонно-плазмової обробки є універсальним, тобто з його допомогою можна обробляти підкладки з будь-якого напівпровідникового матеріалу.

Розглянемо теоретичні уявлення про механізм іонно-плазмового видалення матеріалу з поверхні напівпровідникової підкладки. Найбільш прийнятною слід вважати теорію, що виходить з можливості виникнення радіаційних дефектів в оброблюваній напівпровідниковій підкладці при бомбардуванні її поверхні зарядженими іонами інертних газів при зіткненні зарядженого іона з атомом напівпровідникової підкладки відбувається передача моменту кількості руху бомбардувального іона атомам підкладки. Тобто, прискорений до певної енергії позитивно заряджений іон інертного газу з іонної плазми ударяється об поверхню підкладки. При цьому заряджений іон, стикаючись з атомами ґратки, передає їм свою енергію. Оскільки початкова енергія іона велика, то перший атом, що зіткнувся з новим (якщо енергія іона більша енергії зв'язку атома в ґратках), покидає своє місце і в свою чергу співударяється з іншим атомом кристалічної ґратки, який після зіткнення теж може покинути своє місце. Таким чином, може створитися ситуація, коли серія послідовних зіткнень іон – атом і атом – атом приведе до того, що останній з співударених атомів виявиться розташованим на поверхні підкладки. Якщо енергія, передана приповерхневому атому, більша його роботи виходу, то він покидає поверхню підкладки і переходить в об'єм робочої камери.

Техніка проведення процесів іонно-плазмової обробки пов'язана з методом утворення іонної плазми інертного газу. Існує три основні методи утворення плазми. За першим методом джерелом плазми слугує самостійний тліючий розряд, що виникає при певному тиску інертного газу в робочій камері при прикладенні напруги між анодом і катодом. За другим методом плазма збуджується за рахунок дугового розряду, стимульованого струмом термоелектронної емісії. Третій метод створення плазми базу-

ється на використанні систем з високочастотним (ВЧ) збудженням.

Для підтримки плазми тліючого розряду використовують ефекти автоелектронної і іонно-електронної емісії за рахунок високого міжелектродного поля і бомбардування поверхні катода позитивними іонами плазми. Основною перевагою цього методу є його простота і можливість створення рівномірної щільності плазми у великому об'ємі прикатодного простору.

Для підтримки плазми дугового розряду використовують спеціальне джерело електронів у вигляді розжарюваного термоемісійного катода. Емітовані цим катодом електрони прискорюються в напрямку до анода і іонізують молекули інертного газу. Щільність такої плазми може бути набагато більшою, ніж щільність плазми тліючого розряду. Для збільшення щільності плазми дугового розряду використовують магнітні лінзи, які стягують її в шнур за рахунок фокусування електронів уздовж напрямку силових ліній магнітного поля. Поле просторового заряду сфокусованих електронів притягує позитивно заряджені іони плазми і її щільність різко зростає.

Системи з ВЧ збудженням плазми застосовуються для іонно-плазмової обробки підкладок з діелектричних матеріалів. При обробці діелектричної підкладки виникає ускладнення, пов'язане з накопиченням на ній позитивного заряду, що перешкоджає подальшому процесу видалення матеріалу. Це ускладнення долається тим, що на оброблювану підкладку разом з постійною негативною напругою подається змінна напруга високої частоти (близько 15 МГц) з амплітудою, що дещо перевищує постійну напругу. Тоді при негативному півперіоді результуюча напруга на оброблюваній підкладці негативна та відбувається процес видалення матеріалу підкладки. При цьому на поверхні підкладки створюється позитивний заряд за рахунок позитивно заряджених іонів плазми. Крім того, позитивні іони з плазми прискорюються у напрямку до підкладки і бомбардують її. Деяка частина іонів рекомбінує з електронами і залишається на поверхні діелектричної підкладки, збільшуючи тим самим її позитивний потенціал. При позитивному півперіоді високочастотної напруги на підкладці сумарна напруга буде позитивною і підкладка притягатиме електрони з плазми. В цьому випадку процес видалення матеріалу з підкладки припиняється та відбувається компенсація накопиченого позитивного заряду.

На рис. 3.1 подано схему установки іонно-плазмової обробки підкладок. У робочій камері 1 розміщені три основні електроди: термоемісійний катод 2, анод 3 і оброблювана підкладка 4. Між катодом і анодом створюється плазма 5 інертного газу за рахунок дугового розряду.

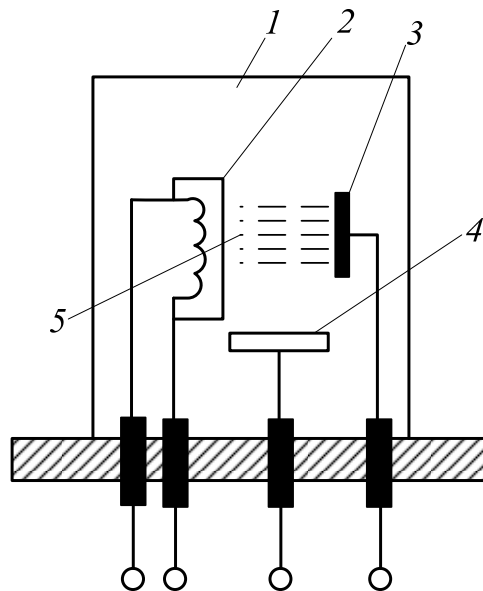


Рисунок 3.1 – Схема установки для іонно-плазмової обробки напівпровідникових пластин

Процес іонно-плазмової обробки полягає в тому, що з робочої камери відкачують повітря і заповнюють її інертним газом. Найчастіше для цих цілей використовують аргон. Заздалегідь оброблену підкладку закріплюють усередині камери на електроді 4. Тиск інертного газу в камері встановлюють в діапазоні 1,3—0,13 Па. Між анодом і катодом прикладають напругу, що не перевищує декількох десятків вольт. Процес обробки підкладки починається з моменту подачі на неї високої негативної напруги (близько 1—3 кВ), достатньої для інтенсивного бомбардування її позитивними іонами інертного газу плазми. Вибиті атоми підкладки переходять в об'єм робочої камери і осідають на її стінках або на спеціальних захисних екранах.

3.9 Плазмохімічна обробка підкладок

Плазмохімічна обробка використовується в процесах видалення поверхневого шару матеріалу підкладки, що знаходиться в твердій фазі, при взаємодії цієї підкладки з плазмою активних газів або сумішей газів. В цьому випадку протікає процес реактивного травлення матеріалу підкладки.

Процес плазмохімічної обробки підкладок відрізняється від іонно-плазмового процесу тим, що видалення речовини з поверхні підкладки відбувається не тільки в результаті бомбардування її позитивно зарядженими іонами плазми, але й унаслідок хімічної взаємодії підкладки з активними реагентами плазми. Таким чином, при плазмохімічній обробці підкладок велике значення має висока хімічна реакційна здатність плазми.

Спосіб плазмохімічної обробки підкладок має такі переваги: є легко керованим і дозволяє проводити регулювання режиму на всіх стадіях його

проведення; має незначну інерційність; не потребує рідких травників; має високу роздільну здатність і точність обробки поверхні підкладки.

При плазмохімічній обробці можна сумістити в одній камері декілька різних технологічних операцій: очищення поверхні, травлення і осадження нових шарів. Це дозволяє різко понизити можливість забруднення підкладок, а також виключити такі трудомісткі технологічні операції, як промивання і сушка підкладок.

Найбільш широкого розповсюдження метод плазмохімічної обробки знаходить в технологічному процесі фотолітографії для видалення фоторезисту з поверхні підкладок.

Як активний газ для видалення фоторезистів використовують суміш кисню, азоту і водню. Активними частинками, що вступають в хімічну реакцію з фоторезистом, є атомарний кисень і озон, що виникає завдяки дисоціації молекул кисню в плазмі газового розряду. Додання невеликої кількості азоту і водню (близько 1%) приводить до збільшення швидкості видалення фоторезистивної плівки з поверхні підкладки.

Для здійснення плазмохімічного методу обробки підкладок зазвичай використовують ВЧ газорозрядну плазму низького тиску. Газовий розряд в реакційній камері збуджується або індуктором, або електродами, які знаходяться поза реакційною камерою. Це забезпечує чистоту хімічних процесів плазмової обробки матеріалів підкладки, оскільки в цьому випадку не відбувається взаємодія плазми з матеріалами електродів.

3.10 Осадження гальванічних покриттів

На різних етапах технологічного процесу виготовлення багатьох типів напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем на початкові напівпровідникові пластини (підкладки) осаджують різні за товщиною і формою металеві шари. Ці шари утворюються в результаті протікання електричного струму через два електроди (одним з електродів звичайно є початкова підкладка) і електроліт певного складу. В основі процесу осадження металів електролітичним способом лежить реакція катодного відновлення.

В напівпровідниковій технології осадження гальванічних покриттів застосовують для отримання омичних контактів до початкової напівпровідникової підкладки, створення електродних виводів, контактних площадок і струмоведучих доріжок, нанесення багатошарових металевих композицій, виготовлення кулькових і консольних елементів.

На електролітичний процес осадження металу на напівпровідникову підкладку впливають такі чинники: склад електроліту, хімічний склад матеріалів електродів, електродний потенціал в даному електроліті, значення і напрямок електричного струму, що проходить через електроліт, температура електроліту та ін.

Особливу увагу при проведенні процесів гальванічного осадження металів слід звертати на чистоту використовуваних електролітів. У готовому

електроліті не повинно бути домішок, що змінюють склад осаджуваних плівок і їх електрофізичні властивості. Так, наявність в електроліті донорних домішок призводить до того, що на напівпровідниковому матеріалі з дірковою електропровідністю не можна одержати хороші омичні контакти. Наявність в електроліті побічних домішок може привести до відшарування, луцення або здуття металевої плівки, а також до нерівномірності товщини осаджуваного шару. Домішки можуть потрапляти в електроліт із сталевого, мідного, бронзового, нікелевого, алюмінієвого і іншого посуду, в якому він тимчасово знаходиться. Тому у виробництві мікроелектронних засобів електроліти слід готувати і тримати тільки в керамічному, скляному, вінілпластовому, кварцовому або фторопластовому посуді. Домішки можуть потрапляти в електроліт з води, яка є їх складовою частиною. Звичайна водопровідна і навіть дистильована вода містить велику кількість різних іонів металів. Тому в напівпровідниковому виробництві для приготування електролітів використовують тільки деіонізовану воду.

Крім того, небажані домішки можуть потрапляти в електроліт з матеріалу анода, який необхідно контролювати за чистотою і складом вхідних компонентів. Для усунення домішок, що потрапляють на матеріал анода в процесі його механічної обробки (прокатування, штампування, токарної обробки та ін.), готові аноди піддають спеціальному травленню і ретельній промивці в деіонізованій воді.

До початкових матеріалів, використовуваних для приготування електролітів, висуваються специфічні вимоги, пов'язані з технологічним процесом осадження: нагрівостійкість, розчинність в кислотах, лугах і воді, стійкість до денного світла, стійкість до тривалого зберігання, незмінність складу в часі і нешкідливість. Матеріали, з яких готують електроліт, не повинні випадати в осад при взаємодії з іншими складовими частинами електроліту. При зміні режиму електролітичного осадження (температури, щільності струму, швидкості перемішування та ін.) електроліт не повинен утворювати бульбашок, твердих осадів і газових виділень.

Електричний струм, що проходить через електроліт в процесі осадження, може бути постійним і змінним. Вид електричного струму вибирають залежно від вимог, які висувають до властивостей осаджуваних плівок.

Процес осадження гальванічних покриттів можна розділити на чотири стадії. Перша стадія включає утворення заряджених іонів металу в об'ємі електроліту під дією електричного струму. Друга стадія полягає в перенесенні заряджених іонів металу з об'єму електроліту до поверхні напівпровідникової підкладки (катода). Третя стадія є електрохімічною реакцією, в ході якої заряджені іони перетворюються на адсорбовані іони і атоми на поверхні напівпровідникової підкладки. На четвертій стадії проходить процес дифузії адсорбованих на поверхні підкладки іонів до місць зростання металевої плівки.

У промисловому виробництві ІМС використовуються гальванічні покриття з міді, нікелю, срібла, золота, олова, цинку, кадмію, хрому та індію.

3.11 Отримання особливо чистої води

Вода широко використовується при виготовленні ІМС. Основне її призначення – промивання (напівпровідникових пластин, кристалів, елементів конструкцій корпусів) і приготування травильних розчинів і електролітів.

Вода – безбарвна рідина, яка є хімічною сполукою 11,2% водню і 88,8% кисню. У воді розчиняється багато солей, оксидів, кислот і лугів. При підвищених температурах вона реагує з багатьма металами.

В процесі безперервного кругообігу в природі вода постійно забруднюється різного роду домішками: пилом, газами, хімічними елементами, мікроорганізмами. Природна вода ніколи не буває абсолютно чистою і тому не може бути використана в технологічних процесах виготовлення ІМС.

Очищують воду від механічних домішок фільтрацією через шар піску і гравію, а від мікроорганізмів – хлоруванням. Для подальшого очищення воду багато разів перегоняють (процес дистиляції). Така вода одержала назву дистильованої.

Дистильована вода містить достатньо велику кількість домішок. Так, концентрація водневих іонів складає 5,4 – 6,6. Сухий залишок не перевищує 5 мг/л, а залишок після прокалювання – 0,05 мг/л. Кількість домішок у вигляді сульфатів, хлоридів, нітратів кальцію і важких металів сірчановодневої групи і групи сірчистого амонію не перевищує 1 мг/л. Таким чином, дистильовану воду не можна використовувати для промивання напівпровідникових підкладок і пластин з *p-n*-переходами. Її зазвичай використовують для попереднього промивання деталей і вузлів конструкцій корпусів, а також для відмивання різних виробів перед хімічним травленням.

Для отримання особливо чистої води дистильовану воду піддають додатковому очищенню з метою видалення з неї неорганічних домішок, які знаходяться в ній у вигляді іонів: катіонів Fe^{2+} , Cu^{2+} , Na^{2+} і ін. та аніонів NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} і ін. Таким чином, особливо чисту воду називають *деіонізованою*, одержують методом іонного обміну, суть якого полягає в тому, що в гетерогенній системі вода – іоніт відбувається обмін іонами між водою і іонітом. Як іоніт зазвичай використовують різні іонообмінні смоли.

Існує два види іонообмінних смол: катіонітові, що зв'язують катіони (КУ-1, КУ-2; КУ-8-4с, КБ-4, КБ4П2), і аніонітові, що зв'язують аніони (АВ-16, АВ-17-8, ЕДЕ-10П, АН-2Ф, АН-1, АВ-17-8-4с). Їх умовні позначення мають вигляд R – Н і R – ОН, відповідно, де R – органічний радикал. Смоли гранульовано в кульки розміром 1–5 мм.

Якщо дистильована вода спочатку проходить через колонку, наповнену катіонітовою смолою, то відбувається уловлювання цією смолою позитивно заряджених катіонів металів M^+ шляхом заміщення ними протонів, що входять до складу смоли: $(R-H)+M^+ \rightarrow (R-M)+H^+$.

Якщо після цього процесу вода пройде через другу колонку, наповнену аніонітовою смолою, то відбудеться скріплення негативно заряджених аніонів (Γ) хлоридів, сульфідів, бікарбонатів і т. п. шляхом заміщення ними

гідроксильної групи, що входить до складу аніонітової смоли: $(R-OH)+I^- \rightarrow (R-I)+OH^-$. Протони і гідроксильні групи з'єднуються в молекулі води: $H^++OH^- \rightarrow H_2O$.

У виробництві ІМС застосовують деіонізовану воду двох марок: марки А (призначену для промивання пластин і кристалів з *p-n*-переходами) і марки Б (призначену для обробки всіх інших елементів конструкцій приладів і ІМС). Вода марки А при температурі 20 °С має питомий опір 7–20 *МОм·см*, а вода марки Б – не менше 1 *МОм·см*. Окиснюваність в перерахунку на кисень, що визначає вміст органічних домішок, у воді марки А дорівнює 1,3 мг/л, а у воді марки Б – 2,5 мг/л. Вміст кремнієкислоти в перерахунку на SiO₂ у воді марки А не більше 2·10⁻⁶%, а у воді марки Б – не більше 2·10⁻⁵%.

Про чистоту деіонізованої води судять за її питомим опором.

Контрольні запитання

1. Назвіть цілі технохімічних процесів підготовки підкладок ІМС.
2. Наведіть класифікацію забруднень напівпровідникових підкладок.
3. Як відбувається відмивання напівпровідникових підкладок?
4. В чому полягає хімічна обробка напівпровідникових підкладок?
5. В чому полягає хіміко-динамічна обробка напівпровідникових підкладок?
6. В чому полягає електрохімічна обробка напівпровідникових підкладок?
7. В чому полягає парогазова обробка кремнієвих підкладок?
8. В чому полягає іонно-плазмова обробка підкладок?
9. Як отримати особливо чисту воду? Для чого вона використовується?
10. В чому полягає плазмохімічна обробка підкладок?
11. Для чого застосовують осадження гальванічних покриттів?

4 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ЕПІТАКСІЙНОГО НАРОЩУВАННЯ

Метод епітаксії розроблявся з початку 60-х років ХХ ст. і дозволив подолати багато труднощів, що виникали при створенні все більш досконалих приладів. Процес епітаксії здійснюється у вакуумі, в газовій і в рідкій фазах. Прогрес напівпровідникового виробництва багато в чому зобов'язаний розвитку технології епітаксії кремнію з газової фази.

Найбільшого поширення набув хлоридний метод епітаксії кремнію, який базується на відновленні хлоридів кремнію воднем. Перспективним методом є гідридний метод, що дозволяє позбавитися забруднення шару хлором і знизити температуру процесу. При створенні МДН СБІС найважливішим процесом є отримання епітаксійних шарів кремнію на діелектричних підкладках.

У зв'язку з розвитком оптоелектроніки широкого поширення набули методи епітаксії напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$, істотною особливістю яких є висока летучість елементів V групи. Для сполуки типу $A^{III}B^V$ разом з газофазною знайшла застосування епітаксія з рідкої фази.

Нарощування монокристалічного епітаксійного шару супроводжується утворенням дефектів структури – дислокацій, дефектів пакування та ін., поява яких багато в чому пов'язана з конкретними умовами проведення технологічного процесу. Контроль дефектів, а також електрофізичних і геометричних параметрів епітаксійних шарів здійснюють металографічними методами, за інтерференцією ІЧ-променів, за допомогою рентгенівського мікроаналізу і т. п.

4.1 Основні методи епітаксійного осадження

До напівпровідникового матеріалу, використовуваного для виготовлення мікроелектронних засобів, часто висувують суперечливі вимоги. Наприклад, для підвищення пробивної напруги імпульсних діодів потрібно збільшувати питомий опір пластин напівпровідника, що викликає зростання опору розтікання і погіршує імпульсні властивості, і швидкодію приладів. Емітерна і базова області, одержані методом дифузії акцепторних і донорних домішок, розташовуються поблизу поверхні пластини. Колекторна область з високим питомим опором забезпечує високу напругу пробою, тобто велику зворотну напруга колекторного $p-n$ -переходу, але знижує швидкодію транзистора внаслідок великого накопиченого заряду в об'ємі колектора і обмежує потужність транзистора через великий послідовний опір колектора. Ці обмеження значною мірою були зняті з появою методів епітаксії, що дозволяють нарощувати на сильно легованій пластині напівпровідника – підкладці – тонкі шари того ж напівпровідника з невеликим вмістом легуючої домішки, що слугують базами діодів, колекторними об-

ластями транзисторів і ін.

Різновиди і методи епітаксії. Термін «епітаксія» був введений для позначення процесу орієнтованого нарощування кристалів на кристалах. Він складається з двох грецьких слів: приставки «епі» – на та кореня «таксис» – розташування в порядку.

Епітаксійний шар – це монокристалічний матеріал, осаджений на кристалічну підкладку, що зберігає морфологію (структуру) цієї підкладки.

В процесі епітаксійного нарощування фаза, що утворюється, закономірно, продовжує кристалічну ґратку наявної фази за допомогою утворення перехідного епітаксійного шару. Перехідний шар сприяє когерентному зрощенню двох ґраток за площинами та напрямками зі схожою щільністю пакування атомів, через нього передається основна інформація про кристалічну структуру підкладки в наростаючий шар.

Відомі три групи процесів епітаксії: авто-, гетеро- і хемоепітаксія.

Автоепітаксія (від грец. *авто* – само) – це процес орієнтованого нарощення кристалічної речовини, однотипної за структурою з підкладкою, що відрізняється від неї тільки вмістом легуючих домішок.

Гетероепітаксія (від грец. «гетеро» – інший) – це процес орієнтованого нарощення речовини, що відрізняється за складом від речовини підкладки, який відбувається при їх кристалохімічній взаємодії.

Хемоепітаксія – це процес орієнтованого нарощення речовини, в результаті якої утворення нової фази відбувається при хімічній взаємодії речовини підкладки з речовиною, що поступає із зовнішнього середовища. Одержаний хемоепітаксійний шар, який відрізняється за складом як від речовини підкладки, так і від речовини, що поступає на її поверхню.

Існує три основні технологічні методи епітаксії, що відрізняються природою фізико-хімічних явищ утворення нарощуваного шару:

- 1) *молекулярно-променева* епітаксія з молекулярних пучків у вакуумі;
- 2) *газофазна* епітаксія за допомогою хімічної взаємодії речовини в газовій або парогазовій суміші, названа газовою або хімічною епітаксією;
- 3) *рідкофазна* епітаксія в рідкій фазі шляхом рекристалізації з розплаву або розчину-розплаву.

Розглянемо стисло основні особливості цих трьох методів.

Молекулярно-променева епітаксія. Епітаксія з молекулярних пучків у вакуумі є процесом прямого перенесення речовини. Речовина-джерело (монокристалічний кремній або германій) за допомогою сфокусованого електронного пучка у високому вакуумі інтенсивно випаровується, утворюючи потік молекулярних частинок, що досягають підкладки без проміжних взаємодій. Частинки напівпровідника, які осіли на поверхню підкладки, під впливом сил молекулярної взаємодії утворюють правильну структуру, що визначається кристалічною орієнтацією напівпровідника. Зростання епітаксійного шару відбувається вздовж поверхні, і шар, що росте, повторює структуру підкладки.

Різновидом епітаксії з молекулярних пучків у вакуумі є *метод субли-*

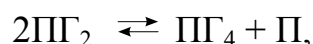
мації, при якому випаровування напівпровідника, зокрема кремнію, проводять шляхом прямого розігрівання електричним струмом прямокутної пластини, віддаленої від підкладки на відстані в декілька сотень мікрометрів. В даному випадку зразок-джерело не плавиться, а відбувається сублімація кремнію і перенесення його на підкладку. Одержуваний шар має високий питомий опір, оскільки імовірність попадання сторонніх домішок з вакуумної камери мала, але продуктивність процесу недостатня для промислового виробництва.

Епітаксія в газовій фазі за допомогою хімічної взаємодії. При кристалізації з газової фази за допомогою хімічної взаємодії атоми напівпровідника переносяться у складі хімічної сполуки, яка дисоціює на підкладці, звільняючи атоми напівпровідника (якщо в процесі беруть участь елементарні напівпровідники – германій і кремній) або його молекули. Хімічні методи найширше застосовуються при отриманні епітаксійних шарів у виробничих умовах. Ці методи відносяться до *непрямих процесів* перенесення, суть яких полягає в тому, що в результаті певних хімічних реакцій утворюється напівпровідниковий матеріал.

Серед гіпотез епітаксійного росту з газової фази слід зазначити дві. Згідно з першою, напівпровідник утворюється на підкладці в результаті реакції дисоціації, каналізованою поверхнею підкладки. Згідно з другою, розкладання сполук напівпровідника відбувається на деякому видаленні від підкладки. Частинки напівпровідника досягають підкладки шляхом дифузії в газовій фазі.

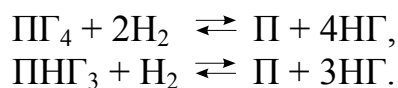
Хімічні реакції, що приводять до звільнення атомів напівпровідника, можна об'єднати в чотири групи.

1. Реакції диспропорціонування галоїдних сполук:

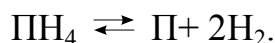


де П — атом напівпровідника (германій, кремній);
Г — атом галоїду (хлор, фтор, бром, йод).

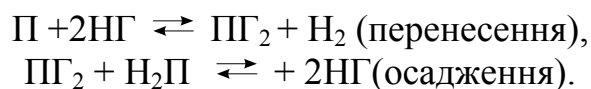
2. Реакції відновлення галоїдних сполук воднем:



3. Піроліз (терморозпад) – розкладання сполук при нагріванні:



4. Транспортні хімічні реакції (реакції перенесення), що відбуваються в дві стадії:



Всі ці реакції – зворотні. Напрямок протікання реакції і швидкість осадження залежать від концентрації початкових речовин і режиму процесу.

Епітаксія в рідкій фазі. Метод рідкофазної епітаксії полягає в нарощуванні монокристалічного шару напівпровідника із розплаву або розчину-розплаву, насиченого напівпровідниковим матеріалом. Напівпровідник епітаксійно кристалізується на поверхні підкладки, зануреної в розплав, при його охолодженні. В більшості випадків при кристалізації з рідкої фази як розчинник використовують будь-який метал, що має необмежену розчинність з напівпровідником в рідкому стані і який створює евтектику, наприклад Al–Si або Au–Si. В випадку рідкофазної епітаксії напівпровідникових сполук як розчинник застосовують легкоплавкий компонент сполук, наприклад Ga для GaAs та GaP. Це дозволяє понизити температуру кристалізації і зменшити перепад температури на межі підкладка – розплав, що підвищує чистоту нарощуваного шару.

Перспективним є процес *пара – рідина – тверде тіло*, що поєднує методи газової і рідинної епітаксії. На поверхню напівпровідникової підкладки наносять тонкий шар металу, що створює рідку фазу евтектичного складу, що дозволяє використовувати низькі температури епітаксії. Атоми напівпровідника осідають з газової фази і дифундують через шар рідини до межі з підкладкою, де відбувається їх кристалізація. Оскільки товщина шару розплаву не перевищує 1 мкм, то швидкість росту епітаксійного шару практично не залежить від часу дифузії атомів в розплаві.

4.2 Технологічні особливості епітаксії Si і Ge

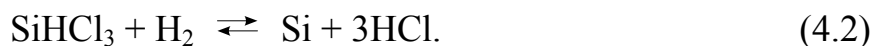
Серед найбільш поширених методів нарощування епітаксійних шарів германію і кремнію основними є відновлення їх тетрахлоридів воднем і термічне розкладання моносилана SiH₄ і моногермана GeH₄. Монокристалічні шари кремнію або германію осідають на нагрітих підкладках при пропусканні над ними водню з парами хлоридів або гідридів та легуючих домішок. Типовий процес епітаксійного нарощування складається з таких операцій: 1) завантаження пластин в реактор; 2) продування реактора інертним газом і воднем; 3) нагрівання пластин і подача реагентів для газового травлення з метою очищення пластин; 4) припинення травлення і встановлення температури, необхідної для нарощування; 5) подача реагентів для осадження і легування епітаксійних шарів; 6) припинення подачі реагентів і короткочасне продування воднем; 7) виключення нагріву, продування воднем і інертним газом; 8) розвантаження реактора. У виробництві напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем найбільший об'єм епітаксійних процесів припадає на епітаксію кремнію. Широке практичне застосування одержало відновлення хлоридів кремнію воднем – хлоридний метод епітаксії.

Хлоридний метод епітаксії кремнію. Його широке розповсюдження

обумовлене відносною простотою і доступністю початкових матеріалів. Пари тетрахлориду кремнію і водень подаються в реактор, де протікає основна реакція відновлення кремнію



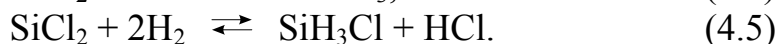
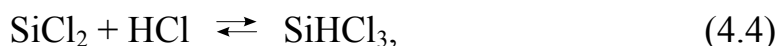
Замість тетрахлориду іноді використовують трихлорсилан SiHCl_3 , відновлення якого протікає згідно з реакцією



При надлишку хлористого водню HCl обидві реакції йдуть справа наліво, що використовують для газового травлення підкладок з метою видалення поверхневих шарів кремнію, що містять порушення структури, а також залишків діоксиду кремнію і забруднень. Процес відновлення SiCl_4 є складнішим, ніж описуваний реакцією (4.1). Протікання реакцій проміжних взаємодій розраховують двома способами. За першою схемою, відновлення супроводжується протіканням реакцій за участю дихлориду кремнію SiHCl_2 , HCl і H_2 . Реакції осадження (4.1) супроводжує реакція травлення кремнію:

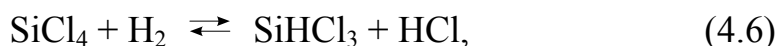


Внесок цієї реакції збільшується при зростанні концентрації тетрахлориду у водні, що приводить до спадання швидкості росту епітаксійного шару. Крім цього протікають побічні реакції:



Утворювані хлористоводневі сполуки кремнію відновлюються воднем до чистого кремнію.

За другою схемою, відновлення SiCl_4 , відбувається в газовій фазі за однією з реакцій:



або



Після часткового відновлення SiCl_4 йде відновлення хлоридів або диспропорціонування їх на підкладці з утворенням атомарного кремнію. Відносно легший розпад молекули SiHCl_3 в порівнянні з молекулою SiCl_4 визначається меншою енергією зв'язку $\text{Si} - \text{H}$ в порівнянні з енергією зв'язку $\text{Si} - \text{Cl}$.

При малих концентраціях тетрахлориду кремнію у водні спостерігають лінійну залежність швидкості росту від концентрації SiCl_4 відповідно до реакції (4.1). При збільшенні вмісту SiCl_4 швидкість росту знижується і спостерігається перехід до травлення підкладки – переважає реакція (4.3).

Експериментально показано, що при температурах 1050–1300 °С максимальне значення енергії активації (145 кДж/моль) відповідає концентрації 5% SiCl_4 у водні. При нижчих або вищих концентраціях SiCl_4 енергія активації процесу осадження кремнію знижується. Таким чином, при концентраціях SiCl_4 менших 1% відбувається реакція зростання (4.1). При великих концентраціях одночасно з реакцією (4.1) протікає реакція травлення (4.3), а також парофазні реакції (4.4) – (4.7).

Осадження кремнію здійснюється в інтервалі температур 1150–1250 °С, концентрація тетрахлориду у водні підтримується на рівні 0,5–1%, а швидкість потоку газу складає 0,1–1 м/с. За цих умов швидкість росту шарів близька до 1 мкм/хв. При невисоких температурах і великому вмісті тетрахлориду в парах утворюються рихлі і аморфні або полікристалічні солі кремнію. Збільшення температури підкладок і зменшення мольної частки тетрахлориду в газовій суміші веде до ущільнення і кристалізації шарів.

Гібридний метод епітаксії кремнію. При проведенні процесу епітаксії хлоридним методом температура підкладок складає біля 1200 °С. В результаті відбувається помітна дифузія домішок із сильно легованої пластини – підкладки – в слаболегований нарощувальний епітаксійний шар. Це явище називають *автолегуванням*. Крім дифузії автолегування може здійснюватися внаслідок перенесення домішки із зворотної сторони підкладки в нарощувальний шар. Автолегування змінює концентрацію домішок в епітаксійному шарі, розподіл домішок на межі шар – підкладка і тим самим товщину області із заданою концентрацією домішки в епітаксійному шарі.

Для обмеження дифузії домішок з підкладки прагнуть вибрати леговану домішку в ній з низьким коефіцієнтом дифузії, наприклад Sb і As в кремнієвих n^+ -підкладках замість фосфору.

Іншою можливістю обмеження дифузії домішок є зниження температури процесу. Понизити температуру до 1000 °С при епітаксії кремнію можна шляхом використання УФ-опромінення підкладок під час нарощування. Опромінювання УФ-світлом зменшує вплив домішок, адсорбованих з газової фази, на рухливість мігруючих по поверхні підкладки атомів кремнію. Кардинальніше проблема обмеження автолегування розв'язується шляхом використання гібридного методу епітаксії, що дозволяє понизити температуру процесу. Гібридний метод полягає в піролізі моносилану, тому його іноді називають силановим методом. Рівняння реакції терморозпаду моносилану має вигляд



Кремній, що звільняється, осідає на підкладках, температура яких може бути знижена до 1000 °С. Це практично запобігає дифузії домішок з підкладки і сприяє зростанню шару з рівномірним розподілом легуючої домішки по товщині. Оптимальні температури осадження при піролізі моносилану 1050–1100 °С. Як джерело зазвичай застосовують суміш, що складається з 4–5% моносилану і 95–96% He, Ar або H₂ високої чистоти. Концентрація моносилану у водні під час осадження 0,05–0,1%, а швидкість потоку газу 30–50 см/с. За цих умов швидкість росту може змінюватися від 0,2 до 2 мкм/хв. Певною складністю при роботі з моносиланом є можливість його мимовільного газофазного розкладання в реакторі з утворенням твердих частинок. Це викликає зменшення концентрації моносилану в газовій фазі і зниження швидкості росту. Тверді частинки, потрапляючи в нарощуваний шар, можуть призвести до появи недосконалої кристалічної структури. Вірогідність газофазного піролізу моносилану збільшується при температурах вище за 1100 °С, концентрації моносилану у водні більше 0,12% і швидкості потоку газу менше 20 см/с, а також за наявності в газовій фазі слідів H₂O і O₂.

Окрім порівняно низької температури процесу перевагою методу піролізу моносилану є відсутність під час зростання шарів сполук, що містять хлор. При цьому в порівнянні з хлоридним методом вдається зменшити автотолегування і одержати різкіші профілі розподілу концентрації домішок на межі шар – підкладка. Швидкість осадження кремнію при терморозпаді моносилану лінійно залежить від концентрації SiH₄ у суміші. При зростанні температури від 800 до 1100 °С швидкість росту збільшується, причому енергія активації процесу складає (140±17) кДж/моль. При температурах вище 1100 °С швидкість росту перестає залежати від температури і визначається масопереносом реагентів в газовій фазі.

Горизонтальні і вертикальні реактори. Температурні і газодинамічні умови проведення процесу багато в чому визначають якість епітаксійних нарощуваних шарів, тому до устаткування для епітаксії висувають високі вимоги. Установки епітаксійного нарощування відрізняються перш за все конструкцією реакторів, які бувають двох основних типів: горизонтальні і вертикальні.

Горизонтальний реактор має найпростішу конструкцію (рис. 4.1, а). Потік парогазової суміші йде в ньому паралельно підкладкотримачу і, збіднюючись при протіканні над пластинами, викликає зміну товщини і питомого опору епітаксійних шарів. Для більш рівномірного осадження використовують два способи: підкладкотримач встановлюють під деяким кутом до напрямку газового потоку (рис. 4.1, б) або використовують розподілене введення газу по всій довжині підкладкотримача (рис. 4.1, в).

Вертикальні реактори забезпечують якнайкращі умови для нагрівання і потоку газової суміші завдяки осьовій симетрії конструкції реактора. Обертання підкладкотримача сприяє вирівнюванню теплових і газодинамічних полів. На рис. 4.2, а показано реактор з чотиригранним підкладкотримачем

і вертикальним введенням парогазової суміші, що застосовувався в пер-
винних конструкціях установок з вертикальним реактором.

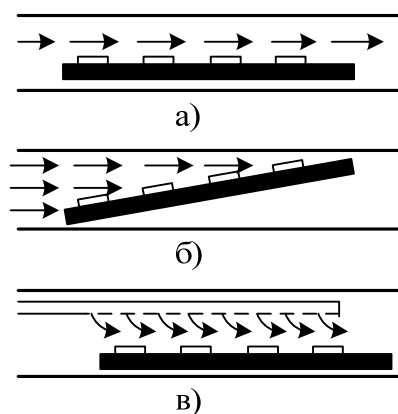


Рисунок 4.1 – Типи
горизонтальних реакторів

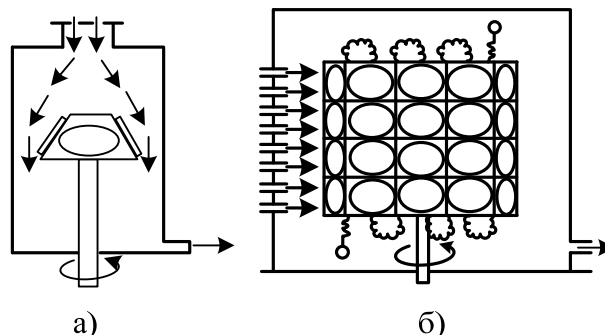


Рисунок 4.2 – Типи
вертикальних реакторів

На рис. 4.2, б показано високопродуктивний вертикальний реактор барабанного типу з горизонтальним введенням робочої суміші. Нагрів чотиригранного графітового підкладкотримача проводиться за допомогою індуктора струмами ВЧ, а реактор є кварцевою трубою. Нагрівання барабанного підкладкотримача здійснюється зсередини за допомогою резистивних елементів, а реактор виконаний з нержавіючої сталі, його іноді називають ковпаковим.

Принципова схема установки для епітаксії подана на рис. 4.3. Судина з тетрахлоридом кремнію або сумішшю $\text{SiCl}_4 + \text{BBr}_3$ або $\text{SiCl}_4 + \text{PCl}_3$, що містить легуючі домішки – трибромистий бор BBr_3 , або трихлористий фосфор PCl_3 для легування шару акцепторною або донорною домішкою, знаходиться в термостаті, який підтримує з високою точністю температуру тетрахлориду, що забезпечує необхідний тиск пари. Зазвичай це температура біля або нижче за 0°C , оскільки SiCl_4 – дуже летка рідина. У систему подається водень, що пройшов паладієве очищення для видалення слідів вологи і кисню. У паладієвій або платиновій системі очищення стоїть діафрагма з Pd або Pt, відповідно, нагріта до $400\text{--}450^\circ\text{C}$. Атомарний водень дифундує з високою швидкістю через цю діафрагму, його витрата складає близько $1\text{ м}^3/\text{год}$, тоді як інші речовини майже не проникають через діафрагму внаслідок малості їх коефіцієнтів дифузії. Точка роси після очищення складає -70°C . Водень проходить через кран 1 і ротаметр, що вимірює витрату водню. Крани 2, 3, 4 закриті. Кремнієві підкладки нагріваються до $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$, і в протоці водню їх поверхня піддається очищенню. Кран 1 закривають, а крани 2 і 3 відкривають. Водень проходить через судину з SiCl_4 і насичується парами тетрахлориду, які в реакторі відновлюються до елементарного кремнію. Продукти реакції – що не прореагували SiCl_4 , H_2 , HCl і ін. – через відкритий кран 5 виходять в скруббер,

призначений для уловлювання отруйних відходів, де вони згорають у водневому полум'ї. Для газового травлення в установках епітаксійного нарощування передбачена подача хлористого водню через кран 1 в камеру перед процесом епітаксії. Широке застосування одержала установка нарощування епітаксійних шарів УНЕС-2П-В (двокамерна, з реактором вертикального типу).

Обидва реактори можуть працювати послідовно: один завантажують, в другому проходить процес нарощування шару.

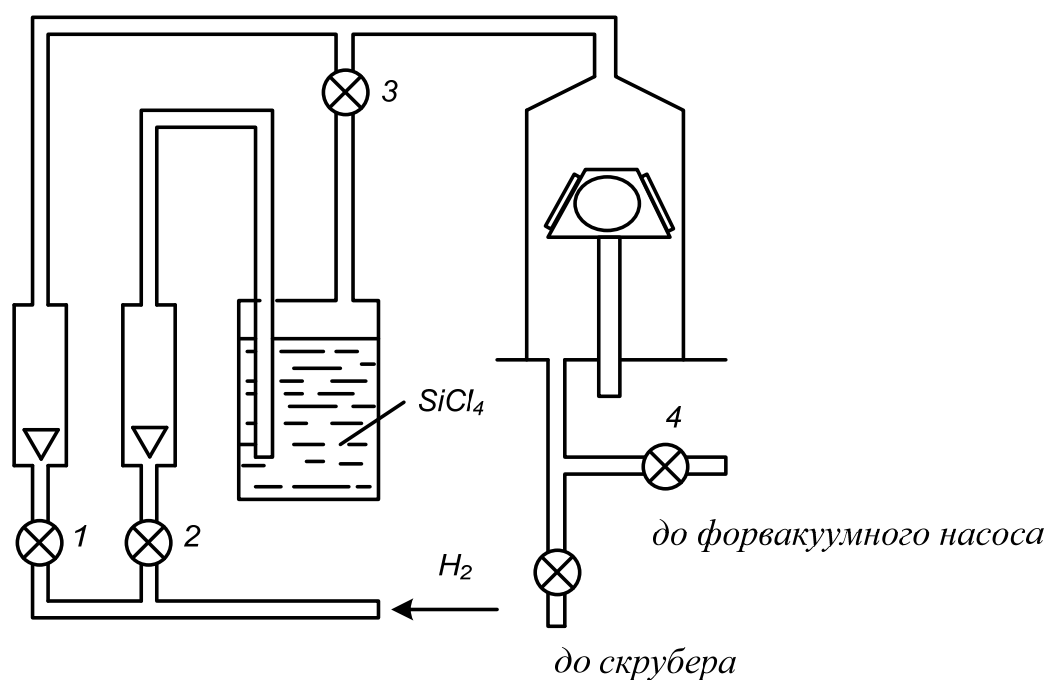


Рисунок 4.3 – Схема установки для епітаксії кремнію

Технологія епітаксійного нарощування вирішує перш за все задачу досягнення необхідних значень товщини епітаксійних шарів і рівнів легування з точністю не гірше $\pm(5-10)\%$ від пластини до пластини. Щоб досягти хорошої відтворюваності товщини епітаксійних шарів, перш за все необхідно зберігати постійною швидкість нарощування. Для цього слід підтримувати на постійному рівні концентрацію основної речовини (SiCl_4 , SiH_4) і температуру протягом всього процесу. Для відтворюваного отримання епітаксійних шарів із заданим питомим опором нагрів повинен бути рівномірним, оскільки температурні залежності тиску пари і ступеня дисоціації основної речовини і легуючих домішок різні.

4.3 Технологічні особливості епітаксії напівпровідникових сполук типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$

Області застосування хімічних сполук типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ безперервно розширюються. В наш час їх використовують в оптоелектроніці для створення

систем відображення інформації, джерел і приймачів випромінювання, напівпровідникових лазерів і ін. У всіх типах перерахованих виробів активна напівпровідникова структура містить, як правило, мінімум два авто- або гетероепітаксійних шарів.

Синтез напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$ і їх твердих розчинів безпосередньо з елементів ускладнюється поєднанням високих температур їх плавлення і тиску пари. При нагріванні на повітрі більше $300\text{ }^\circ\text{C}$ арсенід галію окислюється, а починаючи з $600\text{ }^\circ\text{C}$ – розкладається з виділенням миш'яку, тиск пари якого при температурі плавлення складає 10^5 Па . Тиск пари фосфору в точці плавлення GaP складає $3,5 \cdot 10^6\text{ Па}$.

Розплавлені GaAs і GaP дуже активні і взаємодіють зі всіма відомими контейнерними матеріалами. Синтетичний кварц, використовуваний в технології отримання монокристалів $A^{III}B^V$, забруднює розплав GaAs кремнієм.

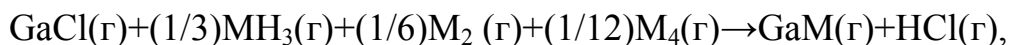
Багато відмічених труднощів усуваються при вирощуванні сполук типу $A^{III}B^V$ у вигляді епітаксійних шарів з парової фази при температурах нижче за температуру плавлення сполук. Серед варіантів осадження сполук типу $A^{III}B^V$ з газової фази або парогазових сумішей широке застосування знайшов метод хімічних транспортних реакцій в проточній системі. Він має велику гнучкість і керованість, придатний для синтезу шарів з матеріалів з властивостями компонентів, що значно відрізняються. Використання газоподібних початкових реагентів дозволяє зменшити флуктуації складу сполук, одержувати кристали з високою гомогенністю. Відмінною рисою методу є можливість поступової зміни складу шару, що зростає, при віддаленні від підкладки. Це зменшує напруги, що виникають через відмінності параметрів ґратки підкладки і нарощувального шару. Є також можливість створення багатошарових структур.

Для сполук типу $A^{III}B^V$, як і при епітаксії кремнію і германію, використовують гідридні і хлоридні методи. У гідридних методах елементи напівпровідникової сполуки транспортуються до підкладки у вигляді газоподібних сполук водню: арсину AsH_3 , фосфіна PH_3 і ін. На рис. 4.4 показано вертикальний реактор, що використовується для отримання твердих розчинів арсеніду-фосфіду галію різних складів від $x=0$ до $x=1$.

Вертикальний реактор забезпечує високу однорідність газо- і термодинамічних умов при зростанні епітаксійних шарів. Для отримання твердих розчинів арсеніду-фосфіду галію зі складами $0 \leq x \leq 1$ використовують фосфін і арсин, які поступають в реактор зверху в потоці водню. У ці ж суміші додають пару або газ, до складу якого входять легуючі речовини, наприклад цинк для вирощування шарів з електропровідністю p -типу або сірчистий водень для отримання шарів n -типу. Також зверху через окремий вхід пропускають суміш хлористого водню з воднем, який при проходженні через резервуар з розплавленим галієм, утворює хлорид галію:



Для отримання відтворених результатів необхідно, щоб об'єм і протяжність кожної зони, а також температурні умови і швидкості газових потоків в них, забезпечували утворення сумішей необхідного складу і постійної концентрації. Хлорид галію, арсин і фосфін взаємодіють в реакторі, внаслідок чого на підкладках осідає епітаксійний шар твердого розчину. Реакція осадження має вигляд:



де М – атом As або P, оскільки за наявності суміші гідридів $\text{AsH}_3 + \text{PH}_3$ обидві сполуки вступають в реакцію з хлористим галієм.

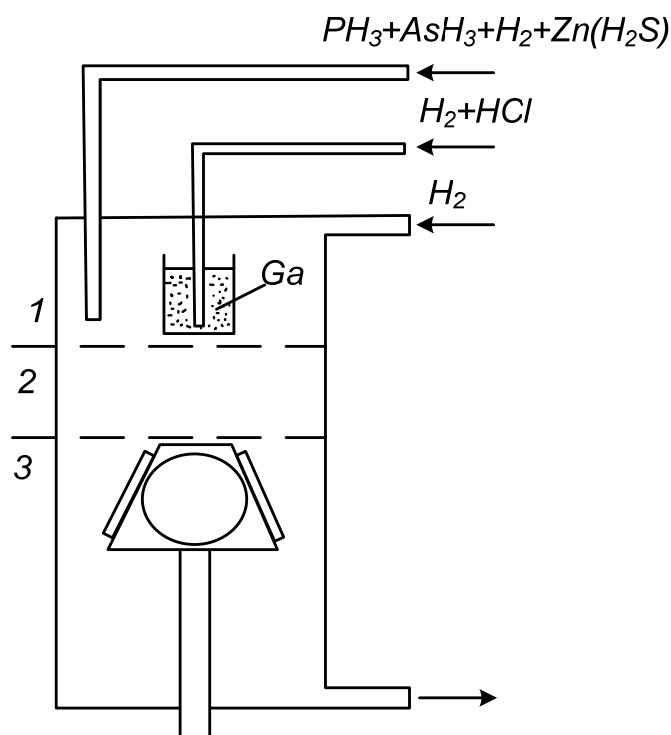


Рисунок 4.4 – Схема вертикального реактора для отримання твердих розчинів $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$:
1 – зона джерела парів; 2 – зона змішування парів; 3 – зона осадження

Склад твердого розчину $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ змінюється залежно від температури осадження. Епітаксійні шари, осаджені при нижчій температурі, містять фосфор в меншій кількості, ніж шари, осаджені при температурі 700 – 800 °С. Відмітимо, що в даному методі внаслідок відсутності гідридів галію використовують хлорид галію і точніше цей метод називають *гідрид-но-хлоридним*.

Швидкість зростання твердих розчинів GaAsP змінюється з температурою немонотонно. Із зменшенням температури зростає перенасичення парової фази і швидкість зростання починає збільшуватись. Проте протікан-

ня конкуруючих процесів поглинання GaCl та M на поверхнях реактора веде до зниження швидкості зростання. Шари, одержані при температурах нижче за 700 °С, мають недосконалу структуру. Швидкість зростання твердих розчинів може змінюватися в межах 0,1–10 мкм/хв, товщина досягає 500 мкм в випадку осадження на підкладках з GaAs.

Закономірності епітаксії з рідкої фази. Метод рідкофазної епітаксії для осадження шарів напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$ є в деяких випадках найефективнішим.

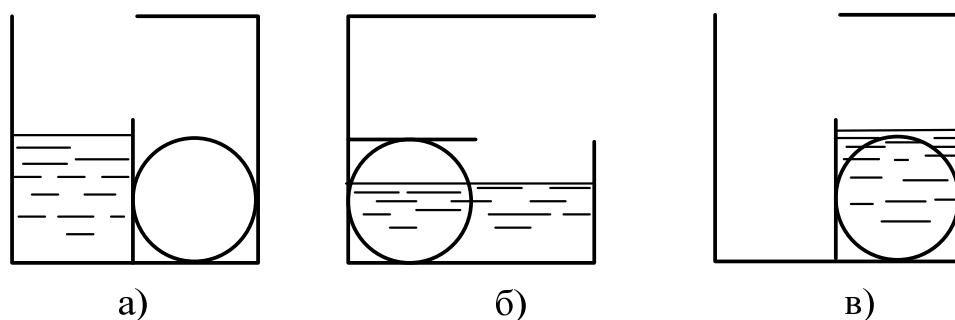


Рисунок 4.5 – Касета, що обертається: а) – початкове положення; б) – переливання розчину; в) – робоче положення

Він переважає, наприклад, при отриманні структур світловипромінюючих приладів на фосфіді галію, легованих азотом, оскільки дозволяє одержувати вищу ефективність люмінесценції в порівнянні з газофазними методами. *Рідкофазна епітаксія* – це орієнтована кристалізація монокристалічного шару напівпровідникового матеріалу з розчинів цього матеріалу в розплавлених металах. Нехай є розчин-розплав, насичений напівпровідниковим матеріалом. У розплав занурюють підкладку з того ж напівпровідникового матеріалу. При подальшому охолодженні унаслідок перенасичення розчину-розплаву напівпровідниковим матеріалом на підкладці відбувається кристалізація епітаксійного шару.

За апаратним оформленням всі технологічні варіанти рідкофазної епітаксії поділяють на *відкриті* і *закриті*. Закриті проводять у відпаяній ампулі, відкриті – в струмі інертного газу або відновлюваному середовищі. Широкого поширення набули відкриті процеси. Основним способом створення перенасичення є примусове охолодження розчину-розплаву.

В основі більшості пристосувань для проведення процесу епітаксії в рідкій фазі лежить пристрій, в якому заливка і видалення розчину з підкладок здійснюються нахилом касети (рис. 4.5). У початковому положенні в одній половині касети знаходиться розчин-розплав, в іншій – підкладки (рис. 4.5, а). Після досягнення необхідної температури вирощування касета двічі повертається (рис. 4.5, б, в) і розплав покриває підкладки. Потужність нагріву печі зменшують, регулюючи її так, щоб отримати відповідну швидкість охолодження. Зростання з'єднання відбувається при повільному охолодженні. Склад розплаву підбирають так, щоб до контакту з підкла-

дкою він був рівноважним або близьким до рівноваги. У останньому випадку при контакті з підкладками відбувається часткове їх розчинення, завдяки чому віддаляються поверхневі порушення і при подальшому охолодженні печі епітаксійна рекристалізація відбувається на більш довершених поверхні підкладки. Товщину епітаксійного шару задають швидкістю охолодження і зміною температурного діапазону, в якому відбувається охолодження розплаву. Розчин знаходиться у контакті з підкладками до тих пір, поки не відбудеться зміна температури в заданому діапазоні, після чого касета повертається в початкове положення (рис. 4.5, а) і розплав стікає з пластин. Залишки розплаву (галію), що прилипли до поверхні епітаксійного шару, видаляють обтиранням і травленням.

Цим методом можна нарощувати два шари – спочатку шар з електропровідністю *n*-типу, легований сіркою або телуром, а потім шар з електропровідністю *p*-типу з розплаву, що містить цинк. Використовують два різновиди цього методу: *перекомпенсація в розплаві і легування з парової фази*. В першому випадку після нарощування *n*-шару товщиною 15–20 мкм, коли розплав ще покриває підкладки і процес зростання продовжується, в розплав додають акцепторну домішку, щоб перекомпенсувати вміст дононої домішки. Такий спосіб дозволяє вести безперервне зростання на *n*-шарі *p*-шару. У другому випадку шар розплаву, що покриває підкладки, підбирають достатньо тонким. Легування проводять також при безперервному вирощуванні шару шляхом введення в реактор пари цинку або сірчистого водню. Сірка і цинк дифундують в розплаві, захвачуються зростаючою сполукою. Ці два способи називають нарощуванням *p-n*-переходу «на місці», тобто без переміщення підкладки. Переваги їх полягають в тому, що межа *p-n*-переходу не стикається з атмосферою, не потрібно будь-якого проміжного очищення поверхні і *p-n*-перехід зростає досконалим.

У ряді випадків застосовують нерухому касету з розплавом, а підкладки закріплюють на тримачах і занурюють в розплав, виймаючи їх через необхідний час. Використовують також касети у вигляді пенала з декількома комітками для розплаву, під якими переміщується вкладиш з підкладками. Для підвищення відтворюваності результатів і кращого управління процесом розроблений *метод рідкофазної епітаксії, контрольованої електричним струмом*. Між підкладкою, наприклад з GaP, і такою ж пластиною-джерелом є розчин-розплав. Джерело, як правило, слугує катодом. При включенні електричного струму параметри рідкої фази і швидкість росту приймають стаціонарне значення. Основною причиною кристалізації є електроперенесення іонів галію і фосфору через розплав до підкладки. Перевагою рідкофазної епітаксії, контрольованої електричним струмом, є те, що середня швидкість росту шару залежить від щільності струму. Це дозволяє просто і точно управляти товщиною шару, а ізотермічні умови зростання дають можливість одержати однорідні за фізичними властивостями епітаксійні шари.

4.4 Дефекти в епітаксійних структурах

Утворення дислокацій в епітаксійних шарах. При епітаксійному зростанні відтворюється морфологія підкладки, тому дислокації, що були в пластині початкового напівпровідника, переростають в епітаксійний шар. Щільність дислокацій в шарі зазвичай перевищує щільність дислокацій в підкладці. Це обумовлено тим, що область поблизу поділу підкладка – епітаксійний шар характеризується наявністю домішок, забруднень і поверхневих дефектів, що впливають на досконалість зростаючого шару і слугує джерелом утворення дислокацій. Щільність дислокацій зростає в напрямку від поверхні епітаксійного шару до межі поділу шару з підкладкою. Межа поділу має підвищену щільність дислокацій і в ній спостерігаються чужорідні включення, наприклад хлоридів. Утворення недосконалої проміжної області з великою щільністю дислокацій залежить від стану поверхні підкладки. Для отримання шарів з малою щільністю дислокацій потрібна ретельна механічна обробка, очищення поверхні пластин, хімічне рідинне або газове травлення.

Якщо для нарощування використовують бездислокаційні підкладки і поверхня їх ретельно оброблена і очищена, то генерація дислокацій може відбуватися в результаті дії термічних і механічних напруг, що виникають на різних стадіях теплової обробки структур. Механічні напруги виникають при значній відмінності у вмісті легуючої домішки в підкладці і зростаючому шарі. При введенні в кремній атомів бору або фосфору, які мають ковалентні радіуси, менші, ніж атоми кремнію, параметр ґраток зменшується. При введенні атомів сурми – з великим ковалентним радіусом – спостерігається зворотний ефект. В процесі нарощування епітаксійного шару через відмінності в параметрах ґраток підкладки і шару виникають напруги і структура згинається. Із збільшенням товщини епітаксійного шару вигин зростає до деякого критичного значення, після чого генеруються *дислокації поверхні поділу*. Утворення дислокацій поверхні поділу усувають, застосовуючи легування епітаксійного шару двома домішками. Ковалентний радіус однієї з них більший, ніж у кремнію, а у іншої – менший. В цьому випадку сталу ґратки епітаксійного шару можна наблизити до сталої ґратки підкладки. Компенсацію напруг в ґратках здійснюють, використовуючи бор або фосфор як легуючі домішки, а германій або олово як компенсуючі. У випадку легування сурмою можна використовувати фосфор або вуглець і концентрація легуючих домішок може досягати без збитку для структури $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Під дією напруг, прикладених до кристала, відбувається ковзання дислокацій, якщо сила, що виникає, перпендикулярна до лінії дислокації. Взаємодія між дислокаціями знижує вплив напруг, прикладених до кристала ззовні, і зміцнює кристал. Домішкові атоми, що знаходяться в кристалі, притягуються дислокаціями і прагнуть скупчитися навколо них, утворюючи так звану *атмосферу Коттреля*, що приводить до мікронеоднорідності

в розподілі легуючих домішок. Якщо атомний радіус домішок більший, ніж у атомів кристала то, потрапляючи в область розтягування поблизу крайової дислокації, вони зменшують вільну енергію кристала за рахунок зменшення пружної деформації. Те ж дають і атоми меншого розміри в області стиснення. При високих температурах атмосфера Коттреля розсмоктується, а при нижчих утворюється знов.

Пружна поведінка вакансій і міжвузлових атомів викликає їх притягування до крайових дислокацій. В результаті точковий дефект переміщується до дислокації і анігілює на ній, а вісь дислокації переходить з однієї площини ковзання на іншу. Коли вакансія підходить до сходинки, що утворена зайвою півплощиною, сходинка зміщується на одну міжплощинну відстань і вакансія зникає. При поглинанні міжвузлових атомів сходинка зміщується в протилежному напрямку. Тому лінія дислокації є місцем стоку для точкових дефектів. Вона ж слугує основним джерелом генерації рівноважних атомних дефектів.

Атоми, розташовані поблизу лінії дислокації, мають підвищений в порівнянні з непорушеною частиною кристала хімічний потенціал, тому розчинення і випаровування кристала починаються з ліній дислокацій. Наявність домішок поблизу дислокацій підвищує або знижує середнє значення хімічного потенціалу і відповідно збільшує або зменшує швидкість травлення.

Дефекти упакування. Зростання монокристалічного епітаксійного шару складається із зародження центрів кристалізації, приєднання атомів до цих центрів, бічного зростання і з'єднання окремих плоских утворень в єдине ціле. Якщо будь-який атом висувається зі свого шару, то він слугує початковою точкою розвитку дефекту упакування, оскільки оточуючі його атоми в процесі подальшого зростання також будуть зміщені щодо моноатомних шарів всього об'єму. Дефекти упаковки на поверхні епітаксійного шару утворюють плоскі фігури у вигляді рівносторонніх або рівнобедрених трикутників, квадратів, прямих ліній, незамкнених трикутників і квадратів. Іноді утворюються складні форми: комбінації трикутників і ліній, квадратів і ліній. В кінці кожної лінії є дислокація. Форма дефектів упаковки залежить від кристалографічної орієнтації епітаксійного шару. У шарах, вирощених на підкладках, які орієнтовані за площиною (111), дефекти упаковки виявляються у вигляді рівносторонніх трикутників і окремих кутів. На шарах з орієнтацією (110) виникають рівнобедрені трикутники, на площині (100) – квадрати і їх комбінації.

Лінії ковзання. Причина появи ліній ковзання – термічні пружні напруження, що виникають внаслідок неоднорідного розподілу температури за товщиною і площею пластини. При температурах нарощування пружні напруження виявляються достатніми для генерації дислокацій і їх міграції, яка супроводжується пластичним перебігом кристала і утворенням ліній ковзання. Якщо при пластичній деформації на поверхні підкладки виникають сходинки, то при нарощуванні епітаксійного шару на них можуть утворю-

ватися дефекти упакування. При достатньо високих термічних напругах генерація і рух дислокацій, утворення ліній ковзання і дефектів упакування відбуваються протягом всього процесу нарощування.

Використовувані для епітаксії підкладки іноді мають кривизну в декілька десятків мікрометрів. Вигин підкладок зростає при зниженні їх товщини до 200 *мкм* і менше, а також при різній механічній обробці робочої і зворотної сторін пластини. Ймовірніша поява вигину у підкладок, діаметр яких перевищує 50 *мм*. Характерним є сферичний вигин пластин, причому епітаксійний шар виявляється на увігнутій стороні. Відсутність хорошого теплового контакту з поверхнею нагрівача викликає неоднорідний розподіл температури в підкладці. Навіть плоска, абсолютно рівна підкладка, що лежить на нагрівачі, скривлюватиметься при нагріванні, оскільки її зовнішня (верхня) сторона виявляється менш нагрітою, чим нижня. Перепад температур за товщиною підкладки складає 20–50 *К*. Напруги, що виникають в зігнутій і неоднорідно нагрітій підкладці, достатні для утворення і переміщення дислокацій і зсуву площин $\{111\}$ в напрямках $\langle 110 \rangle$ при ковзанні. Лінії ковзання, розташовані в центральній частині пластини, видно без хімічної обробки. Ця область виглядає матовою. Окремі лінії є сходишками, що виникли в результаті дії стискальних напруг на центральну область пластини. Запобігання появі ліній ковзання сприяє зменшенню температури процесу нижче за той рівень, при якому відбувається пластична течія (для кремнію це 1000 °C), використання бездислокаційних підкладок, а також ретельне хімічне полірування.

4.5 Методи контролю епітаксійних шарів

Основними параметрами, що визначають придатність епітаксійного шару для використання при виготовленні інтегральних мікросхем, є концентрація носіїв заряду, щільність дефектів і товщина шару. Товщину шару на кремнії вимірюють, використовуючи техніку поперечних шліфів, за допомогою поперечного сколення, за інтерференцією ІЧ-променів і шляхом спостереження дефектів упаковки.

Виготовлення поперечного відколка. Цей спосіб набув поширення для крихких матеріалів, таких, як сполуки типу $A^{III}B^V$ і їх тверді розчини. Пластину з нарощеним епітаксійним шаром поміщають на рівну поверхню і легким натисненням пінцета або скальпеля на її край відколюють шматочок. Сколювання відбувається по площині спайності, тому, відступивши від грані відколку по краю пластини на 1–2 *мм*, роблять ще одне сколювання – паралельно попередньому. Одержаний зразок – поперечний відколок – є довгою смужкою, шириною 1–2 *мм* і товщиною, що дорівнює товщині пластини.

Для виявлення межі шар – підкладка, а також *p-n*-переходу, якщо він є в шарі, поперечний відколок травлять в лужному розчині червоної кров'яної солі ($20(z)K_3Fe(CN_6)_3 + 30(z)KOH + 250(z)H_2O$) протягом 1–2 *хв*. Ця

суміш придатна для сполуки $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Межа епітаксійний шар – підкладка виявляється у вигляді темної смуги. Вимірювання товщини епітаксійного шару проводять за допомогою мікроскопа МІМ-7 з мікрометричною насадкою.

Інтерференція ІЧ-променів. Віддзеркалення інфрачервоних променів в діапазоні довжин хвиль 10 – 35 $\mu\text{м}$ походить не тільки від поверхні пластини, але і від межі поділу епітаксійний шар – підкладка внаслідок відмінностей показників заломлення, підкладки і шару, домішок, що містять різну концентрацію. За картиною інтерференції відбитих променів можна судити про товщину шару. Надійні дані одержують, якщо опір шару вище 0,1 $\text{Ом}\cdot\text{см}$, а опір підкладки нижче 0,02 $\text{Ом}\cdot\text{см}$. Із збільшенням концентрації домішки в шарі зростає поглинання ІЧ-променів, тоді як із зменшенням концентрації домішки в підкладці зростає пропускання нею променів і зменшується їх віддзеркалення на межі.

Різниця ходу променів δ , відбитих на поверхні шару і на межі підкладка – шар, визначається товщиною шару h , показником його заломлення α і кутом заломлення φ :

$$\delta = 2ah \cos \varphi.$$

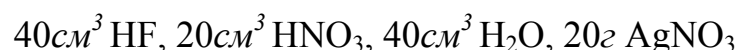
Спостерігаючи інтерференційну картину і вимірюючи різницю ходу, обчислюють товщину епітаксійного шару. Неоднорідність шару за товщиною або розмиття розподілу домішки на межі підкладка – шар приводить до погіршення контрасту інтерференційної картини.

Спостереження дефектів упаковки. Оскільки дефекти упаковки зароджуються переважно на межі поділу шару і підкладки і утворюють правильні тетраедри, то висота цих тетраедрів дорівнює товщині шару. При орієнтації підкладки за площиною (111) основою тетраедрів є рівносторонній трикутник, а висота тетраедра

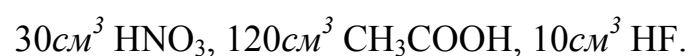
$$h = L\sqrt{2/3} = 0,816L,$$

де L — довжина сторони рівностороннього трикутника.

Для інших типів орієнтації можна знайти аналогічні вирази. Виявлення дефектів упаковки в кремнії проводять шляхом травлення в сумішах



або



Травлення проводиться 5 – 20 с. Цим же методом досліджують щільність дефектів упаковки на одиниці площі поверхні шару.

Рентгенівський мікроаналіз. Широко використовується метод лока-

льного рентгеноспектрального аналізу елементного складу напівпровідників за допомогою мікроаналізаторів, в яких збудження характеристичного рентгенівського випромінювання здійснюють гострофокусованим електронним пучком. При гальмуванні електронів в речовині виникають *гальмівне* і *характеристичне* випромінювання. Гальмівне випромінювання електронів має суцільний спектр, тоді як характеристичне складається з окремих лінійчастих спектрів, що випускаються атомами речовини. Частота характеристичного випромінювання залежить від атомного номера елемента мішені, тому на підставі лінійчастих спектрів характеристичного випромінювання можна визначити, які елементи присутні в мішені.

На рис. 4.6 подана схема установки для рентгенівського мікроаналізу. Електрони емітуються катодом *1* і прискорюються в електронній гарматі *2* до енергії $10 - 30 \text{ кеВ}$. Конденсорна магнітна лінза *3*, діафрагма *4* і об'єктна лінза *6* слугують для формування вузького пучка електронів *5*, що потрапляє на досліджуваний зразок *8*. Для ідентифікації рентгенівського випромінювання *9* за довжиною хвилі використовують два типи спектрометрів: з кристалами слюди для м'якого випромінювання – *7* і кварцу для жорсткого – *10*. Великі міжплощинні відстані кристала слюди дозволяють пропускати довжини хвиль $0,4 - 20 \text{ нм}$ (енергія випромінюваних квантів $4 - 0,8 \text{ кеВ}$ відповідно), тоді як малі міжплощинні відстані кварцу пропускають довжини хвиль $0,08 - 0,5 \text{ нм}$ (енергія квантів $15 - 3 \text{ кеВ}$).

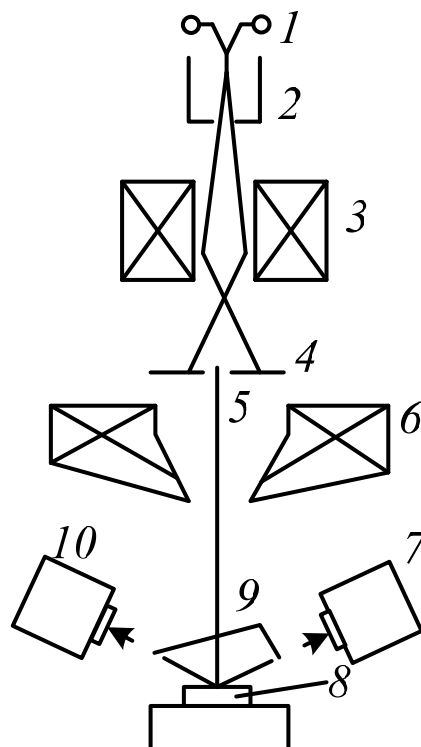


Рисунок 4.6 – Схема рентгенівського мікроаналізатора

Аналізатор може працювати в статичному режимі і в режимі сканування, що дозволяє одержувати топограму розподілу домішок уздовж поверхні зразка. Для оцінювання концентрацій досліджуваного домішкового елементу в напівпровідниковій структурі порівнюють інтенсивність відповідної лінії характеристичного випромінювання в даному кристалі з інтенсивністю тієї ж лінії в еталоні, наприклад в чистому елементі з урахуванням поправок на поглинання рентгенівського випромінювання, на відмінність в поглинанні компонентами сполук, на флуоресцентне збудження і збудження атомів гальмівним випромінюванням. Чутливість методу для більшості елементів складає $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні методи епітаксійного осадження.
2. З яких операцій складається типовий процес епітаксійного нарощування?
3. Що таке горизонтальні і вертикальні реактори?
4. Наведіть схему установки для епітаксії кремнію.
5. Які технологічні особливості епітаксії напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$?
6. Як утворюються дислокації в епітаксійних шарах?
7. Що таке дефекти упакування?
8. Охарактеризуйте методи контролю епітаксійних шарів.
9. Поясніть схему рентгенівського мікроаналізатора.

5 ФОТОЛІТОГРАФІЯ

5.1 Фотолітографія – основа планарної технології

Фотолітографія – це процес утворення на поверхні підкладки за допомогою світлочутливих матеріалів локальних захисних ділянок плівки (мікрозображення), рельєф яких повторює рисунок топології приладу або схеми, і подальшого перенесення цього мікрозображення на підкладку.

Суть процесу фотолітографії полягає в тому, що на поверхню спеціально обробленої пластини (підкладки) наносять тонкий шар світлочутливого матеріалу — *фоторезисту*. Після висихання фоторезисту на початковій підкладці утворюється міцна плівка. Опромінювання цієї плівки фоторезисту через притиснутий до неї фотошаблон (контактний друк) актинічним світлом приводить до зміни її властивостей. Проявлення і полімеризація плівки фоторезисту дозволяють одержати в ній рельєф потрібного рисунка, тобто відкриті (вільні від плівки фоторезисту) і закриті (з плівкою фоторезисту) ділянки плівки. Рельєф певного рисунка, що утворився в плівці фоторезисту, переносять на підкладку.

«Вікна», що утворюються в плівці фоторезисту, дозволяють проводити такі важливі технологічні операції: локальне травлення підкладки з метою видалення шару напівпровідникового матеріалу і створення мезаструктур, видалення захисних діелектричних шарів SiO_2 і Si_3N_4 з метою розкриття «вікон» під дифузію, а також витравлення металевих шарів з метою створення омичних контактів і струмоведучих доріжок складної геометричної форми.

Фотолітографія є одним з основних процесів в загальному циклі виготовлення інтегральних мікросхем.

Перевагами фотолітографії є універсальність, масовість, технологічність, можливість автоматизації. За допомогою фотолітографії на одній підкладці можна одержати велику кількість елементів мікросхем, що дозволяє проводити групову обробку підкладок за наперед вибраним технологічним маршрутом.

Фотолітографія розвивається в двох напрямках: постійне вдосконалення високоточного устаткування і технологічних процесів з метою стабільного відтворення форми і розмірів рисунка і розробка нових прийомів, що дозволяють розширити граничні можливості процесу створення рисунка на підкладці.

Фотолітографія є складним комплексним технологічним процесом, що включає механічні, оптичні, фізичні, фізико-хімічні і хімічні процеси. До них відносяться: вибір початкового світлочутливого матеріалу (фоторезисту), його очищення і обробка; підготовка підкладок (хіміко-динамічне очищення); формування світлочутливих плівок на поверхні підкладки; операції термообробки, експонування, проявлення, хімічного травлення і т. п.

5.2 Фоторезисти

Фоторезистами називають світлочутливі речовини, що змінюють свої властивості, перш за все розчинність, під дією актинічного світла і стійкі до кислотних і лужних травників.

Під актинічним світлом розуміють світлове випромінювання, що впливає на фоторезист, так, що викликає протікання фотохімічних реакцій і зміну розчинності опромінених ділянок фоторезисту.

Основним призначенням фоторезистів є створення на поверхні напівпровідникової пластини або будь-якої іншої підкладки тонкої захисної плівки з необхідною конфігурацією рисунка. Рельєф рисунка в захисній плівці фоторезисту отримується в результаті світлового впливу на окремі ділянки плівки і диференційованої розчинності освітлених і неосвітлених ділянок. Після проявлення опроміненої плівки фоторезисту частина її (потрібний рисунок) залишається на підкладці і слугує захисною маскою при подальших технологічних операціях, а інша частина видаляється.

Фоторезисти є складними мономерними або полімерними композиціями органічних речовин. Захисні властивості фоторезистивних плівок, що утворюються мономерними світлочутливими сполуками, як правило, невисокі, і для фотолітографії мономери використовуються як добавки до полімерної основи.

Процеси, що відбуваються у фоторезистах під дією світла, підпорядковуються основним фотохімічним законам: 1) фотохімічно активними є тільки ті світлові промені, які поглинаються при реакції взаємодії світла з фоторезистом; 2) хімічна дія світла прямо пропорціональна добутку інтенсивності світла на час його дії; 3) кожному поглиненому кванту світла відповідає одна молекула, яка прореагувала.

Тому для характеристики фотохімічного процесу, що відбувається у фоторезисті, використовують поняття квантового виходу, тобто відношення кількості молекул, що прореагували, до поглинених квантів світла.

Щоб у фоторезисті протікала фотохімічна реакція, необхідно мати енергію фотонів, достатню для розриву або перебудови між атомами.

Квантовий вихід, швидкість фотохімічних реакцій і їх керованість багато в чому визначаються спектральним складом і інтенсивністю падаючого світла та залежать від хімічної будови опромінюваних речовин. Для управління спектральною чутливістю до складу фоторезистів вводять спеціальні речовини – сенсibiliзатори, які зсувають максимум поглинання в потрібну область спектра.

Фотохімічні реакції, що відбуваються у фоторезистах при поглинанні світлової енергії, відрізняються складністю і різноманіттям. Відмінність фотохімічних перетворень молекул речовини визначається хімічною будовою речовини і умовами опромінювання.

Існують такі фотохімічні реакції: фоторозпад, фотоперегрупування, фотоприєднання, фотоперенесення, фотовідновлення і фотосенсибілізація.

Фоторозпад є розкладанням збудженої світлом молекули на активні частини. Залежно від природи молекули речовини розрізняють фотодисоціацію, тобто розпад молекули на нейтральні частинки – вільні радикали, і фотоіонізацію, тобто розпад початкової молекули на іони.

Фотоперегрупування є новим розташуванням (перегрупуванням) атомів в скелеті молекули під дією світла. Можливі два види перегрупування атомів: фотоізомеризація, тобто поворот однієї групи атомів відносно іншої, і фототаумеризація, тобто переміщення окремих атомів з однієї частини скелета молекули в іншу.

Фотоприєднання є приєднанням до збудженої молекули іншої молекули. Існують чотири види фотоприєднання: фотодимеризація – утворення з двох молекул початкової речовини нового стану – димера; фотоконденсація – утворення нових зв'язків в структурі молекули; фотогідроліз – процес взаємодії молекули з водою; фотоокиснення – процес приєднання до збудженої молекули молекули кисню.

Фотоперенесення є відривом електрона у молекули, що поглинула квант світла.

Фотовідновлення може відбуватися з деякими речовинами у присутності сполук, що легко віддають атоми водню.

Фотосенсибілізація є передачею енергії збудження від однієї молекули до іншої або від однієї частини молекули до іншої.

У багатьох випадках фотохімічні реакції протікають одночасно. Енергія, необхідна для збудження молекули, і, отже, характер спектра поглинання речовини залежать від її будови. Багато полімерних речовин, з яких виготовляють фоторезисти, містять функціональні групи, що поглинають світло в ультрафіолетовій області спектра. Так, карбонільна група вуглець – кисень має найбільше поглинання в діапазоні 270–360 нм, а група вуглець – вуглець – в діапазоні довжин хвиль 220–240 нм.

Залежно від характеру фотохімічних реакцій, що протікають у фоторезистах, їх поділяють на дві основні групи: негативні і позитивні.

Негативні фоторезисти під дією світла утворюють нерозчинні ділянки плівки на поверхні підкладки за рахунок фотополімеризації або фотоконденсації і після проявлення залишаються на її поверхні.

Рисунок (рельєф) фоторезисту, що залишився на поверхні підкладки, є негативним зображенням оригіналу (фотошаблону), через яке проводилось експонування фоторезисту.

Позитивний фоторезист, навпаки, під дією світла утворює розчинні ділянки за рахунок фоторозпаду, які зазвичай після проявлення видаляються з поверхні підкладки. Шар фоторезисту, що залишився на поверхні, в точності повторює рисунок оригіналу, через який проводилося експонування фоторезисту. Як негативний фоторезист в напівпровідниковій технології застосовують суміш на основі складного ефіру полівінілового спирту і коричної кислоти — полівінілцинамат. Ці речовини мають загальну формулу $R_1- [O- R_2]_n$, де R_1 – макромолекула полівінілового спирту, що містить ве-

лику кількість атомів від вуглеводневої основи якої відходять світлочутливі цинамоїльні групи R_2 .

При поглинанні фотонів в негативних фоторезистах подвійний зв'язок вуглець – вуглець цинамоїльної групи розривається, а вільні зв'язки, що виникають при його розриві, приводять до утворення містків, що зшивають окремі молекули полімеру в хімічно стійку тривимірну структуру.

Також як негативний фоторезист використовують циклокаучук з різними домішками. Сам циклокаучук не є світлочутливим матеріалом, тому для підвищення його чутливості до світла в нього вводять різні органічні азиди (алкілазиди, алкеназиди, арилазиди, бісазиди і ін.).

Під дією світла азиди розкладаються зі втратою молекули азоту, утворюючи нові речовини – нітрени, які вступають в реакцію з макромолекулами каучуку, в результаті утворюється стійка тривимірна структура.

Як позитивний фоторезист найбільше застосування знайшли суміші на основі новолаку і світлочутливого нафтохінондіазиду. Їх особливість полягає в тому, що під дією світла відбувається відщеплення азоту від нафтохінондіазидної групи і в результаті хімічної реакції відбувається утворення інденкарбонової кислоти. Гідрофобні похідні нафтохінондіазиду після фотохімічних перетворень стають гідрофільними, тобто набувають здатності розчинятися в слабких водних розчинах лугів. Таким чином, при проявленні проексованої плівки фоторезиста карбоксильна група, що отримується при розкладанні кислоти, реагує з проявником з утворенням легкокорозивних у воді солей. Це приводить до того, що проексовані ділянки плівки фоторезисту вимиваються (видаляються з поверхні підкладки), а неекспоновані залишаються на поверхні підкладки.

5.3 Критерії застосовності фоторезистів

Основними критеріями, які необхідно брати до уваги при використанні фоторезистів в технології напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем, є світлочутливість, роздільна здатність, кислотостійкість, адгезія до підкладки і технологічність.

Світлочутливість фоторезистів. Світлочутливість будь-якого фоторезисту є функцією процесів експонування і проявлення. Головною вимогою процесу експонування є спектральна чутливість фоторезисту, яка вимірюється величиною, зворотною поглиненій світловій енергії, що необхідна для певного вимірювання властивостей світлочутливого матеріалу.

Спектральна чутливість фоторезисту

$$S = \frac{1}{Et} = \frac{1}{H},$$

де E – світлова опроміненість фоторезисту, Bm/m^2 ;

t – час опромінювання, s ;

$H = Et$ – значення експозиції, $Bm \cdot c/m^2$.

Отже, світлочутливість фоторезистів пов'язана з повнотою засвічення світлочутливого шару матеріалу.

Проте кінцевою метою процесу фотолітографії є не тільки повнота засвічення фоторезисту, але і висока якість одержуваного в шарі фоторезисту рельєфу рисунка.

Тому правильнішу характеристику світлочутливості фоторезистів можна дати тільки при сумісному розгляданні двох процесів: експонування і проявлення.

Процес проявлення здійснює прямий вплив на світлочутливість фоторезистів, оскільки при проявленні відбувається хімічна взаємодія проявника з експонованими і неекспонованими областями плівки фоторезисту. Процес проявлення формує в плівці фоторезисту певний рельєф рисунка, який в результаті і визначає якість одержаної захисної плівки.

Під *критерієм світлочутливості негативних фоторезистів* розуміють утворення після експонування і проявлення на поверхні підкладки локальних полімеризованих ділянок (рельєфу рисунка) плівки фоторезисту.

Під *критерієм світлочутливості позитивних фоторезистів* розуміють повноту руйнування і видалення з поверхні підкладки після експонування і проявлення локальних ділянок (рельєфу рисунка) плівки фоторезисту.

Таким чином, критерієм світлочутливості фоторезистів слугує чіткість зображення рельєфу рисунка в плівці фоторезисту після проведення процесів експонування і проявлення, тобто рельєф рисунка повинен мати різко окреслену межу між видаленими областями і фоторезистом, що залишився на поверхні підкладки.

Роздільна здатність фоторезистів. Критерієм застосовності у виробництві інтегральних мікросхем того або іншого фоторезисту є його здатність створювати мікрорельєф рисунка з мінімальним розміром елементів.

Роздільна здатність фоторезисту визначається кількістю ліній рівної товщини, які можуть бути одержані без злиття на 1 мм поверхні пластини в результаті проведення процесу фотолітографії.

Нехай необхідно одержати на поверхні підкладки лінію фоторезисту шириною l . Враховуючи, що мінімальний зазор між лініями дорівнює ширині самої лінії, одержимо вираз для визначення роздільної здатності:

$$R = \frac{1}{2l}.$$

Якщо для виготовлення інтегральної мікросхеми необхідний рельєф рисунка з мінімальним розміром $l = 1 \text{ мкм}$, то роздільна здатність фоторезисту повинна бути не нижче ніж $R = 1/(2 \cdot 0,001) = 500 \text{ ліній/мм}$.

Для визначення роздільної здатності фоторезистів використовують *штрихові міри*, які є скляними пластинами з нанесеними на їх поверхні штрихами шириною від одного до декількох десятків мікрометрів. Визна-

чають роздільну здатність фоторезисту експонуванням його через міру, проявленням і підрахунком кількості ліній фоторезисту, що залишилися на поверхні і приходяться на 1 мм підкладки, або проведенням процесу фотолітографії і контролем мінімального розміру рельєфу рисунка плівки фоторезисту.

На роздільну здатність здійснюють істотний вплив як процеси експонування і пов'язані з ними оптичні явища в системі, фотошаблон – фоторезист – підкладка, так і процеси проявлення і сушіння.

До оптичних явищ, що впливають на роздільну здатність фоторезистів, слід віднести дифракцію світла на межі фотошаблон – фоторезист, віддзеркалення світла від поверхні підкладки і розсіювання світла в плівці фоторезисту.

Стабільність геометричних розмірів елементів рельєфу рисунка в плівці фоторезисту великою мірою залежить від проведення процесів проявлення і сушіння. Процес перепроявлення приводить до збільшення розмірів елементів (особливо для позитивних фоторезистів), а процес сушіння може приводити до викривлення плівки фоторезисту.

Тому максимальну роздільну здатність можна одержати при оптимізації всіх розглянутих процесів.

Кислотостійкість фоторезистів – здатність плівок фоторезистів після експонування, проявлення і сушіння селективно захищати поверхню підкладки від дії кислотних і лужних травників.

Критерієм кислотостійкості є час, протягом якого травник впливає на плівку фоторезисту до початку її руйнування або відшарування, а також якість одержаних структур в підкладці після травлення.

Кислотостійкість фоторезистів є важливим критерієм їх застосовності в конкретних технологічних процесах, оскільки багато з них пов'язані з використанням сильних травників, до складу яких входять азотна, плавикова, соляна, сірчана і інші кислоти, солі, луги.

Нестійкість фоторезистів визначається за такими ознаками: часткове руйнування плівки, відшарування плівки від підкладки, локальне розтравлювання плівки і підтравлювання плівки на межі плівка – підкладка.

Адгезія фоторезисту до підкладки. Адгезія фоторезисту визначає стійкість плівки до зовнішніх дій. Вона залежить від хімічного складу і будови самого фоторезисту, а також від стану поверхні початкової підкладки і режимів формування плівки фоторезисту на підкладці.

Визначальною передумовою для отримання високої адгезійної здатності є хороша змочуваність підкладки фоторезистом. Адгезійні сили плівки фоторезисту зростають із збільшенням ступеня змочування.

Адгезія може бути значно понижена за рахунок погано обробленої поверхні підкладки. Жирові плями, адсорбовані гази, іони чужорідних домішок можуть створювати окремі ділянки на підкладці з малою адгезією фоторезисту. Тому чистота поверхні підкладки є передумовою до хорошої адгезії фоторезисту. Наявність на поверхні підкладки мікрорисок і

мікрозаглиблень призводить до зниження адгезії за рахунок повітря, що важко видаляється з цих структурних дефектів поверхні підкладки.

Методи і режими нанесення фоторезисту впливають на адгезію його до підкладки. При нанесенні шару фоторезисту на поверхню підкладки необхідний час, щоб забезпечити видалення повітря з-під плівки фоторезисту.

Під технологічністю фоторезистів в промислових умовах розуміють простоту приготування фоторезисту потрібного складу і необхідних фізико-хімічних властивостей; доступність нанесення його на поверхню підкладки у вигляді тонкого рівномірного шару; зручність обробки фоторезистивних плівок при сушінні, проявленні і травленні. Технологічність фоторезистів передбачає також тривале їх зберігання без зміни світлочутливих і механічних властивостей. Важливим моментом технологічності є токсичність самих фоторезистів і використовуваних для їх проявлення розчинів.

До технологічності слід віднести можливість механізації і автоматизації процесів, пов'язаних з використанням фоторезистів: приготування, контроль, нанесення на підкладку, сушіння, експонування, проявлення, травлення підкладки і видалення фоторезисту. Чим менше витрат пов'язано з використанням фоторезистів в загальному процесі виготовлення приладу, тим вони технологічніші.

5.4 Фотошаблони і способи їх отримання

Для проведення процесів фотолітографії в планарній технології використовують фотошаблони.

Фотошаблон – це плоскопаралельна пластина з прозорого матеріалу, на якій є рисунок, що складається з поєднання прозорих і непрозорих для світла певної довжини хвилі ділянок, які створюють топологію приладу або групи приладів, багато разів повторених в межах робочого поля пластини.

Фотошаблони є основним інструментом, за допомогою якого формують мікрозображення дуже складного рисунка в шарі фоторезисту, нанесеного на початкову підкладку.

Основу фотошаблону виготовляють з оптичного скла, а рисунок на поверхню скла наносять фотографічним способом. Залежно від матеріалу, з якого створений рисунок на скляній пластині, розрізняють емульсивні, металізовані і кольорові (транспарентні) фотошаблони.

В *емульсивних фотошаблонах* ділянки рисунка з максимальною і мінімальною оптичною щільністю створюються в шарі емульсії звичайним фотографічним методом. Для цього типу фотошаблонів щільність прозорого елемента (ділянки рисунка) дорівнює сумі оптичної щільності скляної підкладки і емульсивного шару, що не містить частинок срібла.

В *металізованих фотошаблонах* ділянки рисунка створюються за рахунок тонкого шару хрому. У цих фотошаблонах мінімальна оптична

щільність прозорих ділянок дорівнює оптичній щільності скла, а максимальна щільність відповідає практично непрозорим металевим шарам хрому.

До переваг металізованих фотошаблонів відноситься їх висока стійкість до стирання, що дозволяє проводити до декількох сотень контактних експозицій. Недоліками металізованих фотошаблонів є висока здатність до відображення плівки хрому (до 50 – 60%) і повна її непрозорість для видимого світла.

Хромовані фотошаблони мають також вищу роздільну здатність за рахунок меншої нерівності краю, що одержується при витравленні мікрорельєфу в плівці хрому.

Висока здатність відображення плівки хрому приводить до засвічення периферійних ділянок фоторезисту, розташованих під непрозорим елементом фотошаблону, що викликає зміну форми і розмірів оригіналу рисунка.

Непрозорість плівки хрому для видимого світла приводить до значних труднощів при поєднанні рисунка фотошаблону з рисунком на початковій підкладці, оскільки через непрозорі ділянки фотошаблону неможливо побачити елемент поєднання.

У *кольорових фотошаблонах* рисунок виконується за допомогою плівки з оксиду заліза. Мінімальна оптична щільність, так само як і у металізованих фотошаблонів, дорівнює оптичній щільності скла, а максимальна щільність відповідає практично непрозорим в ультрафіолетовому діапазоні плівкам оксиду заліза.

Основними перевагами кольорових фотошаблонів є незначна в порівнянні з металізованими фотошаблонами відображувальна здатність (до 10 – 15) і прозорість для видимого світла.

Використання кольорових фотошаблонів дозволяє знизити ефект віддзеркалення світла при контактному друці і тим самим значно поліпшити якість одержуваного мікрозображення. Прозорість плівок оксиду заліза для видимого світла дає можливість простого і якісного поєднання рисунка кольорового фотошаблону з рисунком на початковій пластині.

Фотошаблони можуть бути *негативними* (темнопольними), коли зображення елементів рисунка подане у вигляді світлих ділянок на темному полі, і *позитивними* (світлопольними), коли зображення елементів рисунка подане у вигляді непрозорих ділянок на світлому фоні.

До фотошаблонів висувають такі вимоги: висока точність геометричних розмірів елементів рисунка, точність розмірів кроку між фрагментами, стабільність рисунка і його розмірів в часі, стійкість до стирання, площинна робоча поверхня, поєднання комплекту фотошаблонів.

Висока точність геометричних розмірів елементів рисунка фотошаблону диктується необхідністю отримання активних елементів інтегральних мікросхем, що мають розміри від одиниць до десятих часток мікрометра. Точність кроку між окремими фрагментами рисунка фотошаблону обумовлена в першу чергу поєднанням комплекту фотошаблонів, а також необхідністю на завершальній стадії планарної технології розділяти початкову

підкладку на окремі паралелепіеди, що включають ІМС.

Стабільність рисунка фотошаблону і його розмірів в часі є важливою вимогою, що висувається до емульсивних фотошаблонів, оскільки при тривалому зберіганні і впливі зовнішніх чинників (температури, вологості) емульсивна плівка може деформуватися.

Стійкість до стирання є основною вимогою, яка висувається до всіх видів фотошаблонів. Це обумовлено тим, що перенесення рисунка зображення з фотошаблону на початкову підкладку здійснюється контактним способом, тобто кожен процес експозиції супроводжується контактним притисненням поверхні фотошаблону, на якій нанесений захисний рисунок, до поверхні початкової пластини, на яку нанесена плівка фоторезисту. Багатократне контактне притиснення фотошаблону до підкладки приводить до його стирання і непридатності до процесу фотолітографії.

Вимога високої площинності поверхні фотошаблону слідує з того, що при контактному друці між фотошаблоном і початковою пластиною не повинно бути зазорів, які викликають розсіяння світла, що проходить через фотошаблон.

Поєднання комплекту фотошаблонів є основним критерієм застосовності комплекту у виробництві ІМС. Від правильного поєднання окремих елементів кожного подальшого фотошаблону залежить відтворюваність структури, що виготовляється, а також стабільність електричних параметрів.

Виготовлення фотошаблонів проводиться *оптико-механічним способом*, який реалізується в трьох різних варіантах виконання, що відрізняються один від одного послідовністю операцій і використанням устаткуванням (рис. 5.1).

Перша операція першого варіанта полягає у викреслюванні збільшеного в 100–1000 разів одинарного фрагмента або модуля фотошаблону на папері або склі, на поверхню яких нанесений шар чорної фарби, або на двошаровій полімерній плівці. Викреслювання проводять з допомогою координатографа з рухомим різцем. Задаючи певні координати в двох взаємно перпендикулярних напрямках, визначають фігуру на площині і різцем обводять контур цієї фігури, підрізаючи, шар фарби або один з шарів двошарової полімерної плівки. Непотрібні ділянки фарби або плівки, що прорізають різцем по контуру, видаляють з поверхні скла або з основи полімерної плівки. Одержані таким чином вікна заданої наскільки завгодно складної конфігурації є зображеннями фрагментів або елементів модуля.

Координатографи дозволяють забезпечити точність розмірів фігур, що вирізаються, в межах ± 50 мкм.

Якщо одержану з такою точністю фігуру при подальших процесах зменшити в 100–1000 разів, то помилка геометричного розміру елемента на робочому фотошаблоні не перевищить сотих часток мікрметра. Викреслювання фігур на координатографі здійснюється автоматично за наперед складеною програмою з використанням ЕОМ.

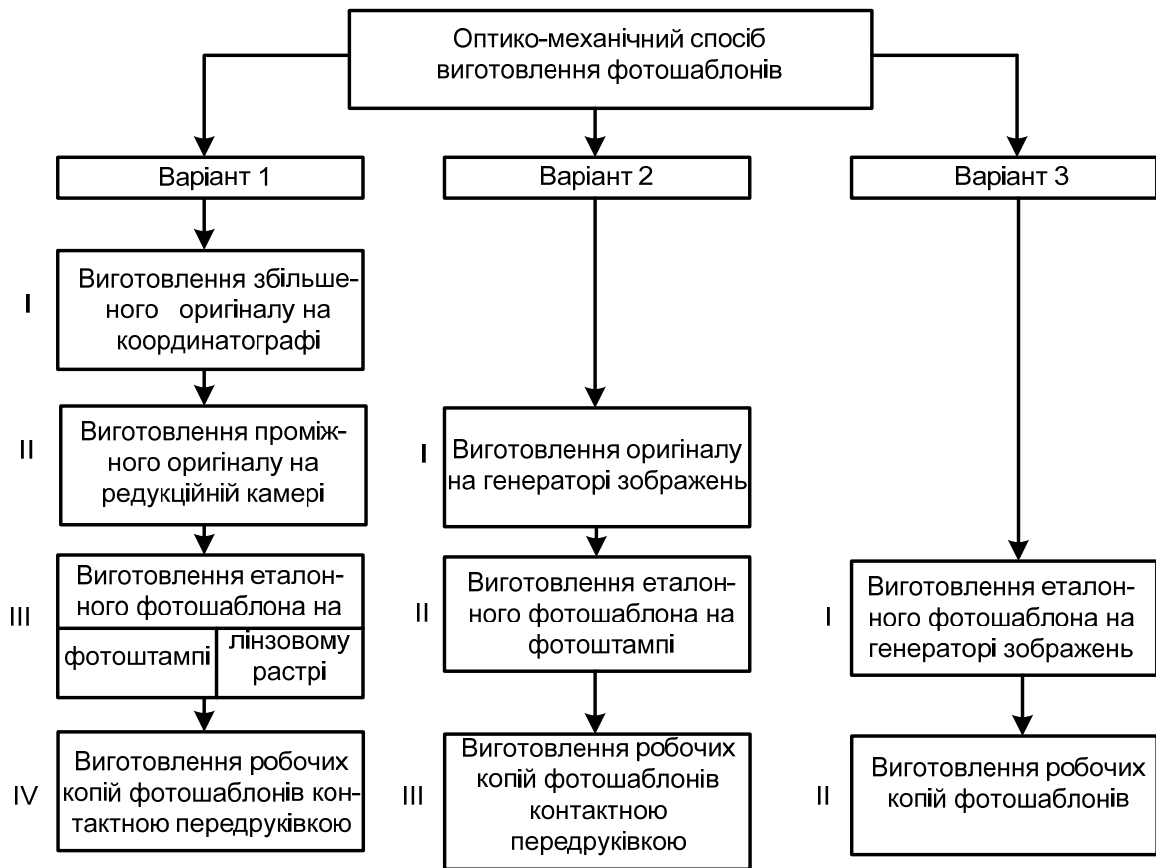


Рисунок 5.1 – Варіанти виготовлення фотошаблонів

Друга операція цього варіанта передбачає виготовлення проміжного оригінала (емульсивного) за допомогою редуційної камери. Одержаний в першій операції збільшений оригінал поміщують в редуційну камеру і фотографують із зменшенням в 50 – 100 разів на фотопластину з високою роздільною здатністю.

Отже, проміжний оригінал є зменшеною копією збільшеного оригінала. Якість одержуваних проміжних оригіналів великою мірою залежить від роздільної здатності використовуваних об'єктивів і фотопластин.

Для покращення якості і терміну служби проміжного оригіналу з виготовленого емульсивного зразка роблять металізовані копії.

Третя операція цього варіанта є процесом мультиплікації рисунка проміжного оригінала по всьому робочому полю, тобто виготовлення еталонного фотошаблону. Процес мультиплікації проводять в спеціальних установках: одномісних або багатомісних фотоштампах.

Проміжний оригінал поміщують в проекційну камеру фотоштампу. Фотоштанп експонує рисунок проміжного оригіналу на поверхню пластини з fotocутливим шаром майбутнього еталонного фотошаблону із зменшенням до робочих розмірів і мультиплікує цей рисунок по всій поверхні пластини. Мультиплікація рисунка здійснюється за рахунок пере-

сування столу фотоштанпу, на якому розташована скляна пластина з фоточутливим шаром, в двох взаємно перпендикулярних напрямках із заданим кроком.

Разом з механічною в деяких випадках використовують і оптичну мультиплікацію. Оптична мультиплікація базується на застосуванні лінзових растрів, які здатні створити одночасно велику кількість зменшених зображень рисунка проміжного оригіналу на поверхні скляної пластини з фоточутливим шаром. Лінзовий растр є розмножувальною оптичною системою, що складається з великої кількості маленьких лінз – об'єктивів, розміщених за певним законом на одній основі, що має вид плоскопаралельної прозорої пластини. Світлофокусувальна поверхня лінзових елементів растру може бути сферичною, еліптичною, циліндричною і ін. Найчастіше використовують лінзові елементи зі сферичною поверхнею.

Якщо перед лінзовим растром поставити проміжний оригінал, а у фокальній площині растра – пластину з фоточутливим шаром, то при експонуванні кожна лінза растра спроектує рисунок проміжного оригіналу на фотошар в заданому місці і в заданому розмірі. Крок мультиплікації в цьому методі сталий і дорівнює відстані між сусідніми лінзами растра. Розміри зображення, що одержуються на фотопластині, можуть змінюватися регулюванням відстані між об'єктом і площиною лінзового растра, а також зміною розмірів рисунка проміжного оригіналу.

Роздільна здатність процесу з використанням лінзових растрів невисока і значно поступається роздільній здатності процесу мультиплікації з використанням фотоштанпів.

Четверта, завершальна, *операція* цього варіанта полягає у виготовленні робочих копій з одержаного еталонного фотошаблону. Ця операція полягає в контактному передруку рисунка з еталонного фотошаблону на металізовану пластину з фоточутливим шаром. Спочатку на скляну пластину за допомогою вакуумно-термічного випаровування наносять шар хрому товщиною 0,1 – 0,2 мкм. Потім на шар хрому методом центрифугування наносять шар фоторезисту товщиною 0,2 – 0,4 мкм. Перед процесом експонування створюють хороше притискання еталонного фотошаблону емульсивною стороною до поверхні металізованої пластини з фоторезистом, щоб між ними був відсутній зазор по всій дотичній поверхні. Після цього проводять експонування фоточутливого шару фоторезисту через еталонний фотошаблон.

Слід зазначити, що контактний передрук має один істотний недолік – можливість механічного пошкодження як поверхні еталонного фотошаблону, так і плівки фоторезисту початкової металізованої пластини. Для усунення цього недоліку необхідно ретельно промивати скляні заготовки і дотримувати необхідну чистоту в робочих приміщеннях.

Перша операція другого варіанта (рис. 5.1) полягає у виготовленні оригіналу, що є збільшеним в 10 разів одинарним фрагментом або модулем фотошаблону. Такий оригінал за своїми розмірами рисунка і габари-

тами підкладки аналогічний проміжному оригіналу, одержаному на редуційній камері.

Оригінали виготовляють на спеціальних установках, які дозволяють генерувати зображення певної форми на поверхню фотопластини. Основними елементами таких установок є робоча камера з оптичною системою, рухома діафрагма, двокоординатний рухомий стіл і електронна система управління з ЕОМ.

Генерація зображення здійснюється за допомогою пучка світла високої інтенсивності, яке проходить через оптичну систему і експонує певні ділянки поверхні фотопластини, розташованої на координатному столі. За допомогою рухомої діафрагми можна автоматично задавати форму і розміри вікна, через яке проходить пучок світла. Зсувом координатного столу в двох взаємно перпендикулярних напрямках вибирають необхідні координати на фотопластині для проведення експонування. Зв'язок між пересуванням координатного столу, вибором форми діафрагми і часом експозиції здійснюється за допомогою ЕОМ за певною програмою. Генератори зображення можна розглядати як вихідні пристрої машинного проектування топології фотошаблонів. Застосовують три види генерування зображення: мікрофотонабір, фотомонтаж і сканування світлового променя з поелементною розгорткою.

При *мікрофотонаборі* топологічний рисунок оригіналу набирається з окремих елементів. Відповідно до інформації (програми), що вводиться в ЕОМ, ці елементи послідовно експонуються у відповідних місцях фотопластини. У простому і найбільш поширеному випадку набірним елементом слугує прямокутник, розміри якого і кут повороту в процесі генерування зображення змінюються за рахунок рухомої діафрагми. Діафрагма розміщується в предметній площині об'єктиву і формує набірні елементи шляхом переміщення взаємно перпендикулярних шторок.

При *фотомонтажі* топологічний рисунок набирається із стандартних елементів або фрагментів, що також послідовно експонуються в певних місцях фотопластини за заданою програмою.

Сканування світлового променя з поелементною розгорткою передбачає послідовне вибіркоче експонування ділянок фотопластини відповідно до вибраної і введеної в ЕОМ програми.

Друга операція цього варіанта аналогічна третій операції першого варіанта і полягає у виготовленні еталонного фотошаблону шляхом мультиплікації оригіналу, одержаного на генераторі зображень, по всьому робочому полю фотопластини. Процес мультиплікації, як правило, проводять на одномісних або багатомісних фотоштампах.

Третя операція другого варіанта полягає у виготовленні робочих копій фотошаблонів методом контактного передруку рисунка з еталонного фотошаблону на робочу фотопластину (див. четверту операцію першого варіанта).

Перша операція третього варіанта (рис. 5.1) полягає в створенні ета-

лонного фотошаблону, що базується на застосуванні установок з генераторами зображень. Відмінність цього варіанта від попереднього полягає в тому, що повністю виключається виготовлення оригіналу, а рисунок елемента, фрагмента або модуля відразу генерується на еталонну фотопластину. Такий варіант виготовлення еталонних фотошаблонів дозволяє одержувати мінімальні розміри модулів і значною мірою знижувати загальні витрати трудомісткості процесу.

Друга операція цього варіанта аналогічна четвертій операції першого варіанта.

Вибір того або іншого варіанта виготовлення фотошаблонів диктується в першу чергу тими вимогами, які висуваються до топології рисунка інтегральної схеми, що виготовляється. Інтегральні мікросхеми, що мають складні елементи топології і велику щільність їх розташування, потребують складнішого варіанта виготовлення фотошаблонів з використанням ЕОМ.

5.5 Промислове виготовлення фотошаблонів

Для забезпечення виготовлення інтегральних мікросхем налагоджений промисловий цикл виготовлення металізованих фотошаблонів. Він включає комплекс різних технологічних процесів: виготовлення пластин з оптичного скла, механічну і хімічну обробку скляних пластин, промивання, нанесення металевих або кольорових плівок на поверхню скляних пластин, створення на цих плівках шару фоторезисту, проведення контактного друку, фотохімічну обробку шару фоторезисту, контроль якості фотошаблонів і їх пакування.

Виготовлення еталонного фотошаблону, який використовується при контактному друці, проводять за одним з трьох розглянутих в попередньому розділі варіантів.

На рис. 5.2 продано схему серійного промислового виробництва фотошаблонів, на якій показана послідовність проведення технологічних операцій.

Розглянемо особливості цих технологічних операцій.

Виготовлення скляних пластин. Як початковий матеріал для виготовлення скляних пластин використовують оптичне боросилікатне скло марки К-8, що має достатню механічну міцність, не має чужорідних включень, завилькуватості і пузирів. Це скло має широкий спектр пропускання як видимого світла, так і ближнього ультрафіолетового. Воно має показник заломлення, рівний 1,5163, і середню дисперсію 0,008.

Після варіння скло формують для надання йому певної форми і розмірів. Як підкладки для фотошаблонів використовують зазвичай пластини квадратної форми таких розмірів, мм: 70×70×3, 76×76×3, 102×102×3, 127×127×3. До скляних пластин для фотошаблонів висувають підвищені вимоги до чистоти обробки поверхні і геометричних розмірів.

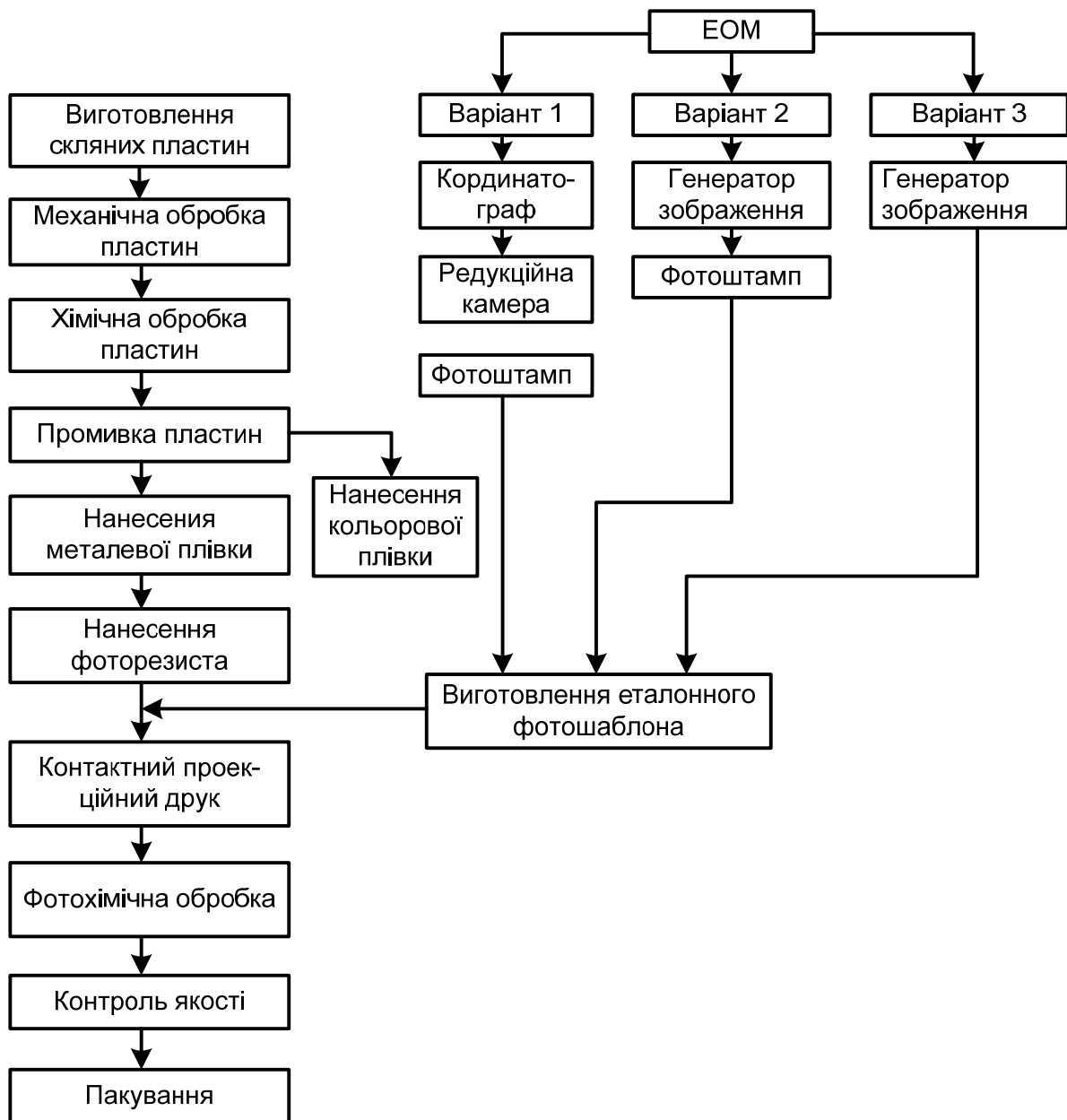


Рисунок 5.2 – Схема серійного виготовлення фотошаблонів

Механічна обробка скляних пластин. Скляні заготовки після варіння і формування піддають механічній обробці: шліфуванню і поліруванню.

Процес шліфування проводять на шліфувальних верстатах з використанням мікропорошків як абразивів. Потім скляні пластини полірують на м'яких полірувальниках з використанням алмазних паст і суспензій на основі оксиду хрому. Остаточне доведення проводять при отриманні 14-го класу чистоти обробки і при допустимому відхиленні від площинності, що не перевищує 3 мкм в робочій частині пластини. Полірована поверхня скляних пластин не повинна мати рисок, подряпин і точок мікровідколів.

Хімічну обробку скляних пластин проводять для видалення з їх по-

верхні різного роду забруднень. Після механічної обробки пластини піддають хімічній дії лугів, кислот і розчинів солей. Така обробка дозволяє розчинити сторонні частинки, які є на поверхні скла.

Промивання скляних пластин є логічним продовженням попереднього процесу хімічної обробки. Від якості промивання залежить остаточна чистота поверхні скляної пластини. Залишена на поверхні чужорідна частинка розміром в 1 мкм може викликати брак на подальшій технологічній операції. Тому особливе значення процес промивання скла має при виготовленні фотошаблонів з розмірами елементів менше 1 мкм.

Існують різні способи очищення скла після хімічної обробки: знежирення в ацетоні, в гарячому 10%-вому розчині соди або водному розчині біхромату калію, в гарячій дистильованій воді і метиловому спирті, в гарячій проточній воді і хромовій суміші, в розчині їдкого калію, в сірчаному ефірі, в суміші сірчаного ефіру і етилового спирту.

Найефективнішою є така послідовність технологічних операцій.

Перша операція: знежирення в гарячому перекисно-аміачному розчині (що є хорошим окиснювачем і не створює шкідливих з'єднань) з подальшим промиванням проточною деіонізованою водою.

Друга операція: обробка в концентрованій сірчаній кислоті з подальшим промиванням в деіонізованій воді. Цей процес проводиться для додаткового окиснення можливих залишків жирових забруднень і розчинення деяких неорганічних речовин.

Третя операція: протирання спеціальними кистями в проточній деіонізованій воді, яка значно покращує якість відмивання, механічно видаляючи залишки реакції двох попередніх процесів.

Четверта операція: сушіння скляних пластин за допомогою центрифуги.

Промислова лінія очищення скляних пластин зазвичай складається з ультразвукового очищення, обробки в гарячому розчиннику, вібраційно-хімічної обробки, завершального відмивання, сушіння і нанесення консервувального лакового покриття.

Нанесення металевих плівок. На чисто оброблену поверхню скляної пластини у вакуумних камерах за допомогою термічного випаровування або катодного розпилювання наносять шар хрому товщиною 0,1–0,2 мкм. Плівка хрому не повинна мати наскрізних отворів (проколів). Отримання високоякісної плівки хрому можливе лише при дотриманні оптимальних умов за чистотою робочого місця, незапиленні робочих камер установок і ідеальній чистоті поверхні скляних пластин. Великий вплив на якість хромових покриттів надають процес завантаження пластин у вакуумну камеру, глибина вакууму в робочій камері і технологічний режим осадження хрому.

Перш за все необхідно добиватися чистоти процесу завантаження пластин в камеру, виключаючи попадання порошинок на поверхню пластин і стінки камери. Захисний консервувальний лаковий шар необхідно знімати

з пластини безпосередньо перед завантаженням пластини в робочу камеру установки.

Слід звертати увагу і на чистоту початкового навішення хрому. Для видалення забруднень навішення хрому перед завантаженням в камеру піддають відпалу при температурі, близькій до температури випаровування.

Нанесення кольорових плівок. Як кольорові плівки при виготовленні фотошаблонів найчастіше використовують плівки оксиду заліза. Вони можуть бути нанесені на поверхню скляних пластин різними способами: вакуумним термічним випаровуванням оксиду заліза з використанням як нагрівача випарника електронного променя або безвакуумним термічним розкладанням пентакарбонілу заліза $\text{Fe}(\text{CO})_5$ в атмосфері кисню. Товщина плівок оксиду заліза складає 0,2 – 0,25 мкм. Для отримання високоякісних плівок оксиду заліза необхідно дотримуватися вимоги за чистотою робочого місця і чистотою проведення процесу осадження.

На відміну від плівок хрому плівки оксиду заліза прозорі для видимого світла, що дає можливість використовувати їх для виготовлення кольорових фотошаблонів.

Нанесення фоторезисту. Від якості плівки фоторезисту (адгезія до підкладки, товщина, рівномірність товщини по всій поверхні пластини, однорідність, відсутність дефектів і сторонніх включень і т. п.) багато в чому залежать робочі характеристики фотошаблонів: форма і розмір елементів мікробразження, рівність краю елемента, наявність або відсутність проколів (отворів), мінімальний розмір елемента і кин травлення рельєфу мікробразження. Тому до процесу нанесення фоторезисту на скляну пластину висувають високі вимоги як за чистотою і початковими властивостями самого фоторезисту, так і з створення умов хорошої адгезії плівки фоторезисту до скла і рівномірності її за товщиною.

Найбільш поширеним в промисловості способом нанесення фоторезисту є центрифугування. За цим способом скляна підкладка поміщається на диск центрифуги. За допомогою дозатора на поверхню підкладки наноситься певна кількість фоторезисту. При обертанні центрифуги фоторезист рівномірно розподіляється по всій поверхні початкової підкладки. Режим нанесення фоторезисту і його кількість підбирають експериментально залежно від конкретних вимог технологічного процесу.

Після нанесення фоторезисту проводять сушіння для утворення механічно міцної плівки. Процес сушіння проводять при температурі, що не перевищує 100 °C, протягом 30 – 40 хв.

Виготовлення еталонного фотошаблону. Ця операція безпосередньо не входить в загальну послідовність виготовлення робочих копій фотошаблонів. Правильніше буде сказати, що виготовлення робочих копій є завершальною операцією після виготовлення еталонного фотошаблону.

Розгляд даної операції саме в цьому місці пояснюється тим, що після нанесення фоторезисту слідує операція контактної проекційної друку, а

для його здійснення необхідний еталонний фотошаблон.

Контактний проекційний друк. Цей процес дає можливість з одного еталонного фотошаблону виготовити декілька десятків копій, які є робочими фотошаблонами. Виготовлення копій проводять простим і надійним контактним способом, який полягає в щільному притисненні еталонного фотошаблону до підкладки з фоторезистом і експонуванні фоторезисту через еталонний фотошаблон.

Недоліком контактного друку є можливість механічного пошкодження як поверхні еталонного фотошаблону, так і шару фоторезисту. До переваг слід віднести необмеженість площі переносуваного з фотошаблону на підкладку з фоторезистом рисунка мікрозображення.

До процесу контактного друку висувають дві основні вимоги: отримання щільного притискання фотошаблону до плівки фоторезисту по всій контактуючій поверхні і створення рівномірної освітленості по всьому полю фотошаблону.

Тиражування робочих фотошаблонів контактним способом проводять на спеціальних установках, які забезпечують нерівномірність освітленості робочого поля фотошаблону $\pm 10\%$ і продуктивність 100 копій в час.

Фотохімічна обробка. Після проведення контактного експонування пластини з фоторезистом піддають спеціальній обробці для створення рельєфу рисунка. Ця обробка включає такі технологічні операції: проявлення зображення, промивання після проявлення, сушіння плівки фоторезисту для її полімеризації; локальне травлення металевих і кольорових плівок, видалення фоторезисту і промивання готових копій робочих фотошаблонів.

Для проявлення позитивних фоторезистів широко використовують гліцериновий (1%-вий розчин тринатрійфосфату у водно-гліцериновому складі) і лужний (0,3%-вий розчин КОН) проявники. Негативні фоторезисти проявляють в різних розчинниках: толуолі, хлорбензолі або трихлоретилені. Промивання пластин з фоторезистом проводять в деіонізованій воді.

Для видалення вологи і полімеризації плівки фоторезисту проводять термічне сушіння при температурі 140–160 °C протягом 30 – 40 хв.

Травлення плівки хрому при виготовленні металізованих копій проводять у водних розчинах соляної кислоти ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:3$), а травлення плівок оксиду заліза при виготовленні кольорових копій проводять у фосфорній кислоті.

Видалення фоторезисту після локального травлення плівок хрому і оксиду заліза проводять в установках фреонового очищення, які складаються з трьох робочих відсіків. Пластину з фоторезистом поміщають послідовно в кожен відсік, наповнений парами фреону.

У першому відсіку установки проводять ультразвукову обробку пластини в рідкому фреоні, в другому відсіку – обробку в суміші фреону з розчинниками, а в третьому – обробку в парах фреону. В результаті такої триступінчатої обробки фоторезист повністю видаляється з поверхні пластин.

Контроль фотошаблонів є складною і трудомісткою операцією. Найбільш трудомістка частина контролю фотошаблонів відноситься до перевірки якості робочого поля. Робоче поле фотошаблону не повинне мати будь-яких дефектів поверхні: відколів, подряпин, рисок, крізних отворів на темному полі і точок на світлому полі, дефектів краю мікробразження (виступи і западини). Контролюються такі параметри фотошаблонів: форма і розміри елементів мікробразження, точність поєднання елементів в комплекті фотошаблонів, чистота робочого поля фотошаблону.

Контроль фотошаблонів проводять на прецизійному вимірювальному устаткуванні з використанням мікроскопів.

Процес атестації готових робочих фотошаблонів здійснюється або перенесенням функцій контрольного устаткування на виробниче устаткування, тобто фіксацією відсотка виходу придатних виробів, або створенням спеціалізованого устаткування для контролю параметрів фотошаблонів.

Контроль фотошаблонів першим способом проводять у тому випадку, коли технологічний процес виготовлення мікросхеми добре відпрацьований або схема достатньо проста.

Контроль фотошаблонів другим способом проводять безпосередньо після їх виготовлення за допомогою вибіркового або 100%-вого контролю основних параметрів.

Кількість контрольованих фотошаблонів знаходиться в прямій залежності від складності і мінімальних розмірів окремих елементів мікробразження. Як правило, 100%-вій перевірці підлягають еталонні фотошаблони, а також робочі копії фотошаблонів на етапі освоєння виробництва нових типів мікросхем. При налагодженому виробництві використовують вибіркочку перевірку фотошаблонів з оптимальною кількістю найважливіших параметрів.

Перевірку лінійних розмірів окремих елементів, фрагментів і модулів проводять за допомогою мікроскопа по всьому полю фотошаблону із збільшенням в 500 разів. Помилки при вимірюваннях можуть виникати через недостатню різкість зображення, при цьому розмір одного і того ж елемента може коливатися від 0,2 до 0,8 *мкм*. Крім того, на помилку вимірювання великий вплив здійснює температура навколишнього середовища. Так, при вимірюванні протягом 30 *хв* і більше пластина фотошаблону нагрівається від лампи освітлення, що приводить до спотворення точності вимірювання лінійних розмірів на 0,5 *мкм*. Тому проводити контроль лінійних розмірів рекомендується при стабільній температурі навколишнього середовища з точністю її підтримки не гірше ± 1 °C.

Перевірку сумісності комплекту фотошаблонів проводять на спеціальних компараторах, які дозволяють контролювати несумісність елементів з точністю 0,1 *мкм*. Вимірюють координати крокових міток або відстані між окремими елементами, фрагментами або модулями. Спочатку вимірюють координати по осі *X*, при цьому записують значення координати на одному кінці фотошаблону, а потім на другому. Після віднімання координат одер-

жують так звану «розтяжку» першого рядка з матриці елементів фотошаблону на координаті X . Потім повторюють аналогічні вимірювання по осі Y і визначають «розтяжку» по цій осі. Після проведення цієї операції проводять аналогічну операцію на другому фотошаблоні з одного комплекту. За результатами цих вимірювань визначають розсуміщення елементів цих двох фотошаблонів. Повторюючи цю операцію для всіх фотошаблонів одного комплекту, визначають його сумісність.

Сумісність комплекту фотошаблонів можна оцінити за допомогою процесу фотолітографії з послідовним використанням фотошаблонів всього комплекту. Після кожного процесу фотолітографії візуально під мікроскопом визначають сумісність двох рисунків. Цей метод широко використовується у виробничих умовах.

5.6 Контактна фотолітографія

Контактна фотолітографія передбачає процес утворення рисунка на початковій підкладці з фоторезистом. Цей процес включає створення контакту між фотошаблоном і підкладкою, тому і одержав назву *контактної фотолітографії*.

Використання фотолітографії в планарній технології дозволяє одержувати на одній підкладці велику кількість (десятки і сотні тисяч) дискретних елементів і складних схем.

Технологічний процес контактної фотолітографії подано на рис. 5.3 і містить такі операції:

- 1 – підготовка поверхні початкової підкладки;
- 2 – нанесення на підкладку шару фоторезисту;
- 3 – перше сушіння фоторезисту — плівкоутворення;
- 4 – поєднання рисунка фотошаблону з рисунком на початковій підкладці (якщо процес фотолітографії повторюється із зміною фотошаблону);
- 5 – експонування фоторезисту контактним способом;
- 6 – проявлення фоторезисту;
- 7 – друге сушіння фоторезисту — полімеризація;
- 8 – контроль рельєфу рисунка в плівці фоторезисту;
- 9 – травлення підкладки;
- 10 – зняття плівки фоторезисту з поверхні підкладки;
- 11 – контроль рельєфу рисунка в підкладці.

Розглянемо детально кожен з цих операцій і дамо характеристику технологічних режимів їх проведення.

Підготовка поверхні початкової підкладки. Підготовка поверхні початкових підкладок здійснює істотний вплив на адгезію фоторезисту до матеріалу підкладки. Чим чистіша поверхня початкової підкладки, тим краще адгезійна здатність фоторезисту. Процес змочування поверхні початкової

пластини фоторезистом є основним критерієм і визначальною передумовою для хорошої адгезії. Змочування сильною мірою залежить від стану змочуваної поверхні підкладки, тобто від наявності на ній бруду, жиру, жирних плям, адсорбованих газів, сторонніх домішок і т. п. Видалення перерахованих видів забруднень і особливо відбитків пальців забезпечує чистоту поверхні, поліпшення процесу змочування і, як наслідок, приводить до підвищення адгезійних сил між фоторезистом і підкладкою.

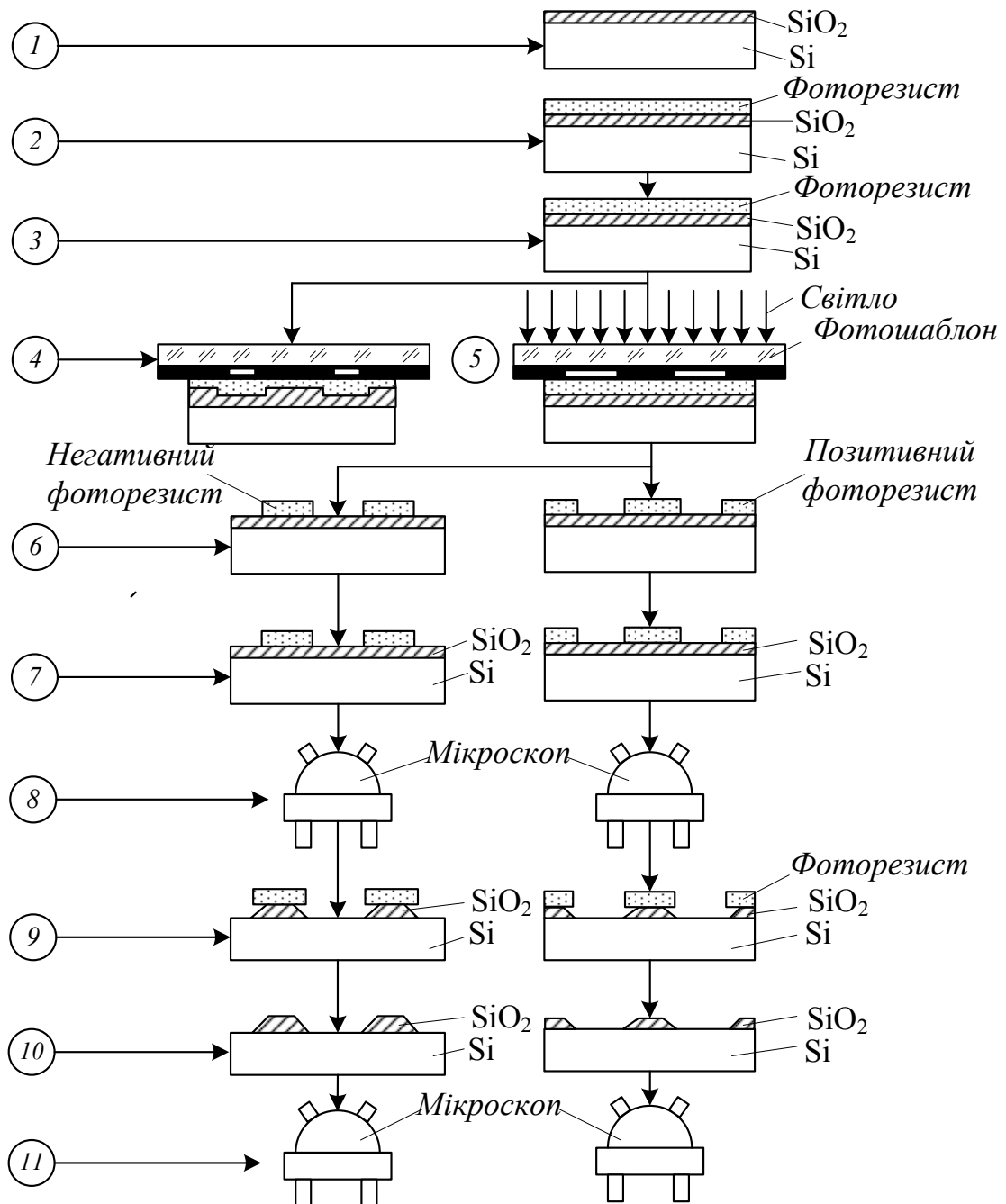


Рисунок 5.3 – Схема процесу контактної фотолітографії

Окрім вказаних забруднень, що впливають на адгезію, існують і інші чинники, що призводять до її зниження.

До цих чинників в першу чергу слід віднести різні механічні пошкодження поверхні початкової підкладки: риски, подряпини, відколки, мікротріщини, заглиблення і ін. В цих механічних пошкодженнях знаходиться повітря, яке важко видаляється при нанесенні на підкладку фоторезисту. Тому в місцях механічних пошкоджень створюються області слабкої адгезії фоторезисту до підкладки.

Підготовка поверхні початкової підкладки перед нанесенням фоторезисту – це ряд послідовних обробок в хімічних розчинах і розчинниках з метою видалення різних забруднень і адсорбованих газів, а також збільшення гідрофобності поверхні.

Найефективнішим способом обробки є промивання початкових підкладок в різних розчинниках: трихлоретилені, толуолі, амілацегаті, ацетоні і етиловому спирті. Деякі види забруднень можна видалити тільки кип'ятінням підкладок в сірчаній або азотній кислотах.

Нанесення на підкладку шару фоторезисту. Від цієї операції залежать основні параметри плівки фоторезисту: бездефектність, товщина, рівномірність товщини по всій поверхні підкладки, адгезія і відтворюваність результатів.

Для нанесення шару фоторезисту на підкладку застосовують різні способи: центрифугування, розпилювання (пульверизація), занурення в розчин фоторезисту, полив і накатування валиком. Ці способи знаходять застосування в різних областях виробництва мікроелектронного приладобудування.

Так, способи центрифугування і розпилювання використовують при виробництві інтегральних мікросхем з великою щільністю елементів і малими розмірами. Занурення в розчин фоторезисту застосовують в тих випадках, коли необхідно відразу нанести фоторезист на обидві поверхні початкової підкладки. Полив і накатування валиком застосовують головним чином для виготовлення друкованих плат.

Спосіб центрифугування є одним з найпоширеніших в напівпровідниковій технології способів нанесення фоторезисту на поверхню підкладки. При порівняно нескладному устаткуванні цей спосіб дозволяє одержувати достатньо рівномірні плівки фоторезисту (розкид за товщиною не перевищує $\pm 10\%$). Спосіб розпилювання (пульверизації) не знайшов широкого розповсюдження в промисловому виробництві.

Перед нанесенням фоторезисту на підкладку він піддається фільтрації з метою видалення з нього механічних домішок. До фільтрації проводять контроль в'язкості фоторезисту і за необхідності розбавляють його до потрібного значення в'язкості.

Для нанесення шару фоторезисту підкладку розташовують на диску центрифуги і міцно закріплюють. За допомогою дозатора на поверхню підкладки наносять певну кількість фоторезисту, дають можливість йому роз-

тектися по поверхні підкладки і після цього включають обертання диска центрифуги. При обертанні під дією відцентрової сили фоторезист рівномірно розподіляється по поверхні підкладки.

Товщина плівки фоторезисту залежить від частоти обертання центрифуги, в'язкості фоторезисту, характеру підкладки (хімічна природа матеріалу, якість обробки поверхні і її чистота) і центрування підкладки щодо осі центрифуги.

Частоту обертання диска центрифуги вибирають в діапазоні 2000 – 15000 *об/хв*. При частоті обертання підкладки менше 2000 *об/хв* можливе утворення валика фоторезисту по периметру підкладки, що виникає за рахунок поверхневого натягу. При частоті обертання більше 15000 *об/хв* можливе повне видалення фоторезисту з поверхні підкладки за рахунок збільшення відцентрових сил, що діють на фоторезист.

Конкретний технологічний режим нанесення фоторезисту на підкладку вибирають залежно від типу використовуваного фоторезисту, виду центрифуги і матеріалу початкової підкладки.

Критерієм вибору товщини плівки фоторезисту, з одного боку, є бездефектність (відсутність проколів), з іншого боку висока роздільна здатність.

При товщині плівок фоторезисту менше 0,2 *мкм* імовірність з'явлення проколів різко збільшується, що не дає можливості їх практичного використання.

При товщині плівок більше 1 *мкм* роздільна здатність їх знижується настільки, що не дозволяє одержувати елементи з малими розмірами. Тому рекомендується наносити плівки фоторезисту товщиною від 0,3 до 0,8 *мкм*. При виборі товщини плівки фоторезисту слід враховувати той факт, що при проявленні вони набухають. Чим товща плівка фоторезисту, тим більша деформація плівки при набуханні.

При малих розмірах елементів рисунка така деформація плівки фоторезисту при набуханні може привести до змикання сусідніх елементів рисунка.

При великій товщині плівки фоторезисту сили, викликані процесом набухання, можуть бути такими значними, що зруйнують зв'язки між підкладкою і плівкою фоторезисту. Це приводить до зсуву плівки фоторезисту відносно підкладки і, як наслідок, до зміни форми і розмірів елементів рисунка.

Слід зазначити, що із збільшенням товщини плівки фоторезисту зростає вплив розсіяння світла в самій плівці, що також приводить до зміни розмірів елементів рисунка.

На якість рисунка сильно впливає неоднорідність плівки фоторезисту за товщиною. Із збільшенням неоднорідності плівки зменшується роздільна здатність її окремих ділянок.

На рис. 5.4 подано графік залежності роздільної здатності фоторезисту від товщини його плівки. На графіку позначені дві області, що обмежують вибір товщини плівки при її нанесенні на підкладку. Вертикальна область (на рисунку заштрихована), що обмежує товщину плівки знизу, характери-

зується низькою досконалістю плівки і наявністю в ній великої кількості проколів. Горизонтальна область (на рисунку заштрихована), що обмежує товщину плівки фоторезисту зверху, характеризується мінімально можливою роздільною здатністю фоторезисту, необхідною для проведення процесу фотолітографії.

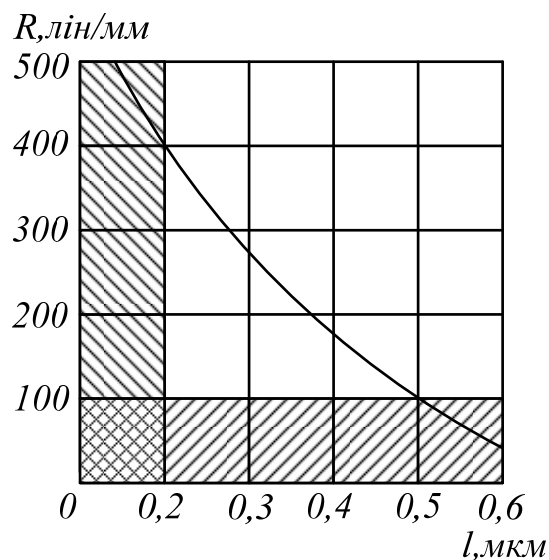


Рисунок 5.4 – Залежність роздільної здатності фоторезистів від товщини плівки

Перше сушіння фоторезисту – плівкоутворення. Цю операцію проводять для видалення розчинника з шару фоторезисту і утворення міцної і однорідної плівки.

Від сушіння полімерних плівок залежать адгезія і наявність внутрішніх механічних напруг в плівці.

Деформація плівки фоторезисту при її сушінні викликається нерівномірністю видалення розчинника з поверхні плівки і з її шарів, що глибше залягають. Це приводить до викривлення плівки і зміни її рівномірності за товщиною. В зв'язку з цим, необхідно вибирати такі режими сушіння, які давали б можливість рівномірного випаровування розчинника з плівки фоторезисту і зниження внутрішніх механічних напруг. Для цього використовують двоступінчатий температурний цикл сушіння, який забезпечує плавний процес видалення розчинника з плівки фоторезисту.

Критерієм для вибору температури сушіння є температура, при якій відбувається полімеризація плівки фоторезисту. Для різних типів фоторезистів температура полімеризації відповідає 140 – 200 °С. Тому перший процес сушіння зазвичай проводять при температурі, значно нижчій за температуру полімеризації. Для отримання високоякісних плівок фоторезистів їх сушать в два етапи, спочатку при температурі 18 – 20 °С протягом 15 –

30 хв, а потім при температурі 90 – 100 °С протягом 30 – 60 хв.

Процес сушіння рекомендується проводити в інертній атмосфері, оскільки при сушінні на повітрі можливе окиснення фоторезисту. Як джерело випромінювання в устаткуванні сушіння фоторезистів використовують інфрачервоне нагрівання.

Суміщення рисунка фотошаблону з рисунком на початковій пластині. Ця операція в первинному процесі фотолітографії відсутня, оскільки на початковій підкладці ще немає рисунка мікрозображення. Операція поєднання з'являється лише в тому випадку, якщо процес фотолітографії повторюється, а рисунок фотошаблону при другій фотолітографії змінюється. Суть процесу поєднання полягає в тому, щоб рисунок на початковій підкладці, одержаний в процесі першої фотолітографії, сумістити з рисунком на фотошаблоні, який використовується в процесі другої фотолітографії.

Точність суміщення цих двох рисунків залежить від трьох чинників: точності суміщення фотошаблонів в комплекті, точності відтворення форм і розмірів елементів рисунка в процесі фотолітографії і точності самої операції суміщення. Для полегшення процесу суміщення на фотошаблонах виготовляють спеціальні знаки, які є фігурами суміщення у вигляді хрестів, куточків, квадратів і ін. Форму фігур суміщення вибирають залежно від типу використовуваного в процесі фотолітографії фоторезисту (негативного або позитивного). Якщо фігура суміщення на фотошаблоні є прозорим вікном, то за своїми розмірами вона повинна охоплювати аналогічну фігуру суміщення на підкладці. Якщо ж фігура суміщення на фотошаблоні – непрозорий елемент, то вона повинна охоплюватися аналогічною фігурою суміщення на підкладці.

Операцію суміщення проводять на спеціальній установці для суміщення мікрозображень, основними елементами якої є предметний стіл зі сферичною основою, рамка для закріплення фотошаблону і пристрій для точного переміщення рамки і повороту предметного столу. Перед процесом суміщення підкладку розміщують на предметному столі так, щоб шар фоторезисту був зверху. Над поверхнею підкладки розташовують фотошаблон, закріплюючи його в рухомій рамці. Між підкладкою і фотошаблоном залишають повітряний зазор для вільного переміщення фотошаблону відносно підкладки. Суміщення рисунка на фотошаблоні і підкладці досягають шляхом пересування рамки з фотошаблонів в двох взаємно перпендикулярних напрямках і повороту робочого столу з підкладкою навколо вертикальної осі.

Після досягнення суміщення двох рисунків площину підкладки щільно притискують до поверхні фотошаблону.

Експонування фоторезисту контактним способом. Операцію експонування проводять для того, щоб у фоторезисті відбулися фотохімічні реакції, які змінюють початкові властивості фоторезисту.

Від цієї операції залежить якість перенесення мікрозображення з фотошаблону на плівку фоторезисту. Тому метою операції експонування є

високоточне відтворення плівкою фоторезисту всіх елементів, фрагментів і модулів топології інтегральної мікросхеми.

На процес експонування впливають такі чинники: якість фотошаблону, властивості фоторезисту, якість плівки фоторезисту, властивості підкладки, оптичні явища в системі підкладка – фотошаблон, якість процесу поєднання.

При контактному експонуванні світло проходить через фотошаблон і потрапляє на шар фоторезисту. Отже, зародження елементів рисунка в плівці фоторезисту буде залежати від оптичної щільності темних і світлих ділянок рисунка фотошаблону, від коефіцієнтів заломлення скляної основи фотошаблону і коефіцієнта віддзеркалення металізованого шару, різкості і рівності краю елемента рисунка на фотошаблоні.

Вибір джерела світла для операції експонування залежить від світлочутливості, контрастності, ділянки спектрального поглинання, коефіцієнта заломлення і роздільної здатності початкового фоторезисту. Основними вимогами, які висувають до джерел світла при проведенні процесу експонування, є спектр і інтенсивність випромінювання. Для експонування використовують різні джерела світла, спектри випромінювання яких відповідають максимумам спектральної чутливості фоторезистів. Найширше застосовують ртутно-кварцові і ксенонові лампи.

Для якісного проведення процесу експонування слід використовувати пристрої, що дозволяють одержувати паралельність променів в пучку світла. Створення такого пучку світла дає можливість зменшити розміри ділянки півтіней, що виникають в зазорі між підкладкою і фотошаблоном, і тим самим значно покращити відтворюваність рисунка.

Велику роль при експонуванні фоторезисту відіграє рівномірність освітленості по всьому полю фотошаблону. Основними оптичними ефектами при проведенні операції експонування є дифракція світла на межі фотошаблон – плівка фоторезисту, розсіяння світла в плівці фоторезисту і віддзеркалення світла від підкладки і металізованої плівки фотошаблону. Ці ефекти визначають граничну можливість контактного процесу експонування.

Дифракційні ефекти при проходженні світла через фотошаблон до плівки фоторезисту при експонуванні викликаються зазором між фотошаблоном і підкладкою. Чим більший зазор, тим сильніший вплив дифракції на процес експозиції і якість відтворюваного рисунка. Дифракційні явища впливають на розподіл світлової енергії на поверхні фоторезисту і тим самим на зміну розмірів елементів при контактній фотолітографії. Дифракційні явища викликають нерізкість і нерівність краю елемента рисунка при експонуванні і проявленні. Це відбувається за рахунок опромінювання ділянок плівки фоторезисту, що знаходиться під непрозорою ділянкою фотошаблону.

Таким чином, для зменшення впливу ефекту дифракції при проведенні експонування слід щільно притискувати фотошаблон до підкладки з метою виключення зазору між ними або зведення цього зазору до мінімуму.

Іншим важливим оптичним ефектом при проведенні експонування є

проходження світла через плівку фоторезисту. Світловий потік, що проходить через плівку фоторезисту, розсіюється в ній, дійшовши до підкладки, відбивається від неї і повертається назад в плівку. Дійшовши до поверхні фотошаблону, світловий потік відбивається від металізованого шару фотошаблону і знову потрапляє в плівку фоторезисту. Ці відбиття світлового потоку приводять до небажаного додаткового експонування ділянок плівки фоторезисту, що знаходиться під непрозорою ділянкою фотошаблону. Відбитий потік світла залежить від коефіцієнтів відбиття підкладки і металізованих ділянок рисунка фотошаблону. Тому зниження коефіцієнта відбиття фотошаблону зменшує вплив ефекту відбиття і розсіювання світла в плівці фоторезисту, що знаходиться під непрозорою ділянкою рисунка фотошаблону. З метою зниження ефекту відбиття використовують для контактної експозиції замість металізованих фотошаблонів кольорові, коефіцієнт відбиття яких значно нижче.

Проявлення фоторезисту. Операція проявлення плівки фоторезисту після її експонування полягає в обробці підкладки з плівкою в спеціальних розчинах з метою видалення з поверхні підкладки певних ділянок плівки фоторезисту: опромінених – для позитивних і неопромінених – для негативних фоторезистів.

Процес проявлення негативних і позитивних фоторезистів неоднаковий. Відмінність полягає в хімічних реакціях, які протікають в цих фоторезистах при дії на них певних розчинів. Так, процес проявлення негативних фоторезистів є типовим фізико-хімічним процесом розчинення полімерних матеріалів. Тому як проявники для негативних фоторезистів використовують органічні розчинники: толуол, хлорбензол, трихлоретилен і ін. При дії розчинників на негативні фоторезисти відбувається значне набухання опромінених і розчинення неопромінених ділянок плівки.

На процес проявлення негативних фоторезистів впливає експозиція. При недостатній експозиції опромінені ділянки фоторезисту можуть повністю розчинитися при проявленні або набухнути до з'єднання сусідніх елементів між собою. За набуханням плівки негативного фоторезисту після проявлення судять про правильність вибору режиму експозиції. Істотним моментом в операції проявлення негативних фоторезистів є те, що для них безпечно перепроявлення, якщо експозиція вибрана правильно. Тому процеси проявлення негативних фоторезистів легко піддаються автоматизації.

Процес проявлення позитивних фоторезистів складніший. Він базується на протіканні хімічного процесу взаємодії продуктів фотолізу нафтохінондіазидів і фенольних смол з лужними розчинами з подальшим фізико-хімічним видаленням продуктів реакції. Тому як проявники для позитивних фоторезистів зазвичай використовують сильно розбавлені водні розчини їдкої калію і натрію або тринатрійфосфату. Характерною особливістю процесу проявлення позитивних фоторезистів є їх чутливість до перепроявлення, тобто до надмірно тривалого перебування проекспонованої плівки фоторезисту в проявнику. Це пояснюється тим, що при тривалій

взаємодії плівки фоторезисту з проявником неопромінені її ділянки починають хімічно взаємодіяти з проявником і поступово розчиняються в ньому. Звичайно час проявлення позитивних фоторезистів не перевищує декількох десятків секунд.

В процесі проявлення негативних і позитивних фоторезистів виявляються паразитні ефекти, пов'язані з дифракцією світла на краю непрозорої частини фотошаблону розсіянням світла в плівці фоторезисту і відбиттям світла від підкладки і фотошаблону. Всі ці чинники приводять до появи *клина проявлення* в плівці фоторезисту біля краю елемента мікрозображення.

Друге сушіння фоторезиста – полімеризація. Ця операція проводиться для видалення з набухлої плівки залишків проявника і термічної полімеризації плівки фоторезисту. Цей процес іноді називають задублюванням фоторезисту. Друге сушіння проводять при вищій температурі, чим першу сушку після нанесення фоторезисту на поверхню підкладки. Для отримання якіснішої плівки фоторезисту друге сушіння проводять в два етапи: спочатку плівку сушать при температурі 18 – 20 °C протягом 15–30 хв, а потім при температурі 140 – 200 °C (залежно від типу фоторезисту) протягом 30–60 хв.

Як джерело тепла широко використовують інфрачервоне випромінювання.

Контроль рельєфу рисунка в плівці фоторезисту. Контроль проводять візуально під мікроскопом. Перевіряють всю робочу поверхню підкладки з елементами рисунка, що є на ній, з плівки фоторезисту. Контролюються такі основні критерії якості плівки: чистота робочого поля плівки фоторезисту, наявність проколів і їх кількість, геометричні розміри елементів рельєфу, неповне видалення фоторезисту у вікнах (при позитивному фоторезисті) або за вікнами, (при негативному фоторезисті), спотворення форми елементів рисунка, наявність ореола і клина в рельєфі рисунка.

При виявленні того або іншого дефекту в плівці фоторезисту проводять аналіз можливих причин його появи. Після цього складають план заходів щодо перевірки окремих технологічних операцій процесу фотолітографії.

Травлення підкладки. Операцію травлення підкладки проводять з метою перенесення зображення рисунка з плівки фоторезисту на підкладку. Перенесення зображення здійснюється методом хімічного травлення локальних ділянок підкладки через відкриті місця в масці, роль якої виконує плівка фоторезисту заданого рельєфу. Процес вибіркового травлення матеріалу підкладки є завершальною стадією формування топології рисунка в циклі фотолітографії. Основними вимогами, що висуваються до цього процесу, є мінімальне спотворення форми і розмірів перенесеного рисунка і його окремих елементів, досягнення потрібної глибини витравлення профілю рисунка, повне стравлювання металевих і діелектричних плівок з поверхні підкладки, не захищених шаром фоторезисту, мінімальну дію травника на плівку фоторезисту.

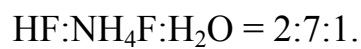
На процес травлення впливають температура, тип вибраного травника і кінетика хімічної реакції взаємодії травника з матеріалом підкладки.

Важливою особливістю локального травлення через плівку фоторезисту є те, що в процесі хімічної обробки відбувається не тільки травлення матеріалу за глибиною, але і підтравлювання його під захисною плівкою фоторезисту. В результаті утворюється *клин травлення* в рельєфі підкладки. Клин травлення залежить як від якості хімічної обробки вказаних чинників, так і від якості попередніх технологічних операцій (нанесення, сушіння, експонування, проявлення).

Перенесення зображення з плівки фоторезисту може проводитися: на підкладку з напівпровідникових матеріалів (германій, кремній, сполуки типу $A^{III}B^V$ і ін.), на діелектричні шари (SiO_2 і Si_3N_4), що осаджені на підкладці, на металеві плівки (Ni, Au, Al, Cu, Ag, Cr, Zn і ін.), що нанесені на підкладку, і на різного роду резистивні плівки. У кожному конкретному випадку вибирають певний травник і експериментальним шляхом підбирають оптимальний режим хімічної обробки.

Для витравлення рельєфу в напівпровідникових підкладках (Ge, Si, сполуки типу $A^{III}B^V$ і ін.) розроблені і широко використовуються різні кислотні і лужні травники.

Для отримання рельєфу в плівках SiO_2 широко використовують травник такого складу:



Травлення плівок нітриту кремнію проводять в киплячій фосфорній або в концентрованій плавиковій кислоті.

Мідь добре травиться в 65%-вому розчині хлорного заліза $FeCl_3$; алюміній – в 10 – 20%-вих водних розчинах лугів NaOH і KOH; срібло – в концентрованих азотній і сірчаній кислотах; хром – в суміші концентрованої сірчаної кислоти і води в співвідношенні 1:1; цинк добре розчиняється в соляній, азотній, сірчаній кислотах і в розчинах лугів; нікель – в азотній кислоті і в суміші азотної і сірчаної кислот; золото травиться в царській горілці (суміш азотної і соляної кислот в співвідношенні 1:3).

Зняття плівки фоторезисту з поверхні підкладки. Ця операція є завершальною в загальному циклі процесу фотолітографії. Для видалення плівки фоторезисту з поверхні підкладки використовують фізико-хімічні методи, що базуються на попередньому набуханні плівки фоторезисту в розчинниках і кислотах і механічному видаленні набухлого фоторезисту з поверхні підкладки. Найбільш якісне видалення фоторезисту з поверхні пластини одержують при іонно-плазмовій і плазмохімічній обробці. Як робочі реактиви використовують суміші газів: азоту, кисню і аргону.

5.7 Проекційна оптична фотолітографія

Окрім описаного контактного переддруку переносити зображення з фотошаблону на початкову підкладку з фоторезистом можна методом проекційного друку. При використанні проекційної фотолітографії виключаються операції контакту фотошаблону з підкладкою. Довговічність фотошаблонів в цьому випадку стає теоретично нескінченною.

Проекційний метод фотолітографії дозволяє уникнути недоліків, властивих контактній фотолітографії. Так, при проекційному методі перенесення зображення рисунок фотошаблону проектується через спеціальний об'єктив з високою роздільною здатністю на поверхню підкладки, а суміщення рисунків здійснюється з використанням того ж об'єктиву.

Усувається також проблема глибини різкості об'єктивів і пов'язана з нею проблема точності установа малих зазорів між фотошаблоном і підкладкою, оскільки оператор може проводити суміщення рисунків в одній площині фотошаблону або в площині підкладки.

Таким чином, проекційний метод фотолітографії підвищує точність суміщення, спрощує сам процес суміщення, знижує час процесу суміщення.

Проекційну фотолітографію можна здійснити трьома способами.

Перший спосіб передбачає одночасну передачу всіх елементів рисунка фотошаблону шляхом проектування його на поверхню підкладки, покритої шаром фоторезисту.

Другий спосіб включає послідовне поелементне (крокове) проектування окремих фрагментів або модулів на поверхню підкладки з фоторезистом.

Третій спосіб базується на послідовному викреслюванні рисунка зображення в шарі фоторезисту підкладки сфокусованим до певних розмірів світловим променем, керованим за певною програмою від ЕОМ.

Найбільше застосування в проекційній фотолітографії знайшов перший спосіб. Другий спосіб використовується у фотошаблонах для мультиплікації окремих модулів рисунків фотошаблону за робочим полем підкладки. Третій спосіб застосовується при виготовленні фотошаблонів.

Перший спосіб проекційної фотолітографії може бути реалізований з використанням трьох різних варіантів оптичних схем (рис. 5.5).

Перший варіант оптичної схеми подано на рис. 5.5, а. Він передбачає пряме проектування зображення фотошаблону на підкладку з суміщенням і експонуванням від одного джерела світла. За цією схемою пучок світла від джерела 1 проходить через конденсор 2, фільтр 3, фотошаблон 4 і потрапляє на напівпрозоре дзеркало 7, з якого через проекційний об'єктив 8 – на підкладку 9 з фоторезистом. При зворотному ході променів через об'єктив 8 і дзеркало 7 за допомогою мікроскопа 5 на екрані 6 спостерігають рисунок, що був на підкладці, і новий рисунок, спроектований на її поверхню з фотошаблону. Переваги даної оптичної схеми полягають в тому, що при переході від операції суміщен-

ня до операції експонування не потребується додаткового настроювання і другого джерела світла. Проте ця схема має і недоліки: а) промені світла при проектуванні зображення і суміщенні рисунків проходять через похило розташоване дзеркало, що приводить до спотворень рисунка зображення; б) при проведенні суміщення проектуване зображення двічі проходить через об'єктив і, отже, помилки зображення, обумовлені похибками об'єктива, подвоюються; в) розсіяння пучка світла на лінзах об'єктива викликає деяку втрату контрастності зображення рисунка.

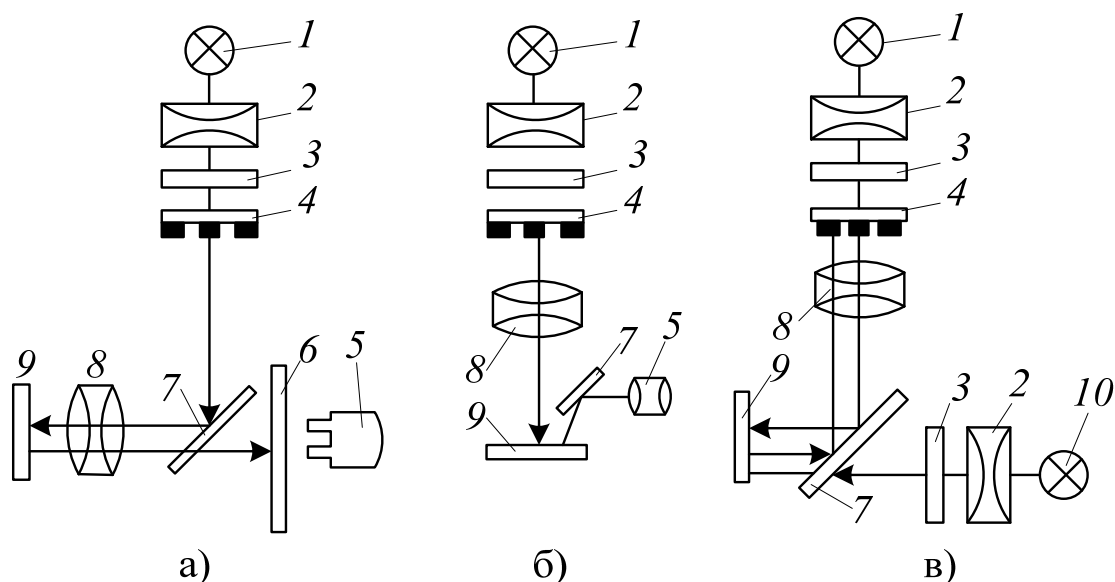


Рисунок 5.5 – Схема оптичної проєкційної фотолітографії:
а – прямого проєктування; б – суміщення; в – зворотного відображення

Другий варіант оптичної схеми (рис. 5.5, б) не має недоліків першого варіанта. Тут світло від джерела 1 проходить через конденсор 2, фільтр 3, фотошаблон 4, об'єктив 8 і потрапляє відразу на підкладку 9 з фоторезистом. Суміщення рисунка підкладки з рисунком фотошаблону проводять за допомогою дзеркала 7 і мікроскопа 5. Недоліком цього варіанту є те, що кутлова апертура променів світла, використовуваних для експонування і суміщення, в спостережуваній області під дзеркалом 7 зменшується, а це в свою чергу приводить до спотворення зображення і збільшення помилки суміщення.

Третій варіант оптичної схеми (рис. 5.5, в) дає можливість зворотного відображення рисунка підкладки на поверхню фотошаблону. З оптичної точки зору даний варіант є найоптимальнішим. У цій схемі світло від джерела 1 проходить через конденсор 2, фільтр 5, фотошаблон 4, об'єктив 8 і потрапляє на напівпрозоре дзеркало 7, з якого проєктується на підкладку 9 з фоторезистом. При зворотному ході світлового променя рисунок підкладки відображується на поверхні фотошаблону 4, хід променів від фотошаблону до підкладки повністю збігається зі зворот-

ним ходом променів від підкладки до фотошаблону. Даний варіант схеми дозволяє вибрати оптимальні умови освітлення як при експонуванні, так і при суміщенні. Для експонування використовується джерело світла I , а для суміщення – джерело світла I_0 . Перевагою схеми є те, що між фотошаблоном і підкладкою немає додаткових оптичних елементів, окрім об'єктива і дзеркала. Недоліком схеми є необхідність при проведенні процесу експонування міняти місцями джерело світла і мікроскоп, а при проведенні процесу суміщення – використовувати друге джерело світла.

При проведенні процесів проекційної фотолітографії враховують сумісність окремих компонентів оптичної системи джерело – об'єктив – фоторезист. Це необхідно для вибору джерела світла і узгодження його зі спектральною чутливістю використовуваного фоторезисту.

5.8 Дефекти процесу фотолітографії

Всі дефекти, що виникають в процесі проведення різних стадій фотолітографії, можна розбити на чотири основні групи.

Перша група – дефекти, пов'язані із застосуванням фотошаблонів – основних інструментів, за допомогою яких формується рельєф зображення в плівці фоторезисту.

Друга група – дефекти, пов'язані з якістю самої плівки фоторезисту і способами її отримання.

Третя група – дефекти, що виникають при експонуванні плівки фоторезисту.

Четверта група – дефекти, пов'язані з процесом перенесення зображення з плівки фоторезисту на підкладку, тобто з процесами локального травлення підкладки.

Дефекти фотошаблонів істотно впливають на якість всього процесу фотолітографії. До дефектів фотошаблонів відносять наявність на поверхні механічних пошкоджень (рисок, подряпин, відколків), крізні отвори на темному полі рисунка і непрозорі точки на світлому полі, нерівність краю, форми і розмірів елементів рисунка на фотошаблоні щодо початкових даних, несумісність елементів в комплекті фотошаблонів.

Ретельний контроль вказаних дефектів і відбракування неякісних фотошаблонів перед запуском їх в роботу дозволяють знизити загальний відсоток браку на операції фотолітографії.

Дефекти плівки фоторезисту виникають в процесі її нанесення на поверхню підкладки і пов'язані з неправильно вибраним технологічним режимом. До них відносяться завищена або занижена товщина плівки, різнотовщинність плівки по робочому полю, низька адгезія плівки до підкладки.

Товщина плівки і її різнотовщинність визначаються як способом

нанесення плівки, так і попередньою обробкою поверхні підкладки. Основними чинниками, які обумовлюють нерівність плівки фоторезисту, можуть бути надмірна густина фоторезисту, низька частота обертання диска центрифуги, відхилення диска центрифуги від горизонтальної площини і його неспіввісність. На адгезію плівки фоторезисту до підкладки впливають чистота початкової підкладки, чистота фоторезисту і спосіб нанесення.

Слід відзначити, що поява вказаних дефектів плівки фоторезисту слугує критерієм при відбракуванні на даній операції. Підкладки із забракованою плівкою фоторезисту направляють на операцію «зняття фоторезисту». Після відповідної підготовки поверхні вони знову поступають на операцію «нанесення фоторезисту».

Таким чином, процес фотолітографії повторюється, що спричиняє за собою певні економічні витрати, зате початкові параметри підкладки не змінюються.

Якщо якість плівки фоторезисту задовольняє вимоги процесу фотолітографії, то вона поступає на операції, які можуть створювати свою групу дефектів. До цих операцій відносяться експонування і проявлення фоторезисту.

Операції експонування і проявлення можуть викликати такі дефекти, як проколи в плівці фоторезисту, зміна розмірів опромінених і неопромінених ділянок плівки фоторезисту за рахунок ефектів дифракції, розсіювання і відбиття, нерівність краю елемента рисунка і клин проявлення. Проколи в плівці фоторезисту виникають з двох причин: наявність в плівці фоторезисту чужорідних включень і використання неякісних або сильно зношених фотошаблонів. Зміна геометричних розмірів елементів зображення пов'язана з наявністю зазору між фотошаблоном і підкладкою з фоторезистом. Поганий контакт між елементами при експонуванні приводить до зміни перенесеного з фотошаблону на підкладку рисунка за рахунок ефекту дифракції світла. Нерівність краю елемента у вигляді виступів і западин може утворюватися через наявність в плівці фоторезисту субполімерних частинок розміром 0,3–0,5 мкм. Поява таких частинок пов'язана з неповною розчинністю сухого фоторезисту в робочих складах. Для попередження цього дефекту слід ретельніше фільтрувати фоторезист. Клин прояву в плівці фоторезисту може бути зменшений оптимальним підбором експозиції і використанням певного типу проявника.

Окрім вказаних дефектів при недостатньо відпрацьованих процесах експонування і проявлення можуть мати місце дефекти, пов'язані із залишками плівки фоторезисту в тих місцях, де вона повинна бути повністю видалена, і, навпаки, видалення частини плівки фоторезисту з місць, де вона повинна повністю зберігатися. Цей вид дефекту може бути виключений точним підбором експозиції і часу прояву.

Дефекти, що виникають при перенесенні рисунка зображення з плівки фоторезисту на підкладку, тобто при проведенні процесу локального травлення, є остаточними і виправленню не піддаються. До цих дефектів відноситься повне або часткове відшарування плівки фоторезисту від підкладки в процесі травлення.

Контрольні запитання

1. В чому полягає процес фотолітографії?
2. Що таке фоторезист?
3. Яким законам підпорядковуються процеси, що відбуваються у фоторезистах під дією світла?
4. Охарактеризуйте фотохімічні реакції, що відбуваються у фоторезистах.
5. Чим відрізняються позитивні та негативні фоторезисти?
6. Вкажіть критерії застосовності фоторезистів.
7. Що таке фотошаблони і які є способи їх отримання?
8. Як розрізняють фотошаблони залежно від матеріалу, з якого створений рисунок на скляній пластині?
9. Які вимоги висуваються до фотошаблонів?
10. Вкажіть варіанти виготовлення фотошаблонів.
11. Що таке координатограф?
12. Назвіть види генерування зображення на фотошаблоні.
13. Наведіть схему серійного виготовлення фотошаблонів.
14. Поясніть процес контактної фотолітографії.
15. Які способи проекційної фотолітографії Ви знаєте?
16. Охарактеризуйте дефекти процесу фотолітографії.

6 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДИФУЗІЇ

Дифузія легуючих домішок до напівпровідникових кристалів є основним технологічним методом створення електрично гетерогенних структур при виготовленні різних типів мікроелектронних засобів. Для проведення дифузії напівпровідникову пластину поміщають в нагріту до високої температури кварцову трубу дифузійної печі. Через трубу пропускають пари легуючої домішки, які адсорбуються на поверхні пластини і дифундують в кристалічну ґратку напівпровідника.

Особливості дифузії в планарній технології полягають в тому, що домішку вводять в напівпровідникову пластину локально в обмежені захисною маскою вікна, а сам процес здійснюють в дві стадії: попередня загонка потрібної кількості домішки і подальший розгін на необхідну глибину і до необхідного рівня концентрації. Важливими технологічними чинниками є способи проведення дифузії і види дифузантив.

Створення ІМС потребувало розробки дифузійних методів ізоляції окремих елементів, що розміщуються на одній підкладці, а також виготовлення не тільки активних, але і пасивних елементів (резисторів, конденсаторів). Введення домішок дифузійним способом супроводжується їх дією на кристалічну ґратку напівпровідника, що приводить до виникнення дефектів в дифузійних структурах. Знання особливостей утворення і можливих способів запобігання таким дефектам необхідне для оволодіння процесом дифузії. Неабиякою мірою цьому сприяють методи контролю дифузійних структур: вимірювання глибини залягання *p-n*-переходу, поверхневого опору і концентрації, щільності дислокацій.

6.1 Розподіл домішки при дифузії

Дифузія домішкових атомів в твердому тілі відбувається внаслідок хаотичного теплового руху у напрямку зменшення їх концентрації. Мікроскопічне переміщення атомів відбувається або за вакансіями, або за міжвузловинами. Дифузія основних легуючих домішок в напівпровідниках здійснюється, як правило, за вакансіями, тоді як інших домішок – за міжвузловинами. У напівпровідниковій технології найбільший інтерес викликають два випадки розподілу домішкових атомів.

1. Якщо дифузія йде із *джерела з обмеженим вмістом домішки*, що знаходиться в початковий момент в нескінченно тонкому поверхневому шарі, то профіль розподілу концентрації має вигляд

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (6.1)$$

де N – щільність атомів домішки під одиницею площі поверхні, не-

змінна у будь-який момент дифузії, at/cm^2 ;
 x – глибина, відповідна даній концентрації, cm ;
 D – коефіцієнт дифузії домішки, cm^2/c ;
 t – тривалість дифузії, c .

Глибина залягання дифузійного p - n -переходу

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln(C_0 / C_B)}, \quad (6.2)$$

де C_B — концентрація домішки в початковій пластині напівпровідника.
 При $x = 0$ поверхнева концентрація домішки

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}}. \quad (6.3)$$

Для багатьох практичних випадків глибина p - n -переходу

$$x_j \approx 6\sqrt{Dt}. \quad (6.4)$$

2. Якщо дифузія йде із джерела з постійною поверхневою концентрацією домішкових атомів C_0 , то розподіл має вигляд

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (6.5)$$

Для допустимого спрощення замість erfc -функції можна використовувати апроксимацію

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0,3 \right)^2 \right]. \quad (6.6)$$

Для цього випадку глибина залягання p - n -переходу

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \left(\sqrt{\ln(C_0 / (C_B) - 0,3)} \right). \quad (6.7)$$

При послідовній дифузії ряду домішок пластина напівпровідника піддається багатократним циклам дифузії. Для розрахунку $C(x, t)$ в цьому випадку слід використовувати суму:

$$Dt = D_1 t_1 + D_2 t_2 + D_3 t_3 + \dots \quad (6.8)$$

Електронно-діркові переходи, утворені методом дифузії, мають плавний розподіл домішки, крутизна якого характеризується градієнтом концентрації a .

Поняття плавного, як і різкого, p - n -переходу ідеалізується. Із зростанням глибини дифузії і вищим вмістом домішки в початковій пластині перехід є плавнішим і краще відповідає моделі переходу з лінійним розподілом домішки в області просторового заряду (ОПЗ). Чим менші глибина дифузії і концентрація домішки в початковій пластині, тим краще наближення до різкого переходу.

Дифузія в планарній технології. У планарній технології дифузію проводять в дві стадії, що особливо важливо, якщо потрібно одержати добре контрольовану низьку поверхневу концентрацію. Спочатку здійснюють коротку дифузію із джерела з постійною поверхневою концентрацією – *загонку*. Поверхнева концентрація при цьому визначається або граничною розчинністю домішки, або вмістом домішки в джерелі дифузанта. Потім пластини виймають з печі і видаляють склоподібний шар, що переважно утворюється на поверхні кремнію при загонці в окислювальній атмосфері і що має склад, близький до складу боросилікатного або фосфорно-силікатного скла. Чисті пластини поміщають в чисту піч для проведення другої стадії дифузії – *розгонки*, здійснюваної при вищій температурі, так що $D_2t_2 \gg D_1t_1$. Тонкий дифузійний шар, сформований на першій стадії дифузії, є джерелом з обмеженою кількістю домішки.

Планарні p - n -переходи мають істотну відмінність від простих площинних переходів, пов'язану з їх геометричною конфігурацією. У планарній технології p - n -перехід створюють дифузією домішки в об'ємі напівпровідника через вікна в захисному шарі діоксиду кремнію. Домішка при цьому дифундує не тільки в глибину, але і уздовж поверхні під захисну маску, чим досягається пасивація межі p - n -переходу, пластини, що виходить на поверхню. P - n -перехід, що утворюється, складається з плоскої частини і крайових ділянок, що мають приблизну циліндрову форму, як показано на рис. 6.1 (цифрою 1 відмічено циліндрові ділянки переходу). Оскільки в захисній масці є кути, то форма переходу поблизу кутів близька до сферичної. Ці ділянки відмічені на рис. 6.1 цифрою 2. Якщо p - n -перехід одержаний дифузією через вікно, що має конфігурацію вузької щілини, ширина якої близька до глибини дифузії, то перехід має форму півциліндра. Перехід, створений дифузією через кругле вікно, має форму півсфери, якщо радіус вікна дорівнює глибині переходу або менший за неї.

Внаслідок малої глибини залягання планарних p - n -переходів, що зазвичай не перевищує 10 $\mu\text{м}$, вони мають велику кривизну під краєм захисної маски, що викликає стягування ліній струму, локальне зростання електричного поля і зменшення напруги лавинного пробоя. Структура дрібних планарних переходів в плоскій частині подібна різким переходам. Як видно з рис. 6.1, а, радіус кривизни бічної межі p - n -переходу r_j приблизно дорівнює глибині залягання переходу x_j . Для плоскої частини переходу ра-

діус кривизни прагне до нескінченності і напруга пробою максимальна. При даному значенні r_j і однакових концентраціях домішки напруга пробою сферичного переходу менша, ніж циліндрового. Наприклад, при концентрації $C_B = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ напруга пробою плоского кремнієвого переходу складає 330 В, циліндрового переходу з радіусом кривизни 1 мкм – 80 В, а сферичного переходу такої ж кривизни – 40 В.

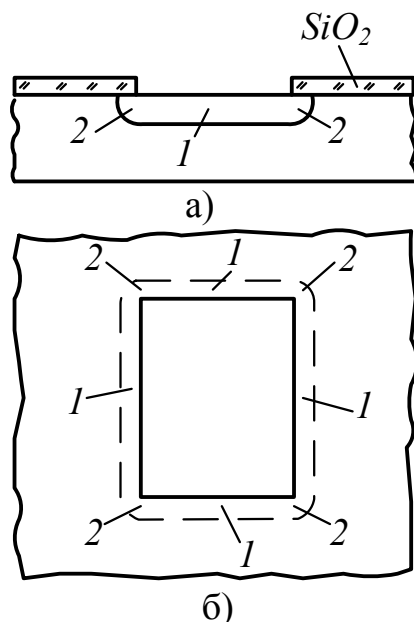


Рисунок 6.1 – Геометрія дифузійного планарного $p-n$ -переходу:
а – переріз; б – вигляд в плані

Ще одна особливість отримання дифузійних $p-n$ -переходів в планарній технології пов'язана з наявністю декількох операцій оксидування, що проводяться після операцій дифузії. Внаслідок різної розчинності дифундувальної домішки в кремнії і в діоксиді кремнію, що утворюється, відбувається помітний перерозподіл концентрації домішки на межі поділу кремній – діоксид. Розчинність бору і алюмінію в діоксиді більша, ніж в кремнії, тому поверхня кремнію обідняється бором і алюмінієм, тоді як розчинність фосфору, сурми і миш'яку вища в кремнії, ніж в SiO₂, та поверхня кремнію збагачується атомами цих елементів. Наявність збіднених або збагачених домішками шарів кремнію приводить до зміни електричних властивостей дифузійних структур і перед усім напруги пробою.

6.2 Технологічні прийоми отримання дифузійних структур

Способи проведення дифузії. Дифузію проводять в порівняно обмеженому діапазоні температур. Для кремнію, наприклад, цей діапазон 1100 – 1300 °С або з урахуванням процесу загонки при двостадійній дифузії 1000 – 1300 °С. Нижче за 1000 °С значення коефіцієнтів дифузії дуже малі і глибина дифузії незначна. Вище 1300 °С якість дифузійних шарів незадо-

вільна через порушення поверхні пластин під дією температури. Якщо в ізольований об'єм помістити пластину напівпровідника і домішковий елемент і нагрівати їх до деякої температури, то внаслідок сублімації або випаровування домішкового елементу в об'ємі незабаром встановиться певний парціальний тиск його пари. Молекули пари адсорбуються всіма поверхнями, у тому числі і поверхнею пластини, і при достатньо великій температурі дифундують углиб. У загальному випадку рівноважна концентрація пропорційна тиску пари, тому управління поверхневою концентрацією домішки здійснюють шляхом контролю тиску пари. Якщо рівновага на поверхні досягається за час, менший, ніж тривалість дифузії, то поверхнева концентрація залишається сталою. Тому в більшості випадків розподіл домішки при дифузії з газової фази описується функцією доповнення до інтеграла помилок.

Дифузійні процеси проводять в закритій або відкритій трубі. Термін «відкрита труба» обумовлений тим, що вихідний кінець дифузійної труби сполучається з атмосферою (рис. 6.2, а – в, д). Через нього в зону дифузії завантажують кремнієві пластини 1. Щоб звести до мінімуму забруднення з атмосфери, над виходом труби 2 встановлюють витяжну систему. Вхідний кінець дифузійної труби 3 слугує для введення газу-носія (азоту, аргону або кисню). Термін «закрита труба» відноситься до дифузії в герметизованій ампулі (рис. 6.2, г). Пластини напівпровідника 1 і джерело дифузанта 4 завантажують в кварцову ампулу 6, яку вакуумують, герметизують і поміщають в дифузійну піч 5.

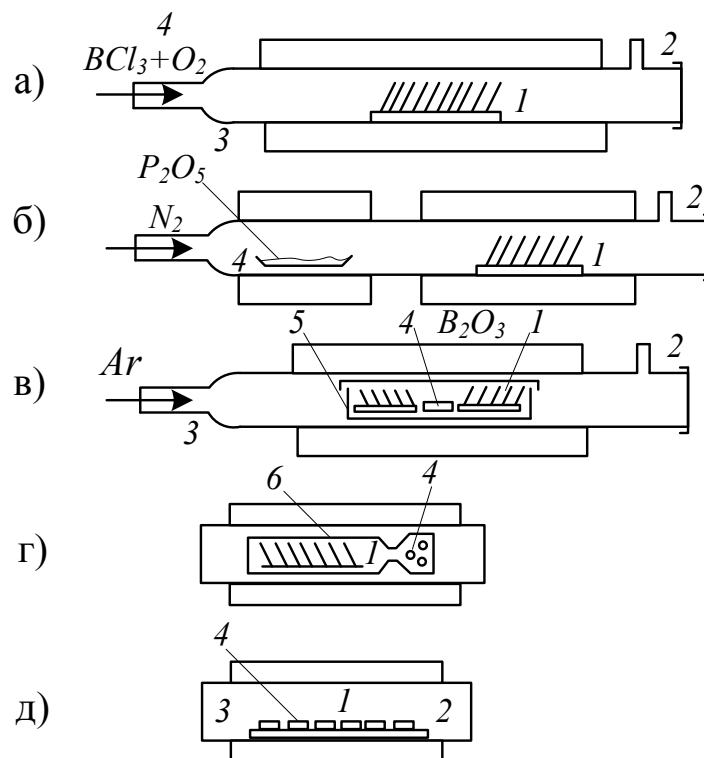


Рисунок 6.2 – Варіанти проведення дифузії

Дифузанти 4 або наносять на поверхню пластини (рис. 6.2, д), або вводять у вигляді пари або газу в газ-носії (рис. 6.2, а). На рис. 6.2, б показана схема двозонної печі, вживаної в основному для дифузії з твердих джерел дифузанта методом відкритої труби, а на рис. 6.2, в – схема методу боксу. В останньому методі пластини і джерело домішки знаходяться в напівгерметичному контейнері 5 однозонної печі.

Найбільшого поширення набула дифузія у відкритій трубі, що проводиться з твердих, рідких і газоподібних джерел. Основними дифузантами при дифузії в кремнію є фосфор і бор. При виготовленні планарних приладів процес дифузії зазвичай проводять в дві стадії. На першій стадії (загонці) на поверхні кремнію створюють тонкий дифузійний шар з *erfc*-розподілом домішки. Загонку здійснюють в печах з однією або двома температурними зонами при невисоких порівняно з власною дифузією температурах. На другій стадії (розгону) пластини напівпровідника нагрівають в однозонній печі в атмосфері, що не містить атомів дифузанта, так що єдиним процесом є дифузійний перерозподіл домішки. Друга стадія відповідає дифузії з джерела з обмеженим вмістом домішки.

Двостадійна дифузія має дві основні переваги перед одностадійною: 1) розділення процесу на дві стадії робить його більш керованим, що підвищує відтворюваність і спрощує його контроль; 2) полегшується маскування, оскільки перша стадія короткочасна і відносно низькотемпературна, а на другій стадії немає пари дифузанта. Все це підвищує стійкість і захисні властивості діоксиду кремнію.

Дифузанти. Широкого поширення набули газоподібні дифузанти (гідриди бору і фосфору), рідкі (галогеніди бору і фосфору) і тверді (оксиди бору і фосфору).

Найбільш поширеним джерелом фосфору при дифузії з твердого джерела дифузанта є зневоднений пентаоксид фосфору (фосфорний ангідрид P_2O_5). Пентаоксид поміщають в зону джерела і нагрівають до 230–300 °С (рис. 6.2, б). Газ-носії захоплює молекули пентаоксида і переносить їх в зону дифузії. Між кремнієм і P_2O_5 відбувається хімічна реакція, в результаті якої виділяються елементарний фосфор і оксид кремнію, створюючи склоподібну сполуку на поверхні пластини, з якого і відбувається дифузія. Ряд бажаних характеристик має рідке джерело фосфору (оксихлорид фосфору $POCl_3$). Він не гігроскопічний, має малу витрату, стабільний за концентрацією фосфору при тривалому використанні. Механізм дифузії з рідкого джерела аналогічний дифузії з P_2O_5 , оскільки рідкі джерела реагують з надмірним киснем, утворюючи P_2O_5 . На поверхневу концентрацію впливають витрата $POCl_3$, температура джерела, діаметр дифузійної труби, конструкція відбивача пари і склад газу-носія. Як правило, за відтворюваністю та можливістю регулювання параметрів системи з джерелом в рідкій фазі кращі, ніж системи з джерелом в твердій фазі. Також використовують трихлорид PCl_3 і пентафторид фосфору PF_5 .

У системах дифузії фосфору у відкритій трубі з газоподібного джерела зазвичай використовують фосфін PH_3 . Механізм дифузії з PH_3 такий же, як і з P_2O_5 , оскільки він перетворюється на фосфорний ангідрид в результаті окиснення, коли поступає в нагріту дифузійну камеру. Для регулювання поверхневої концентрації застосовують розбавлення PH_3 інертним газом. Фосфін не поглинає воду. За допомогою цієї системи можна одержати низьку поверхневу концентрацію, проте керування концентрацією ускладнюється через неконтрольоване поглинання кварцовими трубами ангідриду фосфору.

Найпоширенішим джерелом в твердій фазі, використовуваним для дифузії бору у відкритій трубі, є борний ангідрид B_2O_3 . Застосовують також борну кислоту H_3BO_3 , яка легко дегідратує при високій температурі, утворюючи B_2O_3 . У трубі підтримується температура джерела бору $T \approx 900$ °С. При стиканні борного ангідриду з кварцом відбувається розкльовування і кварц стає непридатним до використання. Для усунення недоліків B_2O_3 або H_3BO_3 їх змішують з SiO_2 , використовуючи метод сумісного осадження з тетраетилортосилікату $\text{SiO}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$. Це дозволяє регулювати поверхневу концентрацію в широких межах.

Найпоширеніше джерело в рідкій фазі, використовуване в системах дифузії бору у відкритій трубі, – це трибромистий бор BBr_3 . Поверхневою концентрацією управляють, змінюючи температуру дифузії, температуру джерела і витрату потоку газу-носія.

Хлорид бору BCl_3 при кімнатних температурах є газом. У нейтральному або відновному середовищі при підвищеній температурі він взаємодіє з кремнієм, утворюючи леткі сполуки – тетрахлорид кремнію і хлористий водень. При доданні кисню в потік BCl_3 утворюється борний ангідрид і дифузія схожа з дифузією з B_2O_3 . Додання кисню дозволяє регулювати поверхневу концентрацію. При високій концентрації BCl_3 в потоці на поверхні кремнієвих пластин утворюються темні плями, які є субоксидом бору приблизного складу B_6O і не видаляються ніякими відомими розчинниками. Вони обумовлюють невідтворюваність параметрів. Останнім часом велику увагу приділяють відпрацюванню процесів дифузії з газоподібного фториду бору BF_3 , якому не властиві недоліки BCl_3 .

Зручним джерелом для управління дифузією є диборан B_2H_6 . Його використовують у відновному або нейтральному середовищі в розбавленому вигляді – в потоці аргону, азоту або водню, що містить до 0,05% диборану. При $T > 300$ °С відбувається піроліз B_2H_6 з утворенням елементарного бору. Кращу відтворюваність мають системи з окиснювальним середовищем, що містить до 0,01% B_2O_6 і до 2,5% O_2 в аргоні або азоті. Диборан взаємодіє з киснем, утворюючи борний ангідрид і воду.

Присутність води значно збільшує швидкість випаровування борного ангідриду, що обумовлює рівномірний розподіл дифузанта уздовж робочої зони унаслідок утворення летких борних кислот, особливо метаборної HBO_2 . Недоліками B_2H_6 є токсичність і легка займистість на повітрі при

концентрації більше 0,8%, вибух при зіткненні з хлором. На рис. 6.3, а по-
дано температурні залежності коефіцієнтів дифузії В, Al, P і As в кремнії.

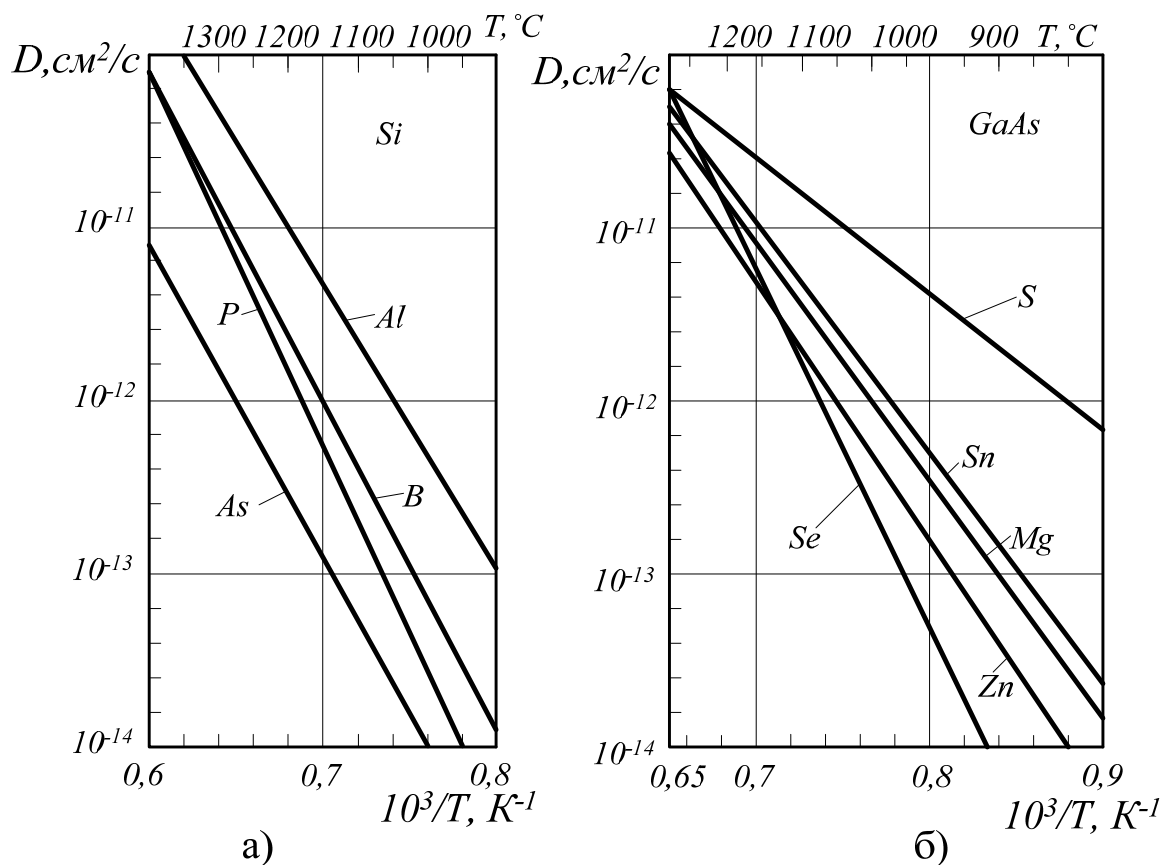


Рисунок 6.3 – Залежність коефіцієнтів дифузії домішок в кремнії (а)
і арсеніді галію (б) від температури

Дифузія в сполуках типу $A^{III}B^V$. Для сполук типу $A^{III}B^V$ дифузія в підгратці, складеній з атомів III групи, характеризується меншою енергією активації, чим відповідна дифузія в підгратці, складеній з атомів групи V. Якщо дифундуючі атоми нейтральні або одноразово іонізовані, то на їх рух, наприклад в арсеніді галію, за вакантними вузлами миш'яку витрачається більша енергія, ніж на рух за вакантними вузлами галію. Це відбувається тому, що для утворення вакансій галію слід видалити тільки три електрони, тоді як для утворення вакансії миш'яку потрібно видалити п'ять електронів. Сприяє такому співвідношенню швидкостей дифузії і геометричний чинник. Оскільки ковалентний радіус миш'яку (0,118 нм) менший ковалентного радіуса галію (0,126 нм), то домішки в галієвій підгратці можуть дифундувати швидше, ніж в миш'яковій. На рис. 6.3, б по-дано температурні залежності коефіцієнтів дифузії S, Se, Sri, Mg і Zn в GaAs.

Внаслідок випаровування поверхневих атомів з арсеніду галію при температурах дифузії в поверхневому шарі утворюється велика кількість

надмірних вакансій. Оскільки при температурах вищих $637\text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск пари As_2 і As_4 більший тиску пари Ga, то поверхня стає нестехіометричною в GaAs n -типу зростає концентрація акцепторів, якими є вакансії Ga. Вакансії As є донорами і зосереджені у вузькій поверхневій області, оскільки мають менший коефіцієнт дифузії.

Особливість проведення процесу дифузії в сполуках типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ полягає в необхідності створення надмірного тиску пари легкого компонента групи V для запобігання розкладанню поверхні зразків при нагріванні. Тому дифузії зазвичай проводять у відпаяній кварцовій ампулі, в яку окрім легуючої домішки поміщають наважку фосфору або миш'яку.

6.3 Дифузійні процеси при виготовленні ІМС

Внаслідок того, що всі активні і пасивні елементи напівпровідникових ІМС розташовані в одному кристалі, між ними існують не передбачені електричною схемою резистивні і ємнісні зв'язки. Тому однією з головних проблем при створенні напівпровідникових мікросхем є проблема ізоляції елементів з метою усунення паразитних зв'язків. Існує дві групи методів ізоляції: за допомогою зворотно зміщених p - n -переходів і за допомогою діелектрика. Ізолюючі p - n -переходи створюють переважно методом дифузії. Переваги методів ізоляції за допомогою зворотно зміщених p - n -переходів полягають у високій технологічності, малій тривалості виробничого циклу і порівняно високому відсотку виходу придатних мікросхем. Існує ряд різновидів ізоляції елементів ІМС зворотно зміщеними p - n -переходами: метод роздільної дифузії, колекторна ізолювальна дифузія, базова ізолювальна дифузія, метод трьох фотошаблонів, метод самосуміщення.

Метод роздільної дифузії. Внаслідок простоти і низької вартості даний метод є найпоширенішим при виготовленні ІМС широкого застосування. Основні етапи технології полягають в тому, що початкова пластина кремнію з електропровідністю p -типу після механічної і хімічної обробки піддається оксидуванню.

У діоксиді кремнію за допомогою фотолітографії створюють вікна, розміри яких дещо більші площі, яку матимуть колекторні переходи. У вікна проводять дифузії миш'яку або сурми, тобто домішок, що створюють високу концентрацію носіїв заряду і мають низький коефіцієнт дифузії в кремнії. В результаті утворюються n^+ -області майбутніх прихованих шарів під колекторами транзисторів, що зменшують опір насичення транзисторів (рис. 6.4, а). Діоксид видаляють зі всієї поверхні пластини і наросшують епітаксійний шар з електропровідністю n -типу товщиною 3 – 10 μm (рис. 6.4, б). У цьому шарі будуть створені всі активні і пасивні елементи мікросхеми. На епітаксійному шарі вирощують плівку SiO_2 , у якій розкривають вікна, що обмежують області ІМС, які потребують ізоляції одна від одної. У вікна проводять дифузії бору на глибину 5 –

12 мкм, щоб p^+ -шар, що утворився, надійно зімкнувся з p -підкладкою і ізолював структуру транзистора і інші ділянки схеми (рис. 6.4, в). Ізолюючий p - n -перехід складається з трьох ділянок (p^+ - n , p - n і p - n^+) з різними напругами пробою. Мінімальна напруга пробою повинна перевищувати максимальний зсув, використовуваний при роботі ІМС. В процесі подальших технологічних операцій формуються p -база, p -резистор, n -емітер і n^+ -контакт до колектора (рис. 6.4, г).

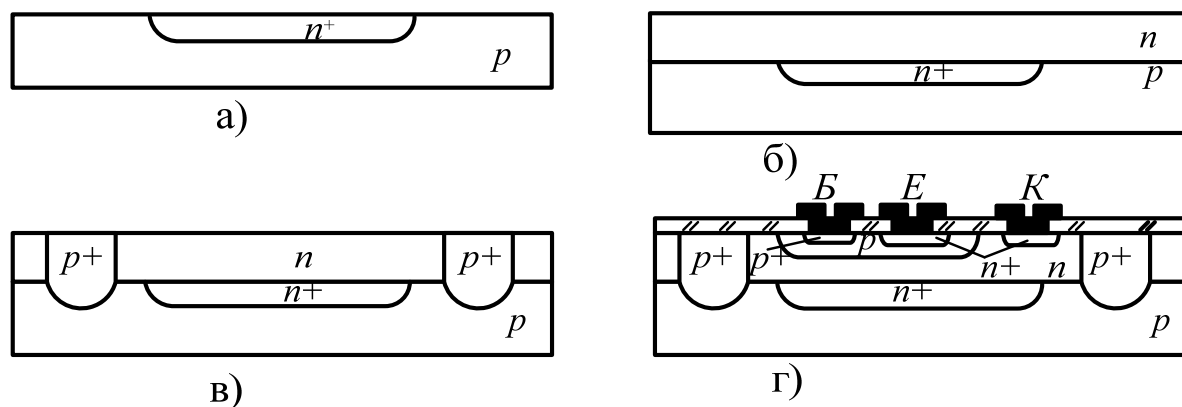


Рисунок 6.4 – Метод роздільної дифузії

Дифузійні резистори. Для створення резисторів в напівпровідникових ІМС використовують дифузійні шари, одержані при формуванні базової або емітерної областей транзисторів. Як правило, дифузійний резистор створюється одночасно з базою транзистора шляхом дифузії акцепторної домішки в підкладку з електропровідністю n -типу (рис. 6.5, а). Опір дифузійного шару залежить від розподілу домішки, глибини дифузії і відношення довжини дифузійного резистора до його ширини. Номінал резистора R задається схемою, а довжину розраховують за відомими значеннями поверхневого опору дифузійного шару R_s , ширини резистора ω і опору контактів R_k :

$$L = \omega \frac{R - R_k}{R_s}$$

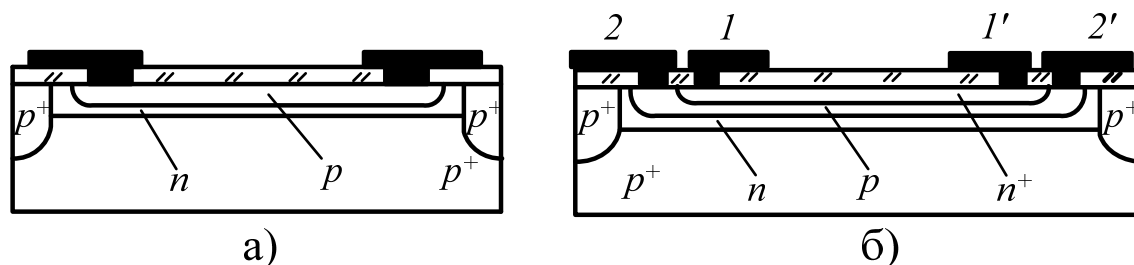


Рисунок 6.5 – Дифузійні резистори: а) в базовому; б) в емітерному шарі (виводи 1 – 1') і в «стиснутому» базовому шарі (виводи 2 - 2')

Базова дифузія дозволяє одержувати високоомні резистори. Резистори з невеликими опорами одержують в процесі емітерної дифузії (рис. 6.5, б, виводи 1—1'). Найбільш використовувані дифузійні резистори мають параметри, наведені в табл. 6.1. Для отримання резисторів з номіналами понад 50 кОм використовують «стиснуті» базові шари, що одержуються після проведення емітерної дифузії (рис. 6.5, б, виводи 2—2'). Сильнолегована поверхнева частина базового шару компенсується емітерним дифузійним шаром, і поверхневий опір глибокої частини базового шару зростає у багато разів (табл. 6.1). Розкид номіналів у таких резисторах і температурний коефіцієнт опору (ТКО) більші, ніж у звичайних резисторах в базовому шарі.

Таблиця 6.1 – Параметри найбільш використовуваних резисторів

Параметри	Тип резистора		
	базовий	емітерний	стислий
Поверхневий опір, Ом/□	100–400	2–3	500–1·10 ⁴
Номінали опорів, кОм	0,1–50	0,003–0,05	50–500
Розкид номіналу, %	±(3–20)	±20	±(30–50)
ТКО, 10 ⁻³ /К	0,05–5	0,1–0,5	3–5

Обов'язковою складовою частиною структури резистора є *p-n*-перехід, що ізолює резистор від підкладки і має розподілену ємність. Напруга пробною переходу обмежує максимальну напругу, яку можна подати на резистор. Повна розподілена ємність складає 2 – 20 пФ для типових структур і повинна враховуватися при роботі на частотах понад 10 МГц. Розміри областей, що визначають загальну ємність резистора, залежать від рисунка фотошаблону. Необхідна площа області резистора обмежена значенням розсіюваної потужності. Для отримання резисторів з великим опором без збільшення їх площі іноді зменшують ширину дифузійного резистора. В цьому випадку також застосовують «стислі» резистори.

Дифузійні резистори мають відносно великий розкид за номіналом і великі температурні коефіцієнти опорів. Для заданої концентрації домішок в дифузійній області її опір пов'язаний зі зміною рухливості дірок або електронів з температурою. Вплив температури на рухливість обумовлює позитивний ТКО дифузійних резисторів. ТКО тим більше залежить від зміни концентрації домішки, чим вищий поверхневий опір.

Резистори, що одержуються під час базової дифузії при створенні *p-n-p*-транзисторів, є резисторами *n*-типу. Їм властиві два основні недоліки, яких немає у резисторів *p*-типу.

По-перше, при даному значенні поверхневого опорю через вищу рухливість електронів шар з електропровідністю *n*-типу має меншу концентрацію домішки. Слабке легування викликає дещо велику неоднорідність поверхневого опорю і більший розкид номіналу.

По-друге, шар p -типу, що оточує резистор, сильніше схильний до виникнення поверхневих каналів, які викликають нелінійні ефекти. Метод усунення каналів в p - n - p -транзисторах приводить до зменшення цих ефектів, але при цьому потрібні додаткові процеси дифузії і велика площа підкладки. Один із способів вирішення цієї проблеми полягає в застосуванні суміщеної технології, коли на поверхні оксиду в схемах з p - n - p -транзисторами створюють тонкоплівкові резистори.

Топологія схеми залишається тією ж самою, але потребує застосування додаткових фотошаблонів. Оптимальним варіантом застосування напівпровідникових дифузійних резисторів є схеми, в яких важливо витримати співвідношення між номіналами опорів, тоді як абсолютні значення номіналів не дуже суттєві.

Дифузійні конденсатори. Конденсатори в напівпровідникових мікросхемах утворюються зворотно зміщеними p - n -переходами. Основна перевага дифузійних конденсаторів полягає в тому, що їх формують одночасно з отриманням дифузійних областей транзисторних структур, тому при раціонально виготовленому комплекті фотошаблонів не потрібно ніяких додаткових операцій створення пасивних елементів. Значення ємності залежить від типу електропровідності напівпровідникового матеріалу, площі переходу, характеру розподілення і концентрації домішки, а також полярності і зміщення. Залежність ємності дифузійних конденсаторів від прикладеної напруги дозволяє конструювати спеціальні мікросхеми, наприклад схему генератора, керованого напругою. Але у ряді випадків така залежність ємності від напруги небажана. Параметри типових дифузійних конденсаторів наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри типових дифузійних конденсаторів

Параметр	Значення
Питома ємність, $n\Phi/cm^2$	$1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$
Максимальна ємність, $n\Phi$	200
Розкид номіналу, %	$\pm(10 - 30)$
ТКС, $1/K$	$2 \cdot 10^{-4}$
Напруга пробою, B	30 – 100

6.4 Дефекти і методи контролю дифузійних структур

Реально одержувані дифузійні шари можуть мати електрофізичні властивості, що значно відрізняються від очікуваних. Ця невідповідність значною мірою обумовлена виникненням дефектів в дифузійних шарах в процесі дифузії.

Утворення дислокацій. Домішкові атоми, що входять в кристалічну ґратку напівпровідника, внаслідок відмінності в атомних радіусах викли-

кають стискування або розтягування ґраток. Під дією виникаючих напруг генеруються дислокації. Максимальна щільність домішкових атомів бору на поверхні пластини кремнію, яка не викликає напруг, рівних критичному значенню виникнення дислокацій, дорівнює $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Якщо дифузія бору проводиться при $T \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, то в поверхневий шар можуть проникати $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, якщо ж температура дифузії $T \approx 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, то ця кількість зростає до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Щільність дислокацій, що утворюються під час дифузії фосфору в кремнії, менша, оскільки менші значення створюваних фосфором напруг через більшу відповідність їх атомних радіусів. Внаслідок того, що концентрація домішки змінюється за глибиною дифузійного шару, змінюється і щільність дислокацій. Зазвичай область дислокацій не досягає *p-n*-переходів. Дифузанти, у яких відмінність в атомних радіусах менша, ніж у бору і кремнію або у фосфору і кремнію, утворюватимуть більш досконалі *p-n*-переходи. До таких дифузантів відносяться миш'як, галій і алюміній. Сильнолегований бездислокаційний шар можна одержати, якщо провести одночасно дифузію двох домішок, що мають протилежну відмінність в атомних радіусах.

Осадження домішок. Такі метали, як Cu, Au і Fe, характеризуються різкою температурною залежністю їх розчинності в твердому кремнії. Якщо не дотримуватись спеціальних запобіжних засобів, то з навколишньої атмосфери і дифузійної печі вони проникають в пластини кремнію. Їх коефіцієнти дифузії при процесах загонки і розгонки домішки складають 10^{-7} – $10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, тому за час витримки вони пронизують весь об'єм напівпровідника. При охолодженні в результаті перенасичення твердих розчинів цих атомів в кремнії дані домішки утворюють осадження у вигляді мікроскупчень. Переважне випадання їх відбувається на дефектах структури і в першу чергу на дислокаціях. Оскільки дислокації пронизують пластину наскрізь, то впоперек *p-n*-переходу виникають провідні металеві мікростіжки. Зворотний струм зростає із зростанням зворотної напруги за степеневим законом $I \sim U^n$, де найчастіше $n = 5 \pm 2$.

Гетерування. Видалення небажаних домішок з об'єму напівпровідника за допомогою рідкої фази, утвореної на його поверхні, називається *гетеруванням*. Витягання можливе тому, що коефіцієнт розподілу небажаних домішок Cu, Fe, Au в потрійних системах, утворених напівпровідником, цими домішками і розплавом, значно менший за одиницю. Завдяки цьому створюється значний градієнт концентрації домішкових атомів, які активно починають переходити в рідку фазу. Для гетерування міді з германію використовують покриття плівками сурми, олова, свинцю, індію. Такі метали, як мідь, золото і залізо, видаляють з кремнію за допомогою склоподібних оксидних шарів, що утворюються на поверхні кремнію при осаженні пари борного або фосфорного ангідриду. В результаті взаємодії кремнію або завжди присутньої на його поверхні плівки діоксиду кремнію з ангідридом виникають рідкі склоподібні розплави. Осажені в кремнії атоми Au, Cu, Fe дифундують до поверхні, переходять в шар скла,

утворюючи з ним хімічні сполуки типу фосфатів або борату. Температура обробки складає зазвичай 1050 °С.

Контроль параметрів дифузійних шарів складає основу отримання дифузійних структур високої якості. Основними контрольованими параметрами є глибина залягання дифузійного *p-n*-переходу x_j , поверхневий опір шару R_s і поверхнева концентрація домішки C_0 .

Вимірювання глибини залягання p-n-переходу. Внаслідок того, що дифузійні шари можуть бути дуже тонкими (порядку одиниць мікрометрів і менші), для їх контролю виготовляють сферичний шліф. Металева куля діаметром 30 – 100 мм обертається, торкаючись поверхні пластини. У місці зіткнення подається алмазна паста або оксид хрому. Лунка сферичної кривизни, що утворилася, повинна бути глибша за *p-n*-перехід, тоді після фарбування, якщо дифузійний шар має електропровідність *p*-типу, в лунці утворюється темне кільце. Фарбування *p*-області проводять в розчині, що складається з 0,05 – 0,1% азотної (70%-вої) кислоти в 48%-вій плавиковій кислоті. Виникаюче потемніння обумовлене утворенням оксиду кремнію унаслідок окислення *p*-області.

Вимірюючи за допомогою інструментального мікроскопа з мікрометричною насадкою більшою d_1 і меншою d_2 діаметри забарвленої області, знаходять глибину залягання *p-n*-переходу: $x_j = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4D}$, де D – діаметр кулі.

Глибину залягання *p-n*-переходу в напівпровідникових сполуках типу $A^{III}B^V$ і їх твердих розчинів визначають за допомогою виготовлення поперечних відколків.

Вимірювання поверхневого опору. Питомий опір легованого шару обернено пропорційний до вмісту домішки, тому, знаючи ρ , можна однозначно визначити концентрацію домішки в напівпровіднику. Поняття питомого опору для неоднорідного легованого дифузійного шару втрачає практичний сенс і не може слугувати точною характеристикою вмісту домішки. Рівень легування дифузійних шарів оцінюють, вимірюючи їх поверхневий опір, тобто поздовжній опір дифузійного шару.

Опір уздовж поверхні дифузійного шару залежить тільки від кількості домішкових атомів в шарі, а не від їх концентрації. Поверхневий опір визначається як опір дифузійного резистора, товщина якого рівна глибині залягання *p-n*-переходу x_j , а довжина і ширина дорівнюють один одному і утворюють квадрат зі стороною l . Опір такого паралелепіпеда (Ом/□)

$$R = \rho \frac{l}{lx_j} = \frac{\rho}{x_j} = R_s,$$

де ρ – середнє значення питомого опору дифузійного шару, яке не по-

трібно знати при вимірюванні R_s .

Поверхневий опір не залежить від сторони квадрата l , оскільки зростання R_s за рахунок збільшення довжини компенсується однаковим зменшенням R_s за рахунок збільшення ширини, тому опір квадрата відносять не до одиниці площі, а до довільного квадрата. Зрозуміло, що для вимірювання R_s слід пропустити струм через будь-які два протилежні перерізи lx шару і заміряти спад напруги на них. Це потребує виготовлення резисторів спеціальної конфігурації. Щоб не робити цього, вимірювання R_s проводять на будь-яких дифузійних шарах чотиризондовим методом.

Контрольні запитання

1. В чому полягають особливості дифузії в планарній технології?
2. Охарактеризуйте розподіл домішки при дифузії.
3. Як відбувається дифузія в планарній технології?
4. Вкажіть способи проведення дифузії.
5. Проаналізуйте відомі дифузанти.
6. Проаналізуйте дифузійні процеси при виготовленні ІМС.
7. Охарактеризуйте методи контролю дифузійних структур.
8. Які дефекти зустрічаються в дифузійних шарах в процесі дифузії?
9. Як визначається поверхневий опір дифузійного шару?
10. Як визначити глибину залягання p - n -переходу?

7 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДОМ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

Створення біполярних і МДН НВІС з хорошими техніко-економічними характеристиками неможливе без використання методу іонної імплантації, освоєного промисловістю в 70-і роки ХХ ст. Пучок позитивно заряджених домішкових іонів в іонно-променевому прискорювачі бомбардує кристал напівпровідника. Проникаючи в кристал, домішка легує його і одночасно викликає утворення радіаційних порушень. Розподіл концентрації упродовжених іонів описується кривою Гаусса, основним параметром якої є пробіг прискорених іонів. При малих дозах опромінювання радіаційні порушення не змінюють кристалічної структури напівпровідника, тоді як великі дози опромінювання домішковими атомами приводять до аморфізації кристала. Для усунення порушень і електричної активації прониклої домішки необхідний відпал кристала.

Найбільшого поширення іонна імплантація набула в технології загонок строго дозованої кількості домішкових атомів, яка використовується як джерело при подальшому дифузійному розгоні для формування домішкового профілю. Крім того, імплантація використовується для створення тонких базових областей біполярних транзисторів, управління пороговими напругами МДН-транзисторів і інших цілей. Для контролю іонно-імплантованих структур досліджують профілі розподілу упродовжених атомів, вимірюють ефективну поверхневу концентрацію носіїв заряду.

7.1 Технологічні особливості процесів іонної імплантації

Принцип дії і конструкція іонно-променевого прискорювача. Іонно-променевий прискорювач складається з таких основних блоків: джерела іонів, джерела високої напруги, прискорювальної трубки, магнітного сепаратора, системи фокусування і сканування пучка іонів, приймальної камери і вакуумної системи відкачування. Джерело іонів призначене для іонізації пари робочої речовини і первинного фокусування іонного пучка. Воно є газорозрядною камерою, при поданні газу або пари робочої речовини в яку відбувається іонізація молекул і атомів шляхом бомбардування електронами, що емітуються термокатодом. Поперечне магнітне поле в розрядній камері, що створюється системою магнітного сепаратора, викликає обертання електронів, що рухаються в ньому по спіралях, що збільшує ефективність іонізації. В іонно-променевих прискорювачах типу «Везувій» (рис. 7.1) передбачено два джерела іонів: для фосфору I_ϕ і для бору I_δ . Вони розрізняються способом подачі речовини. У джерело іонів бору поступає газ трифтористий бор BF_3 – з балона з мікронаповнювачем МН. Витрата газу контролюється автоматично. У джерело іонів фосфору подають

пари фосфору, що утворюються у випарнику з нагрівачем Н, в якого завантажують порошок червоного фосфору. В процесі імплантації функціонує тільки одне з іонних джерел.

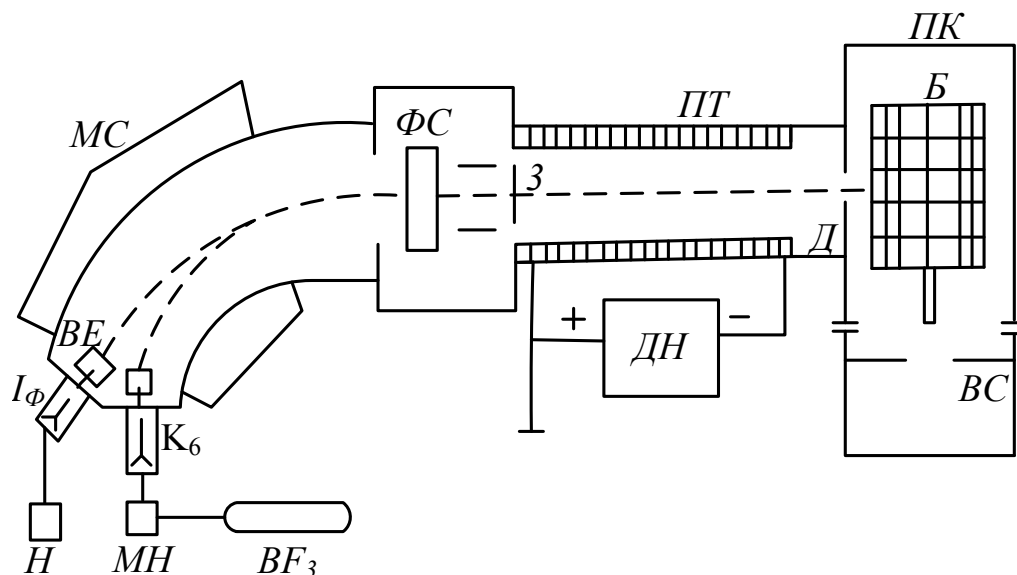


Рисунок 7.1 – Схема іонно-променевого прискорювача

Позитивні іони витягуються з розрядної камери невеликою прискорюючою напругою першого ступеня до 20 кВ, що подається на витягуючий електрод ВЕ. Формування іонного пучка проводять за допомогою магнітного сепаратора МС і системи фокусування і сканування ФС. Магнітний сепаратор призначений для розділення пучка іонів відповідно до їх заряду і маси, оскільки під дією сили Лоренца в області магнітного поля сепаратора іони рухаються по кругових траєкторіях, радіуси яких залежать від їх маси M_1 , прискорювальної напруги U і магнітної індукції B :

$$r = \sqrt{\frac{2M_1U}{qB^2}},$$

де q — заряд іона.

Після проходження магнітного сепаратора іони великих мас мають плавні траєкторії, іони менших мас – менший радіус повороту і різкі викривлення траєкторії. Магнітна система сепаратора виконана у вигляді постійного магніту, для якого $B = \text{const}$, тому, щоб вивести пучки іонів В+ і Р+ в систему фокусування і сканування, джерела іонів бору і фосфору розділяють, як показано на рис. 7.1.

Система фокусування і сканування формує іонний пучок і здійснює його сканування у вертикальній площині. До системи входить електростатична фокусувальна лінза і два електроди електростатичного сканування. Зміщення S пучка у вертикальній площині прямо пропорційне напрузі U_c

на електродах сканування:

$$S = \frac{U_c l L}{2dU},$$

де l – довжина скануючого електрода;

L – відстань від центра скануючого електрода до мішені;

d – відстань між електродами сканування по вертикалі;

U – прискорювальна напруга.

Між системою ФС і прискорювальною трубкою ПТ знаходиться заслонка З для автоматичного перекриття іонного пучка при наборі заданої дози.

Прискорювальна трубка складається з послідовності ізольованих електродів, між кожним з яких від джерела високовольтного живлення ДН прикладається напруга до 20 кВ так, що крайні електроди мають різницю потенціалів близько 200 кВ. Позитивний пучок іонів прискорюється у напрямку негативно зміщеного електрода.

Приймальна камера ПК слугує для завантаження оброблюваних напівпровідникових пластин, які розміщуються на касеті барабанного типа Б в декілька рядів. Вакуумна система ВС забезпечує розрідження $2 \cdot 10^{-3}$ Па. При опромінюванні іонний пучок сканує вздовж осі касети Б, яка обертається, що забезпечує високу однорідність легування. Перед касетою стоїть прямокутна діафрагма Д, яка задає висоту і ширину опромінюваної області. Час опромінювання $t(c)$ для набору дози Q ($Кл/м^2$) при щільності іонного струму ($A/м^2$) визначається співвідношенням

$$t = \frac{2\pi Q}{a j},$$

де a — виражений в радіанах кут, що визначається сектором кола барабана, на який потрапляє іонний пучок, що проходить через діафрагму заданої ширини.

Сектор тим більший, чим ширша діафрагма. Для набору малих доз ширину діафрагми зменшують, що веде до зменшення кута a і збільшенню тривалості опромінювання до декількох хвилин, що, у свою чергу, покращує точність контролю дози.

Речовини — джерело іонів. Робочі речовини для отримання іонів знаходяться в газоподібному, твердому та рідкому станах. Для отримання іонів O^+ N^+ Ne^+ , Ar^+ , F^+ Cl^+ і т. п. використовують відповідний газ, що поступає у вакуумну камеру джерела іонів крізь мікронакопичувач. З інших газоподібних матеріалів слід відзначити застосування VF_3 для іонів V^+ , CO_2 для іонів C^+ , H_2S для іонів S^+ . Широко застосовують рідкі речовини, особливо хлориди BCl_3 , BBr_3 , PCl_3 , CCl_4 , $SiCl_4$, які добре випаровуються при кімнатній температурі. Найбільші іонні струми зазвичай досягаються при вживанні твердих матеріалів в елементарному вигляді. Ці речовини потребують нагріву, щоб одержати достатній тиск пари: S і P (червоний) –

175 °C, As – 260 °C, Zn, Se і Ti – 550 °C, Mg і Sb – 580 °C. Можуть бути використані і інші речовини. Основна вимога до них – великий парціальний вміст легуючого елемента в парах. Внаслідок виділення ізотопної лінії легуючого елемента в аналізаторі мас, на відміну від інших методів легування напівпровідників, до робочих речовин не висувають жорстких вимог за чистотою.

Метод іонної імплантації є основним в планарній технології, що поєднує загонку домішок у вигляді дозованої кількості іонів і дифузійний розгін. Поєднання іонної імплантації з планарною технологією полегшується застосуванням тих же легуючих домішок і речовин для їх отримання, що і при дифузії: використанням тих же матеріалів для маскування при однаковій товщині, що ніяк не впливає на процес фотолітографії; можливістю управління дозами опромінювання в дуже широких межах (від 10^{10} до 10^{17} см^{-2}) при високій продуктивності.

Основні переваги методу іонної імплантації, на яких базується його використання в серійному виробництві, полягають в точному контролі повної кількості прониклої домішки і високої однорідності легування по поверхні пластини. Неоднорідність в розподілі щільності прониклої домішки по пластині з діаметрами 50 – 80 мм складає 1% або менше при відтворюваності результатів від процесу до процесу в межах 3%. Точність контролю на більшості технологічних операцій напівпровідникового виробництва не досягає 1 – 3% і коливається в межах 10 – 20%. Навіть в початкових кремнієвих пластинах розкид за концентрацією легуючої домішки досягає 30%. З цієї причини типова концентрація прониклої за допомогою іонної імплантації домішки повинна на порядок перевищувати початковий рівень легування кремнієвої пластини. Різко виражена перекомпенсація або перелегування (для однотипних за електропровідністю домішок) є необхідною умовою отримання точності, властивої методу іонної імплантації.

7.2 Використання процесів іонної імплантації в напівпровідниковій технології

Високий ступінь відпрацювання технологічних процесів іонної імплантації дозволяє істотно поліпшити параметри мікроелектронних засобів, їх відтворюваність, вихід придатних і знизити вартість виробів, що випускаються, а також створити нові типи приладів, отримання яких ускладнене або неможливе без застосування іонної імплантації. Найширше використовують імплантацію для введення легуючих домішок. Застосування імплантації в діапазонах енергій 30 – 300 *keV* і доз 10^{11} – 10^{17} см^{-2} дозволяє створити різні типи дискретних мікроелектронних засобів: біполярні транзистори і ІМС, НВЧ-транзистори, польові МДН-транзистори, лавинно-пролітні діоди, варікапи з різкою залежністю ємності від напруги, фотоприймачі і ін. Подальші перспективи розвитку мікроелектронних засобів пов'язані з субмікронною

технологією формування структур з розмірами елементів менше 1 мкм на базі електронної і рентгенівської літографії, яка також неможлива без використання іонної імплантації. Розглянемо основні напрями використання іонної імплантації в напівпровідниковому виробництві.

Біполярні транзистори. При виготовленні біполярних транзисторів іонну імплантацію застосовують для отримання емітера, бази, колектора, сильнолегованих областей для колекторного і базового контактів, роздільної дифузії, прихованих n^+ шарів і ін. Зміна дози опромінення при створенні бази дозволяє управляти коефіцієнтом передачі струму емітера, а зміна енергії іонів при формуванні профілю розподілу легуючої домішки в базі – регулювати її ширину і, тим самим, задавати частотні характеристики приладів. Для створення біполярних транзисторів з високим коефіцієнтом передачі струму застосовують два способи, які базуються на проникненні бору з невеликою дозою при високій енергії для формування p -базиса і проникненні миш'яку з високою дозою для отримання дрібного емітера. В першому випадку прагнуть зберегти незмінним профіль прониклої домішки і забезпечити високу електричну активність домішки в процесі відпалу емітерного шару при температурі 900 – 950 °C протягом 10 – 15 хв. У другому випадку використовують високотемпературний короточасний розгін емітерної домішки. Емітерний перехід розташовується в цьому випадку в матеріалі, не зачепленому імплантацією, де час життя носіїв заряду не зменшився внаслідок розупорядкування ґратки, тому ефективність емітера висока. Виготовлення структури біполярного транзистора починають зі створення області пасивної бази з допомогою дифузії бору. Використовуючи SiO_2 товщиною 1 мкм як захисну маску, проводять імплантацію іонів $^{75}\text{As}_2^+$ з енергією 100 кеВ та дозами $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Після випалювання при 1000 °C за час 20 – 30 хв миш'як дифундує на глибину 0,3 мкм, де утворюється емітерний p - n -перехід. Активна база формується імплантацією бору з енергією 200 кеВ і дозами $2 \cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в процесі подальшого відпалу при $T = 850 \text{ °C}$ за час $t = 20 \text{ хв}$. Оскільки середній нормальний пробіг іонів бору складає 725 нм, а стандартне відхилення пробігу 126 нм, то основна частина профілю розподілу бору розташовується за емітерним шаром в глибині кристала. При оптимальному поєднанні параметрів таким способом виготовляють транзистори з коефіцієнтами посилення за струмом 100 – 300 і граничними частотами 1 – 8 ГГц.

МДН-транзистори. Одне з перших практичних застосувань технології іонної імплантації в промисловому виробництві, що показало її високу ефективність, пов'язане з МДН-транзисторами. Використання імплантації забезпечує високу однорідність і відтворюваність параметрів транзисторів і дозволяє значно збільшити відсоток виходу придатних транзисторів. Застосування імплантації підвищує надійність МДН-транзисторів, що досягається збільшенням товщини оксиду, підзатвора, і подальшим зниженням порогової напруги до необхідного значення шляхом проникнення легуючих іонів через оксид. Для забезпечення надійності і достатньої крутизни

вольт-амперної характеристики МДН-транзисторів оптимальною є товщина оксиду, підзатвора, 0,1 – 0,15 мкм.

Одним з найважливіших застосувань іонної імплантації є управління концентрацією легуючої домішки з метою зміщення порогової напруги. Управління значенням порогової напруги за допомогою іонної імплантації зводиться до зміни поверхневого заряду МДН-транзистора. Домішки, що вводяться в область, що примикає до межі поділу діоксид – кремній, зменшують або збільшують заряд поверхневих станів і відповідно підвищують або знижують порогову напругу при даній товщині діелектричної плівки. Перевага цього методу в тому, що він дозволяє регулювати порогову напругу структур при роботі в режимі збіднення і збагачення без істотної зміни інших параметрів приладу. В цій ролі метод іонної імплантації забезпечив не тільки кращу конструкцію МДН-транзисторів і ІМС, але і виявився легко сумісним зі стандартною МДН-технологією. Основні напрямки використання іонної імплантації при виготовленні МДН-транзисторів показано на рис 7.3.

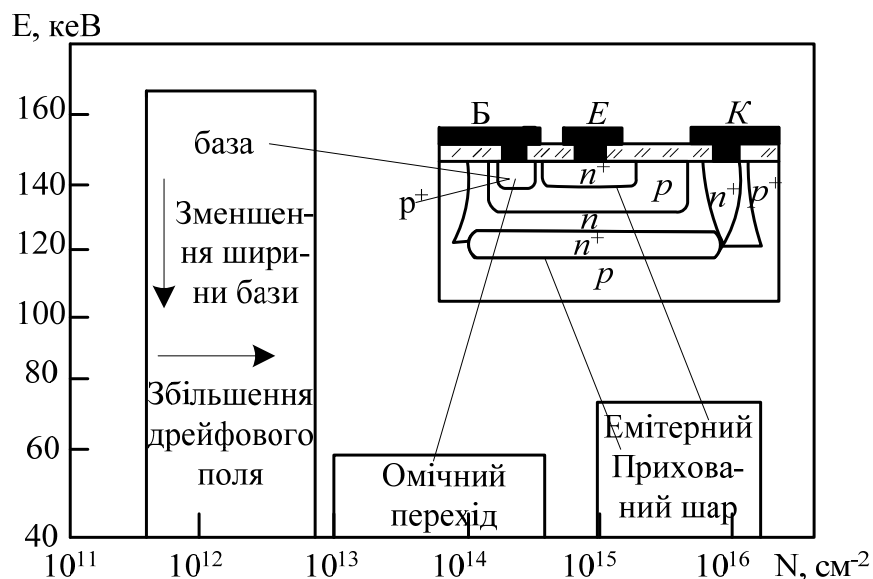


Рисунок 7.2 – Діапазон доз та енергій іонів, використовуваних при виготовленні біполярних транзисторів

Щоб індукувати або збагатити провідний канал між електродами виток і стоку, потенціал затвора повинен перевищувати порогову напругу. Типове значення порогової напруги для кремнієвого МДН-транзистора з каналом р-типу з алюмінієвим затвором дорівнює -2 В при поверхневому заряді в діелектрику затвора $2 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$, $C_v = 10^{15}\text{ см}^{-3}$ і товщині діоксиду затвора 0,1 мкм. Порогову напругу зазвичай регулюють зміною значень зарядів в діелектрику затвора і об'ємного заряду в підкладці.

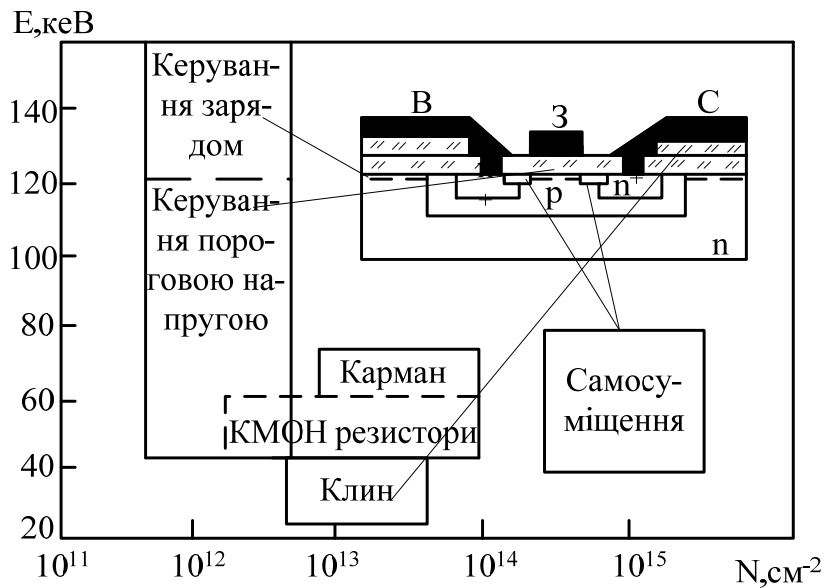


Рисунок 7.3 – Діапазони доз та енергій іонів, використовуваних при виготовленні МДН-транзисторів

Задане значення порогової напруги досягають, використовуючи профілі розподілу прониклих іонів для управління об'ємним зарядом в підкладці. Ступінь легування підкладки під електродом затвора залежить від розподілу прониклих іонів по глибині. Імплантацію бору проводять через тонку плівку діоксиду підзатвора, при енергії 30 – 50 кеВ, яка недостатня для проникнення через товстий оксид, що покриває решту ділянок пластини. Для відпалу радіаційних порушень і активації домішки застосовують нагрівання до 900 °С протягом декількох хвилин. Іноді виявляється достатнім нагрівання до 400 – 500 °С, виконане після нанесення металізації.

Відхилення в ступені легування підкладки приводять до втрати управління пороговою напругою. Один зі способів поліпшення управління пороговою напругою полягає у проникненні іонів з достатньо високою дозою в слабологовану підкладку. Тоді порогова напруга визначається не питомим опором підкладки, а концентрацією домішок, введених імплантацією. Іони бору, прониклі в підкладки *n*-типу з питомим опором $p = 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, ефективно зменшують щільність об'ємного заряду в каналах *p*-типу, що веде до зміни порогових напруг від $-2,5 \text{ В}$ без імплантації бору до $+3 \text{ В}$ при дозі опромінення 10^{12} см^{-2} . Для МДН-транзисторів з каналами *n*-типу аналогічна імплантація приводить до зміни порогових напруг від $-0,5 \text{ В}$ до $+2 \text{ В}$ при тому ж значенні питомого опору підкладки *p*-типу. При дозах понад $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в МДН-транзисторах з індукованими *p*-каналами утворюється вбудований *p*-канал і прилади працюють в режимі збіднення, а не збагачення. Іонне проникнення бору в підкладки *p*-типу або фосфору в підкладки *n*-типу приводить до підвищення порогової напруги для приладів, що працюють в режимі збагачення.

Резистори. Леговані шари, одержані після імплантації і відпалу, по су-

ті є готовими резистивними елементами з високою однорідністю поверхневого опору. Змінюючи дозу опромінення і температуру відпалу, управляють поверхневим опором резистивного шару від $10 \text{ Ом}/\square$ до $100 \text{ кОм}/\square$. Технологія виготовлення резисторів сумісна з біполярною технологією транзисторів і ІМС. Формування резисторів часто суміщають з формуванням базової області або емітерного шару. Конфігурація резистора задається топологією вікон, що розкриваються в діоксиді кремнію, а захисною маскою слугує діоксид або фоторезист. Контактні площадки створюють дифузійним методом перед імплантацією. Однорідність за опором резисторів вдається підвищити таким чином, що обмежуючим чинником стає допуск на фотолітографію.

Формування лінійних профілів. В деяких випадках перед технологом або конструктором стоїть завдання отримання лінійного профілю розподілу домішки на порівняно великій глибині. Для отримання заданого профілю розподілу домішки використовують багатократну імплантацію з декількома дозами і енергіями. Це дозволяє одержувати однорідні, а також рівномірно зростаючі або спадні профілі. Вибір енергій і доз проводять за допомогою моделювання сумарного профілю на ЕОМ. Спочатку встановлюють необхідну енергію іонів відповідно до потрібної глибини і дозу, що забезпечує потрібну концентрацію на цій глибині. Потім проводять підбір доз опромінення при різних енергіях іонів так, щоб сумарний профіль не виходив за межі допустимого розкиду концентрації.

Легування атомами віддачі. Імплантація атомів віддачі з плівок, що знаходяться на поверхні, в підкладки при бомбардуванні іонами інертних газів є перспективним методом отримання надтонких сильнолегованих шарів кремнію, необхідних для багатьох типів мікроелектронних засобів, в першу чергу НВЧ-діапазону. Атоми віддачі можуть одержувати достатньо високу енергію від прискорених іонів і переміщатися на відстань в декілька нанометрів. Особливо важливий такий спосіб легування для домішок з великою атомною масою, таких, як In, Sb або Bi. На поверхню пластини наносять тонкий шар легуючої домішки, який бомбардують потоком іонів. Згідно з теоретичним оцінюванням, потік атомів віддачі через поверхню поділу плівка – підкладка пропорційний щільності пружних втрат енергії бомбардуючих частинок поблизу цієї поверхні, якщо товщина плівки порівнянна з пробігом частинок. Якщо плівки тонші або енергії частинок вищі, то потік пропорційний перетину ядерного гальмування цих частинок в плівці. Для отримання найбільшого виходу атомів віддачі товщина плівки повинна дорівнювати положенню максимуму залежності пружних втрат енергії від глибини пробігу іонів. Збільшення дози опромінення приводить до зниження виходу атомів віддачі, що пов'язано з розпилюванням плівки легуючої речовини. При дозах більших 10^{16} см^{-2} вихід атомів віддачі стає менше одиниці, оскільки в приміжовому шарі відбувається сильне перемішування атомів підкладки і плівки і різка межа між ними зникає.

Каскадне перемішування. При проникненні прискореного іона в крист-

тал утворюються каскади зміщень, в яких відбувається неупорядковане переміщення атомів. Якщо опромінюється структура, що складається з тонкої металевої плівки, розташованої на поверхні напівпровідникової пластини при відповідному виборі енергії іонів і дози опромінення, відбувається не тільки легування атомами віддачі, але і активне переміщення атомів плівки в підкладку, а атомів підкладки в плівку. Цей процес називають атомним або каскадним перемішуванням. Його використовують для створення омічних переходів з низьким опором, що не потребують для свого створення високої температури відпалу. Одним з матеріалів контакту є силіцид молібдену, що утворюється при каскадному перемішуванні в системі молібден – кремній. Якщо використовувати для бомбардування іони інертного газу, то в області контакту утворюються газові порожнини, які погіршують надійність контакту. Тому для перемішування доцільніше використовувати іони легуючих домішок (В, Р, Аs), тоді одночасно з формуванням силіциду молібдену відбувається додаткове легування підкладки. Для ефективного перемішування вибір енергії визначається тією ж вимогою, що і легування атомами віддачі, яке має вигляд $R_p \approx h$, де h – товщина плівки тугоплавкого металу (молібдену). Доза опромінення повинна бути достатньо високою, щоб змістилася велика кількість атомів. Для утворення силіциду молібдену $MoSi_2$ необхідні доза $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$ і енергія $\sim 250 \text{ кеВ}$. При дозах 10^{15} см^{-2} силіцид не утворюється. Каскадне перемішування використовують також для формування контактів на базі Pd, Ni, Pt, Nb і Au. Перевага використання каскадного перемішування перед термічним випаровуванням у вакуумі полягає в зниженні температури нагріву. Оскільки тугоплавкі метали потребують високих температур нагріву підкладок при їх нанесенні, то це викликає появу термомеханічних напруг і обумовлює низьку надійність контакту.

Формування ізолюючих плівок. Завдяки точному управлінню кількістю введених домішок метод іонної імплантації дозволяє формувати ізолюючі плівки SiP_2 , Si_3N_4 . Принциповим обмеженням є мала товщина шару, в якому утворюється плівка даного складу. Вона обмежена пробігом іонів і зазвичай не перевищує $2R_p$. Практично виявилось, що для формування ізолюючої плівки немає потреби точно витримувати стехіометричний склад діоксиду або нітриду кремнію. Тому дози опромінювання кремнію іонами O_2^+ або N_2^+ складають $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при енергіях 30 – 100 кеВ. Після опромінення проводять відпал структур при 800 °С для поліпшення структури плівки і шару кремнію, що лежить під нею.

7.3 Методи контролю іонно-імплантованих структур

Методи контролю іонно-імплантованих структур направлені на виявлення особливостей поведінки прониклих атомів домішок в утворення радіаційних порушень.

Дослідження розподілу концентрації носіїв заряду по глибині легувано-

го шару. Це дослідження проводять шляхом вимірювання коефіцієнта Холла і видалення тонких шарів. Тонкі шари кремнію видаляють за допомогою анодного оксидування і розчинення оксидної плівки в плавиковій кислоті. Електроліт для оксидування складається з 498 г етиленгліколю і 2 г азотнокислого калію. Кремнієвий зразок є анодом. Анодна напруга складає 100 – 250 В, анодний струм в початковий момент підвищується до 100 мА, а до кінця процесу спадає до 1 – 2 мА при площі зразка $\sim 1 \text{ см}^2$. Товщину оксидної плівки визначають на лазерному еліпсометричному мікроскопі або за кольорами інтерференції. Товщину видаленого шару кремнію розраховують на підставі масової частки кремнію в діоксиді кремнію:

$$M_{\text{Si}} : M_{\text{SiO}_2} = \Delta x : \Delta_{\text{SiO}_2} = 28 : 60 = 0,465.$$

Товщина шару кремнію, що видаляється, лінійно пов'язана з анодною напругою і для вказаних режимів справедливе співвідношення $\Delta x = KU$, де $K = 0,2 \text{ нм/В}$.

Шари з неоднорідним розподілом домішок характеризуються поверхневим коефіцієнтом Холла R_{hs} , що включає усереднювання напруги Холла за товщиною всього шару X_j . Створення середньої концентрації носіїв заряду в шарі \bar{C} на товщину шару дорівнює кількості носіїв, які розміщені під одиницею площі легованого шару $N_s(\text{см}^{-2})$. Цю величину називають ефективною поверхневою концентрацією носіїв заряду:

$$N_s = \bar{C}x_j.$$

Поверхневий коефіцієнт Холла пов'язаний з N виразом

$$N_s = r / (eR_{HS}),$$

де $r = \mu_n/\mu$ – фактор Холла, співвідношення холловської та дрейфової рухливостей.

Оскільки точне значення фактора Холла зазвичай невідоме, то для іонно-імплантованих шарів його приймають рівним 1. Це може привести до помилки в розрахунку N_s на 20 – 30% у бік заниження дійсних значень за електронами і завищення за дірками. Пластини для холловських вимірювань можуть бути довільної форми. Дві пари протилежних контактів наносять по краях зразка і позначають по порядку номерами 1, 2, 3, 4. Поверхнева стала Холла R_{HS} ($\text{см}^2/\text{Кл}$) визначається за зміною напруги $\Delta U_{13(B)}$ при протіканні струму I_{24} (А) і накладанні магнітного поля B (Тл), перпендикулярного до площини зразка:

$$R_{HS} = 10^4 \Delta U_{13} / (BI_{24}).$$

Визначивши коефіцієнт Холла, знаходять ефективну поверхневу концентрацію:

$$N_s = 6,25 \cdot 10^{18} / R_{HS}.$$

Потім видаляють тонкий шар легованого кремнію і знову вимірюють N_s . Цю процедуру повторюють багато разів. Концентрацію носіїв в i -му видаленому шарі $C_i, (см^{-3})$ товщиною Δx знаходять із співвідношення:

$$eC_i \mu_i \Delta x = \sigma_{Si} - \sigma_{S(i+1)},$$

звідки

$$C_i = \frac{\Delta \sigma_{Si}}{e \mu_i \Delta x}.$$

Мас-спектроскопія вторинних іонів (ВІМС). Цей метод дозволяє визначати профілі розподілу прониклих іонів по глибині легованого шару. При використанні ВІМС зразок безперервно розсіюють пучком іонів аргону. Вторинні іони домішкових атомів проходять через мас-сепаратор. Іонний струм, що одержується на виході реєструвальної системи, пропорційний концентрації домішки в даному атомному шарі напівпровідника, що розпилюється, а час розпилювання пропорційний його глибині, тому крива $i(t)$ пропорційна кривій $C(x)$.

Чутливість установки залежить від типу домішки, але для всіх іонів лежить на рівні $10^{16} см^{-3}$. Енергія первинного пучка іонів аргону може регулюватися в межах 3 – 6 кеВ. Типове значення швидкості розпилювання кремнію складає 0,6 нм/с. Для калібрування одержаної кривої $i(t)$ в залежність $C(x)$ вважають, що крива розподілу – гауссіана, тому доза іонної імплантації відповідає площі, створеній під кривою $i(t)$, і максимальна концентрація:

$$C_{\max} = \frac{0,94N}{\omega},$$

де ω – повна ширина кривої Гаусса на рівні $C = 0,5 C_{\max}$.

Спектроскопія оже-електронів (СОЕ). Метод спектроскопії оже-електронів дає інформацію про склад і вміст домішок в приповерхневих шарах кристалів і аморфних тіл з товщинами від 0,3 до 3 нм. Ідентифікуються всі елементи, за винятком водню і гелію. При збудженні внутрішніх оболонок атомів пучком прискорених електронів спостерігається безвипромінювальний процес випускання вторинних електронів, виявлений

в 1925 р. Якщо первинні електрони, що падають на зразок, іонізують внутрішній К-рівень і дірку, що виникла на цьому рівні, заповнює електрон з вищого рівня L_1 , то енергія, що виділяється при такому переході $L_1 - K$, може бути передана електрону на рівні L_2 . Енергія достатньо велика, щоб перевести електрон з рівня L_2 у вакуум. Такий електрон, що пішов з рівня L_2 , називають *оже-електроном*. В результаті випускання оже-електронів атом опиняється в двократно іонізованому стані. При достатньо високій чутливості детектора вторинних електронів на кривій розподілу вторинних електронів за енергіями дозволено декілька піків, частина яких характеризує енергію оже-електронів, що випускаються. Енергія оже-електронів не залежить від енергії первинних електронів. За значенням енергії, яка відповідає піку оже-електронів, що випускаються, ідентифікують елемент, а за інтенсивністю випускання визначають концентрацію аналізованих атомів.

Контрольні запитання

1. В чому полягають технологічні особливості процесів іонної імплантації?
2. Поясніть принцип дії іонно-променевого прискорювача.
3. Для чого застосовують іонну імплантацію при виготовленні біполярних транзисторів?
4. Проаналізуйте застосування іонної імплантації при виготовленні МДН-транзисторів.
5. Як можна отримати лінійний профіль розподілу домішки на порівняно великій глибині?
6. Які особливості застосування методу іонної імплантації для формування ізолюючих плівок SiP_2 , Si_3N_4 ?
7. Охарактеризуйте методи контролю іонно-імплантованих структур.
8. Що таке спектроскопія оже-електронів?
9. Поясніть метод мас-спектроскопії вторинних іонів.
10. Як проводять дослідження розподілу концентрації носіїв заряду за глибиною легованого шару?

8 ОТРИМАННЯ СТРУКТУР МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ВИПАРОВУВАННЯ ТА ІОННО-ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЮВАННЯ

Важливе місце в напівпровідниковій технології займають процеси, пов'язані з нанесенням на поверхні структур тонкоплівкових покриттів і їх видаленням у вакуумі. Ці процеси базуються на молекулярно-кінетичних явищах в розріджених газах. Існує два основні методи осадження тонких плівок: термічним випаровуванням і катодним розпилюванням. При термічному випаровуванні осаджується речовина нагрівається до температури випаровування і його пари конденсуються на підкладці. При катодному розпилюванні осаджується речовина знаходиться при кімнатній температурі і бомбардується низькоенергетичними іонами з плазми газового розряду. Розпилені атоми досягають підкладки і конденсуються на ній. Обидва методи використовують для осадження провідних, резистивних і діелектричних плівок. Якість тонкоплівкових покриттів багато в чому залежить від глибини вакууму в робочій камері і співвідношення потоків молекул залишкового газу і випаровуваної речовини на поверхню підкладок. При термічному випаровуванні елементів і сплавів використовують однотигельні і багатотигельні способи. Удосконаленням катодного розпилювання є метод іонно-плазмового розпилювання і його модифікації, які складають основу технології «сухої» обробки напівпровідникових структур, що дозволяє виключити застосування рідких хімічних травників і розчинників при обробці та фотолітографії тонкоплівкових покриттів. При виготовленні ІМС термічне випаровування і іонно-плазмові процеси використовують для створення омичних переходів, пасивних елементів тонкоплівкових схем, міжелементної ізоляції і комутації. Для оцінювання якості тонкоплівкових покриттів контролюють їх товщину і структуру.

8.1 Технологічні особливості термічного випаровування матеріалів

Термічне випаровування проводять в глибокому вакуумі, тому технологічний процес в першу чергу визначається конструкцією вакуумного устаткування. На рис. 8.1 показано схему вакуумної системи напилювальної установки. Вона включає робочу камеру 1 ковпакового типу з об'ємом до $0,5 \text{ м}^3$, в якій розміщуються напівпровідникові структури 2 на планетарному, карусельному або барабанному утримувачі, випарник 4 і заслінка 3. Вимірювання тиску до 10^{-1} Па проводять термодинамічним манометром, а нижче 10^{-1} Па — іонізаційним, які об'єднані в одному приладі 5.

Попередній вакуум досягається за допомогою форвакуумного насоса 9 установки для напилення при закритому клапані 12 дифузійного насоса 11 і закритому крані 10. Крани 8 і 7 відкриті. Після досягнення тиску $\sim 10 \text{ Па}$ кран 7 закривають і відкривають кран 10 і клапан 12, внаслідок чого здійснюється відкачування дифузійним насосом. У разі аварійного відключення

форвакуумного насоса спрацьовує електромагнітний клапан 8, оберігаючи систему від натікання в неї атмосферного повітря через непрацюючий форвакуумний насос. Для конденсації парів масла і залишкових газів слугує пастка 6, наповнювана рідким азотом. В наш час широко використовують безмасляне відкачування із застосуванням турбомолекулярних і гетероіонних насосів, дозволяючи досягати розрідження до 10^{-9} Па.

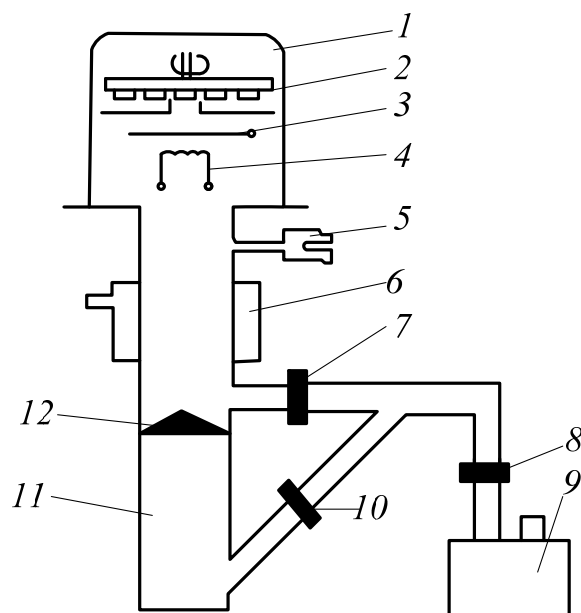


Рисунок 8.1 – Схема вакуумної установки для напилення

Типи випарників. Термічне випаровування матеріалів проводять з випарників непрямого підігріву – дротяних (W ; Ta), стрічкових (Mo , Ta) або тигельних (кварц, графіт, скло-графіт, кераміка). Ці матеріали слабо взаємодіють з багатьма випаровуваними речовинами і не забруднюють молекулярний потік. Форма випарників залежить від агрегатного стану випаровуваного матеріалу. Порошкоподібні речовини випаровують з тиглів і човників, що особливо зручно для незмочуваних матеріалів. Для випаровування грубозернистих порошків використовують дротяні спіральні конічні випарники. Якщо випаровуваний метал належить до змочувального металу, то застосовують стрічкові або спіральні дротяні випарники. Метал навішують на них у вигляді гусариків або навивають тонкою дротяною спіраллю. Підкладки зазвичай розташовують над випарником, що запобігає випадковому попаданню на них крапель розплавленої речовини. Заслінка 3 (рис. 8.1) відіграє важливу технологічну роль, оскільки дозволяє точно контролювати тривалість процесу осадження покриття і перешкоджає попаданню на підкладки летких забруднень, що містяться у випаровуваній речовині, в початковий момент випаровування. Для утворення рівномірного за товщиною покриття карусель і підкладки на ній обертаються над випарником.

8.2 Катодне розпилювання матеріалів

Тліючий розряд. Для утворення іонів, використовуваних при бомбардуванні поверхні розпилювальної мішені, між анодом і катодом у вакуумній камері створюють тліючий розряд. Він характеризується наявністю двох основних областей: невеликої за протяжністю прикатодної, в якій зосереджений основний спад потенціалу, називають катодним спадом потенціалу, та області стовпця розряду, що являє собою сильно іонізований газ – плазму з високою провідністю і тому з малим спадом потенціалу. При зближенні електродів анода і катода в першу чергу зменшується протяжність позитивного стовпця розряду. Електрони можуть виходити з катода під дією фотоемісії. Для збільшення щільності емісії електронів застосовують термоемісійні катоди. У сильному електричному полі катодного спаду потенціалу електрони набирають енергію, яка визначається напруженістю електричного поля і рухливістю електронів в даній області. Збудження молекул газу при зіткненні з електронами викликає появу світіння, а іонізація приводить до утворення позитивних іонів газу. Іони спрямовуються до мішені, на яку поданий негативний потенціал щодо плазми розряду, і розпилюють її.

Механізм розпилювання. Явище фізичного розпилювання обумовлене передачею прискореним іоном атому мішені енергії, що перевищує порогову енергію зміщення, подальшим переміщенням атома в напрямку до поверхні мішені і вилітанням з неї. Основним механізмом катодного розпилювання є процес передачі імпульсу або шляхом безпосереднього зіткнення прискореного іона з атомом мішені, або шляхом ряду вторинних зіткнень, первинно зміщених атомів. Вочевидь, що при нормальному падінні іонного пучка на мішень розпилювання може відбуватися тільки при послідовних вторинних зіткненнях. Фізичне розпилювання речовини кількісно характеризується коефіцієнтом розпилювання K (*ат/іон*) – кількістю атомів, що вибиваються з мішені одним падаючим на неї іоном. Коефіцієнт розпилення є величиною статистичною і визначається інтегральним співвідношенням:

$$K = N_p / N,$$

де N_p – кількість атомів мішені, які розпилені з одиниці поверхні при опроміненні її потоком іонів з дозою N .

8.3 Технологічні особливості іонно-плазмового розпилювання

Класифікація процесів іонно-плазмового розпилювання. У напівпровідниковій технології широке практичне застосування одержали дві основні групи процесів іонно-плазмового розпилювання: іонне травлення – розпилювання речовини під дією іонізованих атомів газу і плазмохімічне трав-

лення – видалення речовини за допомогою хімічних реакцій, що протікають між іонами активного газу і даною речовиною. Розрізняють іонно-променеє травлення, яке здійснюється бомбардуванням зразка пучком прискорених іонів, сформованим в автономному іонному джерелі, та іонно-плазмове травлення, при якому зразок є одним з електродів в розрядній камері і бомбардується іонами, що витягуються з плазми розряду. Плазмо-хімічне травлення відрізняється від іонно-плазмового в основному застосуванням хімічно активного газу, що створює при взаємодії із розпилювальним зразком, леткі з'єднання.

Процеси іонно-плазмового травлення застосовують для обробки металів, діелектриків і напівпровідників на етапах створення металізації і міжелементної ізоляції ІМС, для формування вікон у фоторезисті і діелектрику, для очищення і виявлення структури поверхні монокристалів.

Методи іонно-плазмового розпилювання дозволяють наносити і синтезувати тонкоплівкові покриття з металів і діелектриків. В останньому випадку особливе значення має реактивне розпилювання, назване так у зв'язку з протіканням хімічних реакцій між розпиленими атомами речовини і іонізованим газом, в результаті яких на підкладці відбувається осадження хімічної сполуки.

За методом створення і особливостями підтримки електричного розряду в камері виділяють високочастотне розпилювання – при якому до мішені підводиться напруга високої частоти і магнетронне розпилювання – при якому плазма розряду знаходиться в магнітному полі. За кількістю електродів, розташованих в робочій камері розпилювальних систем, їх поділяють на діодні, тріодні, тетродні та багатоелектродні.

Процеси сухої обробки. Методи іонно-плазмового розпилення складають основу «сухого» технологічного процесу створення мікроелектронних засобів, що дозволяє відмовитися від традиційних процесів хімічної обробки в рідких кислотах, електролітах, розчинниках. Рідинне хімічне травлення із застосуванням фотолітографічних масок, що є головним методом обробки структур ІМС, має ряд недоліків. Підтравлювання матеріалу під маскою з фоторезисту обмежує точність передачі топології мікросхеми і здатність її відтворення. Переважне травлення вздовж меж зерен і мікродефектів тонкоплівкових матеріалів приводить до великої нерівності країв мікробразень. Необхідність ретельних промивок для видалення слідів травників потребує введення додаткових операцій.

На відміну від рідинного хімічного травлення методи іонно-плазмового розпилювання забезпечують такий режим, при якому іони бомбардують структуру перпендикулярно до поверхні пластини, що виключає підтравлення під маскою, забезпечує отримання чітких країв елементів ІМС, не потребує високої адгезії маскувальних матеріалів. Після іонно-плазмового травлення не потрібні допоміжні операції очищення, промивання і сушіння оброблених структур. До недоліків методів іонно-плазмового розпилювання відносять порівняно малу швидкість процесу, явище «замерзання»

фотолітографічних масок, внаслідок дії енергії бомбардуючих їх іонів, що викликає значні труднощі при подальшому видаленні маски. Радіаційні пошкодження, що утворюються, можуть впливати на параметри напівпровідникових структур, зокрема змінюють заряд в діоксиді кремнію МДН-транзисторів.

Високочастотне діодне розпилювання. Технологічні можливості процесів іонноплазмового розпилювання визначаються конструктивними особливостями технологічного устаткування. Конструкція установки, вигляд і параметри газового розряду задають швидкість та роздільну здатність розпилювання, а також ступінь керованості процесу. Широке застосування одержали діодні ВЧ-системи і системи з автономними іонними джерелами, які дозволяють проводити обробку будь-яких матеріалів на великій площі.

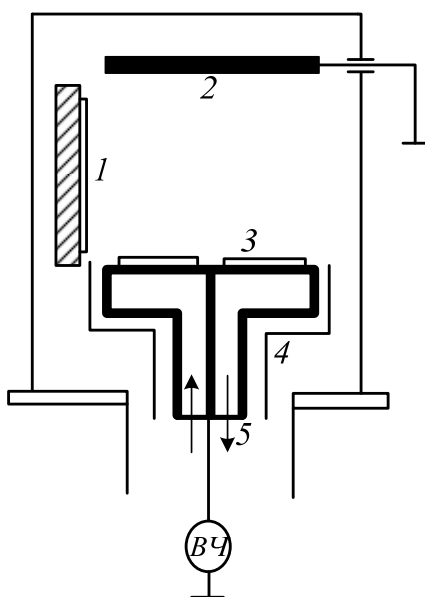


Рисунок 8.2 – Діодна ВЧ-система для іонно-плазмового розпилення:

- 1 – підкладкотримач; 2 – анод; 3 – мішень з пластинами;
4 – екран; 5 – охолодна вода

Діодна ВЧ-система (рис. 8.2) містить два електроди: заземлений анод і мішень (катод), на яку розташовують оброблювані пластини і подають напругу від ВЧ-генератора. Діодна ВЧ-система дозволяє проводити розпилювання металів, напівпровідників, діелектриків, органічних покриттів. Промислові ВЧ-генератори, використовувані в установках травлення, працюють на частотах 1,76; 5,28; 13,56 МГц. Тиск робочого газу 0,5 – 5 Па, потужність розряду 1 – 2 кВт, амплітуда ВЧ-напруги 0,8 – 4 кВ, радіус оброблюваної мішені до 20 см, відстань між анодом і мішенню 4 – 8 см. При подачі на пластини ВЧ-напруги через відмінності в швидкостях електронів і іонів в розряді під час позитивного півперіоду на зразки переходить більше електронів, ніж іонів під час негативного півперіоду. Тому мішень має ефективний негативний заряд, що дозволяє (на відміну від діодної системи на постійному струмі) проводити розпилювання діелектриків. При використанні

постійного струму позитивний заряд на діелектрику перешкоджає подальшому бомбардуванню. В діодній системі мішень є не тільки електродом, що підтримує розряд, але і джерелом розпилювання. Таке поєднання функцій обмежує керованість процесом плазмового травлення, оскільки зміна швидкості травлення повинна враховувати можливість підтримки розряду. Швидкість розпилювання в цих системах зазвичай відносять до щільності потужності іонного струму на мішень. Для осадження тонких плівок з матеріалу мішені, в камеру поміщають підкладкотримач, на який не подається потенціал. Атоми мішені, які розпилені, осідають на підкладках, закріплених на тримачі, і утворюють тонку плівку. Швидкість осадження приблизно дорівнює швидкості розпилювання мішені.

8.4 Пасивні елементи інтегральних мікросхем

При виготовленні інтегральних мікросхем як пасивні елементи широко використовують тонкоплівкові резистори і конденсатори. Велике значення при виготовленні тонкоплівкових елементів має вибір підкладки. Основними матеріалами для підкладок плівкових мікросхем є склокерамічні матеріали – ситал і фотоситал. У напівпровідникових мікросхемах пасивні елементи створюються на пластині кремнію.

Тонкоплівкові резистори. Тонкі резистивні плівки напильють у вакуумі на підкладки і за допомогою фотолітографії надають їм вигляду смужок різної конфігурації, обмежених з обох кінців контактними площадками. Тонкоплівкові резистори прийнято характеризувати поверхневим опором, який визначається, як і для дифузійних шарів, опором квадрата тонкоплівкового матеріалу, до двох протилежних сторін якого підведено контактні виводи. Опір плівки R протяжністю l , перерізом $h\omega$ і питомим опором ρ

$$R = \frac{\rho l}{h\omega} = \frac{R_s l}{\omega},$$

де h – товщина плівки;

$$R_s = \frac{\rho}{h} \text{ – поверхневий опір, Ом/}\square\text{.}$$

Для квадрата $l=\omega$ і $R=R_s$, тобто опір не залежить від розміру сторони квадрата і дорівнює поверхневому опору.

Опір резистора залежить від його форми. Якщо довжина резистора в 10 разів більша ширини, то це еквівалентно тому, що резистор складений з десяти послідовно з'єднаних квадратів і його опір в 10 разів більший за поверхневий.

Таким чином, один і той же номінал опору можна одержати при різних значеннях l і ω , якщо $l/\omega = \text{const}$. Мінімальну довжину і ширину резистора обчислюють за заданим номіналом R , поверхневим опором, потужністю розсіювання P і допустимою потужністю розсіювання P_d :

$$\omega = \sqrt{\frac{PR_s}{P_d R}}, \quad l = \sqrt{\frac{PR}{P_d R_s}} \quad \text{або} \quad l = \frac{\omega R}{R_s}.$$

Конфігурація резистивних елементів буває лінійною і зигзагоподібною (рис. 8.3) залежно від номіналу. При розрахунку номіналів зигзагоподібних резисторів слід враховувати, що опори кутових квадратів складають 0,55 від опорів квадратів, що входять в лінійні гілки резистора. Матеріали, використовувані для отримання резистивних плівок, повинні забезпечувати широкий діапазон опорів з низьким ТКО і високою стабільністю в часі. Значення R_s і ТКО сильно залежать від методу нанесення плівки, режиму її обробки і інших, технологічних чинників. Питомий опір плівки залежить від її структури і складу, які змінюються при напиленні і термообробці. При малій товщині плівки ці властивості залежать від характеру мікронерівностей поверхні підкладки. Можуть спостерігатися порушення безперервності структури плівки, що викликає нестабільність опорів. Тому доцільно використовувати плівки такої товщини, при якій істотно позначаються її об'ємні властивості.

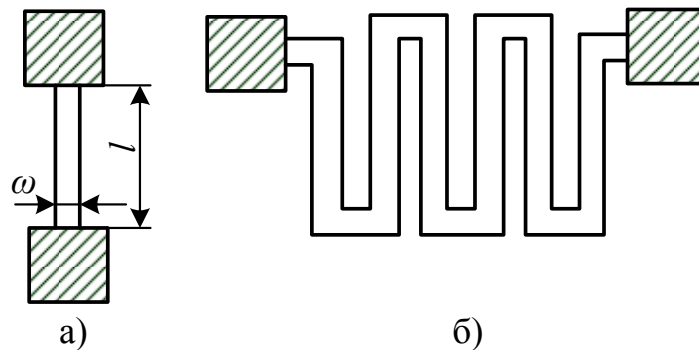


Рисунок 8.3 – Лінійний (а) та зигзагоподібний (б) резистори

Металеві плівки товщиною близько 1 *нм* незалежно від природи металу мають великий питомий опір, який експоненціально зменшується із збільшенням товщини. Плівки такої товщини мають нестабільні характеристики і практично не застосовуються. Для отримання суцільних плівок необхідно щоб їх товщина була не менша 0,1 *мкм*. Плівки тугоплавких металів мають стабільніші характеристики і можуть бути тонкими. Провідність металевих плівок такої товщини висока, тому для резисторів використовують не чисті метали, а сплави, опір яких у багато разів вищий, наприклад ті, що подано в табл. 8.1. Ці матеріали дозволяють одержувати поверхневі опори в межах $10 - 10^4 \text{ Ом}/\square$. На практиці застосовують $R_s = 100 \div 300 \text{ Ом}/\square$. Розкид номіналів резисторів залежить від точності виготовлення мікрозображення при фотолітографії, де для звичайних мікросхем абсолютна похибка складає $\sim 5 \text{ мкм}$. Бажана точність часто обумовлює

розміри елементів. Якщо номінал $R = 90 \text{ кОм}$ зроблений при $R_S = 300 \text{ Ом}/\square$, то потрібно 300 квадратів. Якщо потрібна точність 5%, то ширина лінії не може бути менша 100 $\mu\text{м}$, тобто довжина резистора буде 3 см , а площа зигзагоподібного резистора приблизно дорівнює подвоєній площі резистивного елементу, тобто $0,06 \text{ см}^2$. При точності 20% ширина лінії може бути близько 25 $\mu\text{м}$, довжина резистора – близько 7,5 мм , а площа – близько $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Якщо необхідно одержати резистор з високою точністю (1%), то номінал підганяють шляхом анодування або мікрофрезерування. На рис. 8.4, а показаний спосіб пригонки опорів плівкових резисторів шляхом прорізання алмазним різцем або променем лазера ділянки з розширеною поверхнею. На рис. 8.4, б показаний грубіший, але і доступніший спосіб пригонки – шляхом послідовного видалення шунтувальних переминок провідників і підключення додаткових резистивних ділянок. Обидва способи приводять до збільшення опору резистора.

Таблиця 8.1 – Параметри сплавів для резисторів

Найменування	Склад	$R_S, \frac{\text{Ом}}{\square}$	$\text{ТКО} \cdot 10^6, K^{-1}$
Ніхром	$\text{Ni}_x + \text{Cr}_{1-x}$	10–400	50–500
Нітрид танталу	TaN	50–500	100
Кермети	$\text{Cr}_x + (\text{SiO})_{1-x}$	300– 10^4	100
Металосиліциди	$\text{Cr}_x + \text{Si}_{1-x}$	10^2 – 10^4	50–250

Температурні характеристики плівкових резисторів залежать від товщини. Товсті плівки мають позитивний ТКО, як і у об'ємних матеріалів. Тонкі плівки мають тенденцію до негативного ТКО. Якщо $R_S < 100 \text{ Ом}/\square$, то $\text{ТКО} = (0 \div 200) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, якщо $R_S > 250 \text{ Ом}/\square$, то $\text{ТКО} = (-300 \div 0) \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Негативний ТКО, що має місце у тонких плівках, зазвичай обумовлений наявністю в плівці напівпровідних оксидів або тунелюванням електронів між гранулами і межами зерен речовини.

Тонкоплівкові конденсатори. На рис. 8.5 наведено структуру тонкоплівкового конденсатора. При його виготовленні використовують три напилювальних процеси для отримання металевих обкладинок і діелектричної плівки. Питома ємність C ($\Phi/\text{см}^2$) плоского конденсатора

$$C = 8,86 \cdot 10^{-14} \varepsilon / h,$$

де ε – діелектрична проникність;

h – товщина шару діелектрика, см .

Точність забезпечення номіналу тонкоплівкового конденсатора визначається точністю, з якою може бути сформований діелектричний шар, і точністю задання конфігурації. Управління товщиною й діелектричною проникністю – досить складне завдання: допуск за ними складає $\pm 15\%$ і допуск на номінал дорівнює $\pm 20\%$. Помилка за рахунок маски істотна при $C < 100 \text{ нФ}$,

тому на такі конденсатори допуск задається до $\pm 30\%$. Питомі ємності лежать в межах $2-40 \cdot 10^{-4} \text{ нФ/см}^2$, що на практиці є достатнім. Конденсатор в 10^4 нФ має розмір $2,5 \times 2,5 \text{ мм}$, ТКЄ зазвичай позитивний і близький до значення $250 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

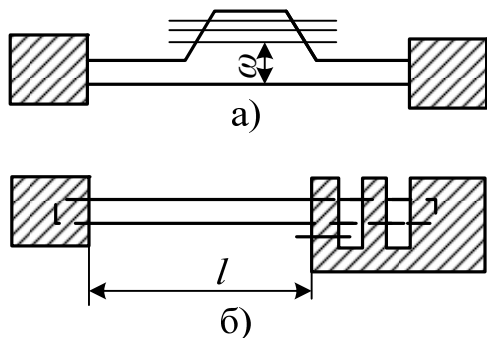


Рисунок 8.4 – Методи пригонки номіналів резисторів: а – зменшення ширини; б – збільшення довжини

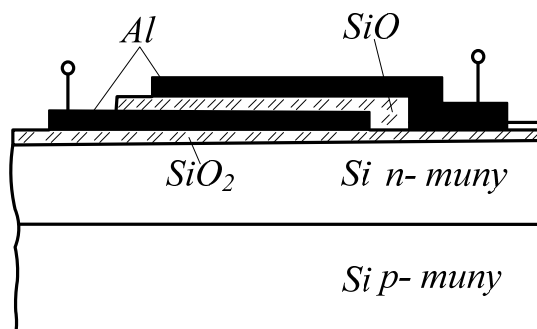


Рисунок 8.5 – Структура тонкоплівкового конденсатора

Основна відмінність між дискретними і тонкоплівковими конденсаторами полягає в значенні тангенса кута діелектричних втрат. Втрати в тонкоплівкових конденсаторах майже повністю визначаються послідовним опором обкладок конденсатора – від декількох Ом при великій ємності до декількох сотень Ом при малій. Тому отримати мале значення втрат досить складно.

Напруга пробою обмежується $10 - 20 \text{ В}$, в кращому випадку вона може досягати 100 В . Електрична міцність плівок ослаблена внаслідок наявності наскрізних пор і інших дефектів. Тому діелектричні плівки товщиною менше 15 нм непридатні для конденсаторів, а лінійна залежність ємності і пробивної напруги від товщини плівки справедлива при товщині більше $0,1 \text{ мкм}$.

Основним елементом плівкового конденсатора, що визначає його параметри і властивості, є діелектрик. Найчастіше для тонкоплівкових конденсаторів як діелектрик використовують монооксид кремнію SiO . Температура плавлення SiO складає $2300 \text{ }^\circ\text{C}$. Випаровування проводять з циліндричного випарника з відбивачем, що перешкоджає прольоту макрочастинок, які погіршують однорідність плівки. Оптимальна температура випаровування близька до $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, тобто оксид кремнію сублімується – випаровується з твердої фази зі швидкістю близько 1 нм/с . Деякого поширення набули конденсатори на основі халькогенідного скла. Температура випаровування цих матеріалів невелика ($400 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$), а діелектрична проникність для трисірчастої сурми досягає 20.

Оксиди деяких металів (Ta, Ti, Nb, Zr Al і ін.) одержують анодним окисненням. Найпоживанішими є плівки пентаоксиду танталу Ta_2O_5 . Спочатку на підкладку осаджують плівку танталу, а потім, одержавши за допомогою фотолітографії потрібну конфігурацію елементів, проводять оксидування.

Конденсатори на основі анодованого алюмінію, не зважаючи на невелику діелектричну проникність (8 – 9), відрізняються високою відтворюваністю і простотою виготовлення плівок алюмінію і стабільністю плівок оксиду алюмінію. Висока провідність алюмінієвих обкладинок дозволяє створювати високочастотні конденсатори. Алюмінієві обкладинки використовують і в інших типах конденсаторів з багатьма діелектриками.

Для забезпечення максимальної добротності тонкопліткових конденсаторів довжину виводів від обкладинок необхідно скорочувати до мінімуму, а товщину збільшувати, щоб їх опір був мінімальним. При виготовленні прецизійних конденсаторів проводять коригування номіналу за допомогою секціонування – введення додаткових ділянок на верхній обкладці конденсатора (рис. 8.6, а). Від'єднання додаткової секції зменшує ємність і дозволяє досягти бажаного номіналу. Від'єднання здійснюють скрайбуванням алмазним різцем або випалюванням електронним або лазерним променем. Для збільшення ємності використовують декілька не зв'язаних між собою секцій (рис. 8.6, б), які під'єднують паралельно одна одній.

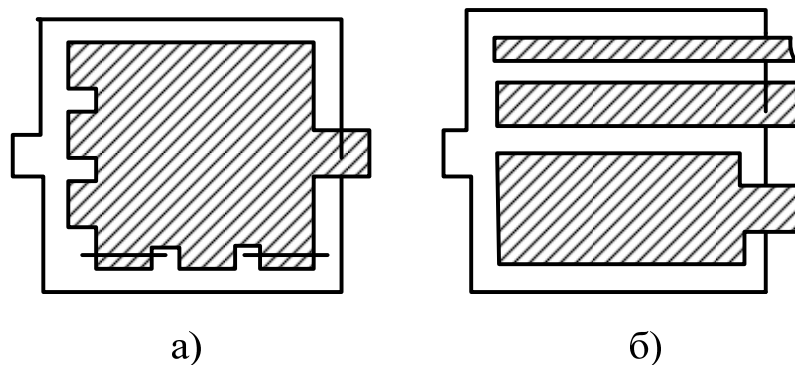


Рисунок 8.6 – Коригування номіналів конденсаторів для зменшення (а) та збільшення (б) ємності

Пасивні елементи НВЧ ІМС. Інтегральні схеми НВЧ-діапазону виготовляють в гібридному виконанні на діелектричних підкладках зі сапфіру або алунду, на яких формують пасивні елементи. ГІС НВЧ-діапазону охоплюють область частот 1 – 15 ГГц і можуть бути з розподіленими та із зосередженими параметрами.

У схемах з розподіленими параметрами широкого поширення набули мікросмугові лінії передачі, показані на (рис. 8.7, а). Електричне поле в мікросмуговій лінії зосереджене в основному в діелектричній підкладці з високим значенням ϵ . Менш поширені конструкції ліній передачі – щілинна (рис. 8.7, б), компланарна (рис. 8.7, в) і компланарно-смугова (рис. 8.7, г).

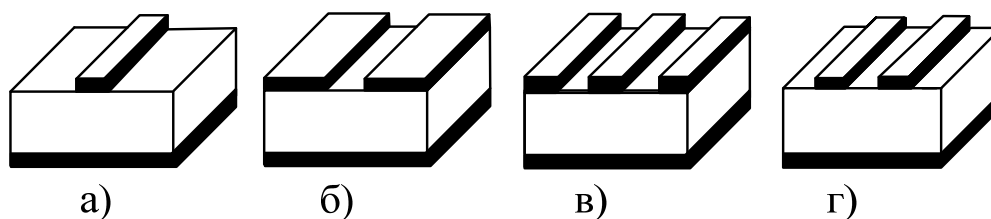


Рисунок 8.7 – Типи хвилеводів, які застосовуються в НВЧ ІМС:
 а – мікросмуговий; б – щілинний; в – компланарний;
 г – компланарно-смуговий

Для створення мікросхем із зосередженими параметрами, необхідно, щоб лінійні розміри елементів були менші довжини хвилі в лінії передачі. Цій умові зосереджені елементи відповідають на частотах до 20 ГГц. При вищих частотах переважають розподілені елементи, оскільки внаслідок паразитних зв'язків через тонку підкладку зосереджені елементи виявляються нерозрізними для НВЧ-сигналів.

При виготовленні зосереджених елементів НВЧ ІМС набули поширення планарні конденсатори, індуктивності і резистори навантажень. Деякі структури планарних конденсаторів, використовуваних НВЧ ІМС, показані на рис. 8.8. У структурах, поданих на рис. 8.8, а, б, в не використовується діелектрична плівка, вони мають низьку ємність (меншу 1 пФ) і їх застосовують в схемах з високим імпедансом. У структурах, поданих на рис. 8.8, г, д, використовується діелектрична плівка, їх застосовують для будь-яких НВЧ-схем з низьким імпедансом і їх ємність складає 10 – 30 пФ.

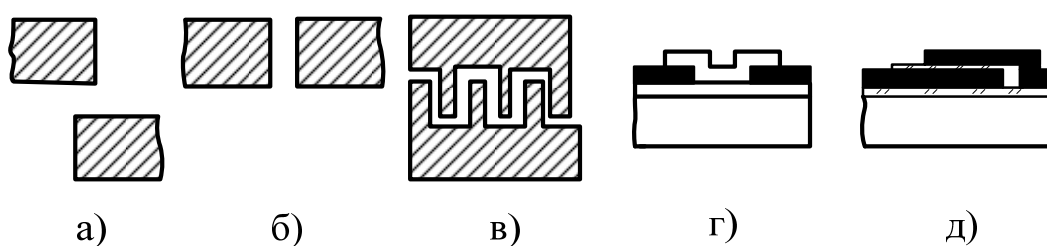


Рисунок 8.8 – Типи планарних конденсаторів в НВЧ ІМС:
 а – з боковим зв'язком; б – з торцевим зв'язком; в – гребінчастий;
 г – з боковим зв'язком та діелектриком; д – з перекриттям

Різні конфігурації планарних індуктивностей показані на рис. 8.9. Окрім ділянки лінії з високим імпедансом всі конфігурації тонкоплівкових індуктивностей дозволяють набути високого значення індуктивності на малій площі (0,5 – 10 нГн). Для зосереджених елементів внаслідок наявності міжсегментної ємності важко досягти високих значень індуктивності. Як навантаження використовують тонкоплівкові планарні резистори, виготовлені в основному з плівок металів, сплавів і керметів. Загальною про-

блемою для більшості тонкоплівкових резисторів є наявність паразитної ємності і розподіленої індуктивності, оскільки резистори розташовані на діелектричній підкладці і мають зигзагоподібну форму. Це обумовлює залежність опору резистора від частоти на високих частотах.

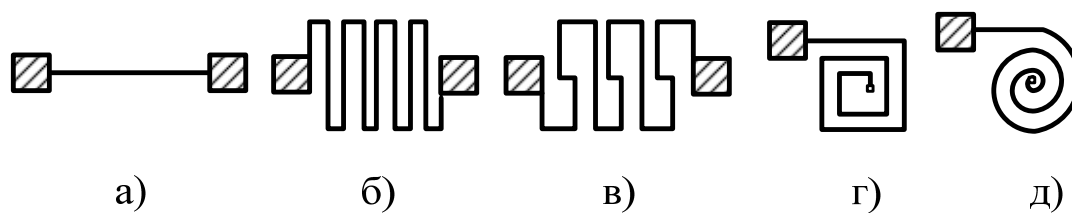


Рисунок 8.9 – Типи планарних індуктивностей в НВЧ ІМС:
 а – ділянка лінії з високим імпедансом; б – меандрова лінія;
 в – S-подібна лінія; г – прямокутна спіраль; д – кругова спіраль

Важливим конструктивно-технологічним параметром тонкоплівкових НВЧ ІМС є тепловий опір між резистивним елементом і підкладкою. Для його зменшення збільшують поверхню резистивної плівки. Ширина резистора не повинна помітно відрізнятись від ширини передавальної лінії, тому для зниження теплового опору збільшують довжину резистора, а для підтримки потрібного номіналу змінюють поверхневий опір.

8.5 Методи контролю тонких плівок

Провідні резистивні і діелектричні плівки, які осаджуються на напівпровідникові і ізолювальні підкладки, при виготовленні пасивних елементів мікроелектронних засобів контролюють, досліджуючи їх структуру та вимірюючи товщину.

Контроль структури плівок. Вивчення структури тонких плівок дозволяє встановити зв'язок між фізичними властивостями плівок і умовами їх осадження. Поширеними методами контролю структури полікристалічних і монокристалічних плівок є електронна мікроскопія, електронографія і рентгенографія. Ці ж методи застосовують при дослідженні аморфних плівок.

Метод електронної мікроскопії найчастіше застосовують, використовуючи трансмісійну (просвітлювальну) мікроскопію, що дає можливість контролювати плівки товщиною 10 – 100 нм. Для дослідження виготовляють «репліку» – плівку, нанесену на матеріал, який перед дослідженням розчиняють, залишаючи одну тонку плівку. Спостереження структури і дефектів плівки можливе завдяки амплітудному контрасту, який створюється пружно і непружно розсіяними електронами, що пройшли крізь плівку і лежать за межами апертури мікроскопа. Електрони, розсіяні на менші кути і такі, що випробували невеликі непружні втрати енергії, утворюють світлопольне зображення. Темнопольне зображення одержують при нахилі конденсорної електромагнітної лінзи або шляхом переміщення апертурної

діафрагми до тих пір, доки дифраговані пучки електронів не потраплять в апертуру мікроскопа. Завдяки високій роздільній здатності (близько 1 нм) серійні електронні мікроскопи використовують для стандартних структурних досліджень тонких плівок. У аморфних плівках контролюють суцільність, зернистість, наявність порожнин, включень чужорідних речовин і ін.

Внаслідок великого поперечного перерізу розсіювання електронів речовиною для вивчення тонких плівок добре підходить електронографія. Електронний пучок направляють під дуже малим кутом до поверхні, по якій він «ковзає» і відбивається. Відбиті електрони утворюють дифракційні картини, за якими судять про будову поверхневих шарів кристалів і тонких плівок (наявність дефектів, напруг, чужорідних атомів і ін.). Аморфні плівки створюють на електронограмах розсіяний дифузний фон і невелику кількість широких кілець. Полікристалічні плівки утворюють багато порівняно різних концентричних кілець, відстань між якими задовольняє рівняння Вульфа–Брега:

$$k\lambda = 2a \sin \theta,$$

де k – порядок спектра, зазвичай $k=1$;

a – міжплощинна відстань;

θ – кут падіння і віддзеркалення пучка – кут Брега.

Якщо частина кільця відсутня або має іншу інтенсивність, утворює симетричну картину, то полікристалічна плівка текстурована, тобто кристали мають переважну орієнтацію в одному або більше кристалографічних напрямках. Монокристалічні плівки дають дифракційні картини, що складаються з окремих рефлексів. Добре впорядковані кристали утворюють на електронограмах так звані кікучі-лінії, що отримуються в результаті, багаторазового розсіювання електронів. За діаметром кілець судять про тип розсіювальних атомів, а за шириною інтерференційного максимуму – про розміри зерен, якщо вони складають від десятих часток до десятків нанометрів.

Метою рентгенівського структурного аналізу є: знаходження точних позицій атомів в елементарній комірці, встановлення просторової групи структур та розподіл електронної щільності. Дифракція рентгенівських променів доповнює дифракцію електронів при визначенні кристалічної структури плівки. За розширенням інтерференційних ліній можна визначити розміри зерен від 5 до 120 нм, тобто майже на порядок більше, ніж за допомогою електронографії. Рентгенівська емісійна спектроскопія дозволяє встановити елементний склад плівок при мінімальній товщині близько 10 нм.

Вимірювання товщини плівки. Визначення товщини плівок являє значні методичні труднощі, оскільки щільність, питомий опір, оптичні властивості плівок і масивних зразків відрізняються. Тому виміряна будь-яким методом товщина буде ефективною, відмінною від значення «істинної» товщи-

ни. Значення ефективної товщини плівки, одержані різними способами вимірювання, не збігаються. При виборі способу визначення ефективної товщини слід орієнтуватися на вимоги, пов'язані з використанням даної плівки. У інтерферометрії має значення фазовий зсув і необхідно знати «інтерферометричну» товщину плівки. У тонкоплівкових конденсаторах важливо знати «ємнісну» товщину плівки, що визначає питому ємність. Розглянемо найбільш використовувані методи вимірювання товщини плівки.

Методи інтерферометрії базуються на виникненні різниці фаз променя світла, відбитого від підкладки і поверхні плівки. Перед вимірюванням на зразку одержують так звану сходинку – різку бічну межу плівки на підкладці. Це досягається або маскуванням частини підкладки при осадженні плівки чи розпилюванні підкладки, або шляхом видалення осадженої плівки з ділянки підкладки. Вимірювання товщини плівки проводять на мікроінтерференційному мікроскопі типу МІІ-4. Для отримання двох систем хвиль, які виходять з однієї точки джерела світла, використовують похилу пластинку, з напівпрозорим покриттям. Половину падаючого на неї світла пластинка відбиває, половину пропускає, утворюючи дві системи хвиль. Одна система хвиль падає на еталонне дзеркало і, відбиваючись від нього, потрапляє на фокальну площину окуляра. Друга потрапляє на досліджувану поверхню і, відбиваючись від неї, також потрапляє на фокальну площину окуляра. В результаті на фокальній площині окуляра спостерігаються інтерференційні смуги. Різниця ходу інтерферувальних променів, від центра поля до країв збільшується. В точках поля, де різниця ходу дорівнює $k\lambda$, отримуються світлі смуги, де різниця ходу складає $(k + \lambda/2)$ – темні смуги. Відстань між смугами залежить від довжини хвилі. Тому в білому світлі смуги для різних довжин хвиль не збігаються одна з одною, за винятком нульової смуги, що визначає вісь симетрії інтерференційної картини. Інтерференційна картина в білому світлі має такий вигляд: у центрі біла ахроматична смуга, по обидві сторони – дві чорні смуги з кольоровими облямівками, а далі кольорові смуги. Якщо на поверхні зразка є сходинка, то інтерференційні смуги зміщуються на величину, залежну від висоти сходинки. Вимірюючи відстань між смугами L і зсув смуг l , визначають висоту сходинки (мкм):

$$H = \frac{0,27l}{L},$$

де l і L відраховують в поділках кругової шкали на мікроскопі.

Точність вимірювання складає від 30 нм до 3 нм на кращих інтерферометрах. Даний метод застосовують тільки для непрозорих плівок. Якщо плівка прозора, то на плівку і підкладку в області сходинки осаджують непрозору добре відбиваючу металеву плівку, наприклад алюмінію. Для зменшення вношеної похибки товщина плівки повинна бути набагато меншою за тов-

щину вимірюваної плівки.

Для вимірювання товщини плівки з будь-якого матеріалу в процесі осадження використовують *метод кварцового резонатора*. Частота коливань f кварцового кристала з масою M лінійно змінюється із зміною маси осадженого матеріалу m . Зміщення резонансної частоти

$$\Delta f = \frac{fm}{M}.$$

Знаючи щільність d і площу S плівки, можна одержати вираз для визначення її товщини:

$$h = \frac{m \Delta f}{Sd f}.$$

Вибір частоти f залежить від діапазону вимірюваної товщини плівок. Для тонких плівок і великої чутливості використовують високі частоти. Чутливість кварцового резонатора $m/\Delta f = 10^{-10}$ г/Гц. Застосування радіотехнічної апаратури при $f = 20$ МГц дозволяє визначити зміщення $\Delta f = 20$ Гц, що дає можливість вимірювати прирости маси 10^{-9} г/см² або 0,01 – 0,1 нм товщини. Практично точність складає 5 – 20 нм.

Контрольні запитання

1. В чому полягає сутність термічного випаровування матеріалів?
2. Охарактеризуйте випарники для термічного випаровування.
3. Охарактеризуйте процеси іонно-плазмового розпилювання.
4. Поясніть принцип високочастотного діодного розпилювання.
5. Проаналізуйте пасивні елементи інтегральних мікросхем.
6. Охарактеризуйте методи контролю структури плівок.
7. В чому полягає метод інтерферометрії?
8. На що слід орієнтуватися при виборі способу визначення ефективної товщини плівок?
9. Як визначається відстань між концентричними кільцями полікристалічних плівок?

9 ПРОЦЕСИ РАДІАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ

Широке практичне застосування отримали технологічні процеси обробки напівпровідникових структур потоками проникної і непроникної радіації. Носіями енергії в цих процесах є швидкі частинки (іони, електрони, іноді нейтрони), а також кванти рентгенівського і оптичного випромінювання. Технологічні процеси радіаційної обробки поділяють на *термічні* – ті, що супроводжуються виділенням великої кількості теплоти, і *нетермічні* – ті, що відбуваються без помітного нагрівання зразка. Термічні процеси реалізуються перш за все лазерним випромінюванням і рідше імпульсними пучками електронів або некогерентним світлом. Нетермічні процеси ініціюються дією прискорених іонів і електронів або γ -випромінюванням. Термічна дія полягає в здійсненні фазових перетворень (плавленні, випаровуванні), тоді як нетермічна дія пов'язана з утворенням радіаційних порушень і стимуляцією хімічних реакцій. Більшість процесів радіаційної обробки базується на створенні в напівпровідникових структурах радіаційних порушень. За характером технологічної дії є дві групи процесів: *контрольоване введення радіаційних порушень* на стадії виготовлення окремих елементів структури, що здійснюється локально з використанням різних масок, і *управління електричними параметрами* готових приладів, що здійснюється після їх герметизації або перед нею суцільними потоками швидких частинок, що опромінюють всю структуру.

Для контролю радіаційних дефектів, що виникають в кристалах, використовують такі методи, як зворотне розсіяння іонів гелію, електронний парамагнітний резонанс та ін.

9.1 Дія проникної радіації на речовину

Процеси радіаційної обробки базуються на дії потоків електронів, γ -квантів, протонів, прискорених іонів, рідше нейтронів на напівпровідникові структури. *Швидкі нейтрони* утворюють радіаційні дефекти в основному в результаті пружної взаємодії з ядрами атомів речовин. При цьому нейтрон передає ядру атома частину своєї кінетичної енергії, внаслідок чого ядро захоплює за собою електронну оболонку атома. Швидке зміщення атома в процесі віддачі може викликати його іонізацію, якщо швидкість зміщення більша швидкості орбітальних електронів. Таким чином, при нейтронному бомбардуванні характер пошкоджень багато в чому схожий з результатом дії протонів.

Взаємодія γ -квантів з речовиною здійснюється трьома механізмами: за рахунок фотоефекту, ефекту Комптона і утворення пар. Для більшості матеріалів з атомними масами 30 – 50 і енергіями квантів 0,1 – 10 MeV переважним є ефект Комптона. В його основі лежить явище передачі ене-

ргії фотона електрону, внаслідок чого з'являється електрон віддачі. Всі три механізми викликають утворення електронів з енергіями, порівнянними з енергією γ -квантів. Тому γ -опромінення приводить до бомбардування речовини швидкими електронами зсередини. Електрони з енергіями $10 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$ гальмуються в речовині через зіткнення з ядрами атомів і електронами атомних оболонок. Основна частина енергії витрачається внаслідок непружних процесів розсіювання та викликає іонізацію атомів. Пружне розсіяння, пов'язане з кулонівською взаємодією електрона з ядром атома, може приводити до зміщення атомів з вузлів. Роль швидких електронів в процесах радіаційної обробки є основною. Пробіг електронів в речовині визначається їх енергією E (eV) і щільністю речовини d (г/см³):

при $E = 10 \text{ keV} \div 1 \text{ MeV}$

$$R = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} E^{\frac{5}{3}}}{d} \text{ см};$$

при $E > 1 \text{ MeV}$

$$R = \frac{5,1 \cdot 10^{-7} E - 0,26}{d} \text{ см.}$$

Вторинні процеси при електронному опроміненні. На ділянці зустрічі електронного пучка з речовиною кінетична енергія електронів при взаємодії з атомами перетворюється на теплову енергію або енергію збудження атомів і молекул. Частина електронів пучка відображається і розсіюється поверхнею. Вторинні процеси полягають в емісії вторинних електронів, появі рентгенівського випромінювання і часто термоемісії електронів, оскільки в зоні дії пучка температура підвищується.

Вторинні електрони емітуються з поверхні мішені з енергіями до 50 eV . Струм вторинної емісії залежить від матеріалу і структури мішені, кута падіння на її поверхню і має такий же порядок, що і струм пучка. Емісія вторинних електронів і термоемісія практично не відіграють ролі в балансі енергії, потужність, що втрачається через них, не перевищує 1% потужності пучка. Відбиття електронів в зоні дії пучка приводить до їх розсіювання зі спектром енергії, що тягнеться до енергії електронів в пучку. Частка відбитих електронів, їх енергія і розподіл в просторі залежать від атомного номера елементу і кута падіння пучка. При зростанні Z_2 частка відбитих електронів досягає 40% при $Z_2 = 40$ і 50% при $Z_2 = 100$. Для елементів з великими номерами більш різко виявляється максимум енергії в спектрі відбитих електронів, який зміщується в область великих енергій. Через відбиття електронів втрачається значна енергія пучка: для сталі – 25%, для вольфраму – 38%. Відбиття електронів тим сильніше, чим більше відхилення пучка від нормалі до поверхні.

Рентгенівське випромінювання в інтервалі енергій до $0,5 \text{ MeV}$ розповсюджується в просторі рівномірно, його інтенсивність не залежить від напрямку променів і спадає обернено пропорційно до квадрата відстані від джерела випромінювання. При поглинанні рентгенівського випромінювання речовиною його інтенсивність спадає експоненціально. Коефіцієнт ослаблення інтенсивності

$$g = \frac{I}{I_0} = \exp(-\mu x),$$

де μ – коефіцієнт поглинання;

x – товщина екрана або глибина проникнення.

При гальмуванні електронів в речовині виникає гальмівне і характеристичне випромінювання. Гальмівне випромінювання має безперервний спектр з широким максимумом і граничною енергією квантів $h\nu = eU$. Гальмування електрона – це прискорення руху заряду. Згідно з електромагнітною теорією, воно повинне супроводжуватися виникненням електромагнітних коливань, що і спостерігається. Характеристичне випромінювання складається з окремих лінійчастих спектрів, що випускаються атомами мішені. Електронний пучок при зіткненні з електронами внутрішніх оболонок атомів вибиває їх. Електрони із зовнішніх оболонок переходять на вільні орбіти внутрішніх. Надлишок потенціальної енергії електронів випромінюється у вигляді квантів рентгенівського випромінювання з фіксованою частотою. Частота випромінювання залежить від атомного номера елементу мішені. Втрати енергії електронного пучка на рентгенівське випромінювання не перевищують 1%.

Вплив радіації на електрофізичні властивості напівпровідникових матеріалів. Властивості реальних кристалів (електро- і теплопровідність, дифузія і ін.) пов'язані з наявністю атомних точкових дефектів. Тому зміна кількості дефектів під дією проникної радіації приводить до зміни основних електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів і викликає зміну електричних характеристик мікроелектронних засобів. Типи радіаційних порушень і їх вплив на основні властивості опромінюваних кристалів залежать від структури ґраток, будови енергетичних зон, а також від природи і енергії бомбардуючих частинок. Радіаційні порушення викликають утворення пасток рекомбінації, які визначають зміну всіх електрофізичних параметрів матеріалів. Радіаційні дефекти вносять глибокі енергетичні рівні в заборонену зону напівпровідника. Поява глибоких рівнів обумовлює зростання швидкості об'ємної рекомбінації і відповідне зменшення часу життя нерівноважних носіїв заряду τ . Для різних видів проникної радіації існує зв'язок між зміною частоти рекомбінації ν – величини, оберненої до часу життя носіїв, – і інтегральним потоком опромінення Φ :

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = K_\tau \Phi,$$

де $\nu = 1/\tau$ – частота рекомбінації після опромінення;

$\nu_0 = 1/\tau_0$ – частота рекомбінації до опромінення;

K_τ – коефіцієнт радіаційної зміни часу життя.

Коефіцієнт K_τ залежить від концентрації основних носіїв заряду, швидкості введення пасток рекомбінації, ступеня заповнення їх електронами, перерізів захоплення електронів і дірок: $K_\tau = N_R f C$, де $N_R = p\Phi$ – концентрація пасток рекомбінації (p – імовірність утворення пасток рекомбінації бомбардуючою частинкою); f – імовірність того, що пастка зайнята основними носіями заряду, яка залежить від положення рівня Фермі і рівня пастки; $C = \sigma v$ – стала захоплення неосновного носія, (v – теплова швидкість носія заряду). Глибокі енергетичні рівні, що вводяться проникною радіацією, мають донорний або акцепторний характер. Наявність таких рівнів супроводжується захопленням основних носіїв заряду, що приводить до компенсації електропровідності. В кремнії залежність питомого опору від потоку опромінення має вигляд:

$$\rho = \rho_0 \exp(K_\rho \Phi).$$

Коефіцієнт радіаційної зміни питомого опору:

$$K_\rho = \frac{1}{n_0} \frac{\Delta n}{\Phi},$$

де n_0 – значення концентрації основних носіїв заряду в початковому напівпровідниковому матеріалі;

Δn – зміна концентрації основних носіїв внаслідок захоплення компенсуючими пастками.

Зміна рухливості носіїв заряду чинить незначний вплив на залежність $\rho(\Phi)$ порівняно зі зміною концентрації.

Зміна електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів під дією проникної радіації дозволяє направлено змінювати електричні параметри мікроелектронних засобів: збільшувати швидкодію, стабільність параметрів, стійкість до зовнішніх дій. Обробку прискореними частинками або γ -квантами проводять в кінці технологічного маршруту виготовлення засобу, що обумовлено великою проникною здатністю високоенергетичного випромінювання, в першу чергу електронів і γ -променів. Тому дії радіації піддають прилад в корпусі або готову структуру з контактами і комутацією перед процесом герметизації.

Тепловий вплив електронних пучків. В теплових процесах основну роль відіграє енергія електронного пучка, що перетворюється в теплоту.

Розсіяння теплоти відбувається за рахунок теплопровідності і випромінювання. При мікрозварюванні і мікротермообробці переважають втрати теплоти внаслідок теплопровідності. При плавленні і випаровуванні, особливо тугоплавких матеріалів, втрати теплоти в результаті випромінювання можуть значно перевершувати втрати через теплопровідності. Потужність, що поглинається в одиниці об'єму речовини, є функцією відстані від поверхні, оскільки передача енергії при проникненні електронів всередину речовини відбувається нерівномірно:

$$P(x) = P_{\max} \left[1 - 2,25 \left(\frac{x}{R} - \frac{1}{3} \right)^2 \right],$$

де $P_{\max} = \frac{4}{3} \eta P_s$ – максимальне значення поглиненої потужності, яке має місце при відстані від поверхні $x = R/3$ (η – частка поглиненої потужності від мішені потужності пучка, що поступає на поверхню).

Питома поверхнева потужність:

$$P_s = \frac{P}{A} = \frac{4UI}{\pi D^2} = U \cdot j,$$

де $P = U \cdot I$ – потужність пучка при прискорювальній напрузі U і струмі I ;

D – діаметр електронного пучка.

9.2 Радіаційна літографія

Одним з найважливіших застосувань радіаційної технології є літографічні процеси: електронолітографія, рентгенолітографія і іонолітографія.

Електронна літографія. Для виготовлення мікроелектронних засобів широко використовується контактна фотолітографія і фотолітографія із зазорами, які не забезпечують досить високого рівня виходу придатних структур. Успішно розвивається проекційна фотолітографія із збереженням масштабу фотошаблону. Суттєвим обмеженням всіх оптичних систем літографії є те, що гранична роздільна здатність відповідає мінімальній ширині зображуваного елемента 0,3 – 0,5 мкм. Збільшені вимоги до роздільної здатності при виготовленні НВІС зумовили розвиток інших систем літографії: електронно-променевої, рентгенівської і іонно-променевої.

Використання електронної оптики дозволяє підвищити роздільну здатність процесу літографії, оскільки довжина хвилі електрона залежить від

його енергії:
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} \approx \frac{1,24}{\sqrt{U}}.$$

Якщо U виражене в вольтах, то λ одержують в нм. При зміні прискорювальної напруги від 10^2 до 10^4 В довжина хвилі змінюється від 0,1 до 0,01 нм. Практично за допомогою електронолітографії одержують елементи з мінімальною шириною 0,2 – 1 мкм, а гранична ширина лінії складає 0,05 мкм. Перевагою систем електронної літографії є практична відсутність дифракції, що забезпечує високу чіткість зображення, значно вища глибина різкості ніж у оптичних системах та велика площа зображення з максимальною роздільною здатністю.

Розрізняють дві системи електронолітографії – проєкційна і сканувальна. Сканувальна використовується в основному для виготовлення робочих і проміжних шаблонів, вживаних для проєкційної фотолітографії. Продуктивність сканувальних систем невелика, що ускладнює їх використання для безпосереднього експонування резисту на пластинах без застосування шаблонів. Електронно-променевої проєкційні системи є продуктивнішими. Вони аналогічні проєкційній фотолітографії зі скороченням масштабу, де замість джерела ультрафіолетового випромінювання використовують електронні пучки великого діаметра. При використанні сканувальної електронолітографії для безпосереднього перенесення зображень на напівпровідникову пластину мінімально досяжні розміри визначаються точністю суміщення. Суміщення проводять за допомогою маркерних знаків – витравлених канавок кремнію або металеві плівки. Вторинні електрони, що емітуються під дією електронного пучка, реєструються детектором. Якщо промінь потрапляє на маркерний знак, то в детекторі з'являється відповідний сигнал, що поступає в ЕОМ. Використовують два типи маркерних знаків: для обертання пластини і визначення місцеположення кристала. Перші розташовані діаметрально по периферії пластини і слугують для встановлення положення пластини відносно предметного столу. Інші розміщені в кутках кожного кристала і необхідні для коригування області сканування. Точність поєднання такої системи 0,1 мкм, а час поєднання займає 0,3 – 0,4 с.

При проєкційній електронолітографії точність задавання елементів визначається якістю виготовлення шаблону, через який проводять експонування. Шаблон виготовляють з пластини кремнію діаметром 75 мм, на якій спочатку витравляють квадратну ділянку розміром 40×40 мм до товщини кремнію 3 – 5 мкм, а потім в цій тонкій кремнієвій плівці витравляють мікрозображення елементів ІМС. Крім обмежень, притаманних всім маскам подібного типу за конфігурацією та поєднанням елементів, виготовлення таких шаблонів дуже трудомістке і потребує селективного травлення.

Оскільки при виготовленні мікросхем мінімальні розміри необхідно передавати на обмеженій кількості операцій літографії, то широко використовують гібридну літографію, яка поєднує електронну і звичайну оп-

тичну. Це технологічніше і продуктивніше.

Продуктивність процесу електронолітографії багато в чому визначається тривалістю експонування резисту, тому чутливість електронорезистів і їх роздільна здатність повинні бути високими: доза експонування – не більше $0,8 \text{ мкКл/см}^2$, роздільна здатність – не гірше $0,5 \text{ мкм}$. Як електронорезисти застосовують поліметилметакрилат, чутливість якого складає 300 мкКл/см^2 при енергії електронів 20 кеВ , а також поліхлорметилстирол з чутливістю 3 мкКл/см^2 .

Рентгенівська літографія. Використання рентгенівського випромінювання дозволяє підвищити роздільну здатність процесу літографії. Межа мінімальної ширини лінії рентгенолітографії оцінюється в 10 нм . Практично одержано лінії шириною 20 нм , а на пластинах з резистом виготовляють зображення з роздільною здатністю до $0,1 \text{ мкм}$. На відміну від ультрафіолетових променів, що поглинаються атомними групами полімерних кіл фоторезистів, рентгенівські промені поглинаються цілими молекулами. При цьому відбувається інжекція електронів з внутрішніх оболонок атомів. Під дією цих електронів здійснюється хімічна зміна полімерної плівки резисту, при цьому роздільна здатність резисту залежить від відстані, яку проходить в ній електрон. Перевагою рентгенолітографії є те, що технологічні установки для її проведення дешевші і простіші за конструкцією, ніж для електронно-променевої.

Залежно від розмірів елементів ІМС, продуктивності і типу систем суміщення рентгенівська літографія розвивається у двох напрямках. Перший включає використання випромінювання з $\lambda = 0,4 \div 1,3 \text{ нм}$ в рентгенівських установках з анодом, що обертається, застосування відносно простих систем суміщення і досить чутливих ($\sim 5 \text{ Дж/см}^3$) негативних резистів, що забезпечують роздільну здатність $0,5 \text{ мкм}$ і тривалість експонування не більше 1 хв . Ці системи застосовують для виготовлення ІМС із розмірами елементів $0,5 - 1 \text{ мкм}$. При другому використовуються: синхротронне випромінювання з $\lambda = 1 \div 2,5 \text{ нм}$; складніші системи суміщення; менш чутливі позитивні резисти, що мають високу роздільну здатність та забезпечують виготовлення багат шарових структур із розмірами елементів $0,05 - 0,5 \text{ мкм}$. Синхротронне випромінювання виникає від циркулюючих по замкнутій орбіті релятивістських електронів в синхротроні або електронному накопичувальному кільці. Висока інтенсивність і малі витрати синхротронного випромінювання забезпечують хорошу передачу зображення. Як резист використовують поліметилметакрилат.

Широкого поширення набули системи першого типу. Джерело рентгенівського випромінювання – мішень (анод) з Cu, Al, Mo, Si, Rh, Pd, Ag – поміщають у вакуумну камеру і бомбардують потоком електронів. Довжина хвилі характеристичного випромінювання визначається матеріалом мішені і складає $0,44; 0,54; 0,83; 1,33 \text{ нм}$ для Pd, Mo, Al, Cu, відповідно. Камера має вихідне вікно, закрите тонкою мембраною ($\sim 50 \text{ мкм}$) з берилію, що забезпечує однорідність експонування підкладок великого діаме-

тра. Підкладки поміщають в камеру, заповнену He при тиску 1 Па або атмосферному тиску, що підвищує продуктивність. Відстань від мішені до шаблону близько 50 см. Шаблони, через які проводять експонування, являють собою носійну основу. Це, наприклад, пластина з кремнію або скла, що містить в центральній частині мембрану – маску з мікрозображеннями, подібну до шаблону для електронолітографії. Важливим параметром мембрани є значення і характер механічних напруг в ній. У випадку стискувальних напруг мембрана прагне стиснутися при стравлюванні кремнію із зворотного боку пластини і провисає. У випадку розтягувальних напруг мембрана дуже крихка, тому в ній повинні існувати помірні розтягувальні напруги, що забезпечують хороше натягнення мембрани. Для цього застосовують плівки нітриду кремнію Si_xN_y товщиною 1 мкм, що осаджують на кремнієві пластини товщиною 400 мкм в плазмі газового розряду, яка містить моносилан і аміак. Плівки Si_xN_y містять розтягувальні напруги, що дорівнюють $1 - 5 \text{ кН/см}^2$. На плівку Si_xN_y напилюють шар Ti товщиною $\sim 5 \text{ нм}$, на нього – шар Au товщиною $\sim 20 \text{ нм}$. За допомогою електронолітографії і плазмохімічного травлення шарів Ti–Au формують топологічний рисунок мікросхеми. Потім гальванічним методом нарощують шар Au до товщини 0,8 мкм.

Цей шар необхідний для поглинання рентгенівського випромінювання. Потім із зворотного боку пластини по периферії наносять шар нітриду кремнію Si_3N_4 товщиною 0,1 мкм і в киплячому 20–30%-му розчині КОН проводять селективне травлення кремнію в центральній частині пластини і аж до плівки Si_xN_y . Переріз одержаного шаблону показаний на рис. 9.1. Плівка Si_xN_y оптично прозора і поєднання шаблону з мікрозображеннями на підкладці проводять традиційними оптичними способами. Зазор між шаблоном і підкладкою складає $\sim 40 \text{ мкм}$.

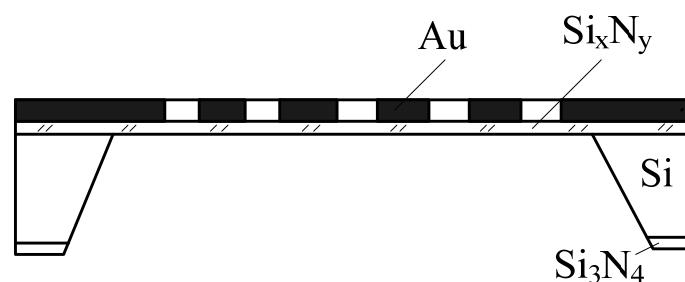


Рисунок 9.1 – Переріз шаблону для рентгенолітографії

Іонно-променева літографія. За допомогою іонних пучків виконуються різні операції для створення ІМС, зокрема експонування резистів при виготовленні шаблонів і обробці пластин. При використанні пучків протонів або інших іонів виключаються проблеми, пов'язані з дифракцією в оптичній фотолітографії або з дифузним розсіюванням електронів в елек-

тронолітографії. Іонно-променева літографія забезпечує роздільну здатність не гірше 0,5 мкм, а мінімальна ширина лінії складає 0,04 мкм. Для експонування потрібні дози опромінювання, у багато разів менші, ніж в електронній літографії. На відміну від рентгенівської літографії експонування прискореними іонами дозволяє позбавитися напівтіньових спотворень мікрозображень, оскільки джерела іонів забезпечують добре колимовані пучки.

Контрольні запитання

1. Поясніть яким чином може здійснюватися взаємодія γ -квантів з речовиною.
2. В чому полягають вторинні процеси при електронному опромінюванні?
3. Поясніть процеси гальмівного і характеристичного випромінювання, які виникають при гальмуванні електронів.
4. Який вплив чинить радіація на електрофізичні властивості напівпровідникових матеріалів?
5. Від чого залежить коефіцієнт радіаційної зміни часу життя?
6. Як визначається питома поверхнева потужність?
7. Поясніть процес електронної літографії.
8. Чим визначається точність задавання елементів при проекційній електронолітографії?
9. Чим визначається продуктивність процесу електронолітографії?
10. Поясніть процес рентгенівської літографії.
11. Охарактеризуйте шаблони, через які проводять експонування, при рентгенівській літографії.
12. Охарактеризуйте процес іонно-променевої літографії.
13. Що дає використання електронної оптики при літографії?

10 СКЛАДАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

10.1 Особливості процесу складання

Від якості складальних операцій значною мірою залежать стабільність електричних параметрів і надійність готових виробів.

Етап складання починається після завершення групової обробки напівпровідникових пластин за планарною технологією і розділення їх на окремі елементи (кристали). Ці кристали можуть мати просту (діодну або транзисторну) структуру або містити складну інтегральну мікросхему (з великою кількістю активних і пасивних елементів) і поступати на складання дискретних, гібридних або монолітних композицій.

Складність процесу складання полягає в тому, що кожен клас дискретних приладів і ІМС має свої конструктивні особливості, які потребують цілком певних складальних операцій і режимів їх проведення.

Процес складання містить три основні технологічні операції: приєднання кристала до основи корпусу, приєднання струмоведучих виводів до активних і пасивних елементів напівпровідникового кристала і внутрішніх елементів корпусу, герметизація кристала від зовнішнього середовища.

10.2 Приєднання кристала до основи корпусу

Приєднання кристала ІМС до основи корпусу проводять за допомогою процесів паяння, припавлення з використанням евтектичних сплавів і приклеювання.

Основною вимогою до операції приєднання кристала є створення з'єднання кристал – основа корпусу, що має високу механічну міцність, хорошу електро- і теплопровідність.

Паяння – процес з'єднання двох різних деталей без їх розплавлення за допомогою третього компоненту – припою. Особливістю процесу паяння є те, що припій при утворенні паяного з'єднання знаходиться в рідкому стані, а з'єднувані деталі – в твердому.

Суть процесу паяння полягає в тому, що якщо між деталями, що з'єднуються, помістити прокладки з припою і всю композицію нагрівати до температури плавлення припою, то матимуть місце такі три фізичні процеси. Спочатку розплавлений припій змочує поверхні деталей, що з'єднуються. Далі в змочених місцях відбуваються процеси міжатомної взаємодії між припоєм і кожним з двох змочених ним матеріалів. При змочуванні можливі два процеси: взаємне розчинення змоченого матеріалу і припою або їх взаємна дифузія. Після охолодження нагрітої композиції припій переходить в твердий стан. При цьому утворюється міцне паяне з'єднання між початковими матеріалами і припоєм.

Процес паяння добре вивчений, він простий і не потребує складного і дорогого устаткування. При серійному випуску виробів електронної техніки припаювання напівпровідникових кристалів до основ корпусів проводиться в конвеєрних печах з високою продуктивністю. Паяння проводиться у відновному (водень) або нейтральному (азот, аргон) середовищі. У печі завантажують багатомісні касети, в які заздалегідь поміщають основи корпусів, навішування припою і напівпровідникові кристали. При русі конвеєрної стрічки касета зі з'єднуваними деталями послідовно проходить зони нагрівання, постійної температури, охолодження. Швидкість руху касети і температурний режим задають і регулюють відповідно до технологічних і конструктивних особливостей конкретного типу ІМС.

Разом з конвеєрними печами для припаювання напівпровідникового кристала до основи корпусу використовують установки, які мають одну індивідуальну позицію, що нагрівається, на яку встановлюють тільки одну деталь корпусу (ніжку), і один напівпровідниковий кристал. При роботі на такій установці оператор за допомогою маніпулятора встановлює кристал на основу корпусу і відбувається короткочасне нагрівання вузла, що з'єднується. В зону нагрівання подається інертний газ. Цей спосіб з'єднання деталей дає хороші результати за умови попереднього лудіння поверхонь кристала і основи корпусу, що з'єднуються.

Процес приєднання кристала паянням поділяють на низькотемпературний (до 400 °С) і високотемпературний (вище 400 °С). Як низькотемпературні припої використовують сплави на основі свинцю і олова з добавками (до 2%) сурми або вісмуту. Добавка сурми або вісмуту в олов'яно-свинцевий припій дозволяє уникнути появи «олов'яної чуми» в готових ІМС при їх експлуатації і тривалому зберіганні. Високотемпературні припої виготовляють на основі срібла (ПСр–45, ПСр–72 та ін.).

На технологічний процес паяння і якість отриманого паяного з'єднання деталей сильний вплив чинять чистота металевих з'єднуваних поверхонь і застосовуваного припою, склад атмосфери робочого процесу і наявність флюсів.

Широке застосування процес паяння знайшов при складанні дискретних напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів, тиристорів і ін.). Це пояснюється тим, що процес паяння дає можливість отримати хороший електричний і тепловий контакт між кристалом напівпровідника і кристалотримачем корпусу, причому площа контактного з'єднання може бути достатньо великою (для приладів великої потужності).

Особливе місце процес паяння займає при закріпленні напівпровідникового кристала великої площі на основі корпусу з міді. В цьому випадку для зниження термомеханічних напруг, що виникають за рахунок різниці в температурних коефіцієнтах розширення напівпровідникових матеріалів і міді, широко використовують молібденові і молібдено-вольфрамові термокомпенсатори, що мають площу, рівну площі напівпровідникового кристала, а TKI – близький до TKI напівпровідника. Така складна багатоступінча-

та композиція з двома прошарками з припою використовується при складанні напівпровідникових приладів середньої і великої потужностей.

Подальший розвиток процес паяння отримав при складанні інтегральних мікросхем за технологією «перевернутого кристала». Ця технологія передбачає попереднє створення на планарній стороні кристала з ІМС «кулькових виводів» або «контактних виступів», які є горбами з міді, покритими припоєм або оловом. Такий кристал розташовують на поверхні підкладки або на основі корпусу так, щоб горби дотикалися з нею в певних ділянках. Таким чином, кристал перевертається і його планарна сторона за допомогою горбків контактує з поверхнею основи корпусу.

При короткочасному нагріванні такої композиції відбувається міцне з'єднання контактних виступів напівпровідникового кристала з основою корпусу. Слід зазначити, що ті ділянки поверхні корпусу, до яких дотикаються «виступи», заздалегідь теж лудяться. Тому у момент нагрівання відбувається з'єднання припою основи корпусу з припоєм контактних виступів.

На рис. 10.1, а показаний варіант приєднання кристала ІМС, що має мідні контактні виступи, що лудять, до підкладки. Така конструкція виводів не боїться розтікання припою по підкладці. Наявність високого грибоподібного виступу забезпечує необхідний зазор між напівпровідниковим кристалом і підкладкою при розплавленні припою. Це дозволяє проводити приєднання кристала до підкладки з високим ступенем точності.

На рис. 10.1, в показаний варіант складання кристалів, що мають м'які стовпчикові виводи з припою на базі олово – свинець.

Приєднання такого кристала до основи корпусу проводять звичайним нагріванням без додаткового тиску на кристал. Припій контактних виступів при нагріванні і розплавленні не розтікається по поверхні ділянок основи корпусу, що лудять, за рахунок сил поверхневого натягу. Це, крім того, забезпечує певний зазор між кристалом і підкладкою.

Розглянутий метод приєднання кристалів ІМС до основи корпусу або до будь-якої плати дозволяє механізувати і автоматизувати технологічний процес складання.

Приплавлення з використанням евтектичних сплавів. Цей спосіб приєднання напівпровідникових кристалів до основи корпусу базується на утворенні розплавленої зони, в якій відбувається розчинення поверхневого шару напівпровідникового матеріалу і шару металу основи корпусу. У промисловості широке застосування отримали два евтектичні сплави: золото – кремній (температура плавлення 370 °С) і золото – германій (температура плавлення 356 °С). Процес евтектичного приєднання кристала до основи корпусу має два різновиди. Перший вид базується на використанні прокладки з евтектичного сплаву, яка розташовується між з'єднуваними елементами: кристалом і корпусом. При такому з'єднанні поверхня основи корпусу повинна мати золоте покриття у вигляді тонкої плівки, а поверхня напівпровідникового кристала може не мати золотого покриття (для крем-

нію і германію) або бути покритою тонким шаром золота (при приєднанні інших напівпровідникових матеріалів). При нагріванні такої композиції до температури плавлення евтектичного сплаву між з'єднуваними елементами (кристал – основа корпусу) утворюється рідка зона. У цій рідкій зоні відбувається з одного боку розчинення шару напівпровідникового матеріалу кристала (або шару золота, нанесеного на поверхню кристала).

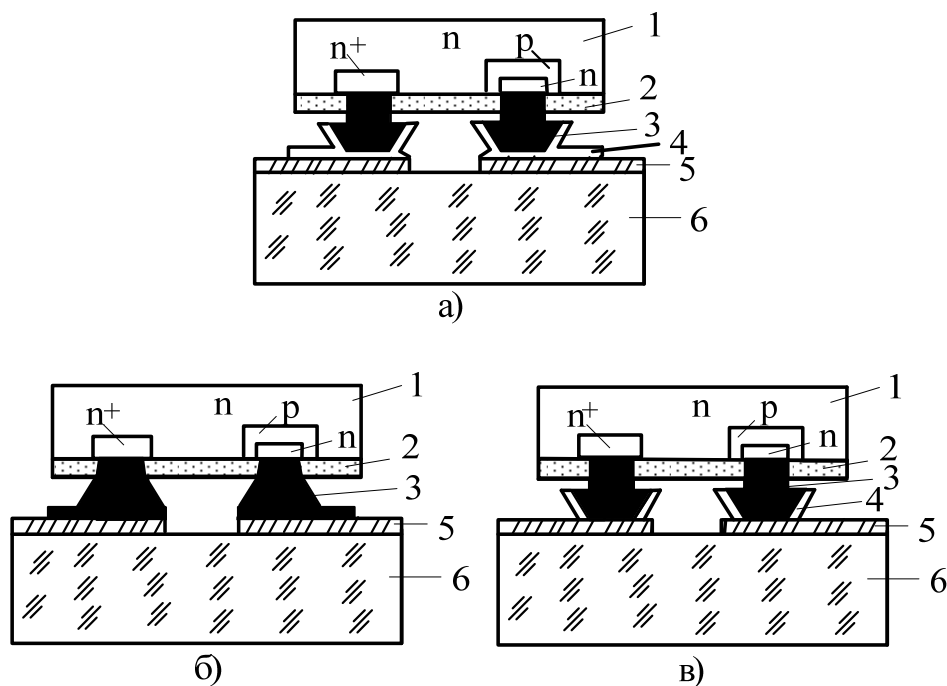


Рисунок 10.1 – Приєднання кристалів до підкладки методом припаювання: а – мідні залужені виступи; б – мідні не залужені виступи; в – виступи зі сплаву олово – свинець (1 – кристал; 2 – плівка SiO₂; 3 – мідний виступ; 4 – олово; 5 – металева плівка; 6 – підкладка)

Після охолодження всієї системи (основа корпусу – евтектичний розплав – напівпровідниковий кристал) відбувається твердіння рідкої зони евтектичного сплаву, а на межі напівпровідник – евтектичний сплав утворюється твердий розчин. В результаті цього процесу створюється механічно міцне з'єднання напівпровідникового матеріалу з основою корпусу.

Другий вид евтектичного приєднання кристала до основи корпусу зазвичай реалізується для кристалів з кремнію або германію. На відміну від першого виду для приєднання кристала не використовується прокладка з евтектичного сплаву. В цьому випадку рідка зона евтектичного розплаву утворюється в результаті нагрівання композиції позолочена основа корпусу – кристал кремнію (або германію).

Якщо на поверхню основи корпусу, що має тонкий шар золотого покриття, помістити кристал кремнію, що не має золотого покриття, і всю систему нагрівати до температури на 40 – 50 °C вище за температуру евтекти-

ки золото – кремній, то між з'єднуваними елементами утворюється рідка фаза евтектичного складу. Оскільки процес сплавлення шару золота з кремнієм є нерівноважним, то кількість кремнію і золота, що розчинилися в рідкій зоні, визначатиметься товщиною золотого покриття, температурою і часом проведення процесу сплавлення. При достатньо великих витримках і сталій температурі процес сплавлення золота з кремнієм наближається до рівноважного і характеризується постійним об'ємом рідкої фази золото – кремній. Наявність великої кількості рідкої фази може привести до витікання її з-під кристала кремнію до його периферії. При твердінні евтектика, що витекла, приводить до утворення достатньо великої механічної напруги і раковин в структурі кристала кремнію, які різко знижують міцність сплавної структури і погіршують її електрофізичні параметри. При мінімальних значеннях часу і температури сплавлення золота з кремнієм відбувається не рівномірно по всій площі дотикання кристала з основою корпусу, а лише в її окремих точках.

В результаті цього зменшується міцність сплавного з'єднання, збільшуються електричний і тепловий опори контакту і знижується надійність отриманої арматури.

Істотний вплив на процес евтектичного сплаву дає стан поверхонь початкових з'єднаних елементів. Наявність забруднень на цих поверхнях приводить до погіршення змочування контактуючих поверхонь рідкою фазою і нерівномірного розчинення.

Приклеювання – це процес з'єднання елементів один з одним, що базується на склеювальних властивостях деяких матеріалів, які дозволяють отримувати механічно міцні з'єднання між напівпровідниковими кристалами і основами корпусів (металевими, скляними або керамічними). Міцність склеювання визначається силою зчеплення між клеєм і склеюваними поверхнями елементів.

Склеювання різних елементів інтегральних схем дає можливість з'єднувати різні матеріали в різних поєднаннях, спрощувати конструкцію вузла, зменшувати його масу, знижувати витрати дорогих матеріалів, не застосовувати припоїв і евтектичних сплавів, значно спрощувати технологічні процеси складання найскладніших мікроелектронних засобів.

В результаті приклеювання можна отримувати арматури і складні композиції з електроізоляційними, оптичними і струмопровідними властивостями. Приєднання кристалів до основи корпусу за допомогою процесу приклеювання незамінне при складанні і монтажі елементів гібридних, монолітних і оптоелектронних схем.

При приклеюванні кристалів на основи корпусів застосовують різні типи клеїв: ізоляційні, струмопровідні, світлопровідні і теплопровідні. За активністю взаємодії між клеєм і склеюваними поверхнями розрізняють полярні (на основі епоксидних смол) і неполярні (на основі поліетилену).

Якість процесу приклеювання залежить не тільки від властивостей клеїв, але і від стану поверхонь склеюваних елементів. Для отримання міцного

з'єднання необхідно ретельно обробити і очистити склеювані поверхні. Важливу роль в процесі склеювання відіграє температура. Так, при склеюванні елементів конструкцій, які не піддаються в подальших технологічних операціях дії високих температур, можна використовувати клеї холодного затвердіння на епоксидній основі. Для приклеювання кремнієвих кристалів до металевих або керамічних основ корпусів зазвичай використовують клей ВК-2, що є розчином кремнійорганічної смоли в органічному розчиннику з мілкодиспергованим азбестом як активний наповнювач якого використовують скло або кварц.

Технологічний процес приклеювання напівпровідникових кристалів проводять в спеціальних складальних касетах, що забезпечують потрібну орієнтацію кристала на основі корпусу і необхідне притиснення його до основи. Складені касети залежно від використовуваного склеювального матеріалу піддають термічній обробці або витримують при кімнатній температурі.

Особливі групи складають електропровідні і оптичні клеї, використовувані для склеювання елементів і вузлів гібридних і оптоелектронних ІМС. Струмopовідними клеями є композиції на основі епоксидних і кремнійорганічних смол з доданням порошків срібла або нікелю. Серед них широкого поширення набули клеї АС-40В, ЕК-А, ЕК-Б, К-3, ЕВТ і КН-1, що є пастоподібними рідинами з питомим електричним опором 0,01 – 0,001 Ом·см і діапазоном робочих температур від –60 до + 150 °С. До оптичних клеїв висувають додаткові вимоги до значень коефіцієнтів заломлення і світлопропускання. Найбільшого поширення набули оптичні клеї ОК-72 Ф, ОП-429, ОП-430, ОП-3М.

10.3 Приєднання виводів

В мікроелектронних засобах, у яких розмір контактних площадок складає декілька десятків мікрометрів, процес приєднання виводів є однією з найтрудомісткіших технологічних операцій.

Для приєднання виводів до контактних площадок інтегральних схем використовують три різновиди зварювання: термокомпресійне, електроконтактне і ультразвукове.

Термокомпресійне зварювання дозволяє приєднувати електричні виводи товщиною декілька десятків мікрометрів до омичних контактів кристалів діаметром не менше 20 – 50 мкм, причому електричний вивід можна приєднати безпосередньо до поверхні напівпровідника без проміжного металевого покриття. Тонкий золотий або алюмінієвий дріт прикладають до кристала і притискують нагрітим стержем. Після невеликої витримки дріт виявляється щільно зчепленим з поверхнею кристала. Зчеплення відбувається внаслідок того, що навіть при невеликому питомому тиску, що діє на кристал напівпровідника і не викликає його руйнування, локальний тиск в мікроставі на поверхні може бути дуже великим. Це приводить до пла-

стичної деформації виступів, чому сприяє підігрівання до температури нижче евтектичної для даного металу і напівпровідника, що не викликає будь-яких змін в структурі кристала. Деформація (затікання) мікровиступів і мікрозападин, що відбувається, обумовлює пробну адгезію і надійний контакт внаслідок ван-дер-ваальсівських сил зчеплення, а з підвищенням температури між матеріалами, що з'єднуються, вірогідніший хімічний зв'язок. Термокомпресійне зварювання має такі переваги: а) з'єднання деталей відбувається без розплавлення зварюваних матеріалів; б) питомий тиск, що прикладається до кристала, не приводить до механічних пошкоджень напівпровідникового матеріалу; в) з'єднання отримують без забруднень, оскільки не використовують припої і флюси.

До недоліків слід віднести малу продуктивність процесу.

Термокомпресійне зварювання можна здійснювати шляхом з'єднань внапуск і встик. При зварюванні внапуск електричний дротяний вивід накладають на контактну площадку кристала напівпровідника і притискають до нього спеціальним інструментом до виникнення деформації виводу. Вісь дротяного виводу при зварюванні розташовують паралельно площині контактної площадки. При зварюванні встик дротяний вивід приварюють торцем до контактної площадки. Вісь дротяного виводу в місці приєднання перпендикулярна до площини контактної площадки.

Зварювання внапуск забезпечує міцне з'єднання кристала напівпровідника з дротяними выводами із золота, алюмінію, срібла і інших пластичних металів, а зварювання встик – тільки з выводами із золота. Товщина дротяних выводів може складати 15 – 100 *мкм*.

Приєднувати виводи можна як до чистих кристалів напівпровідника, так і до контактних площадок, покритих шаром напиленого золота або алюмінію. При використанні чистих поверхонь кристала збільшується перехідний опір контакту і погіршуються електричні параметри приладів.

Елементи, що підлягають термокомпресійному зварюванню, проходять певну технологічну обробку. Поверхню кристала напівпровідника, покриту шаром золота або алюмінію, знежирюють.

Золотий дріт випалюють при 300 – 600 °С протягом 5 – 20 *хв* залежно від способу з'єднання деталей. Алюмінієвий дріт протравлюють в насиченому розчині їдкого натру при 80 °С протягом 1 – 2 *хв*, промивають у дистильованій воді і сушать.

Основними параметрами режиму термокомпресійного зварювання є питомий тиск, температура нагрівання і час зварювання. Питомий тиск вибирають залежно від допустимої напруги стискування кристала напівпровідника і допустимої деформації матеріалу приварюваного виводу. Час зварювання вибирають експериментальним шляхом.

Відносна деформація при термокомпресійному зварюванні

$$\varepsilon = (1 - 0,8 \frac{d}{b}) 100 \%,$$

де d – діаметр дроту, *мкм*;
 b – ширина з'єднання, *мкм*.

Тиск на інструмент визначають, виходячи з розподілу напруги на стадії завершення деформації:

$$P = A \frac{1+f}{1-\varepsilon} \sigma_{\tau} dD,$$

де A – коефіцієнт, що характеризує зміну напруги в процесі деформації дроту;

f – приведений коефіцієнт тертя, що характеризує тертя між інструментом, дротом і підкладкою;

ε – відносна деформація;

σ_{τ} – межа текучості матеріалу дроту при температурі деформації;

d – діаметр дроту;

D – діаметр притискного інструменту, рівний зазвичай $(2\div 3) d$.

Термокомпресійне зварювання має багато видів, які можна класифікувати за способом нагрівання, за способом приєднання, за формою інструменту. За способом нагрівання розрізняють термокомпресійне зварювання з роздільним нагріванням голки, кристала або пуансона, а також з одночасним нагріванням двох з цих елементів. За способом приєднання термокомпресійне зварювання може бути встик і внапуск. За формою інструменту розрізняють «пташиний дзьоб», «клин», «капіляр» і «голку» (рис. 10.2).

При зварюванні інструментом «пташиний дзьоб» один і той же пристрій подає дріт, приєднує його до контактних площадок інтегральної схеми і автоматично обриває, не випускаючи її із «дзьоба». Інструмент у вигляді «клин» притискує кінець дроту до підкладки, при цьому вдавлюється не весь дріт, а тільки центральна його частина. При зварюванні за допомогою «капілярного інструменту» дріт проходить через нього. Капілярний накопичувач одночасно слугує інструментом, що передає тиск на дріт. При зварюванні «голкою» кінець дротяного виводу підводять в зону зварювання спеціальним механізмом і накладають на контактну площадку, а потім притискають її голкою з певним зусиллям.

Для здійснення процесу термокомпресійного зварювання використовуються різні установки, основними вузлами яких є: робочий столик з нагрівальною колонкою або без неї, механізм створення тиску на приєднуваний вивід, робочий інструмент, механізм подачі і обриву дроту для виводів, механізм подачі кристалів або деталей з приєднаним до них кристалом, механізм суміщення з'єднаних елементів, оптична система візуального спостереження процесу зварювання, блоки живлення і управління. Всі перераховані вузли можуть мати різне конструктивне виконання, проте принцип їх побудови і характер виконуваної роботи однаковий.

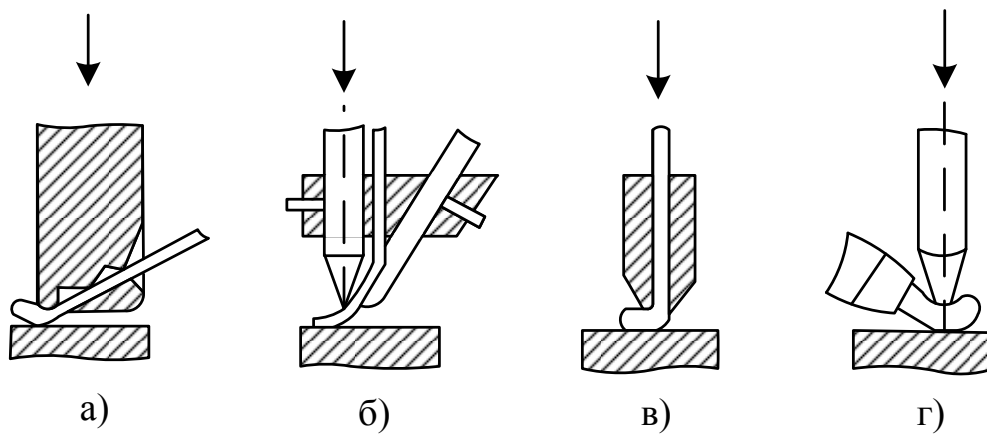


Рисунок 10.2 – Типи інструментів для проведення термокомпресійного зварювання: а – «платиновий дзьоб»; б – «клин»; в – «капіляр»; г – «голка»

Робочий столик всіх установок слугує для закріплення кристала або корпусу інтегральної схеми в певному положенні. Зазвичай робочий столик термокомпресійних установок є змінним, що дозволяє закріплювати кристали різних розмірів і геометричних форм. Нагрівальна колонка слугує для нагрівання кристалів або корпусів до необхідної температури і дозволяє регулювати її в межах $50 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ з точністю регулювання $+5 \text{ }^\circ\text{C}$. Механізм створення тиску призначений для притиснення виводу до контактної площадки кристала і забезпечує регулювання зусилля від $0,01$ до 5 H з точністю $\pm 5\%$. Робочий інструмент є одним з основних вузлів термокомпресійної установки. Його виготовляють з твердих сплавів типу ВК-6М, ВК-15 (для інструментів «платиновий дзьоб» і «капіляр») або із синтетичного корунду (для «клин» і «голки»). Конструкція механізму подачі і відриву дроту залежить від типу установки і форми робочого інструменту. Поширено два способи відриву – важільний і електромагнітний. Процес відриву дротяного виводу після виготовлення термокомпресійного з'єднання на кристалі інтегральної схеми без порушення його міцності багато в чому залежить від конструктивних особливостей механізму. Механізм подачі кристалів або деталей до місця зварювання є звичайними затисками або складними касетами, змонтованими на робочому столику установки. Найбільша продуктивність досягається при використанні касет з металевою стрічкою, на якій корпуси або кристали заздалегідь орієнтуються в заданій площині і в певному положенні. Механізм зміщення зазвичай включає маніпулятори, які дозволяють переміщати кристал до його поєднання із з'єднуваними елементами. Зазвичай використовують маніпулятори двох видів: важільні і пантографні. Оптична система візуального спостереження складається з бінокулярного мікроскопа або збільшувального екрана-проектора. Залежно від розмірів приєднуваних елементів вибирають збільшення оптичної системи від 10 до 100 крат.

Електроконтактне зварювання застосовується для приєднання металевих виводів до контактних площадок кристалів інтегральних мікросхем. Фізична суть процесу електроконтактного зварювання полягає в нагріванні з'єднуваних елементів в локальних ділянках прикладання електродів. Розігрівання локальних областей з'єднуваних елементів відбувається за рахунок максимального електричного опору, що виникає в місцях контакту матеріалу з електродами, при проходженні через електроди електричного струму. Основними параметрами процесу електроконтактного зварювання є значення зварювального струму, швидкість наростання струму, час дії струму на з'єднувані елементи і сила притиснення електродів до з'єднуваних деталей.

Для приєднання виводів до контактних площадок кристалів інтегральних схем використовуються два способи електроконтактного зварювання: *з одностороннім розташуванням двох електродів і з одностороннім розташуванням одного з двоєного електрода*. Другий спосіб відрізняється від першого тим, що робочі електроди виконані у вигляді двох струмопровідних елементів, розділених між собою ізоляційною прокладкою. У момент притиснення такого електрода до дротяного виводу і пропускання через систему, що утворилася, електродного струму відбувається виділення великої кількості теплоти в місці контакту. Зовнішній тиск у поєднанні з розігрівом деталей до температури пластичності або розплавлення приводить до міцного їх з'єднання.

Технологічне устаткування для приєднання виводів методом електроконтактного зварювання містить такі основні вузли: робочий столик, механізм створення тиску на електрод, механізм подачі і відрізання дроту, робочий інструмент, механізм подачі кристалів або корпусів з кристалами, механізм поєднання з'єднуваних елементів, оптичну систему візуального спостереження процесу зварювання, блоки живлення і управління. Робочий столик слугує для розташування на ньому кристалів або корпусів з кристалами. Механізм створення тиску на електрод дозволяє прикладати зусилля 0,1 – 0,5 Н. Принцип дії механізму подання і відрізання дроту базується на русі дроту через капілярний отвір і відрізання його важільним ножом. Форма і матеріал робочого інструменту здійснюють великий вплив на якість і продуктивність процесу електроконтактного зварювання. Зазвичай робоча частина наконечників електродів має форму усіченої піраміди і виготовляється з високоміцного матеріалу на основі карбиду вольфраму марки ВК–8. Механізм подачі кристалів включає набір касет, а механізм поєднання – систему маніпуляторів, які дозволяють розташовувати кристал в потрібному положенні. Оптична візуальна система спостереження складається з мікроскопа або проектора. Блок живлення і управління дозволяє задавати робочий режим зварювання і проводити його перебудову і регулювання при зміні типу кристала і матеріалу виводу.

Ультразвукове зварювання застосовується для приєднання виводів до контактних площадок інтегральних схем, має такі переваги: відсутність

нагрівання з'єднаних елементів, малий час зварювання, можливість зварювання різнорідних і важкозварюваних матеріалів. Відсутність нагрівання дозволяє отримувати з'єднання без плавлення зварюваних деталей. Малий час зварювання дає можливість підвищити продуктивність процесу складання.

Механізм утворення з'єднання між виводом і контактною площадкою при ультразвуковому зварюванні визначається пластичною деформацією, видаленням забруднення, самодифузією і силами поверхневого натягу. Процес ультразвукового зварювання характеризується трьома основними параметрами: амплітудою і частотою ультразвукових коливань, значенням прикладеного тиску і часом проведення процесу зварювання. Установки для ультразвукового зварювання складаються з таких основних вузлів: робочого столика, механізму створення тиску, механізму подачі і відрізання дроту, ультразвукового зварювального пристрою і оптичної системи.

10.4 Герметизація кристала

Після того, як напівпровідниковий кристал орієнтований і закріплений на основі корпусу і до його контактних площадок приєднані виводи, його необхідно захищати від впливу навколишнього середовища, тобто створювати навколо нього герметичну та механічно міцну оболонку. Така оболонка може бути створена або під'єднанням до основи корпусу спеціальної кришки (балона), яка нагріває напівпровідниковий кристал та ізолює його від навколишнього середовища, або обволіканням основи корпусу, з розташованим на ньому напівпровідниковим кристалом пластмасою, яка також відокремлює кристал від навколишнього середовища. Для герметичного з'єднання основи корпусу з кришкою або балоном (дискретний варіант напівпровідникових приладів) широко використовують паяння, електроконтактне та холодне зварювання, а для герметизації кристала на тримачі – заливання, обволікання і пресування пластмасою.

Паяння. Паяння застосовують для герметизації як дискретних приладів, так і ІМС. Найбільше використання цей процес знайшов при складанні і герметизації корпусів діодів і транзисторів. Елементи конструкції корпусів містять окремі вузли і блоки, отримані на базі процесів паяння: металу з металом, металу з керамікою і металу зі склом.

Паяння металу з металом. Основними елементами паяного з'єднання при герметизації інтегральних схем є основа корпусу і кришка. Процес з'єднання основи корпусу з кришкою може проводитися або з використанням прошарку припою, який розташовується між основою корпусу і кришкою у вигляді кільця, або без прошарку припою. У другому випадку краї основи корпусу і кришки заздалегідь лудять припоєм.

При герметизації діодів, транзисторів і тиристорів залежно від конструкції корпусу можуть мати місце декілька паяних з'єднань. Так, паян-

ням з'єднують кристалотримач з балоном і герметизують верхні виводи корпусу тиристора.

До процесу паяння при герметизації висувають вимоги до чистоти початкових деталей, які заздалегідь піддаються очищенню, промиванню і сушінню. Процес паяння проводять у вакуумі, інертному або відновному середовищі. При використанні флюсів паяння можна проводити на повітрі. Флюси покращують змочування і розтікання припою по поверхнях з'єднаних деталей, а це основа утворення герметичного паяного шва. За призначенням флюси поділяють на дві групи: захисні і активні. Захисні флюси оберігають деталі від окиснення в процесі паяння, а активні сприяють відновленню оксидів, що утворилися в процесі паяння. Як захисні флюси найчастіше використовують розчини каніфолі. Активними флюсами слугують хлористий цинк і хлористий амоній. Для паяння використовують припої ПОС–40 і ПОС–60.

Паяння кераміки з металом. У напівпровідниковій техніці, як і в електровакуумній, широке застосування знаходять спаї кераміки з металом, які забезпечують надійнішу герметизацію інтегральних схем.

Припої, які використовують для паяння металу з металом, не змочують поверхню керамічних деталей і тому не спаюються з керамічними деталями корпусів інтегральних схем.

Для отримання паяних з'єднань кераміки з металом її заздалегідь металізують. Металізація проводиться пастами, які наносять на керамічну деталь. Хороше зчеплення шару металу з поверхнею кераміки досягається високотемпературним впалюванням. При впалюванні паст розчинник випаровується, а металеві частинки міцно з'єднуються з поверхнею керамічної деталі. Товщина впаленого шару металу складає зазвичай декілька мікрометрів. Нанесення і впалювання пасти можна повторювати по декілька разів, при цьому товщина шару збільшується і якість шару металізації покращується. Отриману таким чином металізовану кераміку можна паяти звичайними припоями.

Поширеним способом нанесення металевих покриттів на деталі керамічних корпусів є спікання шару пасти металізації з керамікою при високій температурі. Як початкові матеріали використовуються порошки молібдену, вольфраму, ренію, танталу, заліза, нікелю, марганцю, кобальту, хрому, срібла і міді з розмірами зерен в декілька мікрометрів. Для приготування паст ці порошки розводять в зв'язувальних речовинах: ацетоні, амілацетаті, метиловому спирті і ін.

Паяння металізованих керамічних деталей з металевими проводиться звичайним способом.

Паяння скла з металом. Скло ні з одним з чистих металів не спаюється, оскільки чиста поверхня металів не змочується або погано змочується рідким склом.

Проте якщо поверхня металу покрита шаром оксиду, то змочування поліпшується, оксид частково розчиняється в склі і після охолодження

може відбутися герметичне з'єднання. Основна трудність при виготовленні спаїв метал – скло полягає в підборі компонентів скла і металу з достатньо близькими значеннями коефіцієнтів термічного розширення у всьому діапазоні від температури плавлення скла до мінімальної робочої температури мікроелектронного засобу. Навіть невелика відмінність в коефіцієнтах термічного розширення може привести до утворення мікротріщин і розгерметизації готового приладу. При паянні скла з металом для отримання герметичних спаїв необхідно: підбирати компоненти з однаковими коефіцієнтами термічного розширення; застосовувати скляний припій у вигляді суспензії з металевим порошком, поступово переходити від металу до основного скла за допомогою проміжного скла; металізувати поверхню скла.

Для отримання герметичних спаїв скла з металом використовують три способи нагрівання початкових деталей: у полум'ї газового пальника, за допомогою струмів високої частоти, в муфельних або силітових печах. У всіх випадках процес проводять на повітрі, оскільки наявність оксидної плівки сприяє процесу паяння.

Електроконтактне зварювання. Цей процес широко використовується для герметизації корпусів мікроелектронних засобів. Воно базується на розплавленні певних частин металевих з'єднаних деталей, за рахунок проходження через них електричного струму. Суть процесу електроконтактного зварювання полягає в тому, що до зварюваних деталей підводять два електроди, на які подають певну напругу. Оскільки площа електродів значно менша, ніж площа зварюваних деталей, то при проходженні через всю систему електричного струму в місці зіткнення зварюваних деталей, що знаходяться під електродами, виділяється велика кількість теплоти. Це відбувається за рахунок великої щільності струму в малому об'ємі матеріалу зварюваних деталей. Великі щільності струму розігрівають контактні ділянки до розплавлення певних зон початкових матеріалів.

При припиненні дії струму температура контактних ділянок знижується, що спричиняє охолодження розплавленої зони і її рекристалізацію. Отримана таким чином зона рекристалізації герметично з'єднує однорідні і різнорідні металеві деталі одну з другою.

Форма зварного шва залежить від геометричної конфігурації робочих електродів. Якщо електроди виконані у вигляді загострених стержнів, то зварювання виходить точкове. Якщо електроди у вигляді трубки, то зварювальний шов має форму кільця. При пластинчастій формі електродів зварювальний шов має вигляд смуги.

Велике значення для якісної герметизації корпусів приладів електрозварювання має матеріал, з якого виготовляють робочі електроди. До матеріалу електродів висувають підвищені вимоги щодо тепло- і електропровідності, а також механічної міцності. Щоб задовольнити ці вимоги електроди роблять комбінованими, виконаними з двох матеріалів, один з яких має високу теплопровідність, а інший – механічну міцність. Широ-

кого поширення набули електроди, основа яких виготовлена з міді, а осердя (робоча частина) – із сплаву вольфраму з міддю.

Разом із комбінованими використовують електроди, виконані з однорідного металу або сплаву. Так, для зварювання сталевих деталей використовують електроди з міді (М1 та М3) і бронзи (0,4 – 0,8% хрому, 0,2 – 0,6% цинку, решта – мідь). Для зварювання матеріалів з високою електропровідністю (мідь, срібло і т. п.) застосовують електроди з вольфраму і молібдену.

Електроди повинні добре прилягати один до одного по робочих зварюваних поверхнях. Наявність дефектів на робочих поверхнях деталей (риски, вм'ятини, раковини і т. п.) приводить до нерівномірного розігрівання зварюваних ділянок деталей і утворення негерметичного зварного шва в готовому виробі. Особливу увагу слід приділяти кріпленню електродів в електротримачах, оскільки при поганому кріпленні між ними виникає так званий перехідний опір, який, приводить до розігрівання самих електротримачів. Електроди повинні бути строго співвісні між собою. Відсутність співвісних електродів приводить до виникнення браку при зварюванні.

Якість зварювання залежить від вибраного електричного і часового режиму. При малому значенні зварювального струму теплота, що виділяється, виявляється недостатньою для нагрівання деталей до температури плавлення зварюваних металів, в цьому випадку виходить «непроварення» деталей. При великому значенні зварювального струму виділяється дуже велика кількість теплоти, яка може розплавити не тільки місце зварювання, але і всю деталь, що пов'язано з «перепаленням» деталей і виплеском металу.

Велике значення має час проходження зварювального струму через електроди і деталі. Як тільки включається зварювальний струм, в місці контакту починається розігрівання зварюваних деталей, причому точки плавлення досягають тільки поверхневі шари металу. Якщо у цей момент вимкнути струм, то вийде неміцне зварювання. Перегрів ядра розплавленого металу приводить до його розростання і виплеску металу назовні. В результаті цього можуть утворюватися раковини, які різко знижують механічну міцність і герметичність зварних швів.

Перед проведенням процесу зварювання електроконтакту всі деталі корпусів інтегральних схем піддають ретельній обробці (промиванню, знежиренню, протравленню, зачищуванню і т. п.).

Якість зварювання контролюють зовнішнім оглядом і за допомогою поперечних розрізів зварених виробів. Основна увага приділяється механічній міцності і герметичності зварних швів.

Холодне зварювання. В тих випадках, коли при герметизації початкових деталей корпусів недопустиме їх нагрівання і потрібна висока чистота процесу, застосовують холодне зварювання – зварювання під тиском. Крім того, холодне зварювання забезпечує міцне герметичне з'єднання

часто використовуваних різнорідних металів (міді, нікелю, ковару і сталі).

До недоліків даного методу слід віднести наявність значної деформації деталей корпусів в місці з'єднання, що приводить до істотної зміни форми і габаритних розмірів готових виробів.

Зміна зовнішнього діаметра корпусу приладу залежить від товщини початкових зварюваних деталей. Зміна зовнішнього діаметра готового приладу після проведення процесу холодного зварювання

$$\Delta D = (0,6 \div 1,3)(S_B \div S_H),$$

де S_B – товщина буртика верхньої деталі до зварювання;

S_H – товщина буртика нижньої деталі до зварювання.

Велике значення для проведення холодного зварювання має наявність на поверхні з'єднаних деталей плівки оксиду. Якщо ця плівка пластична і м'якша, ніж основний метал, то під тиском вона розтікається, і стає тоншою, розділяючи тим самим чисті металеві поверхні, внаслідок чого зварювання не відбувається. Якщо оксидна плівка крихкіша і твердіша, чим метал, що покривається нею, то під тиском вона тріскається, причому розтріскування відбувається однаково на обох з'єднаних деталях. Забруднення, що були на поверхні плівки, виявляються упакованими з обох боків в своєрідні пакети, міцно затиснуті по краях. Подальше збільшення тиску приводить до розтікання чистого металу до периферійних ділянок. Найбільше розтікання відбувається в серединній площині шва, що утворився, завдяки чому всі пакети із забрудненнями витісняються назовні, а чисті поверхні металу, вступаючи в міжатомні взаємодії, міцно зчіплюються один з одним.

Таким чином, крихкість і твердість – це основні якості оксидної плівки, що забезпечують герметичне з'єднання. Оскільки у більшості металів товщина покриття оксидними плівками не перевершує 10^{-7} см, деталі з таких металів перед зварюванням нікелюють або хромують. Плівки нікелю і хрому мають достатню твердість і крихкість, отже значно покращують зварне з'єднання.

Перед проведенням процесу холодного зварювання всі деталі знежирують, промивають і сушать. Для утворення якісного з'єднання двох металевих деталей необхідно забезпечити достатню деформацію, пластичність і чистоту зварюваних деталей.

Ступінь деформації K при холодному зварюванні повинен знаходитися в межах 75 – 85%:

$$K = \frac{2H - t}{2H} 100\%,$$

де $2H$ – сумарна товщина зварюваних деталей;

t – товщина зварного шва.

Міцність зварного з'єднання

$$P = 0,4DH\sigma,$$

де P – зусилля розриву;

D – діаметр відбитку виступу пуансона;

H – товщина однієї із зварюваних деталей з найменшим розміром;

σ – межа міцності на розтягування з найменшим значенням.

Для деталей корпусів при холодному зварюванні рекомендуються такі поєднання матеріалів: мідь МБ – мідь МБ, мідь МБ – мідь М1, мідь МБ – сталь 10, сплав Н29К18 (ковар) – мідь МБ, ковар – мідь М1.

Критичний тиск, необхідний для пластичної деформації і холодного зварювання, наприклад для поєднання мідь – мідь, складає $1,5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, для поєднання мідь – ковар він дорівнює $2 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

Герметизація пластмасою. Дорогу герметизацію скляних, металоскляних, металокерамічних і металевих корпусів успішно замінюють пластмасовою герметизацією. У ряді випадків це підвищує надійність мікроелектронних засобів, оскільки усувається контакт напівпровідникового кристала з газовим середовищем, що знаходиться всередині корпусу.

Пластмасова герметизація дозволяє надійно ізолювати кристал від зовнішніх дій і забезпечує високу механічну і електричну міцність конструкції. Для герметизації ІМС широко використовують пластмаси на основі епоксидних, кремнійорганічних і поліефірних смол.

Основними методами герметизації є заливання, обволікання і пресування під тиском. При герметизації заливанням використовують порожнисті форми, в які поміщають напівпровідникові кристали з припаяними зовнішніми виводами. Всередину форм заливають пластмасу.

При герметизації приладів обволіканням беруть два (або більше) виводи, виготовлених із стрічкового або дротяного матеріалу, з'єднують їх між собою скляною або пластмасовою бусою і на один з виводів напаяють напівпровідниковий кристал, а до іншого (інших) виводу приєднують електричні контактні провідники. Отриману таким чином збірку герметизують обволіканням пластмасою.

Найбільш перспективною шляхом вирішення проблеми складання і герметизації приладів є герметизація кристалів з активними елементами на металевій стрічці з подальшою герметизацією пластмасою. Перевага цього методу герметизації полягає в можливості механізації і автоматизації процесів складання різних типів ІМС. Основним елементом конструкції пластмасового корпусу є металева стрічка. Для вибору профілю металевої стрічки необхідно виходити з розмірів кристалів, теплових характеристик приладів, можливості монтажу готових приладів на друковану плату електронної схеми, максимальної міцності на відрив від корпусу, простоти конструкції.

Технологічна схема пластмасової герметизації приладу включає осно-

вні етапи планарної технології. Приєднують напівпровідникові кристали з активними елементами до металевої стрічки, покритої золотом, евтектичним сплавом золота з кремнієм або звичайним паянням. Металеву стрічку виготовляють з ковару, міді, молібдену, сталі, нікелю.

Контрольні запитання

1. Які основні технологічні операції містить процес складання?
2. За допомогою яких процесів проводять приєднання кристала ІМС до основи корпусу?
3. Поясніть суть процесу паяння.
4. Охарактеризуйте технологію «перевернутого кристала».
5. Як відбувається приплавлення з використанням евтектичних сплавів?
6. Як здійснюється склеювання різних елементів інтегральних схем?
7. Який процес використовують для приєднання виводів до контактних площадок інтегральних схем?
8. Які недоліки термокомпресійного зварювання?
9. Охарактеризуйте види термокомпресійного зварювання.
10. Які типи інструментів використовуються для проведення термокомпресійного зварювання?
11. Для чого застосовується зварювання електроконтакту?
12. Порівняйте способи електроконтактного зварювання.
13. Для чого потрібна герметизація кристала?
14. Охарактеризуйте способи герметизації кристала.

ЛІТЕРАТУРА

1. Климачев И. И. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / И. И. Климачев, В. А. Иовдальский. – М. : Техносфера, 2006. – 352 с.
2. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем и микросборок / Коледов Л. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
3. Курносов А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.
4. Дубов Є. В. Проектування мікросбірок та гібридних інтегральних схем / Дубов Є. В., Лободзінська Р. Ф., Мізерний В. М. – Вінниця : ВДТУ, 2000. – 137 с.
5. Невлюдов И. Ш. Визуальный мониторинг физико-химических процессов в производстве и эксплуатации электронной аппаратуры / Невлюдов И. Ш., Андрусевич А. А., Омаров М. А. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 236 с.
6. Nikolaev I. Microelectronic devices and fundamentals of their design / I. Nikolaev, N. Filinyuk. – М. : MIR publishers, 1989. – 340 p.
7. Бушминский И. П. Технологическое проектирование микросхем СВЧ : учеб. пособие / И. П. Бушминский, Г. В. Морозов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 354 с.
8. Рындин Е. А. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование / Таганрог. гос. радиотехнический ун-т / Е. А. Рындин, Б. Г. Коноплев.– Таганрог : Изд-во Таганрог. гос. радиотехн. ун-та, 2001. – 146 с.
9. Лебедев Б. К. Интеллектуальные процедуры синтеза топологии СБИС / Таганрогский гос. радиотехн. ун-т / Лебедев Б. К. – Таганрог : Изд-во Таганрог. гос. радиотехн. ун-та, 2003. – 107 с.
10. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : Учеб. пособие для вузов / Коледов Л. А. – СПб. : Лань, 2008. – 399 с.
11. Marsh S. Practical MMIC Design / Marsh S. – Boston : Artech House, inc. – 2006. – 356 p.
12. <http://pctuning.tyden.cz/hardware/procesory-pameti/34087-od-pisku-k-procesoru-tajemstvi-technologie-vyroby-cipu>.

ГЛОСАРІЙ

Абразив – abrasive

Абразивний матеріал – abrasive

Анізотропія – anisotropy

Герметизація – sealing

Густина – density

Дефект – defect

Діелектрик – dielectric

Дисперсія – dispersion

Дрейф електронів – electrons drift

Домішка – admixture

Домішкові атоми – admixture atoms

Дифузія – diffusion

Електроніка – electronic

Електрод – electrode

Електронно-дірковий перехід – electron-hole junction

Елемент - element

Енергія – energy

Епітаксія – epitaxy

Забруднення – contamination

Інтегральна мікросхема – integrated circuit

Іонна імплантація – ion implantation

Іонне легування – ion alloying

Іонно-плазмове розпилювання – ion-plasma dispersion

Катодне розпилювання – cathode dispersion

Компонент – component

Контактна різниця потенціалів – contact difference of potentials

Концентрація - concentration

Кристал – crystal
Кристалічна ґратка – crystalline grating
Лазер – laser
Літографія – lithography
Магнітні матеріали – magnetic materials
Мезаструктура – mesostructure
Мікроелектроніка – microelectronic
Надпровідність - superconductivity
Напівпровідник – semiconductor
Напівпровідникова інтегральна схема – semiconductor integrated circuit
Напруга – voltage
Оже-електрон – auger electron
Осадження – precipitation
Підкладка – substrate
Піроліз – pyrolysis
Питома електропровідність – specific electroconductivity
Питомий опір – specific resistance
Прилад – device
Пристрій – device
Полірування – polish
Потенціальна енергія – potential energy
Потенціальна крива – potential curve
Різання пластин – cutting of plates
Робота виходу електрона – electron work function
Розламування пластин – breaking of plates
Рухливість носіїв – carrier mobility
Сила взаємодії – strength of the interaction
Скрайбування – scribing

Спін – spin

Структура – structure

Струм – current

Теплоємність – heat capacity

Теплопровідність – heat conductivity

Термічне випаровування – thermal evaporation

Технологічний маршрут – technology route

Технологія – technology

Тонка плівка – thin film

Точка роси – dew point

Транзистор – transistor

Фотолітографія - photolithography

Фотон – photon

Фоторезист - photoresist

Фотошаблон – photomask

Хлорид – chloride

Шліфування -grinding

Навчальне видання

**Павлов Сергій Миколайович
Войцеховська Олена Валеріївна**

ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено О. В. Войцеховською

Підписано до друку 25.05.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 21,12.
Наклад 50 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2017-087.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 59-85-32, 59-81-59,
press.vntu.edu.ua,
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.