

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

Володимир Прокопів

**ФІЗИКА І ТЕХНОЛОГІЯ
ТОНКИХ ПЛІВОК**

Навчальний посібник

Том I

ТЕХНОЛОГІЯ ТОНКИХ ПЛІВОК

Івано-Франківськ
2010

УДК 621.382

ББК 31.233

П 80

Рекомендовано до друку Вченою радою фізико-технічного факультету Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

Рецензенти:

кандидат фізико-математичних наук, доцент **М.Ф. Павлюк**

кандидат фізико-математичних наук, доцент **І.М. Ліщинський**

Прокопів В. В.

Фізика і технологія тонких плівок : навчальний посібник.
П 80 У 2-х т. – Т. 1. Технологія тонких плівок / Володимир Васи-
льович Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський на-
ціональний університет імені Василя Стефаника, 2010. – 92 с.

В посібнику розглянуті властивості тонких плівок та методи їх одержання при виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем. Описані вакуумні системи та устаткування для нанесення тонких плівок. Показано як здійснювати контроль параметрів плівок і технологічних режимів їхнього нанесення.

У першому томі розглянуто технологічні аспекти тонкоплівкового матеріалознавства.

Посібник призначений для студентів та магістрантів відповідних спеціальностей вищих навчальних закладів. Корисний буде аспірантам, науковим та інженерно-технічним працівникам що займаються проблемами тонкоплівкового матеріалознавства.

© Прокопів В.В., 2010

© Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010

ВСТУП

Тонкі плівки широко застосовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем (ІМС), а також при виготовленні фотосаблонів – основного технологічного інструмента мікроелектроніки.

Одержання високоякісних і відтворюваних за електрофізичними параметрами тонкоплівкових шарів є одним з найважливіших технологічних процесів формування структур як дискретних діодів і транзисторів, так і активних і пасивних елементів ІМС. Тонкі плівки наносяться також при заключних технологічних операціях виготовлення напівпровідникових приладів і ІМС, тобто після виконання безлічі інших операцій. При цьому брак особливо економічно відчутний і, природно, повинен бути зведений до мінімуму. Таким чином, від досконалості технологічних процесів нанесення тонких плівок у значній мірі залежать надійність і якість виробів мікроелектроніки, технічний рівень і економічні показники їхнього виробництва.

Тонкоплівкова технологія базується на складних фізико-хімічних процесах і застосуванні різних матеріалів. Так, тонкоплівкові резистори, електроди конденсаторів і між'єднання виконують напиленням металевих плівок, а міжшарову ізоляцію і захисні покриття – діелектричних.

Важливим етапом є контроль параметрів тонких плівок (швидкості їхнього нанесення, товщини і її рівномірності, поверхневого опору), що проводиться за допомогою спеціальних приладів як при виконанні окремих технологічних операцій, так і по завершенні всього процесу.

Наносять тонкі плівки різними методами: термічного випаровування, йонного розпилення, рідинно- та газофазної епітаксії. Для реалізації цих методів розроблені спеціальні вакуумні установки періодичної напівбезупинної і безупинної дії, на яких можна наносити різні за складом і властивостями шари з різних джерел у єдиному технологічному циклі. При цьому виключається вплив атмосферного повітря на кожен нанесений шар, підвищується продуктивність за рахунок зменшення циклів відкачування робочих камер, а також нагрівання й охолодження підкладок, з'являється можливість повної автоматизації установок на основі мікропроцесорних систем керування.

Ефективність роботи сучасного вакуумного устаткування для нанесення тонких плівок, оснащеного відкачуючими системами, у які входять насоси різних принципів дії, спеціальна арматура і прилади для вимірювання вакууму, багато в чому залежить від правильності його експлуатації, знання персоналом основ вакуумної техніки.

При нанесенні тонких плівок дуже важливо строго дотримуватися електронно-вакуумної гігієни. Забруднення у виді домішкових хімічно активних газів, що попадають на поверхню оброблюваних підкладок як при проведенні технологічних операцій, так і при міжопераційному транспортуванні і збереженні, можуть істотно змінювати структуру і електрофізичні властивості шарів, що наносяться. Осідання дрібних частинок пилу може призвести до необоротного дефекту плівкових структур – обривів і замикань міжз'єднань. Тому устаткування для нанесення тонких плівок звичайно встановлюють у чистих кімнатах – гермозонах, а обслуговуючий його персонал повинен стежити за чистотою робочого місця і технологічної тари, а також обов'язково працювати у спецодязі.

В другому томі посібника основна увага приділена фізиці тонких плівок. Розглянуто експериментальні і теоретичні дослідження впливу технологічних факторів вирощування на властивості тонких плівок халькогенідів свинцю і телуриду олова. Також описано устаткування для нанесення тонких плівок.

При підготовці посібника використано матеріали з підручників, посібників та монографій перелічених в списку рекомендованої літератури, де студент може знайти більш повну інформацію з розглядуваних питань.

1. ТОНКІ ПЛІВКИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДАХ І МІКРОСХЕМАХ

1.1. Основні положення

Виробництво як дискретних (окремих) напівпровідникових приладів, так і інтегральних мікросхем (ІМС) в основному базується на тих самих технологічних процесах (епітаксії, фотолітографії, травленні, дифузії, нанесенні плівок і ін.). Слід зазначити, що при виготовленні усіх видів напівпровідникових приладів і ІМС у тому чи іншому обсязі використовується технологічний процес нанесення тонких плівок у вакуумі – тонкоплівкова технологія.

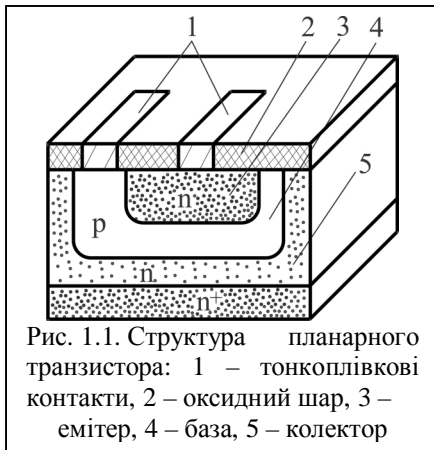


Рис. 1.1. Структура планарного транзистора: 1 – тонкоплівкові контакти, 2 – оксидний шар, 3 – емітер, 4 – база, 5 – колектор

Розглянемо застосування тонких плівок на прикладі виготовлення транзистора, тому що він є не тільки дискретним напівпровідниковим приладом, але й основним елементом ІМС.

Дискретний напівпровідниковий прилад, призначений для підсилення струму чи іншого перетворення електричних сигналів, називають **транзистором**. Планарний транзистор

(рис. 1.1) являє собою кристал напівпровідника з двома p - n -переходами, що утворюють колектор 5, емітер 3 і базу 4. Після формування p - n -переходів у кристалі напівпровідника нанесенням металевих плівок у вакуумі створюють омичні контакти 1 до бази і емітера.

Найбільш часто внаслідок простоти і технологічності застосовують омичні контакти з алюмінію. Якщо виводи приєднують пайкою, на алюміній додатково наносять шар золота. Омичні контакти на кремнії електропровідності n -типу виконують із золота, яке для поліпшення адгезії відпалюють при 370 - 500°C . Високотемпературні контакти на кремнії одержують послідовним нанесенням шару хрому, а потім нікелю, що допускає пайку звичайними припоями. Велике поширення одержали алюмінієві контакти з підшаром титану, що володіє високою адгезією до кремнію. Оскільки шар титану на повітрі швидко окисню-

ється, що перешкоджає надійному приєднанню електричного виводу, на нього наносять шар золота, срібла чи нікелю.

Мікромініатюрний функціональний електронний блок, сукупність робочих елементів якого виготовлена в єдиному комплексі групових технологічних процесів, називають **інтегральною мікросхемою** (ІМС). Показником складності ІМС є **ступінь інтеграції**, що характеризується кількістю елементів, що входять в інтегральну схему. По технологічних методах виготовлення ІМС поділяються на плівкові, гібридні і напівпровідникові (монолітні). Ці методи не є конкуруючими, а доповнюють один одного.

У **плівкових ІМС** всі елементи (резистори, конденсатори) і

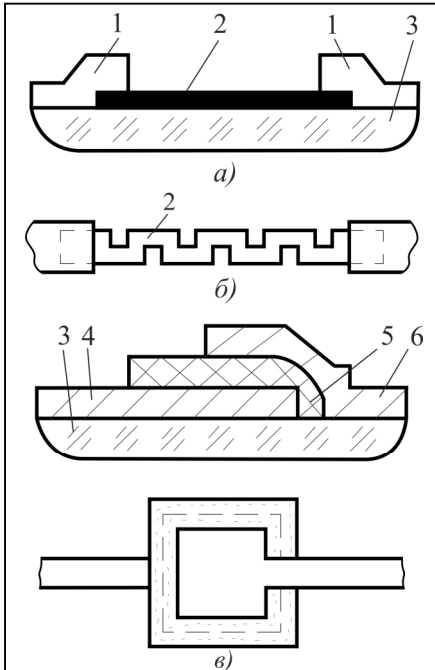


Рис. 1.2. Структура тонкоплівкових резисторів (а, б) і конденсатора (в): 1 – контактні виводи, 2 – резистивна плівка, 3 – діелектрична підкладка, 4, 6 – нижній і верхній металеві плівкові електроди, 5 – плівковий діелектрик

де ρ – питомий об'ємний опір плівки.

міжелементні з'єднання виконуються у виді плівок. Плівкові ІМС створюють пошаровим нанесенням тонких плівок різних матеріалів на спільну основу – діелектричну підкладку. На плівкових елементах, як правило, виконуються різні резистивно-ємнісні схеми (RC-схеми).

Тонкоплівковий резистор (рис. 1.2, а, б) – елемент мікросхеми, розміщений на діелектричній підкладці 3 і здатний чинити опір електричному струму, складається з двох контактних виводів 1 і резистивної плівки 2 лінійної чи зигзагоподібної конфігурації.

Опір плівкових резисторів визначають за опором R_{\square} (Ом/квадрат) квадрата тонкоплівкового матеріалу товщиною d_n , до двох протилежних сторін якого підведені контактні виводи:

$$R_w = \frac{\rho}{d_n}, \quad (1.1)$$

Таким чином, опір плівкового резистора не залежить від розміру сторони квадрата і дорівнює його поверхневому опору. Для виготовлення тонкоплівкових резисторів використовують сплави, опір яких у багато разів більший опору чистих металів (наприклад, ніхром, МЛТ, нітрид танталу, суміш хрому й оксиду кремнію, металокерамічні суміші – кермети).

Тонкоплівковий конденсатор (рис. 1.2, в) – це елемент мікросхеми, здатний накопичувати електричний заряд, який являє собою плоску тришарову структуру, що складається із шару діелектрика, розташованого між двома металевими шарами – електродами (обкладками). Питома ємність (Ф/м^2) плоского плівкового конденсатора:

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\epsilon}{d_d}, \quad (1.2)$$

де d_d – товщина шару діелектрика, ϵ – діелектрична проникність.

Бажано, щоб питома ємність плівкового конденсатора була якнайбільшою. Тому вибирають діелектрик, що володіє великою діелектричною проникністю ϵ , і прагнуть зменшити товщину d_d плівки з нього. Однак ці параметри не можна змінювати в широких межах. Більшість використовуваних у тонкоплівковій технології діелектриків мають ϵ від 3 до 1000. При цьому товщина одержуваних діелектричних плівок складає не менше 0,3 мкм. Основною технологічною задачею при виготовленні плівкових конденсаторів є одержання достатньо тонких діелектричних плівок мінімальної пористості.

Номінали тонкоплівкових конденсаторів визначаються точністю, з якою може бути сформований діелектричний шар. Товщина діелектричних плівок, що допускається, обмежується їхньою електричною міцністю, що знижується внаслідок наскрізних пор і інших дефектів.

Найбільш часто як діелектрик у тонкоплівкових конденсаторах використовують плівки оксидів кремнію SiO_2 і танталу Ta_2O_5 , а в якості обкладок – плівки металів високої провідності. Однак плівки золота, срібла і міді для цих цілей неприйнятні, тому що атоми цих металів мають високу рухливість і, проникаючи в діелектричну плівку, призводять до збоїв у роботі конденсаторів.

Найбільш часто обкладки конденсаторів виготовляють із плівок алюмінію. При цьому верхні обкладки танталових конденсаторів виготовляють із плівок алюмінію з підшаром ванадію.

Контактні площадки плівкових ІМС, як правило, є продовженням з'єднаних провідникових ліній (міжз'єднань) і служать для припаювання чи приварки зовнішніх виводів корпусу.

Підкладками плівкових ІМС служать плоскі прямокутні пластини діелектрика, що мають розміри 48×60, 60×96, 96×120 і товщину від 0,6 до 1,6 мм. Звичайно на одну підкладку одночасно наносять кілька плівкових мікросхем, а потім її розрізають. Попередньо підкладки ретельно шліфують і полірують, тому що подряпини і мікротріщини на їхній поверхні викликають нестабільність тонкоплівкових мікросхем.

Матеріали, з яких виготовляють підкладки, повинні мати високий електричний опір і теплопровідність, термостійкість до 500–600°C, малу діелектричну проникність, достатню механічну міцність і стабільність розмірів, можливість обробки поверхні до $R_z^{0,1}$ – $R_z^{0,05}$, відсутність газовиділення в умовах вакууму і підвищеної температури, хімічну інертність до матеріалів плівок і їх розчинників. Крім того, їхній температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) повинний бути близький до ТКЛР матеріалу плівок. Найбільш поширені для виготовлення підкладок є ситали, алюмокераміка і скло. Ситали являють собою продукт кристалізації скла з дуже дрібними (до 0,01 мкм) і рівномірно розподіленими по об'ємі кристала.

Одним з важливих факторів, що впливають на відтворюваність електрофізичних параметрів тонких плівок, є ступінь чистоти поверхні підкладки. На практиці ідеально чисті поверхні одержати неможливо, тому що вони надзвичайно активні і швидко покриваються газами, що є у навколишньому середовищі, вологою, пилом і різними поверхнево-активними речовинами, тонкі шари яких важко видалити. Очищають підкладки різними фізико-хімічними способами.

Попередньо молекули води й адсорбовані молекули газів видаляють з поверхні підкладок перед нанесенням плівок у вакуумній камері при температурі 200–300°C за час 2–3 хв. Завершальну стадію очищення виконують йонним бомбардуванням у вакуумній камері. Якщо підкладки помістити в зону йонів великих енергій, процес очищення протікає у тліючому розряді і молекулярні шари води, газів, оксидів, а також інших сполук видаляються за кілька хвилин.

Крім того, необхідно знати, що можливе повторне забруднення підкладок при транспортуванні їх у вакуумній камері. Небезпека повторних забруднень полягає у тому, що їх хімічний склад невідомий і не завжди однаковий. Тому такі забруднення призводять до несподіваних наслідків, особливо в умовах промислового виробництва.

Гібридні ІМС – це тонкоплівкові мікросхеми, що складаються з пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, контактних площадок) і дискретних активних елементів (діодів, транзисторів). Гібридна ІМС, показана на рис. 1.3, являє собою діелектричну підкладку з нанесеними на неї плівковими конденсаторами і резисторами і приєднаним



транзистором, база якого з'єднана з верхньою обкладкою конденсатора шиною у вигляді дуже тонкого дротика.

У напівпровідникових ІМС всі елементи і міжелементні з'єднання виконані в об'ємі і на поверхні кристала напівпровідника. Напівпровідникові ІМС являють собою плоский кристал напівпровідника (підкладка), у поверхневому шарі якого різними технологічними прийомами сформовані еквівалентні елементам електричної схеми локальні області (діоди, транзистори, конденсатори, резистори та ін.), об'єднані на поверхні півковими металевими з'єднаннями (міжз'єднаннями).

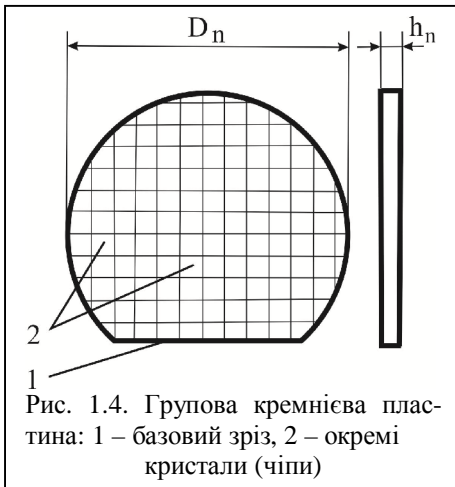
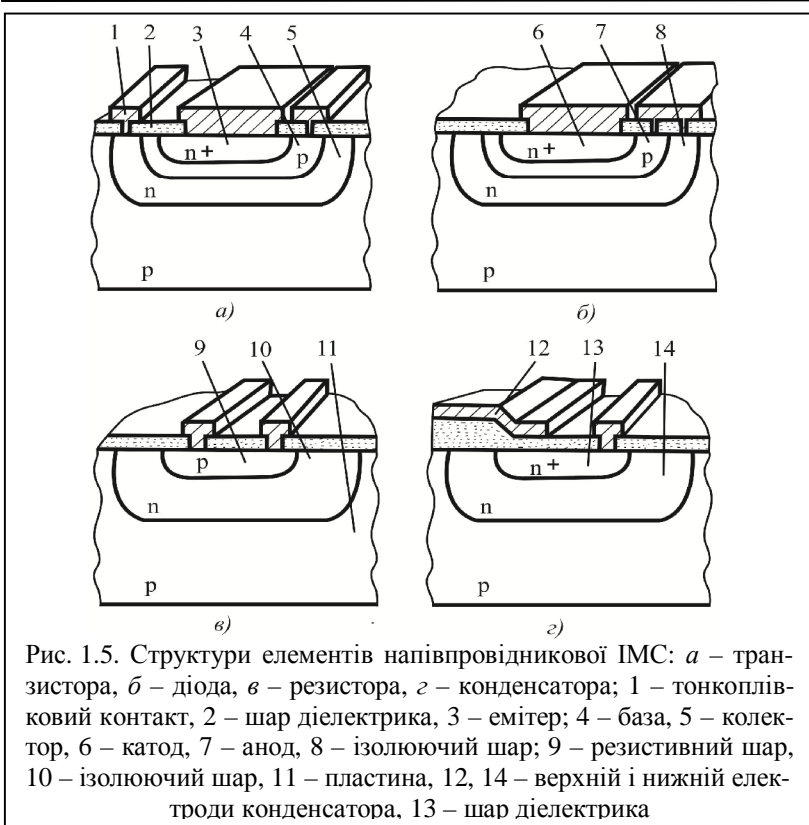


Рис. 1.4. Групова кремнієва пластина: 1 – базовий зріз, 2 – окремі кристали (чіпи)

В якості підкладок напівпровідникових ІМС служать круглі пластини кремнію, германію чи арсеніду галію, що мають діаметр 60–150 мм і товщину 0,2–0,4 мм.

Напівпровідникова підкладка є груповою заготовкою (рис. 1.4), на якій одночасно виготовляють велику кількість ІМС. Після завершення основних технологічних операцій її розрізають на частини – кристали 2 (чіпи). Розміри сторін кристалів можуть бути від 3 до



10 мм. Базовий зріз 1 пластини служить для її орієнтації при різних технологічних процесах.

Структури елементів напівпровідникової ІМС – транзистора, діода, резистора і конденсатора, виготовлених відповідним легуванням локальних ділянок напівпровідника методами планарної технології, показані на рис. 1.5, *а-з*. Планарна технологія характеризується тим, що усі виводи елементів ІМС розташовуються в одній площині на поверхні, одночасно з'єднуються в електричну схему тонкими плівковими міжз'єднаннями. При планарній технології проводиться групова обробка, тобто протягом одного технологічного процесу на підкладках одержують велику кількість ІМС, що забезпечує високу технологічність і економічність, а також дозволяє автоматизувати виробництво.

У суміщених ІМС (рис. 1.6) на кремнієвій підкладці створюють напівпровідникові і тонкоплівкові елементи. Перевага цих схем полягає в тому, що у твердому тілі технологічно важко виготовляти резис-

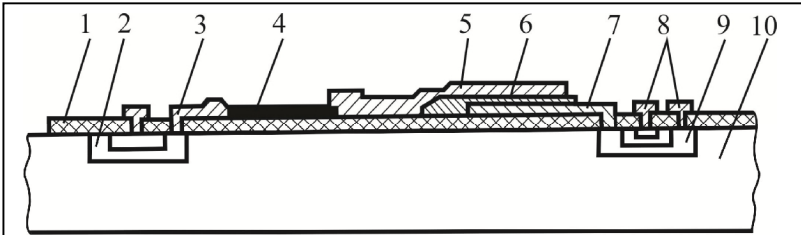


Рис. 1.6. Структура суміщеної ІМС: 1 – плівка діоксиду кремнію, 2 – діод, 3 – плівкові внутрішньо-схемні з'єднання, 4 – тонкоплівковий резистор, 5, 6, 7 – верхній і нижній електроди тонкоплівкового конденсатора і діелектрик, 8 – тонкоплівкові контакти, 9 – кремнієва пластина, 10 – транзистор

тори заданого опору, тому що він залежить не тільки від товщини легованого шару напівпровідника, але і від розподілу питомого опору по товщині. Доведення опору до номінального значення після виготовлення резистора також має значні труднощі. Напівпровідникові резистори володіють помітною температурною залежністю, що ускладнює розробку ІМС. Крім того, у твердому тілі також дуже важко створювати конденсатори.

Для розширення номінальних значень опорів резисторів і ємностей конденсаторів напівпровідникових ІМС, а також поліпшення їхніх робочих характеристик розроблена заснована на технології тонких плівок комбінована технологія, названа технологією суміщених схем.

У цьому випадку активні елементи ІМС (також деякі некритичні по номінальному опорі резистори) виготовляють у тілі кремнієвого кристала дифузійним методом, а потім вакуумним нанесенням плівок (як у плівкових ІМС) формують пасивні елементи – резистори, конденсатори і міжз'єднання.

Така технологія дозволяє одержувати великі абсолютні значення опорів резисторів і конденсаторів з малими паразитними зв'язками і низькими допусками, що збільшує швидкодію і поліпшує робочі характеристики ІМС.

1.2. Нанесення плівок у вакуумі

Процес нанесення тонких плівок у вакуумі полягає у створенні (генерації) потоку частинок, спрямованого у бік оброблюваної підкладки, і наступної їх конденсації з утворенням тонкоплівкових шарів на поверхні, що покривається. (Умовимося для стислості називати час-

тинками окремі атоми чи молекули речовини і розходження між ними підкреслювати тільки в необхідних випадках.)

Таким чином, при нанесенні тонких плівок одночасно протікають три основних процеси:

- Ø генерація спрямованого потоку частинок речовини, що осаджується;
- Ø перенесення частинок у розрідженому (вакуумному) просторі від їхнього джерела до оброблюваної поверхні;
- Ø осідання (конденсація) частинок на поверхні з утворенням тонкоплівкових шарів.

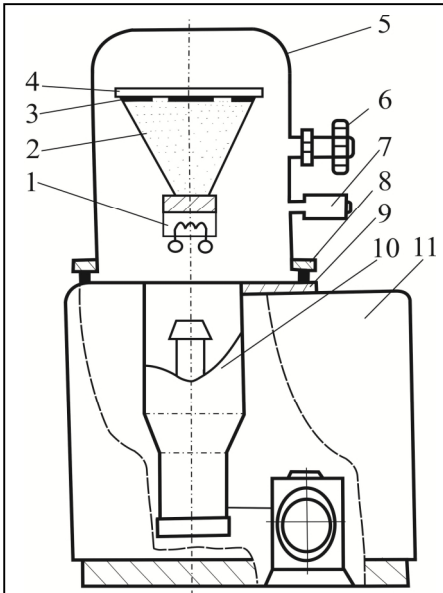


Рис. 1.7. Схема установки для нанесення плівок: 1 – джерело потоку часток, що наносяться, 2 – потік часток, 3 – підкладка, 4 – підкладкотримач, 5 – робоча вакуумна камера, 6 – кран впуску повітря, 7 – датчик зміни вакууму, 8 – кільцева гумова прокладка, 9 – базова плита, 10 – вакуумна відкачуюча система, 11 – каркас

Відповідно до цього вакуумні установки для нанесення тонких плівок, незважаючи на різноманіття їхнього призначення і конструктивного оформлення, складаються з наступних основних елементів: джерела генерації потоку частинок матеріалу, що осаджується; вакуумної системи, що забезпечує необхідні умови для проведення технологічного процесу; транспортно-позиційних пристроїв, що забезпечують введення підкладок у зону нанесення плівок і орієнтування оброблюваних поверхонь щодо потоку частинок матеріалу.

Типова установка нанесення тонких плівок у вакуумі (рис. 1.7) має каркас 11, на якому змонтовані вакуумна робоча камера 5 з джерелом матеріалу, що наноситься, підкладкотримачем 4, підкладкою 3, а також вакуумна система відкачування 10. Системи електро-

живлення керування установкою, як правило, розташовані у

відділових шафах (стійках). Робоча вакуумна камера 5 являє собою циліндричний ковпак з нержавіючої сталі, що підймальним механізмом може підніматися вгору для доступу до підковпакового простору. Над джерелом, яке генерує потік частинок матеріалу, розташований підкладкотримач 4, на якому кріпляться підкладки 3 з необхідною орієнтацією. Вакуумна система кріпиться до отвору в базовій плиті і призначена для відкачування робочої камери.

Процес нанесення тонких плівок у вакуумі складається з наступних основних операцій:

- Ø установка і закріплення підлягаючих обробці підкладок на підкладкотримачі при піднятому ковпаку;
- Ø закриття (герметизація) робочої камери і відкачування її до необхідного вакууму;
- Ø вкючення джерела, що створює атомарний (молекулярний) потік речовини, що осаджується;
- Ø нанесення плівки визначеної товщини при постійно працюючому джерелі потоку частинок і вакуумній системі;
- Ø вимкнення джерела потоку частинок, охолодження підкладок і напуск повітря в робочу камеру до атмосферного тиску;

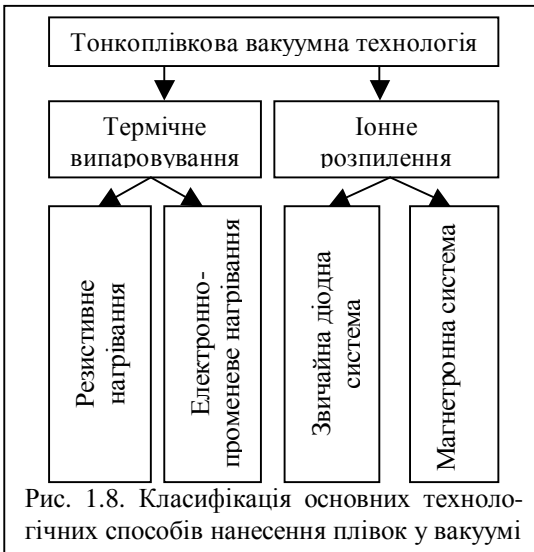


Рис. 1.8. Класифікація основних технологічних способів нанесення плівок у вакуумі

- Ø підйом ковпака і зняття оброблених підкладок з підкладкотримача.

В деяких випадках виконують додаткові операції (наприклад, попереднє нагрівання підкладок). Ефективність процесу характеризується його продуктивністю, чистотою і рівномірністю товщини плівки.

При нанесенні тонких плівок використовують два методи генерації потоку

частинок у вакуумі: термічне випаровування і іонне розпилення.

Метод термічного випаровування заснований на нагріванні речовин у спеціальних випарниках до температури, при якій почина-

ється помітний процес випаровування, і після конденсації парів речовини у вигляді тонких плівок на оброблених поверхнях, розташованих на деякій відстані від випарника. Важливим фактором, що визначає нанесення плівок і конструкцію установок термічного випарювання, є спосіб нагрівання матеріалів, що випаровуються: резистивний (омічний) чи електронно-променевий.

Метод йонного розпилення заснований на бомбардуванні мішені, виготовленої з матеріалу, який потрібно осадити, швидкими частинками (як правило позитивними йонами аргону). Вибиті з мішені в результаті бомбардування частинки утворюють потік матеріалу, він осаджується у вигляді тонкої плівки на підкладках, розташованих на деякій відстані від мішені.

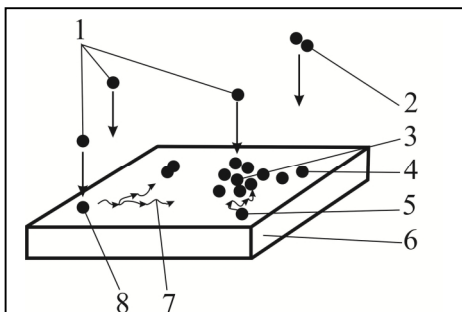


Рис. 1.9. Взаємодія часток, що осаджуються, з підкладкою: 1 – частки у вакуумному просторі, 2 – дуплет часток у вакуумному просторі, 3 – центр кристалізації, 4 – адсорбований дуплет часток, 5 – ріст кристаліта за рахунок мігруючих часток, 6 – підкладка, 7 – поверхнева міграція часток, 8 – адсорбована частка речовини, здатна мігрувати по поверхні підкладки

Важливим фактором, що визначає експлуатаційні особливості і конструкції установок йонного розпилення, є спосіб генерації йонів, що бомбардують мішень. Відповідно до цього установки йонного розпилення оснащуються простою двоелектродною чи магнетронною системою.

Вибір того чи іншого методу нанесення плівки залежить від багатьох факторів, основним з яких є природа і сортамент використовуваного матеріалу, вид і стан оброблюваних поверхонь, вимоги до чистоти і товщини плівки, продуктивність процесу.

Для розуміння фізичних явищ, що відбуваються при нанесенні тонких плівок у вакуумі, необхідно знати, що процес росту плівки на підкладці складається з двох етапів: початкового і завершального. Розглянемо, як взаємодіють частинки матеріалу у вакуумному просторі і на підкладці (рис. 1.9).

Частинки речовини 1, що покидають поверхню джерела, рухаються через вакуумний (розріджений) простір з великими швидкостями (порядку сотень і навіть тисяч метрів за секунду) до підкладки б і

досягають її поверхні, віддаючи їй при зіткненні частину своєї енергії (наприклад, частинка 8). Частина переданої енергії тим менша, чим вища температура підкладки. Зберігши при цьому деякий надлишок енергії, частинка здатна мігрувати по поверхні підкладки. При міграції вона поступово втрачає надлишок своєї енергії, прагнучи до теплової рівноваги з підкладкою. При цьому, якщо на шляху руху частинка втратить надлишок своєї енергії, вона фіксується на підкладці (конденсується). Зустрівши ж на шляху руху іншу мігруючу частинку (чи групу частинок), вступає з нею в сильний зв'язок (металевий), створивши адсорбований дуплет 4. При досить великому об'єднанні такі частинки цілком втрачають здатність мігрувати і фіксуються на підкладці, стаючи центром кристалізації 3.

Навколо окремих центрів кристалізації відбувається ріст кристалітів, що згодом зростаються й утворюють суцільну плівку. Ріст кристалітів відбувається як за рахунок мігруючих по поверхні частинок 5, так і в результаті безпосереднього осідання частинок 1 на поверхню кристалітів. Можливе також утворення дуплетів 2 у вакуумному просторі при зіткненні двох частинок, що в остаточному підсумку адсорбуються на підкладці.

Різні забруднення у вигляді порошин і слідів органічних речовин істотно спотворюють процес росту плівок і погіршують їхню якість.

Утворенням суцільної плівки закінчується початковий етап процесу. З цього моменту якість поверхні підкладки перестає впливати на властивості плівки. Початковий етап має вирішальне значення у формуванні плівок. На завершальному етапі відбувається ріст плівки до необхідної товщини.

Ці фактори обумовлюють необхідність стабільної підтримки температури підкладок і швидкості випаровування матеріалу.

При інших незмінних умовах зростання температури підкладки збільшує енергію, тобто рухливість адсорбованих молекул, що підвищує ймовірність зустрічі мігруючих молекул і призводить до формування плівки крупнокристалічної структури. Крім того, при збільшенні густини падаючого пучка підвищується ймовірність утворення дуплетів і навіть багатоатомних груп. У той же час ріст кількості центрів кристалізації сприяє утворенню плівки дрібнокристалічної структури.

1.3. Вакуум в тонкоплівковій технології

Розріджений стан газу, тобто стан, при якому тиск газу нижчий атмосферного, називають вакуумом. "Вакуум" у перекладі з латинського означає порожнеча.

Вакуумна техніка займає важливе місце у виробництві плівкових структур ІМС. Для створення вакууму в робочій камері з неї повинні бути відкачані гази. Ідеального вакууму не можна досягнути, у відкачаних робочих камерах технологічних установок завжди присутня деяка кількість залишкових газів, чим і визначається тиск в відкачаний камері (глибина чи ступінь вакууму).

У Міжнародній системі одиниць (СІ) одиницею тиску є Паскаль (Па), що дорівнює 1 Н на 1 м² (Н/м²). Велике поширення у вакуумній техніці має позасистемна одиниця – міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст.), що відповідає тиску стовпчика ртуті 1 мм при 0°С.

Між цими одиницями тиску існують наступні співвідношення: 1 мм рт. ст. = 133,3 Па чи 1 Па = 7,5 · 10⁻³ мм рт. ст. Надалі іноді поряд з Паскалями в дужках будуть дані значення тиску в міліметрах ртутного стовпа, тому що деякі прилади проградуїровані в них.

Одним з найважливіших понять вакуумної техніки є середня довжина вільного пробігу молекул, позначається λ .

Очевидно, що значення λ залежить від концентрації молекул. Оскільки концентрація молекул в об'ємі пропорційна тиску p , то значення λ обернено пропорційне тиску газу.

Нижче подана середня довжина вільного пробігу молекул повітря при 20°С при різних тисках, яку можна розрахувати за формулою:

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-1}}{p}, \quad (1.3)$$

Таблиця 1.1

p	Па	10 ⁵	10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴
	мм рт. ст.	760	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
	λ , см	7,2 · 10 ⁻⁶	0,055	0,55	5,5	55	550	5500

З формули (1.3) і табл. 1.1 випливає, що в міру видалення повітря з об'єму, тобто зменшенні тиску, λ збільшується. Причому може наступити такий момент, коли взаємні зіткнення молекул практично припиняться і будуть відбуватися лише їхні зіткнення зі стінками посудини (камери).

Щоб визначити вид зіткнень молекул газу, необхідно визначити співвідношення між середньою довжиною вільного пробігу молекул λ і характерним розміром d – діаметром посудин циліндричної форми чи довжиною меншої сторони посудин прямокутної форми (квадратна камера). Відношення λ/d є критерієм поділу вакууму на низький, високий і середній.

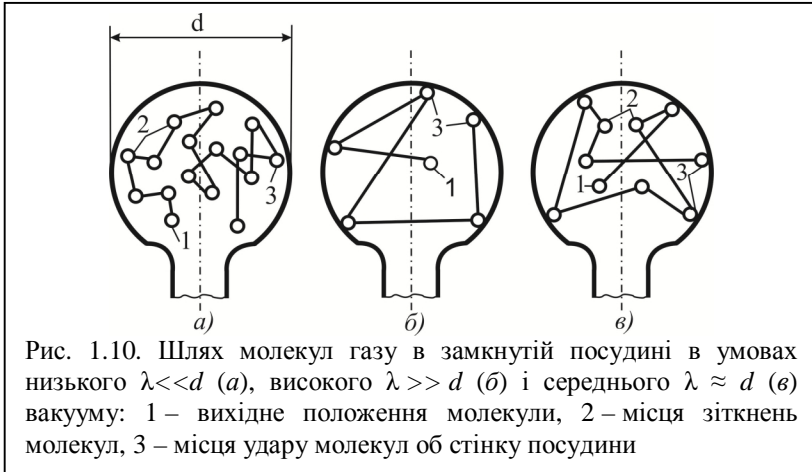


Рис. 1.10. Шлях молекул газу в замкнутій посудині в умовах низького $\lambda \ll d$ (а), високого $\lambda \gg d$ (б) і середнього $\lambda \approx d$ (в) вакууму: 1 – вихідне положення молекули, 2 – місця зіткнень молекул, 3 – місця удару молекул об стінку посудини

При низькому вакуумі середня довжина вільного пробігу молекул λ значно менша характерного розміру посудини: $\lambda \ll d$. Молекули при цьому здійснюють переважно постійні зіткнення одна з одною, внаслідок чого їхній шлях являє собою ламані лінії (рис. 1.10, а). При зіткненні з стінками посудини молекули газу утримуються на них, тобто адсорбуються.

Процес поглинання газів чи пари поверхнею твердого тіла з утворенням на ній плівки газів товщиною в одну чи кілька молекул називають адсорбцією. Адсорбовані на стінках посудини молекули газу безупинно з них випаровуються, але, так як їх λ дуже мала, вони відразу ж зіштовхуються з іншими молекулами газу. Причому молекули, що одержали в результаті зіткнення напрямок свого руху на стінку, знову адсорбуються. Тому в умовах низького вакууму на стінках посудини постійно існує шар адсорбованих молекул.

Високий вакуум характеризується тим, що середня довжина вільного пробігу молекул λ значно більша характерного розміру посудини d , тобто $\lambda \gg d$ (рис. 1.10, б). При високому вакуумі в сильно розрідженому газі хоча і зберігається хаотичний характер руху молекул, але взаємодія між ними через малу кількість практично зникає, і вони рухаються прямолінійно, зіштовхуючись в основному зі стінками посудини. Вдарившись об стінку посудини і пробувши дуже малий час в адсорбованому стані, молекули відриваються і летять у випадкових напрямках. Тому деякі частини стінок посудини можуть бути вільні від шару адсорбованих молекул газу.

Середній вакуум характеризується тим, що середня довжина вільного пробігу молекул λ приблизно дорівнює характерному розміру посудини d тобто $\lambda \approx d$ (рис. 1.10, *в*). Причому можливі траєкторії руху молекул частково притаманні умовам низького, а частково високого вакууму.

1.4. Вплив вакууму на процес нанесення плівок

Процеси, що відбуваються при нанесенні тонких плівок, багато в чому визначаються ступенем вакууму в робочих камерах, який характеризується середньою довжиною вільного пробігу частинок речовини, що осаджується. Для аналізу процесів, що відбуваються при нанесенні тонких плівок, велике значення має співвідношення λ_e/d_{on} . При цьому під λ_e розуміють довжину вільного пробігу частинок потоку речовини, що вийшли з джерела, а під d_{on} – відстань від джерела до підкладки. Характер руху частинок речовини в умовах середнього і



Рис. 1.11. Рух часток речовини в умовах середнього (*а*) і високого (*б*) вакууму: 1 – скляна камера, 2, 9 – частки, осаджені на стінку камери, 3 – частка, осаджена на зворотну сторону підкладки, 4 – підкладка, 5, 10 – частки, осаджені на лицьову сторону підкладки без зіткнень, 6 – частка, осаджена на лицьову сторону підкладки після зіткнення, 7 – джерело потоку часток, 8 – тінь від підкладки

високого вакууму можна пояснити наступним дослідом (рис. 1.11, *а*, *б*). У нижню частину скляної камери 1, у якій підтримується вакуум, поміщають джерело 7 потоку частинок речовини, а у верхню частину встановлюють підкладку 4.

При нанесенні плівок у середньому вакуумі (рис. 1.11, *а*) частинки речовини, що осаджується, мають різний характер руху. Частина з них при русі в напрямку до підкладки багаторазово зіштовхується з молекулами газу, і траєкторія їхнього руху має вигляд ламаної

лінії. При цьому цілком порушується первинний напрям руху частинок. У результаті деякі частинки б після ряду зіткнень попадають на підкладку. Інші частинки попадають на неї без зіткнень. Деякі частинки 2 не попадають на підкладку, а конденсуються на стінках камери 1, утворюючи рівномірне плівкове покриття. Зіткнення окремих частинок 3 може призвести навіть до осідання плівки на зворотній стороні підкладки 4.

При нанесенні плівок у високому вакуумі (рис. 1.11, б) частинки речовини, що осаджується, летять незалежно одна від одної по прямолінійних траєкторіях без взаємних зіткнень і зіткнень з молекулами газу, не змінюючи свого напрямку, і конденсуються (частинки 9 і 10) на стінках камери 1 і поверхні підкладки 4.

Умови вакууму впливають на ріст плівок у такий спосіб.

По-перше, якщо вакуум не досить високий, помітна частина частинок, що летять із джерела потоку, зустрічає молекули залишкового газу й у результаті зіткнення з ними розсіюється, тобто втрачає первісний напрямок свого руху і не попадає на підкладку. Це істотно знижує швидкість нанесення плівки.

По-друге, залишкові гази в робочій камері поглинаються плівкою в процесі її росту, вступають у хімічні реакції з складовою речовиною (хемосорбуються), що погіршує електрофізичні параметри плівки (підвищується її опір, зменшується адгезія, виникають внутрішні напруги й ін.).

Розглянемо взаємодію атомів і молекул речовини, що осаджується, і залишкового газу на підкладці у вакуумі. На підкладку падає два різних потоки: корисний – атоми речовини, що осаджується, і фоновий – молекули залишкових газів. Процеси, що протікають при одночасному перебуванні на підкладці молекул газу й атомів речовини, що осаджується, обумовлені їх фізичною

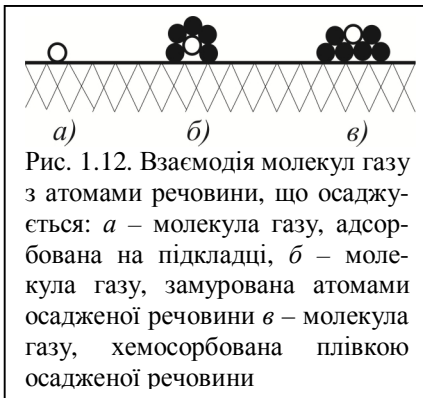


Рис. 1.12. Взаємодія молекул газу з атомами речовини, що осаджується: *a* – молекула газу, адсорбована на підкладці, *б* – молекула газу, замурована атомами осадженої речовини *в* – молекула газу, хемосорбована плівкою осадженої речовини

адсорбцією і хемосорбцією. Адсорбція молекули газу на підкладці, замурування її атомами осаджуваної речовини показані на рис. 1.12, *a-в*. Таким чином, чим нижчий вакуум і чим більше в залишковій атмосфері вакуумної камери домішок активних газів, тим нега-

тивніше вони впливають на якість плівок, а також на продуктивність процесу.

1.5. Одержання конфігурацій тонкоплівкових елементів

При виготовленні тонкоплівкових структур ІМС на кінцевому етапі одержують плівкові резистори, конденсатори, між'єднання і контактні площадки визначених розмірів, взаємного розташування і різної конфігурації, що необхідно для виконання цими елементами заданих функцій. Створення по заданому рисунку плівкових елементів ІМС необхідної конфігурації роблять методом вільної маски або фотолітографії, вибір якого залежить від способу нанесення і властивостей матеріалу тонкої плівки, вимог точності, щільності розміщення елементів, відтворюваності процесу, його продуктивності.

Метод вільної маски в основному використовують у виробництві плівкових і гібридних ІМС при нанесенні плівок термічним випаровуванням у вакуумі. Цей метод заснований на екрануванні підкладки, спеціально виготовленою з тонкої металеві фольги маскою-трафаретом із прорізами й отворами, обриси і розташування яких відповідають необхідній конфігурації плівкових елементів ІМС. Маску-трафарет називають вільною (знімною) тому, що її виготовляють окремо. Перед нанесенням плівкових елементів маску-трафарет закріплюють у маскотримачі, що забезпечує її щільне притискання і фіксоване положення щодо підкладки. При нанесенні плівки речовина, що випаровується, осаджується на підкладці тільки в місцях, незакритих маскою.

Маски-трафарети для формування пасивних елементів ІМС повинні мати точність розмірів прорізів до ± 5 мкм при їхній ширині до 100 мкм, бути досить міцними і пружними при товщині до 100 мкм, мати високу чистоту поверхні і площинність (це забезпечує їхнє щільне прилягання до підкладки), а також добру стійкість до нагріву в умовах вакууму (не повинні деформуватися, допускати газовиділення і випаровуватися). Цим вимогам відповідають мідні сплави, нержавіюча сталь, молібден і деякі інші матеріали. Переважно застосовують берилієву бронзу.

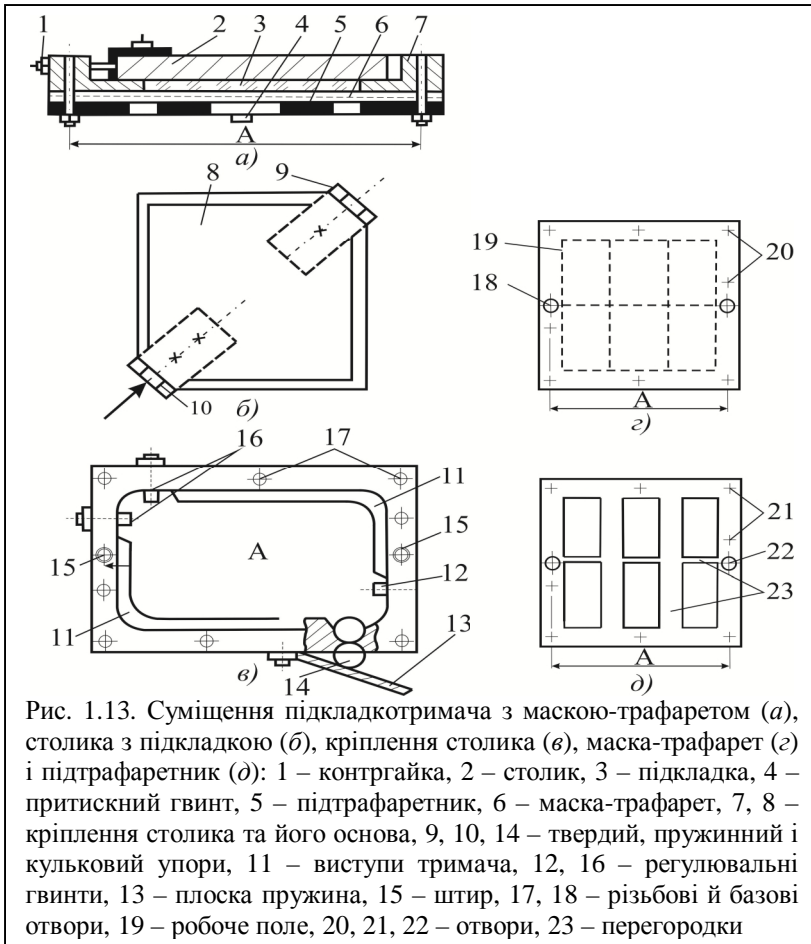
Металеві маски-трафарети виготовляють механічним фрезеруванням, хімічним і електролітичним травленням і фотолітографією.

Механічним фрезеруванням виготовляють металеві маски-трафарети з великим малюнком (не менше 0,5–1 мм), а хімічним і електролітичним травленням – з рисунками менших розмірів. Фольгові маски-трафарети дозволяють одержувати вузькі лінії простих за кон-

фігурацією рисунків із зазорами шириною не меншою від товщини фольги (30–50 мкм).

Оскільки при виготовленні плівкових ІМС наносять кілька шарів різної конфігурації, необхідно сполучати малюнок маски-трафарету з малюнком попереднього шару, нанесеного на підкладку.

Складність фіксації підкладки в підкладкотримачі полягає в тому, що допустима погрішність сполучення з урахуванням нагрівання



підкладки і маски до 300°C не повинна перевищувати сотих часток міліметра. Один з варіантів сполучення маски-трафарету з підкладко-

тримачем показаний на рис. 1.13, *а*. На масивну основу 8 столика 2 (рис. 1.13, *б*) укладають підкладку 3 зворотною стороною. Масивна основа служить для вирівнювання температури по всій підкладці при нанесенні плівки. Фіксують підкладку двома упорами: твердим 9, куди вставляється її базовий кут, і пружинним 10. Потім столик з підкладкою в переверненому положенні (рис. 1.13, *в*) укладають на виступи 11 тримача 7 столика, розташовуючи базовий кут столика між двома регульованими гвинтами 16, а протилежний при цьому виявляється між третім гвинтом 12 і підпружиненим кульковим упором 14 із плоскою пружиною 13. На тримачі столика є два штирі 15 з точною базовою відстанню А. По периферії розташовані різьбові отвори 17.

Маска-трафарет 6 (рис. 1.13, *г*) має два базових отвори 18 і, крім того, по її периферії розташовані отвори 20 для кріплення до тримача столика. Робоче поле 19 маски-трафарета і межі майбутніх ІМС показані на рис. 1.13, *г* штриховими лініями.

Столик з підкладкою встановлюють у тримач й укладають на штирі 15 маску-трафарет і підтрафаретник. Підтрафаретник (рис. 1.13, *д*) служить для додання масці-трафарету жорсткості і виконується у вигляді відносно товстої пластини-ґратки, перегородки 23 якої розташовані по межах майбутніх ІМС (плат) групової маски. По її периферії також є отвори 21 для закріплення на тримачі з фіксацією по базових отворах 22.

Для суміщення підкладки з відповідною маскою-трафаретом служать регульовальні гвинти 16 і 12, які фіксують контрґайками 1, попередньо домігшись з допомогою інструментального мікроскопа правильного положення рисунка маски-трафарету щодо країв підкладки. Щоб маска-трафарет при нагріванні в процесі нанесення плівок не деформувалася, щільно затягують тільки ті гвинти 4 (рис. 1.13, *а*), що розташовані біля базового кута, а інші не докручуються на 0,5–1 виток різьби, що дозволяє масці і підтрафаретнику вільно розширюватися.

Після цього все встановлюють на робочу позицію установки і наносять плівку. Слід зазначити необхідність найбільш щільного притиснення маски-трафарету до підкладки, щоб уникнути появи зони розмитості – підпилення (рис. 1.14), що призводить до порушення геометричних розмірів і відповідно параметрів тонкопліткових елементів.

Перевагами цього методу є те, що маска-трафарет може бути використана багаторазово, і конфігурацію пліткових елементів одержують безпосередньо в процесі нанесення плівок.

Недолік методу полягає в тому, що при багаторазовому використанні маски-трафарету в ній заростають прорізи, які доводиться очи-

щати від матеріалу, що осаджується, тобто відновлювати їхні розміри. При цьому, чим тонші прорізи в масках-трафаретах, тим швидше вони заростають при нанесенні плівок і втрачають свої розміри. Недоліком є і те, що цей метод не дозволяє одержувати елементи ІМС замкнутої конфігурації.

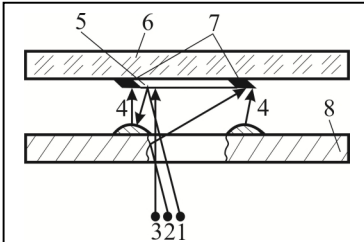


Рис. 1.14. Підпилення при нанесенні плівок з використанням вільної маски-трафарету: 1 – траєкторія атомів, відбитих від підкладки й осілих на тильній стороні маски-трафарету, 2 – траєкторія атомів, відбитих від бічних стінок вікна маски-трафарету, 3 – пряме осадження атомів, 4 – траєкторія атомів, відбитих з тильної сторони маски-трафарету, 5 – необхідна конфігурація плівки, що осаджується, 6 – підкладка, 7 – зона розмитості, 8 – вільна маска-трафарет

Основне обмеження методу вільної маски – невисока точність топології елементів. Це є наслідком похибок виготовлення масок-трафаретів, нещільністю їхнього прилягання до підкладок і температурними взаємодіями в процесі наплення плівки.

Незважаючи на недоліки, метод вільної маски в багатьох випадках незамінний у технології тонкоплівкових ІМС, тому що виключається дія травильних розчинів на плівки, що неминуче при фотолітографії, і, крім того, він найбільш продуктивний і економічний.

Метод фотолітографії дозволяє одержувати точні розміри елементів, тому застосовується в основному у виробництві напівпровідникових ІМС високого ступеня інтеграції, тобто складних тонкоплівкових структур з великою кількістю елементів.

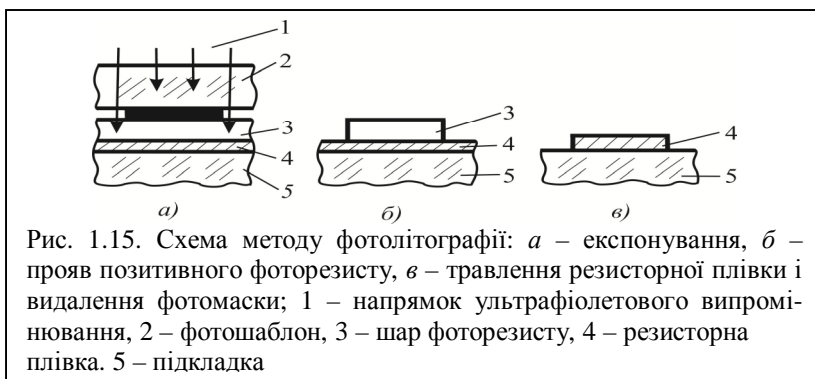
При фотолітографії за допомогою фотохімічних процесів на поверхні підкладок за заданим рисунком

одержують конфігурацію тонких шарів. При цьому на поверхню, що підлягає локальній обробці, наносять шар спеціального матеріалу – фоторезисту, здатного змінювати свої властивості під впливом світлового опромінення. Основним робочим інструментом фотолітографії є фотошаблон, що представляє собою плоску скляну пластину, на яку нанесений необхідний малюнок у вигляді прозорих і непрозорих ділянок. Шар фоторезисту опромінують через фотошаблон і хімічно обробляють – проявляють. В результаті цього з окремих ділянок поверхні

фоторезист відділяється, а той, що залишився, використовується як маска (фотомаска).

Фотолітографічна обробка полягає в наступному. При виготовленні тонкоплівкового резистора (рис. 1.15, *а*) на вихідну підкладку 5 спочатку наносять суцільну резистивну плівку 4, а на неї – тонкий шар фоторезисту 3, який осушують для видалення розчинника, і експонують ультрафіолетовим випромінюванням 1 через фотошаблон 2, який суміщають з підкладкою 5. Потім фоторезист проявляють, і його незазвичайні ділянки вимиваються до шару резистивної плівки (рис. 1.15. *б*).

Далі проводять селективне (вибіркове) травлення незахищених



фоторезистом місць резистивної плівки (рис. 1.15, *в*), у результаті якого одержують необхідний рельєфний малюнок резисторної плівки 4. Останньою операцією фотолітографії є видалення шару фоторезисту, що залишився, з підкладки й одержання готового резистора.

Фотошаблони виконують зі скла, прозорого для ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 300–500 нм. Важливою технологічною операцією при виготовленні фотошаблонів є металізація заготовок фотошаблонів для створення непрозорого тонкого суцільного шару, що володіє високою адгезією до поверхні скляної підкладки і не повинен мати точкових дефектів у вигляді проколів і повинен бути стійким до стирання при суміщенні з підкладкою (витримувати 50–200 операцій суміщення).

Цим вимогам задовольняють непрозорі плівки хрому, а також плівки на основі оксиду заліза, напівпрозорі для видимого і непрозорі для ультрафіолетового випромінювання. Фотошаблони на основі оксиду заліза називають **транспарантними**. При товщині металізованої плівки 0,08–0,15 мкм забезпечується мала щільність дефектів робочих фотошаблонів.

2. НАНЕСЕННЯ ПЛІВОК МЕТОДОМ ТЕРМІЧНОГО ВИПАРОВУВАННЯ

2.1. Основні відомості

При ви­ро­шу­ван­ні плі­вок ви­па­ро­ву­ван­ням у ва­ку­умі, про­цес зводиться до створення потоку пари, яка створюється джерелом, нагрітим до ви­браної тем­пе­ра­тури. Пара, пройшовши деякий шлях, кон­ден­су­ються на під­кладці.

Ви­па­ро­ву­ван­ня, то­бто пе­ре­хід речовини в пароподібний стан, від­бу­вається, коли з підвищенням температури середня коливальна енергія його частинок зростає настільки, що стає вище енергії зв'язку з іншими частинками, і вони залишають поверхню (ви­па­ро­вуються) та поширюються у вільному просторі. Умовною, практично встановленою тем­пе­ра­турою ви­па­ро­ву­ван­ня вважається температура, при якій тиск насиченої пари речовини складає приблизно 1,3 Па.

Тем­пе­ра­тури плавлення і ви­па­ро­ву­ван­ня найбільш важливих елементів наведені в табл. 2.1. З цієї таблиці видно, що умовна температура ви­па­ро­ву­ван­ня більшості елементів вище їхньої температури плавлення, то­бто ви­па­ро­ву­ван­ня проходить з рідкого стану. Деякі речовини мають умовну температуру ви­па­ро­ву­ван­ня нижче температури плавлення, то­бто вони досить інтенсивно ви­па­ро­вуються з твердого стану. Про­цес пере­ходу речовини з твердого стану в пароподібний, минаючи рідку фазу, називають сублімацією.

Швидкість ви­па­ро­ву­ван­ня, то­бто кількість речовини (у грамах), що залишає 1 см² вільної поверхні за 1 с при умовній температурі T_y , розраховують за формулою:

$$v_g = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{M/T_y}, \quad (2.1)$$

де M – молекулярна маса, г/моль.

За цією формулою можна визначити, наприклад, яка швидкість ви­па­ро­ву­ван­ня алюмінію, що має $M=27$ і $T_y = 1423$:

$$v_g = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{27/1423} \approx 9 \cdot 10^{-5} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Швидкість ви­па­ро­ву­ван­ня більшості елементів при T_y складає 10^{-4} г/(см²·с). Для одержання прийнятних швидкостей росту плівки, а також ощадливого використання матеріалу (нерідко дорогого) варто створювати умови руху частинок речовини, що ви­па­ро­вується, переважно в напрямку до підкладки. При цьому необхідний досить глибокий вакуум, при якому виключаються зіткнення молекул залишкового

газу з молекулами речовини і розсіювання їхнього потоку на шляху до підкладки.

Таблиця 2.1

Температури плавлення і випаровування елементів

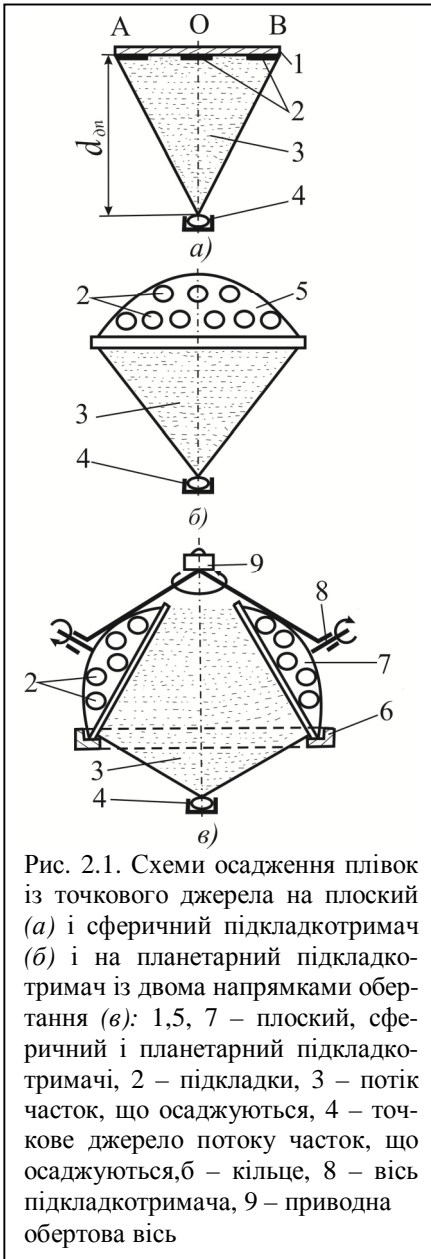
Елемент	Атомна маса	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_y, ^\circ\text{C}$	Рекомендовані матеріали випаровувача	
				дроту, стрічки	тигля
Ag	107,9	961	1047	Mo, Ta	Mo, C
Al	27	660	1150	W	C, BN
Au	197	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Cr*	52	1800	1205	W, Ta	–
Cu	63,5	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al ₂ O ₃
Ge	72,6	959	1251	W, Mo, Ta	W, C, Al ₂ O ₃
Mg*	24,3	651	443	W, Mo, Ta, Ni	FeC
Mn	54,9	1244	980	W, Mo, Ta	Al ₂ O ₃
Mo**	95,9	2622	2533	–	–
Ni	58,7	1455	1510	W	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂
Pt	195	1774	2090	W	ZrO ₂
Si	28	1415	1342	–	BeO, ZrO ₂
Ta**	181	2996	3070	–	–
Ti*	47,9	1725	1546	W, Ta	–
W**	183,9	3382	3309	–	–

* Випаровується з твердого стану (сублимується).

** Рекомендується випаровування електронно-променевим нагріванням чи розпиленням йонним бомбардуванням.

Потік речовини, яка випаровується, що складається з молекул (атомів), які не зазнають на своєму шляху зіткнень і розсіювань та рухаються внаслідок цього прямолінійно, називають молекулярним потоком. Для визначення умов існування молекулярного потоку зручніше характеризувати ступінь вакууму не тиском залишкового газу, а середньою довжиною вільного пробігу його молекул. З формули (1.3) випливає, що вже при тиску $p = 10^{-2}$ Па середня довжина вільного пробігу молекул λ складає 50 см, що перевищує реальну відстань від випарника до підкладки (звичайно не більшу 30 см). Таким чином, для створення прямолінійних траєкторій руху молекул речовини в просторі між випарником і підкладкою необхідний тиск порядку 10^{-3} Па.

Крім того, необхідно забезпечувати рівномірність розподілу товщини півки на підкладці, що є одним з основних її параметрів. Тов-



щина плівки в даній точці підкладки визначається кількістю частинок, що досягають її в одиницю часу. Якби потік частинок був однаковий на всю поверхню підкладки, ми б отримували плівку однакової товщини. Однак площа випарників речовин у багато разів менше площі підкладкотримачів (тому їх називають точковими джерелами). У результаті домогтися рівномірності потоку неможливо. Як видно з рис. 2.1, а, швидкість нанесення плівки буде неоднакова в точці О і в точках А і В: чим далі від осі OS ці точки, тим нижча швидкість нанесення плівки і тим менша її товщина за даний час нанесення. При плоскому підкладкотримачі нерівномірність товщини плівки складає $\pm 20\%$.

Найбільш простим способом зниження нерівномірності розподілу плівки по товщині є збільшення відстані d_{0n} . Однак це зменшує швидкість конденсації плівки, що негативно позначається на її властивостях. Максимально можлива відстань d_{0n} обмежена розмірами робочої камери установки.

На практиці застосовують більш складні способи, одним із яких є надання підкладкотримачеві сферичної форми (рис. 17, б).

Нерівномірність товщини плівки знижується при цьому до $\pm 10\%$. Якщо цього недостатньо, використовують систему з подвійним обертанням, так звану планетарну карусель (рис. 2.1, в), що складається з привідної обертової осі 9, на якій встановлені три підкладкотримачі 7. Кожен підкладкотримач може обертатися навколо власної осі 8 при обкатуванні по кільцю 6. Так здійснюється планетарний рух підкладок. Планетарні каруселі коштують досить дорого, однак при їхньому використанні нерівномірність плівок по товщині складає $\pm(3-4)\%$.

Для перевірки нерівномірності товщини нанесених плівок у п'ятьох точках на пластині – у центрі і по краях взаємно перпендикулярних діаметрів – вимірюють за допомогою мікроскопа МИИ-4 товщину плівки d_n . Вибирають з отриманих значень товщини максимальне d_{max} і мінімальне d_{min} і обчислюють (%) нерівномірність (відхилення товщини від середнього значення) за формулою:

$$\pm B = \frac{d_{max} - d_{min}}{2(d_{max} + d_{min})} \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

Розглянемо приклад розрахунку нерівномірності товщини плівки. Отримано виміри в п'ятьох точках (нм): 1260, 1255, 1290, 1280, 1265. З цього ряду виберемо $d_{max} = 1290$ і $d_{min} = 1255$ та обчислимо нерівномірність за формулою (2.2)

$$\pm B = \frac{1290 - 1255}{2(1290 + 1255)} \cdot 100\% = \pm 2,7\%.$$

Процес випаровування і якість нанесених плівок значною мірою визначаються типом і конструкцією випарників, що можуть мати резистивне чи електронно-променеве нагрівання. Вибір типу випарника залежить від виду матеріалу, що випаровується, його агрегатного стану і температури в процесі випаровування, а також інших факторів.

2.2. Випарники з резистивним нагріванням

Нагрівання електропровідного тіла, що володіє високим електричним опором при проходженні через нього електричного струму, називають **резистивним**. При цьому, як правило, використовують змінний струм.

Переваги резистивного нагрівання – високий ККД, низька вартість устаткування, безпека в роботі (низька напруга на затискачах) і малі габаритні розміри. Факторами, що обмежують застосування випарників з резистивним нагріванням, є можливість забруднення плівки матеріалом нагрівача, а також малий ресурс роботи через старіння

(руйнування) нагрівача, що вимагає його періодичної (іноді досить частой) заміни.

Випарники цього типу різних конструктивних варіантів можуть бути з безпосереднім чи з непрямим нагріванням речовини, що випаровується.

Матеріали, використовувані для виготовлення випарників, повинні відповідати наступним вимогам. Випаровуваність матеріалу випарника при температурі речовини, що випаровується, повинна бути дуже малою. Для гарного теплового контакту матеріал випарника повинен добре змочуватися розплавленою речовиною, що випаровується. Між матеріалом випарника і речовиною не повинні відбуватися ніякі хімічні реакції, а також утворюватися легко випаровувані сплави, тому що це призводить до забруднення плівок і руйнування випарників.

Для виготовлення випарників промислових установок використовують тугоплавкі метали (вольфрам, тантал, молібден).

Слід особливо зазначити, що алюміній, застосований для нанесення плівок, у розплавленому стані володіє високою хімічною активністю і взаємодіє практично з будь-якими металами, з яких виготовляють випарники. Це значно знижує їхній термін служби. Тому такі випарники є одноразовими і після кожного процесу випаровування їх заміняють.

У випарниках з безпосереднім нагріванням струм у кілька десятків ампер проходить безпосередньо через матеріал, що випаровується. Такий метод випарювання може бути застосований тільки для металів, що сублімуються, тобто металів, температура плавлення яких вище температури випаровування (хром, титан і ін. – див. табл. 2.1) .

Основа перевага цих випарників – відсутність теплового контакту між їхніми нагрітими елементами і металом, що випаровується, що забезпечує високу чистоту нанесеної плівки. Однак вони забезпечують низьку швидкість випаровування, дають можливість випаровувати малу кількість матеріалу, що може бути використаний тільки у вигляді стрічки чи дроту, а також не дозволяють випаровувати діелектрики і більшість металів. Переріз таких випарників повинен бути однаковим на всій довжині, інакше в місці звуження виникає перегрів, і вони перегорять.

Випарник з резистивним безпосереднім нагріванням показаний на рис. 2.2. Матеріал, що випаровується 3, у виді дроту чи стрічки вставляють у виготовлені з титану чи нержавіючої сталі і закріплені гвинтами 2 масивні контактні затискачі 1, до яких підводиться електроживлення. Для зниження теплових втрат за рахунок випроміню-

вання, а також обмеження потоку пари 4 у напрямку до підкладки 5 служить багатошаровий екран 6.



Рис. 2.2. Випарник з резистивним безпосереднім нагріванням: 1 – контактний затискач, 2 – гвинт, 3 – матеріал, що випаровується, 4 – потік пари, 5 – підкладка, 6 – багатошаровий екран

тими частинами випарника, а також через випаровування матеріалу підігрівника осаджуються менш чисті плівки.

Поверхню резистивних випарників попередньо очищають, промиваючи в розчинниках. Часто їх також відпалюють у вакуумі. Оскільки форма випарника з непрямым нагріванням залежить від агрегатного стану, у якому знаходиться матеріал, що випаровується, їх поділяють на дровоті, стрічкові і тигельні.

Дротяні випарники застосовують для випаровування речовин, що змочують матеріал нагрівача. При цьому розплавлена речовина силами поверхневого натягу утримується у вигляді краплі на дротяному нагрівачі. Дротяні випарники виготовляються V- і W-подібної форми, а також спірале- і хвилеподібної. Дротяний випарник найпростішої конструкції (рис. 2.3, а) використовують для нанесення плівок алюмінію, що добре змочує вольфрамовий дротяний нагрівач – циліндричну дротяну спіраль 2. Речовину, що випаровується, у вигляді скоб (гусариків) 3 навішують на спіраль, яку відігнутими кінцями 1 вставляють у контактні затискачі. В міру нагрівання ця речовина плавиться і формується на дроті у вигляді крапель. Знизу розмішуються тепловий і обмежуючий екрани. Дротяні випарники призначені для створення протяжного потоку матеріалу, це досягається використанням одночасно кількох гусариків.

При поганій змочуваності речовини, що випаровується, застосовують випарники у вигляді конічної дротяної спіралі 6 (рис. 2.3, б), що закріплюється на затискачах 4 струмопідводу. Спіраль оточена цилін-

Випарники з непрямым нагріванням, у яких речовина, що випаровується, нагрівається за рахунок теплопередачі від нагрівача, більш універсальні, тому що дозволяють випаровувати провідні і непровідні матеріали у вигляді порошку, гранул, дроту, стрічки й ін. Але при цьому через контакт із нагрі-



Рис. 2.3. Дротяні випарники непрямого нагрівання з циліндричною (а) і кінчною (б) дротяною спіраллю: 1 – відігнутий кінець спіралі, 2, 6 – циліндрична і кінчна спіралі, 3 – матеріал, що випаровується (гусарик), 4 – затискачі струмопідводу, 5, 7 – циліндричний тепловий і обмежувачий екрани

дричним тепловим екраном 5, а знизу розміщується обмежувачий екран 7.

Найбільш розповсюдженими матеріалами для виготовлення дровотих випарників є дріт $\varnothing 0,5-1$ мм з вольфраму і танталу.

Істотною перевагою дровотих випарників є простота їхньої конструкції і можливість модифікації під конкретні технологічні умови. Крім того, вони добре компенсують розширення і стиск при нагріванні й охолодженні. Недолік цих випарників – мала кількість матеріалу, що випаровується за один процес.

Стрічкові випарники застосовуються для випаровування металів, що погано утримуються на дротяних випарниках, а також діелектриків і виготовляються з поглибленнями у вигляді півсфер, жолобків, коробочок чи човників. Найбільш розповсюдженими матеріалами для таких випарників є фольга товщиною $0,1-0,3$ мм із вольфраму, молібдену і танталу. Випарник з поглибленням у вигляді пів-

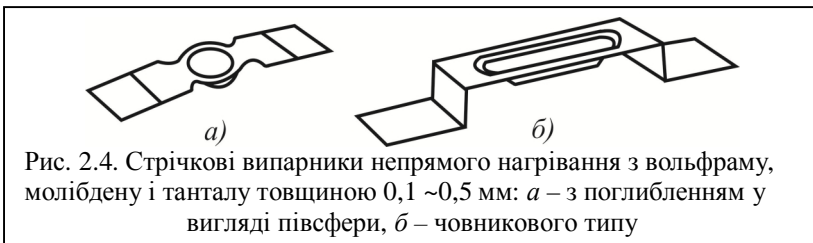


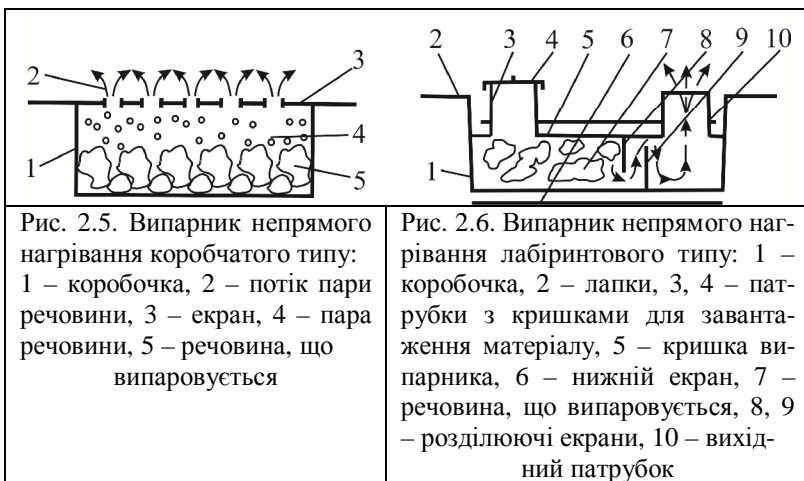
Рис. 2.4. Стрічкові випарники непрямого нагрівання з вольфраму, молібдену і танталу товщиною $0,1-0,5$ мм: а – з поглибленням у вигляді півсфери, б – човникового типу

сфери призначений для випаровування малих кількостей речовини,

показаний на рис. 2.4, *a*. Для зниження теплового потоку з зони випаровування до затискачів струмопідводів по краях півсфери є звуження перерізу (шийки).

Випарники човникового типу (рис. 2.4, *б*) призначені для випаровування великих кількостей речовини. Щоб компенсувати деформації випарника, його профіль ускладнений відгином лапок, якими він кріпиться до затискачів струмопідводів.

Якщо для металів завдяки їхній високій теплопровідності випаровування у вакуумі є явище поверхневе, то для таких неметалічних речовин поганій теплопровідності як діелектрики (наприклад, Si), існує велика ймовірність розбризкування при форсованому випаровуванні. У цих випадках застосовують випарники коробчатого типу ускладненої конструкції (рис. 2.5), виконані з стрічки товщиною 0,1 мм у вигляді коробочки 1, в яку засипають речовину, що випаровується 5. Зверху коробочка закривається одношаровим чи двошаровим екраном 3 з отворами, через які проходить пара матеріалу 4.



У випадку застосування двошарового екрану отвори розташовують у шаховому порядку, що цілком виключає прямий проліт великих частинок пари речовини. Крім запобігання від розбризкування, такі випарники дозволяють створювати над поверхнею речовини, що випаровується, обмежений простір, у якому пара 4 близька до насиченої, що запобігає збідненню сполуки більш летким компонентом.

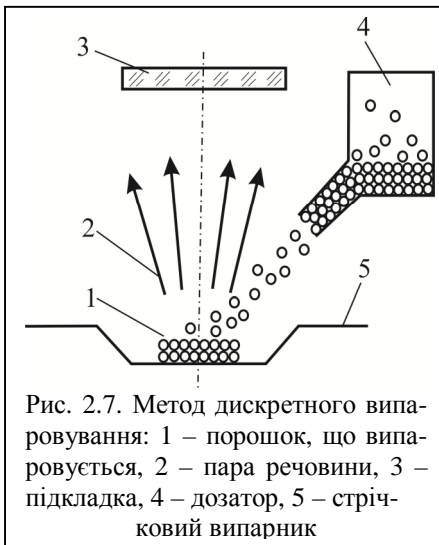
Ефективний захист від розбризкування крапель, яким супроводжується процес випаровування деяких речовин, забезпечують лабіринтові випарники. Як видно з назви, ці випарники мають форму, що

виключає прямий шлях для виходу великих частинок речовини в момент вибухового випаровування. У результаті гранульована речовина, що надходить у лабиринтовий випарник, виходить з нього тільки у вигляді пари в напрямку підкладок.

Лабіринтовий випарник для оксиду кремнію (рис. 2.6) виконаний у вигляді коробочки 1, по краях якої зроблені лапки 2 для приєднання до затискачів. Зверху коробочка закрита кришкою 5, що має бічний і нижній екрани 6 для зниження теплових втрат випромінюванням. У верхній частині кришки є два патрубки. Через патрубок 3 у ліву частину коробочки засипають матеріал, що випаровується 7, а потім цей патрубок закривають круглою кришкою 4. Через правий патрубок 10 надходить пара матеріалу, яка попередньо в коробочці проходить по лабиринті, утвореному екранами 8 і 9, і з неї відсіюються макроскопічні частинки.

У виробництві часто необхідно наносити плівки, що складаються не з однієї речовини, а є сплавами. Це складає найбільші труднощі в тонкоплівковій технології. Внаслідок різної пружності пари компонентів сплаву склад плівки може помітно відрізнятись від вихідного (ефект фракціонування сплаву). Так, при нанесенні сплаву ніхрому (Ni 80 %, Cr 20 %) при $t = 1400^{\circ}\text{C}$ на підкладці утвориться плівка, що має склад: Ni-60%, Cr-40%.

Для одержання складу плівок, що відповідає складу вихідного



сплаву, застосовують метод мікродозування (дискретне чи вибухове випаровування). Суть цього методу (рис. 2.7) полягає в тому, що з дозатора 4 на стрічковий розігрітий випарник 5 дискретно скидаються невеликі порції порошку 1 сплаву, що випаровується, з розмірами частинок 100–200 мкм. Випаровування мікродоз відбувається практично миттєво, в результаті чого на підкладці 3 послідовно осаджуються дуже тонкі шари. У межах кожного шару спостерігається неоднорідний склад (внаслідок фракціонування сплаву), однак вже

в процесі нанесення відбувається взаємна дифузія атомів складових компонентів, вирівнюється концентрація кожного з них по товщині плівки.

Цей метод особливо ефективний при нанесенні багатокомпонентних сплавів (наприклад, МЛТ-2М, ніхром, оксид кремнію). Його перевагою є також відсутність забруднень плівки матеріалом випарника (малий час контакту мікродози сплаву з випарником).

Основний недолік методу мікродозування – складність налагодження дозатора для подачі особливо дрібних порцій сплаву, що випаровується. В умовах великого тепловипромінювання (від перегрітого металевого випарника) стійку роботу дозатора забезпечити важко. Крім того, існує небезпека розбризкування речовини у вигляді крапель чи твердих частинок.

Тигельні випарники використовують, як правило, для випаровування великих кількостей сипучих діелектричних матеріалів. Тиглі виготовляють з тугоплавких металів, кварцу, графіту, а також керамічних матеріалів (нітриду бора BN, оксиду алюмінію Al_2O_3 – алунда). Максимально припустима температура кварцу складає 1400°C , графіту – 3000°C , оксиду алюмінію – 1600°C .

Два типи випарників з тиглями із кераміки показані на рис. 2.8, а, б.

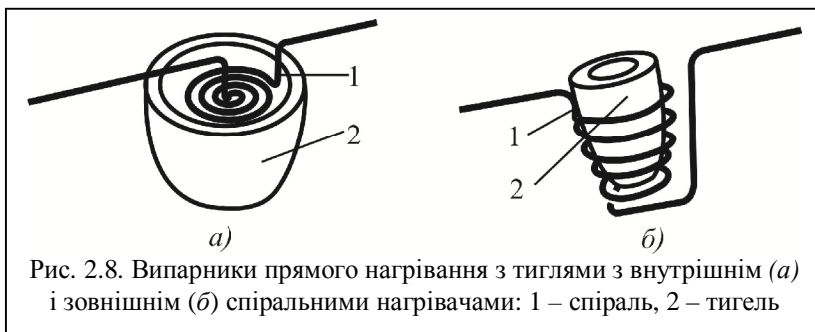


Рис. 2.8. Випарники прямого нагрівання з тиглями з внутрішнім (а) і зовнішнім (б) спіральними нагрівачами: 1 – спіраль, 2 – тигель

У випарнику першого типу (рис. 2.8, а) нагрівач у вигляді плоскої равликоподібної спіралі 1 розташовується в порожнині керамічного тигля 2, куди насилається матеріал, що випаровується. Такий випарник дозволяє випаровувати з високими швидкостями велику кількість речовини.

У випарнику другого типу нагрівач у вигляді конусоподібної спіралі 1 розташований із зовнішньої сторони керамічного тигля 2.

При рівній потужності живлення перший випарник нагрівається до більш високої температури, ніж другий. Однак перевагою другого є відсутність контакту матеріалу, що випаровується, зі спіральним нагрівачем. Експлуатаційним недоліком тигельних випарників є те, що вони досить інерційні, оскільки мала теплопровідність матеріалу, з якого виготовляють тигель, не забезпечує швидкого нагрівання речовини, що випаровується.

2.3. Випарники з електронно-променевим нагріванням

Принцип електронно-променевого нагрівання полягає в тому, що кінетична енергія потоку прискорених електронів при бомбардуванні ними поверхні речовини перетворюється в теплову енергію, в результаті чого вона нагрівається до температури випаровування.

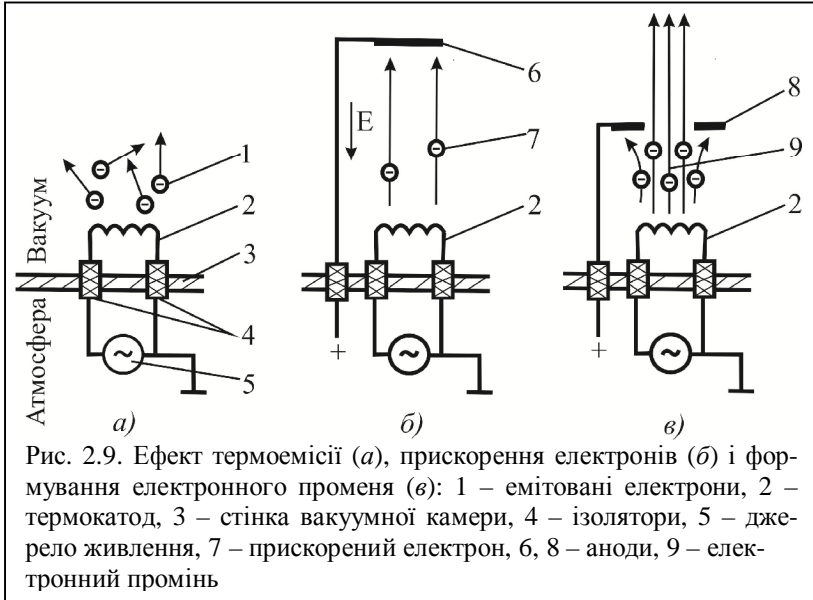
Для утворення електронного променя необхідне джерело вільних, тобто незв'язаних з іншими частинками, електронів. Для того, щоб електрон вилетів з металу назовні, його швидкість повинна бути спрямована убік поверхні металу, і він повинен перебороти дію сил, що прагнуть повернути його у метал.

Роботу з подолання електронном поверхневих сил, які утримують його в металі, називають роботою виходу. При кімнатній температурі кількість електронів у металі, енергія яких перевищує роботу виходу, мізерно мала. Однак їхня кількість різко зростає з ростом температури за рахунок збільшення інтенсивності теплового хаотичного руху.

Вилітання електронів з металу, нагрітого до високої температури, називають термоелектронною емісією (рис. 2.9, *a*), а виконані з металу елементи, що застосовуються для одержання вільних електронів, – термоелектронними катодами, чи просто катодами. Матеріалом для катодів служить, як правило, вольфрамовий дріт. Для розжарення катода, поміщеного у вакуумну камеру, через нього пропускають електричний струм.

Спіральний термокатод 2 закріплюють на стінках вакуумної камери 3 через ізолятори 4. При подачі струму розжарення від джерела 5 відбувається нагрівання термокатада з випусканням електронів 1. Ці електрони мають різну енергію, і напрямок їхнього руху від катода хаотичний. Для прискорення (підвищення енергії) і спрямованого руху електронів необхідно створити прискорююче електричне поле.

Розглядаючи рух електронів в електричному полі, припускають, що вони знаходяться в достатньо розрідженому просторі. При цьому взаємодією між молекулами газу, що залишився в об'ємі, і електронами, що рухаються, можна нехтувати.



Як відомо з електротехніки, на заряджену частинку – електрон, що знаходиться в електричному полі, діє сила, пропорційна напруженості цього поля, у результаті чого частинка прискорюється. Швидкість (км/с), якої набуде електрон під дією різниці потенціалів U між двома точками поля, дорівнює:

$$n_e = 593\sqrt{U}. \quad (2.3)$$

При цьому кінетична енергія (eV) електрона:

$$w_k = \frac{m_e n_e^2}{2}, \quad (2.4)$$

де m_e – маса електрона.

У пристрої для прискорення електронів (рис. 2.9, б) у декількох сантиметрах від катода розміщують анод 6, що створює електричне поле E , напрямом якого показано стрілкою. Між анодом 6 і катодом 2 утвориться різниця потенціалів від 5 до 10 кВ. Електрони, що вилетіли з катода 2, притягаються анодом 6 і утворюють спрямований потік прискорених електронів 7.

Для формування електронного променя 9 (рис. 2.9, в) використовують анод 8 з отвором, через який проходить значна частина електронного потоку.

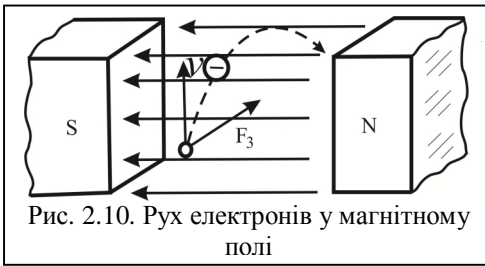


Рис. 2.10. Рух електронів у магнітному полі

Електрон, що рухається, можна представити як електричний струм, що проходить через провідник. Тоді за правилом лівої руки можна визначити напрямки сили, що діє на електрон.

Сила F_y , яка діє на електрон, перпендикулярна до напрямку швидкості його руху і до силових ліній магнітного поля. Оскільки сила F_y діє завжди перпендикулярно швидкості руху електрона, вона не змінює модуль швидкості, а тільки її напрям. Під дією цієї сили траєкторія руху електрона безупинно змінюється, тобто викривляється (як це показано на рис. 2.10 штриховою лінією).

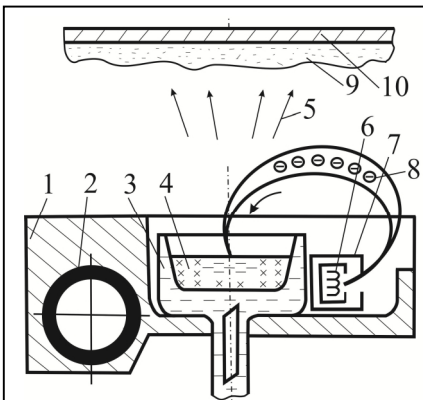


Рис. 2.11. Електронно-променевий випарник: 1 – полюсний наконечник, 2 – електромагніт, 3 – тигель, що охолоджується водою 4 – матеріал, що випаровується, 5 – потік матеріалу, 6 – термокатод, 7 – фокусуєча система, 8 – електронний промінь, 9 – тонка плівка, 10 – підкладка

Розглянемо рух електрона в магнітному полі і силу, що діє на електрон, який влітає в магнітне поле між полюсами постійного магніту перпендикулярно до силових ліній цього поля (рис. 2.10).

Якщо перпендикулярно електронному променю прикласти магнітне поле, він відхилиться.

Фокусування електронного променя дозволяє одержувати велику концентрацію потужності на порівняно малій поверхні ($5 \cdot 10^8$ Вт/см), а отже, випаровувати будь-які, навіть найбільш тугоплавкі матеріали з досить великою швидкістю.

Електронно-променевий випарник (рис. 2.11) складається з трьох основних частин: електронної гармати, відхиляючої системи і тигля, що охолоджується водою.

Електронна гармата призначена для формування потоку електронів і складається з вольфрамового термокатоду 6 і фокусуєчої системи 7. Електрони, що емітуються катодом,

проходять фокусуєчу систему, прискорюються за рахунок різниці потенціалів між катодом і анодом (до 10 кВ) і формуються в електронний промінь 8.

Відхиляюча система призначена для створення магнітного поля, перпендикулярного до напрямку швидкості руху електронів, і складається з полюсних наконечників 1 і електромагніта 2. Між полюсними наконечниками розташований тигель 3 і електронна гармата. Відхиляючи електронний промінь магнітним полем, його направляють у центральну частину тигля 3. У місці падіння променя створюється локальна зона випаровування речовини з рідкої фази. Нагрітий електронним бомбардуванням матеріал 4 випаровується, і потік пари 5 осаджується у вигляді тонкої плівки 9 на підкладці 10. Змінюючи струм у котушці електромагніта 2, можна сканувати променем уздовж тигля, що запобігає утворенню «кратера» у матеріалі, що випаровується.

Мідні тиглі об'ємом 50 см³ і більше забезпечують тривалу безупинну роботу без добавки матеріалу, що випаровується, і крім того, не контактує в розплавленому вигляді з мідними стінками тигля ("автотигельне випаровування"), а значить виключається їхня взаємодія.

Електронно-променеві випарники можуть бути одно- і багатотигельної конструкції з розворотом променя на 270 і 180°. При куті відхилення електронного променя до 270° виключається влучення матеріалу, що випаровується, на катод і забруднення плівок матеріалом катода, що під час роботи також випаровується.

Недоліки цих випарників – складність апаратури живлення і керування, труднощі випаровування металів високої теплопровідності (мідь, алюміній, срібло, золото), необхідність частої заміни і налаштування катоду, а також живлення високою напругою, що вимагає дотримання відповідних правил техніки безпеки.

2.4. Вирощування плівок напівпровідникових сполук методом гарячої стінки

Метод гарячої стінки характеризується тим, що ріст відбувається в умовах, дуже близьких до термодинамічної рівноваги. Основною особливістю методу є наявність нагрітого екрану (гарячої стінки), який служить для зосередження і напрямлення на підкладку випаровуваної речовини. При цьому виключаються втрати випаровуваного матеріалу, створюється можливість підтримки високого тиску пари речовини або його різних компонент і зводиться до мінімуму різниця температур джерела і підкладки. Загальний вигляд технологічного оснащення і конструкція реактора для реалізації методу гарячої стінки по-

казані на рис. 2.12. Основними елементами є випарувальна комірка і тримач підкладок, вміщені у вакуумну камеру з залишковим тиском газів $\sim 10^{-4}$ Па. В нижній частині комірки, виготовленої з кварцової трубки, знаходиться резервуар основного джерела випаровуючого матеріалу. Для управління складом пари вихідного матеріалу і, таким чином, електричними властивостями конденсату в процесі вирощування використовують додаткове джерело одного з компонент, яке розміщене на одній осі з основним. Довжина кварцових трубок додаткового джерела вибирається таким чином, щоб запобігти тепловому нагріву від основного реактора.

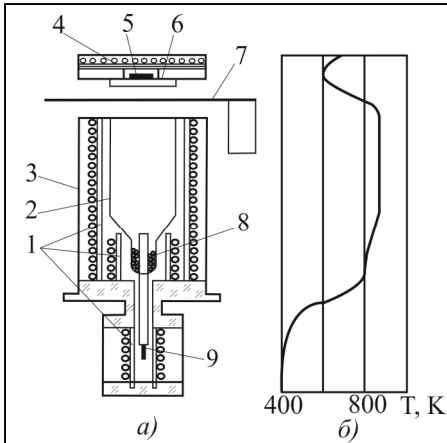


Рис. 2.12. Конструкція (а) і температурний профіль (б) випарувальної комірки для одержання плівок методом гарячої стінки: 1 – нагрівники стінок камери, основного і додаткового джерел; 2 – кварцова камера; 3 – радіаційний екран; 4 – нагрівник підкладок; 5 – підкладка; 6 – маска; 7 – механічна заслінка; 8 – джерело основного матеріалу; 9 – легуюче джерело

камери – $N_C = 200$ Вт і $T_C = 300\text{--}1100$ К.

Тримач підкладок являє собою масивний диск з електрохімічної міді з вмонтованим стрічковим нагрівником із танталу. Передача тепла від нагрівника до диску відбувається випромінюванням. Масивність нагрівника (дysку) забезпечує хорошу стабілізацію температури під-

Систему забезпечують чотири незалежні нагрівники: реакторів для випаровування основного матеріалу (T_B) і лігатур (T_D) і підкладок (T_H). Конструктивно найбільш вдалим виявились нагрівники стрічкового і трубчатого типу із танталу. В якості неохолоджуваних струмопідводів для випарників використовують стрічки ніхрому і танталу. Для зменшення втрат на теплове випромінювання використовують радіаційний екран з нержавіючої сталі. Потужність і робочі температури нагрівників становили:

- реактора основного випарника – $N_B = 150$ Вт і $T_B = 300\text{--}1000$ К;
- реактора додаткового джерела – $N_D = 50$ Вт і $T_D = 300\text{--}700$ К;
- стінок випарувальної ка-

кладок на всіх етапах конденсації матеріалу. Нагрівник потужністю 30 Вт забезпечує робочі температури в діапазоні $T_D = 400 \dots 800$ К. Контроль температурних режимів вирощування плівок здійснюють за допомогою термопар «хромель-копель», ввімкнених до приладів ВРТ-2, що забезпечує стабілізацію температур до $0,5 \dots 1,0$ К.

Вихідним матеріалом при вирощуванні плівок служили синтезовані полікристалічні злитки напівпровідникових сполук. Температурний режим основного реактора випаровувальної комірки задається виходячи з аналізу Р-Т-х діаграми випаровуваного матеріалу. Заслінка, розміщена між джерелом і тримачем підкладок, служить для встановлення часу наплення і запобігає попаданню частинок речовини на підкладку до встановлення вибраних температурних режимів. З метою запобігання конденсації пари матеріалу на шляху до підкладки температура стінок камери вибирають завжди більшою на $50\text{--}100$ градусів, ніж температура основного джерела.

2.5. Метод молекулярно-променевої епітаксії

Метод молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) призначений для вирощування плівок у надвисокому вакуумі за допомогою пучків атомів або молекул, які являються компонентами вирощуваної сполуки. Таким чином, МПЕ є вдосконаленням звичайного способу наплення плівок випаровуванням у вакуумі. Дозволяє вирощувати гетероструктури заданої товщини з моноатомногладкими гетерограницями і із заданим профілем легування. В установках МПЕ є можливість досліджувати якість плівок «in situ» (тобто прямо в ростовій камері під час росту). Для процесу епітаксії необхідні спеціальні добре очищені підкладки з атомарногладкою поверхнею.

Технологія молекулярно-променевої епітаксії була створена в



Рис. 2.13. Схема процесу одержання сполуки $Al_xGa_{1-x}As$ методом МПЕ

кінці 1960-х років Дж. Р. Артуром (J. R. Arthur) і Альфредом Чо (Alfred Y. Cho).

В основі методу лежить осадження випарованої у молекулярному джерелі речовини на кристалічну підкладку. Не дивлячись на достатньо

просту ідею, реалізація даної технології вимагає надзвичайно складних технічних рішень. Основні вимоги до установки наступні:

- у робочій камері установки необхідно підтримувати надвисокий вакуум (близько 10^{-8} Па);
- чистота випаровуваних матеріалів повинна досягати 99,999999 %;
- необхідне молекулярне джерело, здатне випаровувати тугоплавкі речовини з можливістю регулювання густини потоку речовини. Особливістю епітаксії є невисока швидкість росту плівки (зазвичай менше 1000 нм в хвилину).

Будова установки молекулярно-променевої епітаксії

Вакуумна камера виготовляється із нержавіючого сплаву високої чистоти. Для забезпечення вакууму в камері, перед роботою її прогрівають до високих температур. При цьому відбувається дегазація поверхні.

У сучасних установках можуть використовуватися декілька сполучених єдиною транспортною системою камер:

- робоча камера, в якій здійснюється вирощування структури;
- завантажувальна камера, що виконує роль шлюзу між робочою камерою і атмосферою;
- дослідницька камера з приладами.

Форвакуумний насос здійснює початкове відкачування газу з установки (до тиску близько 0,5 Па).

Абсорбційний насос використовує матеріали з розвиненою поверхнею (наприклад порошок цеоліту), які при сильному охолодженні (рідким азотом) вбирають в себе частину газу з установки.

Магніторозрядний насос відкачує газ завдяки наявності в нім титанових електродів, що розпилюються. Розпорошений титан переосаджується на робочу поверхню насоса, утворюючи плівку, яка «прикриває» газ, що потрапив на поверхню. Використовується для досягнення надвисокого вакууму.

Маніпулятор (підкладкотримач) використовується для кріплення підкладки, її обертання і нагрівання.

Вбудований в маніпулятор **нагрівач** забезпечує попереднє прогрівання зразка для очищення його від бруду і знищення захисного шару оксиду. Під час роботи нагрівач підтримує постійну температуру підкладки, при якій відбувається міграція адсорбованих атомів (адатомів) речовини. Тим самим забезпечується процес формування атомарно гладких моношарів. Швидкість росту визначається потоком речовини на поверхню. При малих потоках виходять дуже гладкі плів-

ки з чіткими гетерограницями. Проте із-за тривалості процесу підвищується вірогідність забруднення поверхні, що призводить до появи дефектів у вирощуваній структурі. При більшому потоці виходить полікристалічна або аморфна плівка.

Для усунення ефектів неоднорідності структур із-за несиметричності молекулярних пучків маніпулятори зазвичай роблять такими, що обертаються. Проте в цьому випадку все одно зберігається радіальна несиметричність.

Молекулярні джерела використовуються для випаровування речовин. Вони складаються з наступних елементів:

- тигль з тугоплавкого матеріалу (чистий нітрид бору або графіт). Від форми тигля залежить форма і однорідність молекулярного пучка. У сучасних джерелах використовуються ефузійні комірки Кнудсена;

- нагрівач (намотана навколо тигля спіраль). Температура нагріву досягає 1900 К;

- термопара для вимірювання температури тигля. Від температури залежить густина потоку речовини в пучку;

- заслінка перед тиглем. З її допомогою можна різко вимикати пучок для формування чітких гетерограниць в зразку.

Випарувана в тиглі речовина у вигляді пучка потрапляє на підкладку. Завдяки надвисокому вакууму молекули речовини розповсюджуються практично по прямій не зазнаючи зіткнення з молекулами газу (тобто довжина вільного пробігу молекул більша відстані від джерела до підкладки).

У разі використання тугоплавких матеріалів або речовин з високою хімічною активністю використовується метод автотигля випаровування. Електронний пучок потрапляє в речовину і розплавляє невелику ділянку. Таким чином речовина сама є тиглем. Сучасні пристрої контролю електронного пучка дозволяють змінювати його напрям, фокус, інтенсивність і інші параметри отримати рівномірний атомарний пучок або підвищити ефективність витрати матеріалу.

Кількість і тип джерел визначається використовуваними для вирощування структур речовинами. Наприклад для створення структур GaAs/AlGaAs необхідно три джерела: Ga Al і As. В установках передбачено місце для установки декількох джерел (зазвичай шести), що дозволяє рідше розкривати установку для заправки джерел речовиною.

Кріопанелі – ємкості, заповнені рідким азотом, встановлені навколо маніпулятора для поліпшення вакууму і виморожування молекул випаровуваної речовини, що не потрапили на підкладку. Також

вони використовуються для розділення молекулярних джерел один від одного по температурі.



Рис. 2.14 Загальний вигляд установки для отримання плівок методом молекулярно-променевої епітаксії (STE3532)

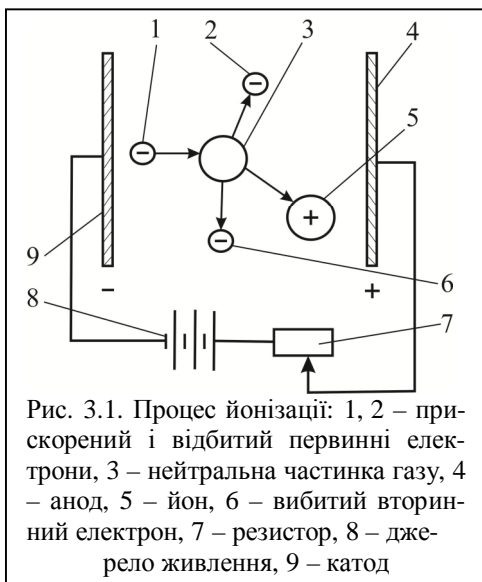
Використання комп'ютерів із спеціальним програмним забезпеченням дозволяє прискорити процеси епітаксії, спростити установку в обслуговуванні.

3. НАНЕСЕННЯ ПЛІВОК МЕТОДОМ ЙОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

3.1. Основні відомості

Принцип дії пристроїв йонного розпилення заснований на таких фізичних явищах як йонізація частинок газу тліючого розряду у вакуумі і розпилення речовин бомбардуванням прискореними йонами.

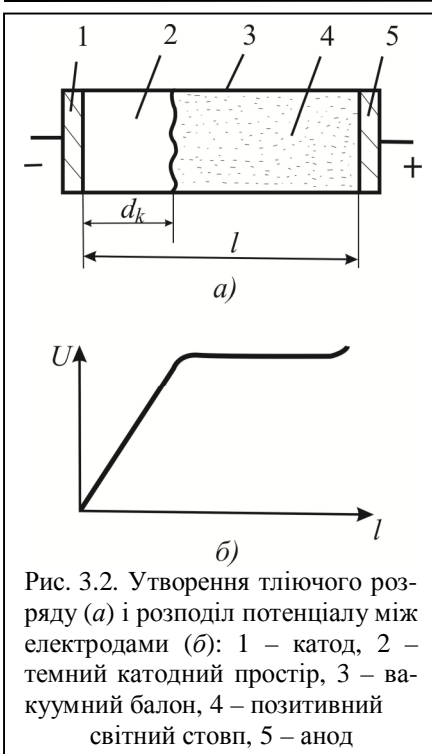
Йонізація – це процес перетворення нейтральних частинок газу (атомів і молекул) у позитивно заряджені йони. Сутність цього процесу полягає в наступному (рис. 28). Газ, що знаходиться між двома електродами завжди містить кілька вільних електронів. Якщо між електродами – анодом 4 і катодом 9 – створити електричне поле (від джерела 8 через баластовий резистор 7), це поле буде прискорювати вільні електрони. При зустрічі з нейтральною частинкою газу 3 прискорений первинний електрон 1 вибиває її вторинний електрон 6, перетворюючи нейтральну частинку газу в позитивно заряджений йон 5. Таким чином, у результаті зіткнення з'являється нова пара заряджених частинок: вибитий вторинний електрон 6 і позитивно заряджений йон 5.



Відбитий первинний електрон 2 і вторинний електрон 6, у свою чергу, можуть бути прискорені електричним полем і при взаємодії з нейтральними частинками газу утворити по парі заряджених частинок. Так розвивається лавиноподібний процес появи в газовому середовищі двох видів заряджених частинок, і газ, будучи в нормальних умовах електричним ізолятором, стає провідником.

Тліючий розряд є одним з видів стаціонарного розряду в газах. Сутність його можна пояснити

на найпростішому пристрої, показаному на рис. 3.1. Із двох сторін у



темним катодним простором утвориться область йонізованого газу. Світіння позитивного стовпа пояснюється збудженням нейтральних молекул газу при їхньому зіткненні з електронами. У позитивному стовпі концентрації йонів і електронів приблизно однакові і досить високі.

Стан газового середовища, при якому в ньому концентрації електронів і йонів приблизно рівні, називають плазмою.

Для тліючого розряду характерним є визначений розподіл потенціалу по довжині балона l . Як видно з рис. 3.2, б, в основному спад прикладеної напруги відбувається на темному катодному просторі. Крім того, у темному катодному просторі, де зосереджено максимальне електричне поле, електрони прискорюються до енергії йонізації газу, у результаті чого підтримується розряд.

Позитивний стовп має однакові концентрації електронів і йонів, характеризується високою провідністю і малим спадом напруги.

вакуумний скляний балон 3 впаяні два металеві дископодібні електроди – катод 1 і анод 5. При тиску порядку 0,1–10 Па і подачі напруги близько 3–4 кВ у результаті йонізації газу в балоні виникає світіння, що і є зовнішньою ознакою тліючого розряду.

Докладно не розглядаючи структуру розряду, можна розділити розрядний простір на дві основні області: темну катодну 2 і позитивний світний стовп 4. Товщина d_k темного катодного простору приблизно дорівнює середній відстані, що проходить електрон від катода до першого йонізуючого зіткнення, коли він не втрачає цілком своєї енергії.

Так як при подальшому русі до анода електрон здатний багаторазово йонізувати частинки газу, безпосередньо за

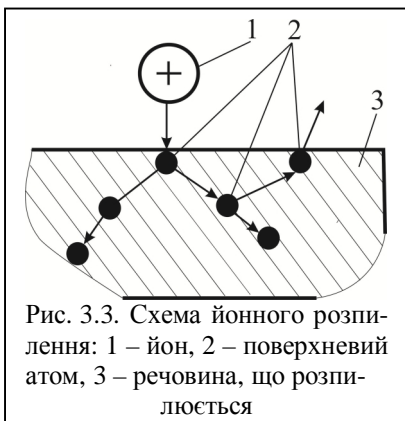


Рис. 3.3. Схема йонного розпилення: 1 – йон, 2 – поверхневий атом, 3 – речовина, що розпилюється

Іони на межі темного катодного простору прискорюються в напрямку катода сильним електричним полем, бомбардують і розпилюють його. При цьому йони нейтралізуються електронами, що знаходяться на катоді із зовнішнього ланцюга. Одночасно з розпиленням катода йони вибивають електрони з його поверхні, що забезпечує постійний приплив електронів для підтримки розряду.

Таким чином, тліючий розряд є генератором йонів, необхідних для ефективного бомбардування катода і його розпилення.

Йонне розпилення (рис. 3.3) можна пояснити з позицій імпульсного механізму впливу прискорених йонів на поверхневі частинки матеріалу.

В атомному масштабі це явище порівнянне з ударом двох біль-ярдних куль, з яких одна являє собою падаючий йон, а інша – атом твердого тіла. При розпиленні речовини 3 йон 1 передає свій імпульс енергії атому, який, у свою чергу, може передати його іншим атомам, викликавши каскад зіткнень, як це показано стрілками на рис. 3.3.

У тому випадку, коли поверхневий атом 2 речовини, що розпилюється 3, одержить достатній імпульс енергії, напрямлений від поверхні, для розриву зв'язку з найближчими сусідніми атомами, він залишить її. Напрямок польоту цього атома відповідає напрямку отриманого імпульсу.

Ефективність процесу йонного розпилення описується коефіцієнтом розпилення, що виражається числом вилучених частинок речовини, яка розпилюється, що припадає на один йон, і складає від часток одиниць до декількох одиниць. Коефіцієнт розпилення залежить від енергії йона, його маси, кута падіння, матеріалу, який розпилюється і стану його поверхні.

Існують різні варіанти реалізації методу йонного розпилення, серед яких найбільш поширені засновані на діодних і магнетронних системах. Діодні системи часто називають системами катодного розпилення.

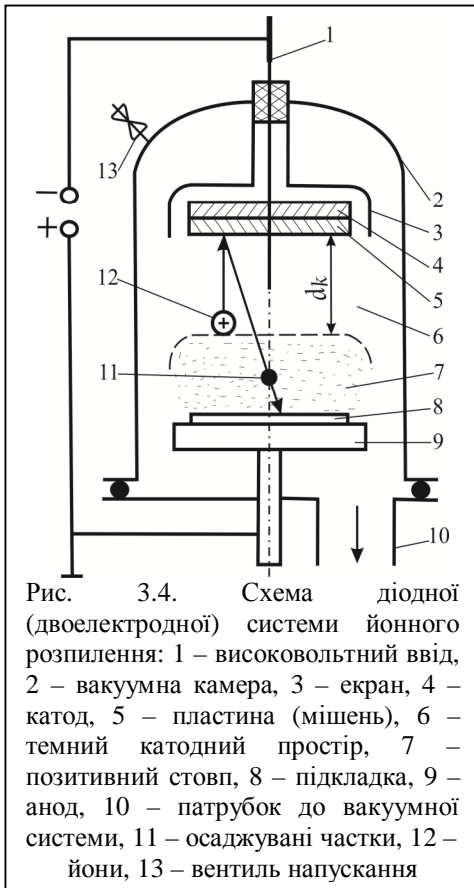


Рис. 3.4. Схема діодної (двоелектродної) системи йонного розпилення: 1 – високовольтний ввід, 2 – вакуумна камера, 3 – екран, 4 – катод, 5 – пластина (мішень), 6 – темний катодний простір, 7 – позитивний стовп, 8 – підкладка, 9 – анод, 10 – патрубок до вакуумної системи, 11 – осаджувані частки, 12 – йони, 13 – вентиль напускання

3.2. Діодні системи йонного розпилення

Принцип дії діодної (двоелектродної) системи йонного розпилення показаний на рис. 3.4. Два основних елементи системи – катод 4 і анод 9 – розташовуються в робочій вакуумній камері 2.

Катод 4 через високовольтний ввід 1 приєднується до негативного полюсу високовольтного джерела.

Матеріал, який підлягає розпиленню, у вигляді пластини 5 прикріплюється до катода. Цю пластину називають мішенню. Землений анод 9 розташовується на відстані кількох сантиметрів від катода. Підкладки 8, на які наносять плівки, закріплюють на аноді. При подачі на катод напруги порядку 35 кВ у камері виникає тліючий розряд.

Як уже відзначалося, для тліючого розряду характерним є визначений розподіл потенціалу в просторі між катодом і анодом. Причому в основному спад прикладеної напруги відбувається на темному катодному просторі 6. йони 12, що дифундують до межі позитивного стовпа 7, попадають на межу темного катодного простору і, прискорюючись в ньому під дією електричного поля, бомбардують мішень (катод). Частинки речовини, що вибиваються з мішені 11, летять у напрямку до анода 9 і осаджуються на підкладці у вигляді тонкої плівки.

Швидкість нанесення тонких плівок у діодних системах складає близько 0,5 нм/с.

Як катод, так і анод охолоджуються протічною водою, що перешкоджає їх перегріву. Крім того, зі зворотної сторони мішені на відстані 3–5 мм розташований екран 3, що локалізує розряд тільки на її лицьовій стороні. Тому задня частина катода не піддається йонному розпиленню.

Розміром d_k темного катодного простору визначається мінімальна відстань між мішенню і підкладкою, що звичайно складає від 3 до 5 см. Якщо ця відстань менша, розряд гасне, тому що шлях, який проходять електрони між катодом і анодом, занадто короткий для створення достатньої кількості йонів і електронів.

Для попереднього відкачування до вакууму порядку 10^{-4} Па і наступної підтримки робочого тиску порядку 1–10 Па служить система відкачування, яка приєднується до патрубку 10. Робочий газ вводять у камеру через вентиль 13, одночасно продовжуючи відкачування через патрубок 10. Це роблять для того, щоб через камеру проходив потік чистого, постійно оновленого газу. Зазвичай як робочий використовують інертний газ аргон – дуже високого ступеня чистоти.

У розглянутій системі діодного розпилення мішені розташовуються вгорі камери. Однак мішені діодних систем можуть мати будь-яке просторове положення.

У порівнянні з термовакуумним методом нанесення плівок метод діодного йонного розпилення володіє декількома особливими властивостями.

Велика площа розпилюваної мішені, що виконує функції джерела атомів речовини, що осаджується, дозволяє осаджувати рівномірні по товщині плівки на підкладках великих розмірів, що забезпечує ефективну реалізацію групового методу обробки. Мішені являють собою джерело частинок матеріалу тривалої дії, що полегшує автоматизацію і підвищує однорідність процесу. Велика енергія атомів, що конденсуються, забезпечує високу адгезію плівки до підкладки.

Основним недоліком цього методу є необхідність для підтримки розряду високого тиску аргону, що підвищує ймовірність забруднення плівки газовими вклученнями. Крім того, при високому тиску довжина вільного пробігу частинок складає кілька міліметрів, тому вони втрачають свою енергію і змінюють напрямок руху при зіткненнях з молекулами робочого газу. У результаті потік частинок, що осаджуються на поверхню підкладки, є хаотичним, що ускладнює можливість використання при розпиленні вільних масок, що дають розмите зображення елементів через ефект "підпилення".

При проведенні процесу розпилення в діодних системах необхідно досить стабільно підтримувати тиск, тому що збільшення його

підвищує ймовірність зіткнення розпилених атомів з молекулами робочого газу. У результаті цього частина атомів не осаджується на підкладці, розсіюється в об'ємі камери чи повертається на мішень, а швидкості розпилення й осідання падають, що може призвести до невідтворюваності товщини плівки.

В даний час діодні розпилювальні системи в основному використовують при виробництві гібридних ІМС. Пояснюється це тим, що частина електронів може без зіткнення пройти простір катод – підкладка і, будучи сильно прискореними, бомбардувати анод (підкладку). Це викликає значне нагрівання підкладок, а також може призвести до ушкодження напівпровідникових структур.

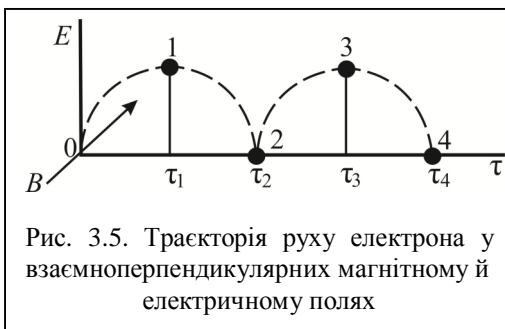
3.3. Магнетронні системи йонного розпилення

Магнетронні системи йонного розпилення є удосконаленими діодними системами і відрізняються від них наявністю в прикатодній області електричного і кільцеподібного магнітного полів, спрямованих перпендикулярно один до одного.

Перш ніж розглянути магнетронні системи, необхідно ознайомитися з законами руху заряджених частинок у схрещених (спрямованих під кутом один до одного) електричному і магнітному полях. Роздільний вплив електричних і магнітних полів на рух заряджених частинок було розглянуто раніше у зв'язку з роботою електронно-променевих випарників. Зовсім інакше поведуться заряджені частинки при одночасному впливі цих полів.

Зупинимося на найпростішому випадку, коли ці поля однорідні і напрямлені перпендикулярно одне до одного (рис. 3.5): електричне поле E – по вертикальній осі, а магнітне B – перпендикулярно до площини рисунка; час t відраховується по горизонтальній осі.

Нехай у деякий початковий момент часу заряджена частинка (електрон) знаходиться в точці 0 і її швидкість дорівнює нулю. Під



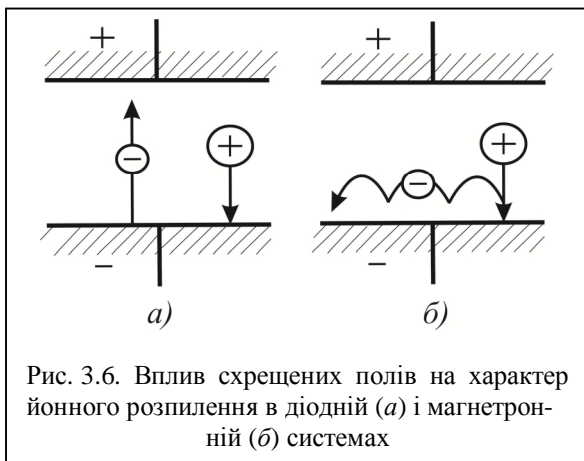
дією електричного поля електрон починає прискорюватися уздовж осі E . В міру збільшення швидкості сила, що діє з боку магнітного поля, буде зростати, тому що вона пропорційна швидкості, і рухомий електрон почне відхилятися, тобто траєкторія буде

відхилятися (згинатися) убік від осі E .

Поступовий поворот траєкторії повинен призвести до того, що електрон, починаючи з деякого моменту часу τ_1 , якому відповідає точка 1, почне рухатися до горизонтальної осі τ . На ділянці траєкторії від точки 1 до точки 2 швидкість електрона через гальмування в електричному полі зменшується і перетворюється в нуль, коли він у момент часу τ_2 досягає горизонтальної осі – точка 2. Потім знову починається процес прискорення, що змінюється фазою гальмування і відхиленням траєкторії від точки 3 до точки 4 і т. д.

Таким чином, траєкторія електрона складається з періодично повторюваних однакових фаз. Така подібна на арку крива зветься циклоїдою.

Розглянемо вплив схрещених полів на процес йонного розпилення. Нагадаємо, що в діодній системі розряд підтримується вторинними електронами, які вводяться з поверхні катода-мішені під дією йонного бомбардування. У цьому випадку (рис. 3.6, *a*) електрони залишають катод, прискорюються в перпендикулярному до нього напрямку електричним полем і, пройшовши позитивний стовп, попадають на анод і захоплюються ним.



Якщо перпендикулярно до електричного поля накласти паралельно катоду і дуже близько до нього магнітне поле (рис. 3.6, *б*), траєкторії електронів будуть являти собою циклоїди. Електрони, що покидають катод внаслідок емісії під дією йонного

бомбардування, не можуть при цьому рухатися до анода в перпендикулярному напрямку, тому що виявляються у своєрідній пастці, створеній магнітним полем.

Доти, поки не відбудеться кілька йонізуючих зіткнень електронів з атомами робочого газу, вони переміщатимуться в пастці, втрачають енергію, отриману від електричного поля. Велика частина енергії

електронів витрачається на йонізацію в безпосередній близькості від катода, де створюється висока концентрація позитивних йонів. У результаті зростають інтенсивність бомбардування катода і швидкість його розпилення.

Швидкість нанесення тонких плівок у магнетронних системах складає 100–200 нм/с.

Тому що застосування магнітного поля збільшує ефективність йонізації, тліючий розряд у магнетронних системах підтримується при більш низьких тисках, ніж у діодних. Магнетронні системи дуже ефективно працюють при тисках аж до 10^{-2} Па і постійній напрузі, що забезпечує високу чистоту отримуваних плівок.

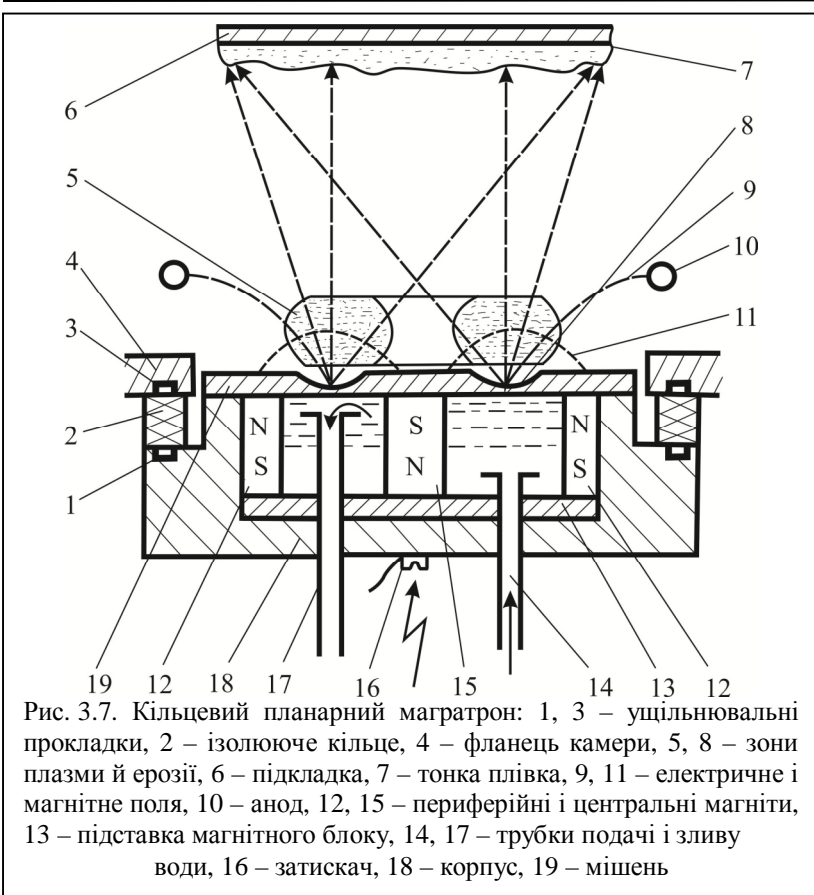
Підводячи підсумки, слід зазначити, що джерела магнетронного розпилення, які називають магратронами, дозволили значно підвищити параметри і розширити технологічні можливості діодних розпилюючих систем:

- Ø збільшити більш ніж на порядок швидкість нанесення плівок, наблизивши її до швидкості термовакуумного напылення, і зменшити на порядок робочий тиск, а отже, і ймовірність попадання газових включень у плівку;
- Ø виключити інтенсивне бомбардування підкладок високоенергетичними електронами, тобто знизити неконтрольоване нагрівання підкладок і ушкодження напівпровідникових структур;
- Ø забезпечити нанесення плівок алюмінію і його сплавів з великими швидкостями розпилення;
- Ø замінити високовольтне устаткування низьковольтним.

Крім того, магратрони забезпечують тривалий ресурс роботи і відкривають можливість створення промислових установок напівбезупинної і безупинної дії. В даний час магратрони є одним з основних пристроїв нанесення тонких плівок при виробництві всіх типів ІМС.

В устаткуванні для нанесення тонких плівок використовують плоскі (планарні) магратрони з кільцевою й овально-протяжною зонами ерозії, що складаються з наступних основних частин: водоохолоджувача катода, магнітного блоку й анода.

У **кільцевому планарному магратроні** (рис. 3.7) всі елементи змонтовані в корпусі 18, що приєднується до робочої камери через проміжне ізолююче кільце 2 і фланець 4 з вакуумними ущільнювальними прокладками 1 і 3. Дискподібна мішень-катод 19 охолоджується протічною водою по трубках 14 і 17. Напруга, що подається на катод через затискач 16, дорівнює 300–700 В. Під катодом розташований



магнітний блок, що складається з центрального 15 і периферійних 12 постійних магнітів, закріплених на основі блоку 13, виготовленого з магнітм'якого матеріалу. Магнітний блок створює над поверхнею катода магнітне поле 11 (порядку 0,02–0,05 Тл). Складава цього поля паралельна до площини катода.

Анод 10 розташований над катодом може знаходитися або під потенціалом землі, або під напругою 30–100 В відносно катода і забезпечує утворення електричного поля 9. Складава цього поля є перпендикулярна до площини катода.

При подачі негативного потенціалу на катод у прикатодній області утворюється зона схрещених магнітних і електричних полів. Електрони, що там знаходяться, під дією цих полів роблять складні рухи, йонізуючи газ. У результаті виникає розряд і над поверхнею ка-

тода утвориться кільцеподібна зона плазми 5 – світний позитивний стовп. При цьому позитивні йони прискорюються в напрямку катода, бомбардуючи і розпилюючи його поверхню в зоні 8, яку називають зоною ерозії. Частинки матеріалу, що залишають мішень, осаджуються у вигляді плівки 7 на підкладці 6, а також частково розсіюються молекулами залишкових газів і осаджуються на стінках робочої камери і поверхнях технологічного оснащення.

Овально-протяжний планарний магратрон (рис. 3.8) побудований аналогічно і відрізняється лише тим, що його магнітний блок має витягнуту конфігурацію, а зона ерозії являє собою ніби два паралельних джерела розпилення. Зверху над полюсами магнітного блоку 2, що має Ш-подібний переріз і розміщений в корпусі 1, розташовується мішень, що розпилюється 3, а по периферії – заземлений екран 4.

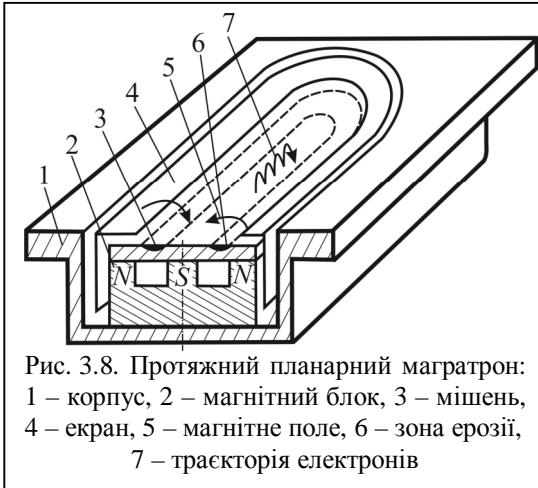


Рис. 3.8. Протяжний планарний магратрон: 1 – корпус, 2 – магнітний блок, 3 – мішень, 4 – екран, 5 – магнітне поле, 6 – зона ерозії, 7 – траєкторія електронів

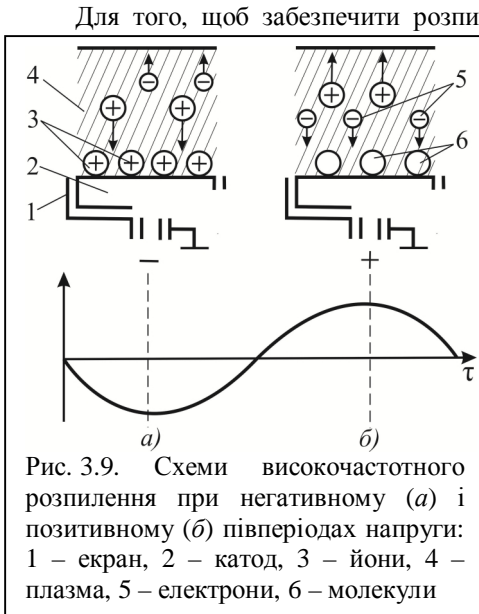
рії – заземлений екран 4.

3.4. Високочастотний і реактивний методи йонного розпилення

Для високочастотного і реактивного йонного розпилення використовують як звичайні діодні, так і магнетронні системи.

Високочастотне розпилення почали застосовувати, коли треба було наносити діелектричні плівки. У попередньому розділі передбачалося, що речовина, яка розпилюється, – метал. При цьому йон робочого газу, вдаряючись об мішень, нейтралізується на ній і повертається у вакуумний об'єм робочої камери.

Якщо матеріал, що розпилюється, – діелектрик, то позитивні йони не нейтралізуються і за короткий проміжок часу після подачі негативного потенціалу покривають шаром мішень, створюючи на її поверхні позитивний заряд. Поле цього заряду компенсує первісне поле мішені, що мала негативний потенціал, і подальше розпилення стає неможливим, тому що йони з розряду не притягаються до мішені.



приходиться нейтралізувати позитивний заряд на її поверхні подачею високочастотного (ВЧ) змінного потенціалу. При цьому в системі розпилення, що являє собою діодну систему (рис. 3.9, а, б) з катодом 2, оточеним екраном 1 (анодом може служити вакуумна камера), відбуваються наступні процеси.

Оскільки в плазмі позитивного стовпа 4 містяться рівні кількості йонів і електронів, при змінній поляризації мішені під час негативного півперіоду (рис. 3.9, а) вона притягає йони 3.

Прискорені йони бомбардують і розпилюють діелектричну мішень, одночасно передаючи їй свій заряд. При цьому мішень накопичує позитивний заряд і інтенсивність розпилення починає знижуватися. Під час позитивного півперіоду (рис. 3.9, б) мішень притягає електрони 5, що нейтралізують заряд йонів, перетворюючи їх у молекули 6. У наступні негативний і позитивний півперіоди процеси повторюються і т. д.

У промислових установках ВЧ розпилення ведеться на єдиній дозволений частоті 13,56 МГц, що знаходиться в діапазоні радіов'язку. Тому іноді ВЧ розпилення називають радіочастотним.

Реактивне розпилення застосовують для нанесення плівок хімічних сполук. Необхідну хімічну сполуку одержують, підбираючи матеріал мішені і робочий газ.

При цьому методі в робочу камеру в процесі розпилення вводять дозовану кількість так званих реактивних (хімічноактивних) газів. Причому для нанесення плівок оксидів і нітридів в робочий газ – аргон – додають відповідно кисень і азот. Основною умовою при отриманні потрібних сполук є очищення реагентів і відсутність натікання, а також газовиділення в камері.

Недолік реактивного розпилення – можливість осідання сполуки на катоді, що істотно зменшує швидкість росту плівки.

При реактивному розпиленні реакції можуть протікати як на мішені, так і в півці, що залежить від співвідношень реактивного газу й аргону. Під час відсутності аргону реакції відбуваються на мішені. При цьому розряд протікає повільно, тому що більшість атомів реактивного газу витрачається на утворення на поверхні мішені сполук, що перешкоджають розпиленню. Щоб реактивні процеси проходили на підкладці, кількість реактивного газу не повинна перевищувати 10%; решту складає аргон.

При реактивному розпиленні кремнію кисень, що напускається в робочу камеру, взаємодіє з атомами кремнію, що конденсують на поверхні підкладки, у результаті чого утворюється плівка SiO_2 .

При нанесенні реактивним розпиленням діелектричних плівок нітриду кремнію Si_3N_4 відбувається аналогічний процес. У робочу камеру напускають ретельно осушений і очищений від кисню аргон з добавкою азоту. Йони цих газів, бомбардуючи кремнієвий катод, вибивають з нього атоми кремнію і на підкладці унаслідок великої хімічної активності йонізованих атомів азоту утворюється плівка нітриду кремнію Si_3N_4 , що відрізняється високою хімічною стійкістю.

Так як що умови реакції при нанесенні діелектричних плівок істотно залежать від сталості в робочому газі процентного вмісту реактивного газу, що напускається, необхідно строго стежити за його подачею. Напуск газів у робочу камеру, як правило, роблять двома способами:

- Ø вводять обидва гази (аргон і реактивний) з магістралей балонів, контролюючи витрату реактивного газу мікровитратоміром і підтримуючи постійний тиск;
- Ø вводять заздалегідь підготовлену визначеного складу робочу суміш газів з резервуара.

Контрольні питання

1. Як відбувається йонізація і виникає тліючий розряд?
2. Який механізм йонного розпилення речовини?
3. Який принцип дії діодної розпилюючої системи?
4. Які особливості магнетронного розпилення?
5. Як влаштований і працює кільцевий планарний магнетрон?
6. Чим відрізняється овально-протяжний магнетрон від кільцевого?
7. Якими методами наносять діелектричні плівки?

4. РІДИННО- ТА ГАЗОФАЗНА ЕПІТАКСІЯ

4.1. Рідиннофазна епітаксія

Метод рідиннофазної епітаксії (РФЕ) разом з методом газозфазної епітаксії (ГФЕ) знайшов у минулому широке застосування для отримання плівок. Цим методом було отримано ряд твердих розчинів, які не могли бути отримані іншим методом. У зв'язку з широким застосуванням молекулярно-променевої епітаксії методу РФЕ почали приділяти менше уваги. Проте цей метод унаслідок своєї простоти не втратив актуальності і в сьогодення, зокрема, у вирішенні проблем отримання квантоворозмірних структур. До технологічних переваг методу рідиннофазної епітаксії в порівнянні з конкуруючим методом газозфазної епітаксії слід віднести:

- ∅ простоту апаратного оформлення;
- ∅ відсутність токсичних реагентів;
- ∅ високу, обумовлену великими швидкостями кристалізації продуктивність;
- ∅ можливість регулювання в певних межах відхилення складу епітаксійної плівки від стехіометричного.



Рис. 4.1. Зовнішній вигляд установки рідиннофазної епітаксії фірми "Cyberstar" для вирощування плівок напівпровідникових твердих розчинів

Суть методу рідиннофазної епітаксії полягає в приведенні в контакт підкладки з пересиченим розчином напівпровідника в легкоплавкому матеріалі – розчиннику.

На якість і електрофізичні властивості епітаксійних плівок, що вирощуються з рідкої фази, впливають наступні фактори:

- ∅ швидкість охолодження розчину-розплаву;
- ∅ початкова рівноважна температура розчину-розплаву;
- ∅ збільшення ваги розчинника понад рівноважне значення;
- ∅ співвідношення об'єму розплаву і контактуючої площі поверхні підкладки з розплавом;

- Ø фізико-хімічна природа розчинника і розчиненої речовини;
- Ø металографічний стан поверхні підкладки;
- Ø чистота речовин і конструкційних матеріалів, що використовуються в процесі.

Процес рідинної епітаксії і властивості одержуваних епітаксійних плівок в значній мірі визначаються властивостями підкладки. У перший момент після початку кристалізації процес рідинної епітаксії визначається характером фазової рівноваги на межі підкладка – розплав і кінетикою поверхневої реакції осадження атомів матеріалу, що кристалізується. Підкладка робить безпосередній вплив тільки на перший шар завтовшки порядку декількох сталих ґратки матеріалу, що кристалізується. Подальше зростання відбувається на епітаксійному шарі, проте, частина параметрів підкладки визначає властивості всієї епітаксійної плівки (наприклад, орієнтація підкладки, оскільки вона зберігається і у плівці, що росте).

Основними вимогами до матеріалу підкладки є:

- Ø вища температура плавлення підкладки по відношенню до матеріалу, що кристалізується;
- Ø однотипність кристалохімічної структури підкладки і епітаксійної плівки;
- Ø максимальна близькість параметрів їх ґраток;
- Ø коефіцієнт термічного розширення підкладки і плівки повинні бути близькими за значеннями;
- Ø підкладки повинні бути інертні до реактивів, вживаних при підготовці пластин до епітаксії.

Невиконання цих вимог утруднює отримання високоякісних епітаксійних плівок.

Основні методи отримання напівпровідникових плівок (структур) рідиннофазною епітаксією за моделлю дифузії (розподілу концентрації) компонент в розчині-розплаві можна розділити на дві групи:

перша – отримання плівок з необмежених об'ємів розчинів-розплавів («нескінченне джерело»); основний критерій необмежених об'ємів – збереження в процесі росту епітаксійних плівок сталими концентрації розчинених компонентів в основній області розчину-розплаву (практично це має місце при достатньо великому об'ємі (товщині) розчину-розплаву);

друга – отримання плівок з обмеженого об'єму розчину-розплаву («скінчене джерело»); основний критерій обмежених (тонких) об'ємів є зміна в процесі росту епітаксійних плівок концентрації розчинених компонентів у всій області розчину-розплаву, але при цьому розподіл за товщиною залишається однорідним (практично це має

місце при достатньо малому об'ємі (товщині) розчину-розплаву і невеликих швидкостях росту епітаксійних плівок). При отриманні плівок з необмежених («нескінченне джерело») об'ємів розчинів-розплавів концентрація компоненту, що кристалізується змінюється в області рідкої фази, приграничної до поверхні плівки, а далеко від її залишається постійною. Рис. 4.2, а якісно ілюструє розподіл концентрації компоненту, що кристалізується у рідкій фазі в процесі росту епітаксійної плівки.

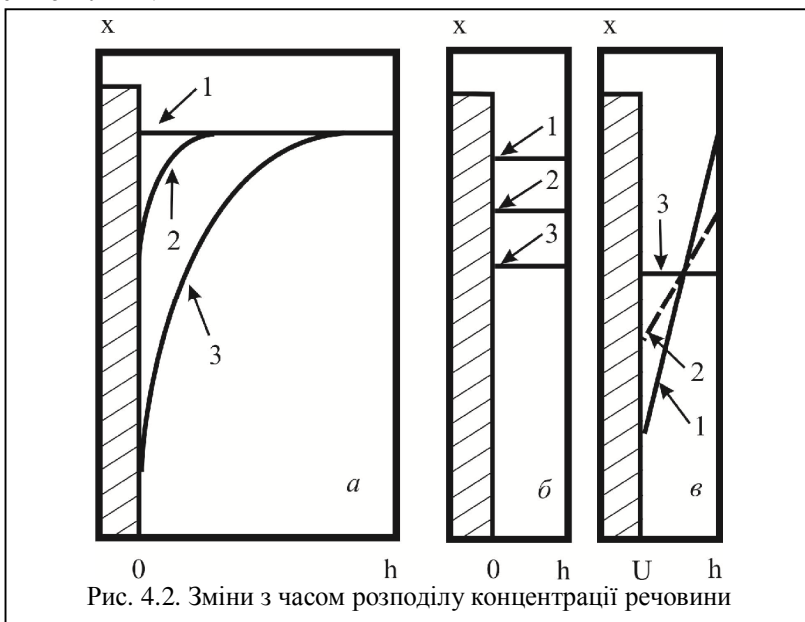


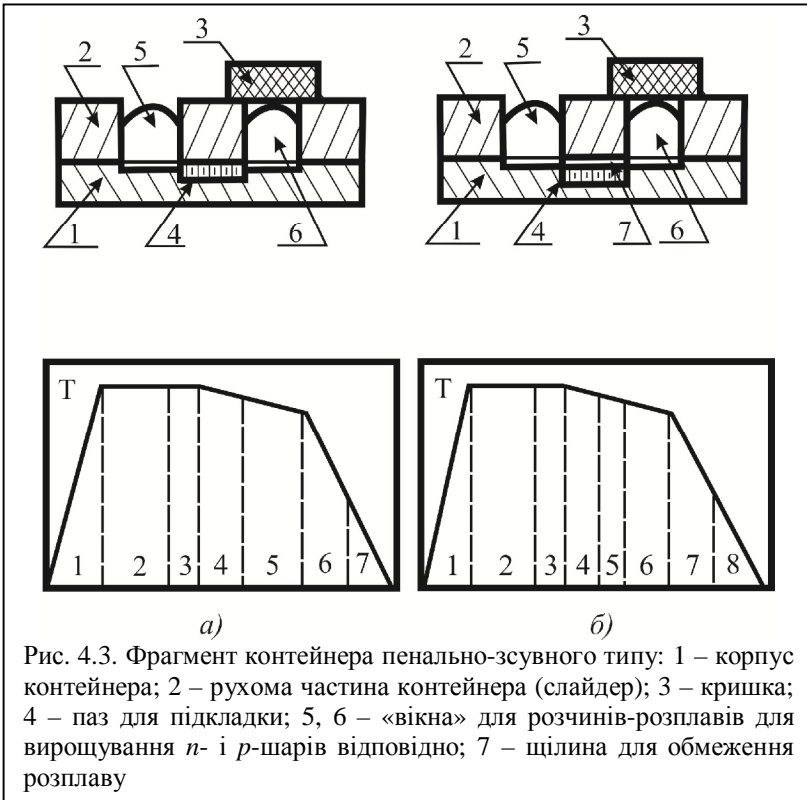
Рис. 4.2. Зміни з часом розподілу концентрації речовини

Як видно з рисунка, при вирощуванні епітаксійних плівок в приграничній області з'являється градієнт концентрації компонент, який поступово збільшується в процесі росту плівки, проте із-за достатньо великої товщини розчину-розплаву зміна концентрації має місце тільки в приграничній області.

При отриманні плівок з обмежених об'ємів розчинів-розплавів («скінченне джерело») можна вважати з певним ступенем ідеалізації, що концентрація компоненту, що кристалізується, змінюється практично рівномірно по всьому об'єму рідкої фази (якщо швидкість дифузії перевищує швидкість росту і вихідний розплав однорідний за складом). Таким чином, при достатньо малих швидкостях росту (менших, ніж швидкість дифузії компоненту, що кристалізується, від верхньої межі расплаву до фронту кристалізації) концентрація компонента,

що кристалізується по товщині рідкої фази буде практично однорідною (рис. 4.2, б).

На рис. 4.3, а показаний фрагмент контейнера пенально-зсувного типу для структур з використанням моделі вирощування з необмежених («нескінченне джерело», а) і з обмежених («скінченне джерело», б) об'ємів незмішуваних розчинів-розплавів з відповідними зрачковими температурно-часовими графіками росту плівок.



4.2. Газофазна епітаксія

В основі методів газофазної епітаксії лежать процеси переносу осаджуваних матеріалів у вигляді летючих сполук до поверхні підкладки, на якій відбувається розклад цих сполук з виділенням необхідного продукту.

Переваги газофазної епітаксії:

- Ø неперервна подача реагентів;
- Ø можливість використання гранично високих температур вирощування;
- Ø простота контролю витрати реагентів (і, тим самим, швидкості росту) в широкому діапазоні;
- Ø можливість вирощування квантово-розмірних структур.

Комбінація цих достоїнств привела до того, що газофазна епітаксія, на сьогоднішній день, є найбільш поширеною епітаксальною технологією.

Недоліки газофазної епітаксії:

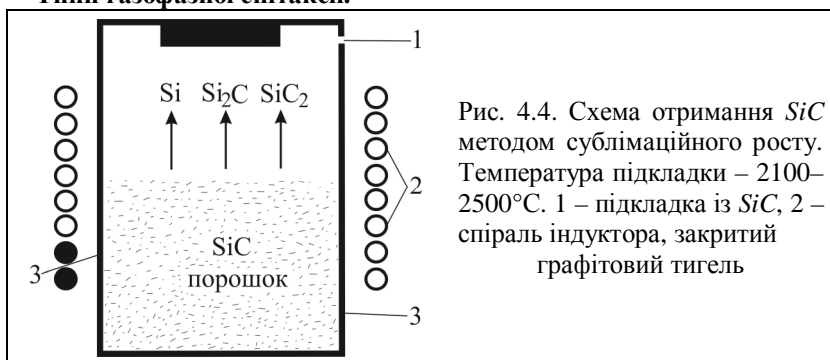
- Ø труднощі отримання різких профілів легування і, в деяких випадках, складу в приладових структурах;
- Ø складні і дорогі системи безпеки і утилізації продуктів хімічних реакцій (економічний чинник);
- Ø трудно отримати різкі профілі легування, які необхідні для ряду приладів мікроелектроніки (транзисторах).

Можлива класифікація ГФЕ технологій:

- Ø за природою процесу: фізична ГФЕ або хімічна ГФЕ;
- Ø по замкнутості процесу: ГФЕ в закритому або проточному реакторі;
- Ø по оборотності процесу: оборотний або необоротний;
- Ø за типом використовуваних реагентів.

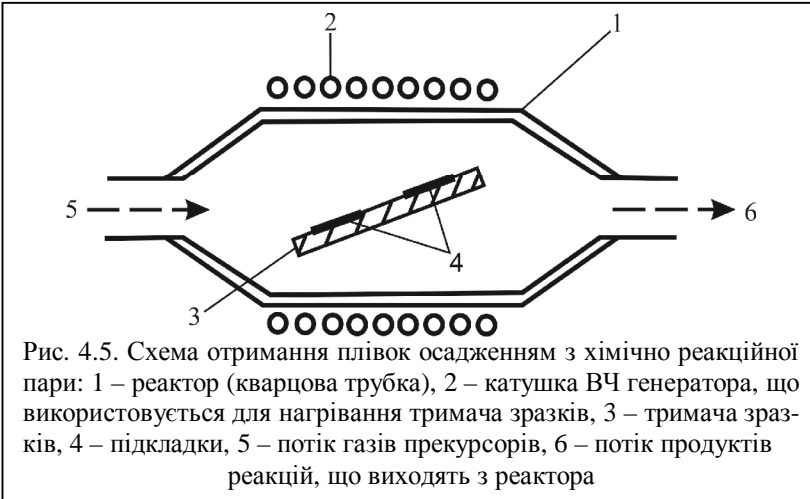
Розділення по всіх цих критеріях – вельми умовні; існує безліч прикордонних і змішаних випадків.

Типи газофазної епітаксії.



Сублімаційний ріст характеризується високими швидкостями росту (до ~1 мм/годину), застосовується, в основному, для вирощування об'ємних кристалів широкозонних напівпровідників, що мають дуже високу температуру плавлення, і для епітаксії, що протікає з високими швидкостями росту.

Осадження з хімічно реакційної пари відбувається в результаті хімічних реакцій, найчастіше, необоротних, таких, що протікають на ростовій поверхні, при цьому початкові реагенти можуть зазнавати хімічних перетворень в газовій фазі на шляху до підкладки.

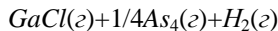


Хлоридно-гідридна епітаксія характеризується відносно високими швидкостями росту (до декількох сотень мікрон в годину) початкові реагенти – хлориди елементів III групи і гідриди елементів V групи. Застосовується, в основному для швидкого вирощування товстих епітаксінних плівок.

Розглянемо схему технологічного процесу хлоридно-гідридної ГФЕ на прикладі отримання $GaAs$. Початковими речовинами є рідкий легколетучий $AsCl_3$ і кристалічний $GaAs$ (джерело). У потоці газу-носія (водню) пари $AsCl_3$ перетворюються в хлористий водень і вільний миш'як за реакцією:



Ці компоненти поступають в зону $GaAs$ -джерела, при взаємодії з яким утворюється рівноважна початкова газова суміш:



яка переноситься в зону осадження. В основі процесу осадження лежить оборотна реакція

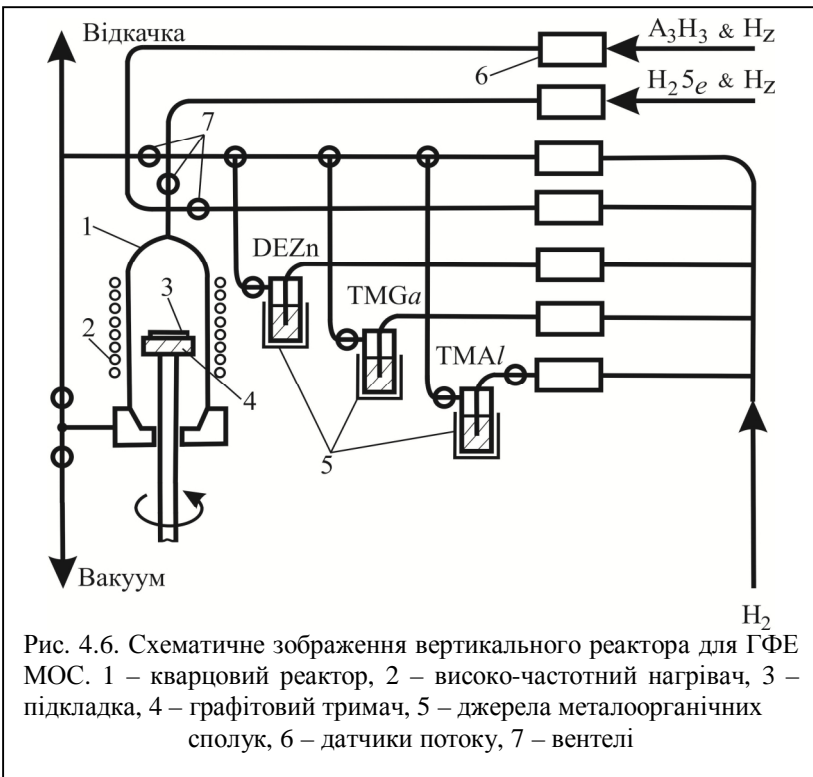
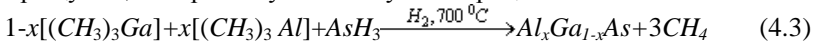


Експериментальні дослідження кінетики росту $GaAs$, а також термодинамічні розрахунки складу газової фази в системі $GaAs-Cl_2-H_2$ показали, що оптимальні умови вирощування шарів $GaAs$ в даній системі варіюються в наступних межах: температура джерела $GaAs(T_D)$

700–850°C, температура підкладок (T_{II}) 600–750°C, різниця температур ($\Delta T = T_{II} - T_{II}$) 50–100°C, молярна концентрація транспортного агента (HCl) у водні ($Q = [HCl]/[H_2]$ від 10^{-2} до 10^{-4} мол. часток, лінійна швидкість потоку газової суміші в реакторі (F) 30–60 см/хв.

МОС-гідридна епітаксія. Початкові реагенти – металоорганічні сполуки елементів III групи і гідриди елементів V групи. Характеризується відносно низькими швидкостями росту (0,01–3,0 мкм/год) – зручна для вирощування квантово-розмірних приладових гетероструктур.

За допомогою ГФЕ МОС вирощують більшість напівпровідникових сполук $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{VI}$ і $A^{IV}B^{VI}$, а також багато важливих потрійних і четверних сполук $A^{III}B^V$. Наприклад, сполуки $Al_xGa_{1-x}As$ звичайно вирощують, використовуючи наступний процес:



5. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВОК І ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЇХНЬОГО НАНЕСЕННЯ

5.1. Основні відомості

Одержання високоякісних плівок із заздальгідь заданими і відтворюваними параметрами визначає необхідність строгого контролю при їхньому нанесенні. Особливості контролю параметрів тонкоплівокових елементів визначаються малими товщинами нанесених плівок (від декількох десятків до сотень нанометрів). Параметри плівок контролюють безпосередньо в процесі їхнього нанесення у вакуумній робочій камері і після нанесення, тобто поза камерою. Найбільш важливий контроль у камері, тому що в залежності від його результатів регулюються режими процесу росту плівки, що дозволяє усунути операції припасування її параметрів після нанесення.

Розглянемо основні способи вимірювання і контролю таких параметрів плівок як товщина, електричний опір, адгезія і найважливіший технологічний режим – швидкості нанесення. У залежності від призначення плівок визначають метод їхнього контролю і контролюють один чи два параметри.

5.2. Вимірювання товщини плівок

Товщину плівок вимірюють такими найбільш розповсюдженими методами як мікрозважування і багатопротенева інтерферометрія.

Метод мікрозважування, який в основному використовується у виробництві гібридних ІМС, полягає у визначенні збільшення маси Δm підкладки після нанесення на неї плівки. При цьому середню товщину плівки визначають за формулою:

$$d_n = \frac{\Delta m}{F_n \rho_m},$$

де F_n – площа плівки на підкладці; ρ_m – густина нанесеної речовини.

Цей метод нескладний, але вимагає, щоб форма підкладки була простою, а її поверхня – у гарному стані. Крім того, на точність вимірювання впливає густина нанесеного матеріалу, що може змінюватися в залежності від умов технологічних режимів (залишкового тиску, забруднень молекулами газу й ін.).

При вимірюванні товщини плівки зважуванням вважають, що густина нанесеної речовини дорівнює густині масивного зразка. Під ефективною товщиною плівки розуміють товщину, яку б мала плівка,

якби вся речовина була рівномірно розподілена по поверхні з густиною, рівною густині масивної речовини.

Чутливість методу зважування складає $1\text{--}10\text{ мкм/м}^2$ і залежить від чутливості ваг і площі півки на підкладці F_n .

Метод багатопроменевої інтерферометрії, який застосовується для вимірювання товщини непрозорих плівок, полягає у спостереженні в мікроскоп інтерференційних смуг, що виникають при розгляді в монохроматичному світлі двох поверхонь, розташованих під кутом одна до одної.

Перед вимірюванням одержують на зразку так звану сходинку – різку бічну межу півки на підкладці. Для цього маскують частину підкладки при напиленні півки чи хімічно видаляють частину нанесеної півки. У мікроскоп спостерігають зсув інтерференційних смуг (рис. 5.1). Світлі і темні інтерференційні смуги чергуються з кроком L

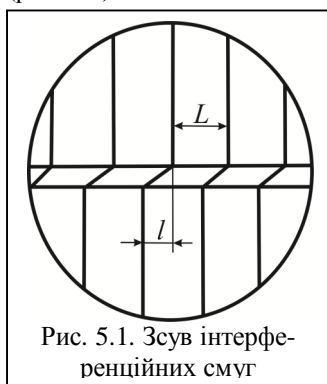


Рис. 5.1. Зсув інтерференційних смуг

на поверхні як півки, так і підкладки й зсуваються одна відносно одної на межі півка – підкладка на значення l .

Вимірюючи за допомогою мікроінтерференційного мікроскопа зсув якої-небудь визначеної смуги, розраховують товщину півки за формулою:

$$d_n = \frac{1}{2} \lambda_c \frac{l}{L}, \quad (5.1)$$

де λ_c – довжина хвилі монохроматичного світла, дорівнює $0,54\text{ мкм}$; L – крок між сусідніми інтерференційними смугами; l – зсув інтерференційної смуги.

Точність цього методу вимірювання товщини півки складає $15\text{--}30\text{ нм}$.

Якщо півка прозора, у місці «сходинки» на неї і на підкладку осаджують додатково непрозору металеву півку, що добре відбиває світло (наприклад, алюмінію), товщина якої, щоб зменшити внесену похибку, повинна бути набагато меншою товщини вимірюваної півки.

5.3. Вимірювання електричного опору плівок

Електричний опір плівок вимірюють резистивним датчиком із зовнішнім вимірювальним приладом. В основному цей метод застосовують при контролі виготовлення резисторів гібридних ІМС і він застосований на тому, що в міру збільшення товщини півки в процесі

росту опір її зменшується. Це дозволяє безпосередньо при нанесенні контролювати опір плівки, а при досягненні номінальної її товщини припинити процес.

При вимірюваннях (рис. 5.2) попередньо виготовляють спеціальну контрольну підкладку «свідок» 1 з ізоляційного матеріалу (скла, ситалу), на яку наносять плоскі контактні площадки 2 з срібла чи іншого матеріалу високої провідності. Потім цю підкладку – «свідок» встановлюють у робочу камеру якнайближче до робочої підкладки 3. Це необхідно для того, щоб обидві підкладки при нанесенні плівки знаходилися в однакових умовах. Резистивну плівку наносять на контрольну і робочу підкладки одночасно.

При монтажі резистивного датчика в робочу камеру з'єднують контакти "свідка" з вимірювальним мостом, у результаті чого опір "свідка" реєструється зовнішнім приладом. У процесі осідання резистивного матеріалу ріст плівки відбувається як на робочих підкладках, так і на контрольній, тобто формується "резистор-свідок". В міру росту опір плівки зменшується і відповідно зменшується опір "резистора-свідка".

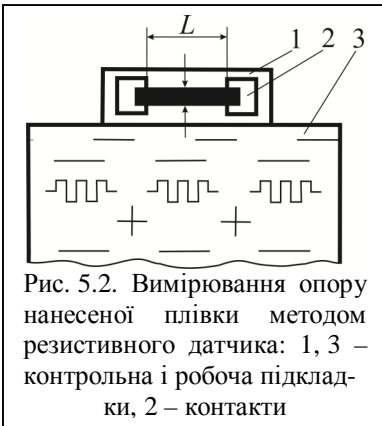


Рис. 5.2. Вимірювання опору нанесеної плівки методом резистивного датчика: 1, 3 – контрольна і робоча підкладки, 2 – контакти

При досягненні номінального (заданого) опору напилюваної плівки на "свідку" через коло зворотного зв'язку надходить сигнал, яким або виключається живлення випарника, або закривається заслінка.

Оскільки вважають, що характеристики плівок на підкладці і "свідку" однакові, зовнішній вимірювальний прилад можна градувати в одиницях опору (при постійній температурі підкладки).

Похибка вимірювання опору при контролі цим методом складає приблизно $\pm 10\%$ і визначається нерівномірністю товщини плівки по поверхні (тобто відмінністю опорів "свідка" і робочої підкладки), а також похибками вимірювання.

Зовнішній вимірювальний прилад можна також градувати в одиницях довжини. Товщину плівки в цьому випадку визначають за формулою:

$$d_n = \frac{\rho_y L}{R_{cv} h}, \quad (5.2)$$

де ρ – питомий опір плівки; R_{ce} – опір плівки на "свідку" між контактами; L і h – довжина і ширина плівки на "свідку".

Чутливість методу складає 1–5 нм, а гранична товщина вимірюваних плівок – близько 1 мкм.

Під товщиною плівки при цьому розуміють товщину, що мав би її шар, якби його питомий опір був рівний питомому опору масивного матеріалу. Внаслідок невизначеності значення питомого опору напильованих плівок точність вимірювання цим методом невелика.

5.4. Вимірювання адгезії плівок

Зчеплення поверхонь різнорідних тіл називають адгезією. Адгезія плівки до підкладки залежить від матеріалу плівки і швидкості її осідання, а також від чистоти поверхні і температури підкладки.

В даний час не існує доступних промислових методів високо-точного виміру адгезії тонких плівок до підкладок. Тому виконують порівняльний контроль, при якому вимірюють зусилля відриву плівки від підкладки напаяним на її поверхню металевим циліндром. У центрі вільного торця циліндра закріплюють гнучкий тросик, зв'язаний через важіль з чашкою ваг. Щоб за зусиллям відриву P визначити адгезію G_a , необхідно точно знати площу контакту F_y і виключити перекис циліндра, який викликає нерівномірний розподіл зусилля по його площі. Розраховують адгезію за формулою:

$$G_a = \frac{P}{F_y}, \quad (5.3)$$

Зазвичай площа торця циліндра близько 1 мм². Для одержання надійних даних варто вимірювати адгезію кілька разів, контролюючи, чи не відбувся відрив в місці спаю і чи не розчинилася плівка в припої.

Різновид цього методу – контроль адгезії металевих плівок за відривом від підкладки за допомогою тонкого золотого чи алюмінієвого дроту, що приєднується до плівки термокомпресією. При цьому площа контакту складає 50–200 мкм², що дозволяє більш точно визначити адгезію локальних ділянок плівки.

5.5. Вимірювання швидкості нанесення плівок

Найбільш розповсюджений контроль швидкості нанесення плівок методом кварцового датчика, що іноді називають резонансно-частотним. Як датчик у цьому методі використовують включений у контур генератора частоти кварцовий елемент.

Принцип дії кварцового датчика заснований на залежності частоти генерованих сигналів від зміни маси кварцового елемента при

нанесенні на його поверхню плівки. Зі збільшенням маси кварцового елемента його резонансна частота падає. Для лінійної ділянки залежності частоти від маси нанесеної плівки справедливе наступне співвідношення:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta m}{m_0}, \quad (5.4)$$

де m_0 і f_0 – маса і резонансна частота кварцового елемента до нанесення плівки; Δm і Δf – зміна маси кварцового елемента і резонансної частоти після нанесення плівки. Таким чином, за зміною швидкості (зсуву) резонансної частоти, яка фіксується вимірювальним приладом, визначають швидкість росту плівки.

Основною частиною кварцового датчика (рис. 5.3) є кварцовий елемент 5 круглої чи квадратної форми, на двох поверхнях якого для подачі напруги наносять тонкі шари золота чи срібла. Кварцовий елемент кріпиться на ізоляторі 4 і закривається кожухом 3, який вставляється в масивний мідний тримач 2, охолоджуваний по трубці 1 протічною водою. У кожусі і тримачі є наскрізний отвір 6 для пропускання потоку частинок напилюваного матеріалу до кварцового елемента.

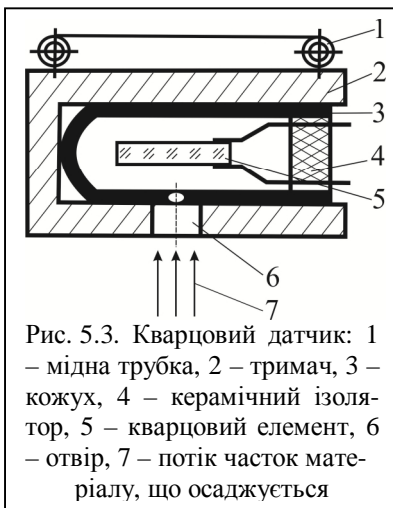
Необхідність ефективного охолодження тримача пояснюється тим, що кристали кварцу дуже чутливі до змін температури. При нанесенні плівок джерела випромінюють значну кількість теплоти, що викликає підвищення температури кварцового елемента. Нестабільність температури кварцового елемента є основною причиною неконтрольованої зміни частоти. Для виключення похибок вимірювань через нестабільність температури датчика тримач охолоджують.

Цим методом можна також з урахуванням геометричних розмірів кварцового елемента і маси нанесеної плівки виміряти її товщину, використовуючи наступну формулу:

$$d_n = \frac{m_0 \Delta f}{\rho_n F_n f_0}, \quad (5.5)$$

де F_n – площа кварцового кристала, покрита плівкою нанесеної речовини; ρ_n – густина плівки, що наноситься.

Точність вимірювання тов-



щини тонких металевих і діелектричних плівок в інтервалі від 10 нм до 5 мкм складає $\pm 10\%$.

Прилади, що серійно випускаються, дозволяють задавати необхідну товщину плівки, після нанесення якої подається сигнал, що зупиняє процес. Для виконання точних вимірювань прилади градуують окремо для кожного матеріалу.

Максимально допустима сумарна товщина плівки, що напилюється на кварцовий датчик, визначається максимальним зсувом частоти і приблизно складає 20 мкм алюмінію. Максимальне значення вимірюваної товщини можна збільшити, перекриваючи періодично кварцовий елемент екраном.

Істотним недоліком методу є те, що, крім градування за матеріалом, що осаджується, необхідне також періодичне очищення кварцових елементів від осілої плівки.

6. ВАКУУМНІ СИСТЕМИ

6.1 Основні відомості

Основними елементами вакуумних систем є насоси, що призначені для створення необхідного вакууму в камерах установок, а також для підтримки робочого тиску при проведенні технологічного процесу. В установках для виготовлення тонкоплівкових структур ІМС застосовуються механічні форвакуумні і двохроторні насоси, пароструменеві дифузійні, а також кріогенні і турбомолекулярні насоси.

При виробництві ІМС у технології нанесення тонких плівок потрібно створювати тиск в межах від 10^5 Па (атмосферний) до 10^{-5} Па і нижче.

Жоден із зазначених насосів не може самостійно забезпечити відкачування від атмосферного тиску до високого вакууму з наступних причин. По-перше, при настільки широкому діапазоні тисків істотно відрізняються умови відкачування, по-друге, кожен насос має вибірковість стосовно газів, що входять до складу повітря.

Для створення технологічного вакууму 10^{-5} Па включають каскадно кілька насосів різних типів. Крім того, для кожного інтервалу тисків і для різних газів існують свої методи відкачування, неоптимальні для інших умов.

Переходячи до вивчення вакуумних насосів, насамперед розглянемо їхні основні параметри – граничний залишковий тиск, швидкість дії, найбільший тиск запуску і випускний тиск, що зазвичай приводяться в паспортних даних.

Граничний залишковий тиск – це найменший тиск, що може бути створено даним насосом при закритому вхідному патрубку. При цьому мається на увазі, що відсутнє натікання в насос ззовні, з боку його вхідного патрубка. Цей параметр обумовлює неможливість побудови насоса, який сам не був би навіть дуже слабким постачальником газів у вакуумну систему.

Швидкість дії – це об'єм газу, який відкачується за одиницю часу при даному тиску на вході в насос (у перерізі вхідного патрубка). Найбільш розповсюдженими одиницями вимірювання швидкості дії є $\text{м}^3/\text{год}$ і $\text{л}/\text{с}$. За сталістю швидкості дії при зміні тиску можна судити про якість насоса, яка тим вища, чим менше змінюється швидкість дії при зменшенні тиску у вхідному патрубку.

Найбільший тиск запуску – це найбільший тиск у вхідному патрубку, при якому насос починає нормально працювати, тобто відкачувати приєднану вакуумну камеру.

Вакуумні насоси можна за цим параметром розділити на дві групи. До першої відносяться насоси, найбільший тиск запуску яких дорівнює атмосферному (механічні форвакуумні). В другу входять насоси, що вимагають для роботи попереднього розрідження, що зазвичай створюється додатковим насосом, так званим **насосом попереднього розрідження, чи попереднього вакууму** (механічним форвакуумним). Насос попереднього вакууму приєднують впускним патрубком до випускного патрубка насоса, який потребує попереднього розрідження.

Найбільший випускний тиск – це найбільший тиск у вихідному патрубку, при якому насос ще може виконувати відкачування (тобто при перевищенні якого відкачування припиняється). Для механічних форвакуумних насосів воно перевищує атмосферне, а для насосів, що вимагають попереднього розрідження, приблизно дорівнює найбільшому тиску запуску.

6.2. Механічні форвакуумні і двороторні насоси

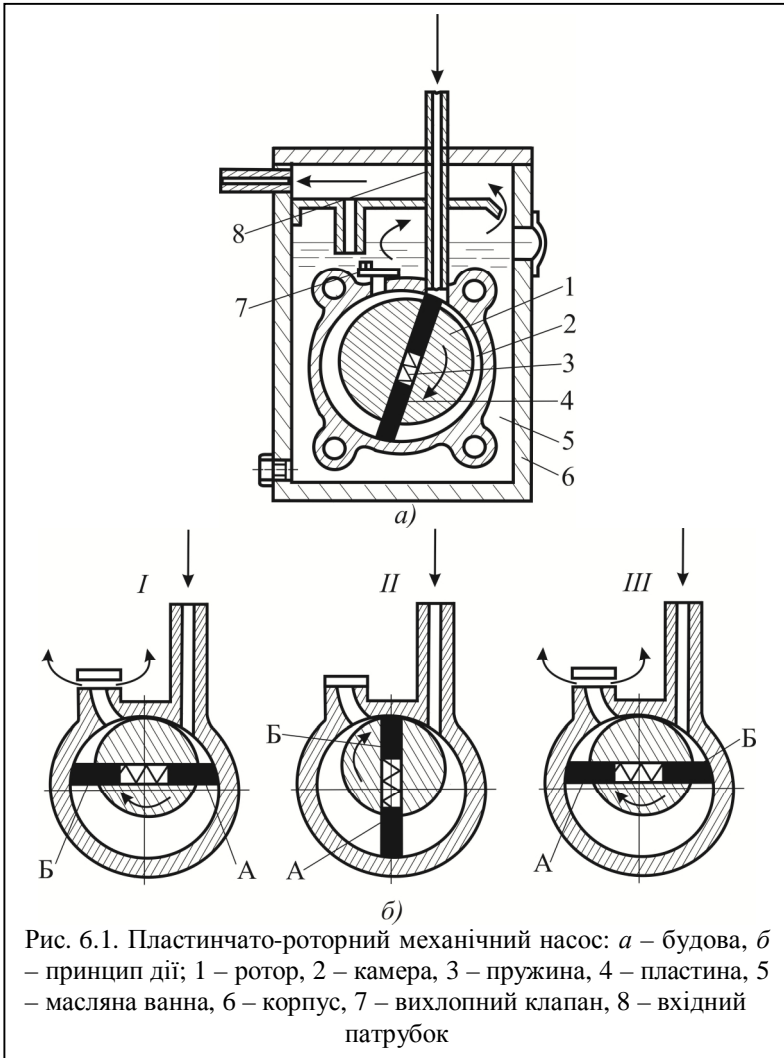
Насоси цих двох типів мають однакові принципи дії, засновані на переміщенні газу внаслідок механічного руху їхніх робочих частин, при якому відбувається періодична зміна об'єму робочої камери.

Механічні форвакуумні і двохроторні насоси працюють в області середнього вакууму, тобто при тиску від 10^2 до 10^{-2} Па.

Механічні форвакуумні насоси застосовують у вакуумних установках для створення вакууму близько 10^{-1} Па при швидкості дії порядку одиниць і десятків літрів за секунду. Найбільше поширення одержали пластинчато-роторні механічні насоси з масляним ущільненням (рис. 6.1, а), основними конструктивними елементами яких є корпус 6, камера 2 і ротор 1.

Робоча камера розташована в заповненому вакуумною олією корпусі 6. У роторі є наскрізний проріз, куди вставляються дві пластини 4, між якими розташована пружина 3.

Вхідний патрубок 8 проходить через кришку корпусу 6, масляну ванну 5 і стінку камери 2 у її робочий простір, де обертається ротор 1 у напрямку, показаному стрілкою. Вісь обертання ротора збігається з його геометричною віссю, але зміщена вгору відносно осі робочої камери так, щоб він при обертанні постійно стикався у верхній частині з внутрішньою стінкою робочої камери. При обертанні ротора пластини 4, що розтискаються пружиною 3 і відцентровою силою обертання, ковзають по внутрішній циліндричній поверхні робочої камери уздовж прорізів то зближуючись, то віддаляючись одна від одної.



На вихідному патрубку робочої камери 2 розташований вихлопний клапан, який являє собою пружну пластину, призначений для пропускання газу, що викидається з насоса, і не допускає його зворотного проникнення. При роботі насоса масло має знаходитися на визначеному рівні над клапаном. Рівень масла контролюють візуально через спеціальне віконце.

Шар масла над клапаном охороняє його від безпосереднього зіткнення з атмосферним повітрям, а також служить для охолодження робочої камери, тому що особливістю пластинчато-роторних насосів є наявність великої кількості тертьових поверхонь, що обумовлює нагрівання робочих частин. Крім того, частина масла, що надходить у робочий простір, служить для змазування тертьових частин і ущільнення зазорів у роторному механізмі насоса.

Принцип дії насоса пояснюється рис. 6.1, *б*, де для простоти показана тільки його робоча камера з ротором, вхідний і випускний патрубки. Напрямки руху відкачуваного газу й обертання ротора зазначені стрілками. Римськими цифрами зазначені три характерних положення ротора, які послідовно займаються ним протягом одного півоберту.

Якщо прийняти положення *I* за початкове, то в цьому положенні пластина А, просунувшись вниз, створює розширення робочого об'єму з боку впускного патрубка 8, у результаті чого відбувається всмоктування газу з відкачуваного об'єму (власне відкачування). Область між пластиною, що рухається вниз, і вхідним патрубком насоса називають об'ємом всмоктування.

Надходження газу в робочий об'єм припиняється при підході до вхідного патрубка пластини Б (положення *II*). При цьому об'єм, що знаходиться перед пластиною А, відділяється від того, який відкачується. Потім газ, захоплений у відділений об'єм, переганяється до випускного патрубка, стискається пластиною А і викидається в атмосферу (положення *III*) через вихлопний клапан 7.

Положення *III* збігається з початковим положенням *I* з тією різницею, що пластини міняються місцями. Далі робота насоса продовжується в описаному порядку. У робочій камері між пластинами завжди існують три об'єми: об'єм розрідження, об'єм, що переганяється, і об'єм стиску.

Таким чином, кожна пластина виконує подвійну роль: з одного боку – ніби тягне за собою газ, що надходить із впускного отвору, а з іншого боку – стискає газ, що надійшов, для викидання його за межі насоса через випускний патрубок. При безупинному обертанні ротора всмоктування і викидання газу по черзі здійснюється двома пластинами, у результаті чого і відбувається відкачування вакуумного об'єму, до якого насос приєднується вхідним патрубком.

Так працює одноступінчастий насос, що створює вакуум порядку 10 Па. Для одержання залишкового тиску до 10^{-1} Па застосовують двоступінчастий насос, що складається з двох послідовно з'єднаних ступенів, розміщених в одному корпусі. Перший ступінь

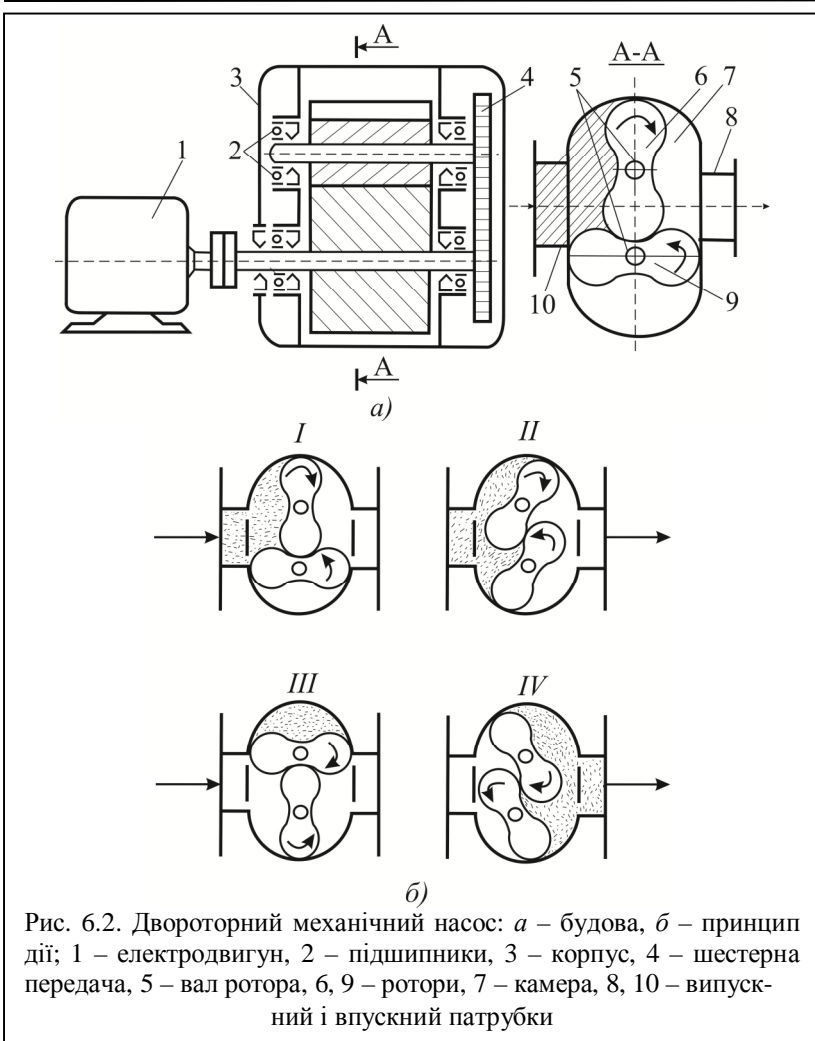


Рис. 6.2. Двороторний механічний насос: *а* – будова, *б* – принцип дії; 1 – електродвигун, 2 – підшипники, 3 – корпус, 4 – шестерна передача, 5 – вал ротора, 6, 9 – ротори, 7 – камера, 8, 10 – випускний і впускний патрубки

забезпечує форвакуум для другого ступеня, що часто називають високовакуумним. Ці ступені можна ототожнити двом окремим насосам, причому випускний патрубок одного з них (найближчого до відкачаного об'єму) приєднується до входного патрубка іншого.

Механічні двороторні насоси (рис. 6.2, *а*) іноді називають насосами Рутса, застосовують у вакуумних системах для створення тиску порядку 10^{-2} Па при швидкості дії більше 50 л/с, тобто забезпечують вакуум, при якому механічні пластинчато-роторні насоси неефективні.

Крім того, швидкодіючі обертальні двоухоторні насоси не мають масляного ущільнення. Такі насоси складаються з корпусу 3 із впускним 10 і випускним 8 патрубками і розташовані в корпусі камери 7 із двома роторами 6 і 9, що мають конфігурацію у вигляді вісімки.

При роботі насоса (рис. 6.2, б) два ротори обертаються всередині камери назустріч один одному в напрямках, зазначених стрілками. Ротори приводяться в обертання електродвигуном 7 через шестерну передачу 4, що зв'язує їхні вали 5 і знаходиться поза камерою. Кінці ротора спираються на підшипники 2. Під час роботи ротори не торкаються один одного завдяки спеціальному профілюванню і регулюванню зазорів при збірці. Форма і синхронне обертання роторів підібрані так, щоб між самими роторами, а також між ними і стінками камери постійно зберігався невеликий зазор (0,1–0,15 мм), що не ущільнюється маслом. Це допускає велику швидкість обертання роторів (до 3000 об/хв) без небезпеки заїдання, і тим самим забезпечується велика швидкість дії.

У положенні *I* починається всмоктування газу верхнім ротором, що закінчується в положенні *II*, коли починається всмоктування нижнім ротором. У положенні *III* ротори міняються ролями (у порівнянні з положенням *I*): верхній ротор переганяє захоплену порцію газу до випускного патрубка, а нижній – продовжує всмоктування. У положенні *IV* верхній ротор починає викид газів у випускний патрубок, а нижній – закінчує всмоктування. Потім верхній ротор починає новий цикл всмоктування, а нижній – викиду. В такий спосіб цикли всмоктування – викид газів повторюються.

При високих тисках, коли довжина вільного пробігу молекул газу в порівнянні із шириною зазору (0,1–0,15 мм) ще мала, насос не може працювати ефективно, тому що одночасно із захопленням газу і виштовхуванням його в бік випускного отвору обертовими роторами в відкачуваний об'єм через зазори, що мають при таких тисках відносно велику пропускну здатність, встигає проходити назад велика кількість газу. Тому розглянутий насос потребує для нормальної роботи попереднього розрідження, для створення якого звичайно застосовують пластинчасто-роторний насос.

Робота двороторного насоса стає ефективною, коли насосом попереднього вакууму впускний тиск знижується до декількох сотень паскаль. Однак найбільшу швидкість дії одержують при впускному тиску порядку кількох одиниць паскаль, при якому довжина вільного пробігу молекул газу стає рівною кільком міліметрам, тобто значно перевищує ширину зазорів, опір яких зворотному потоку газу (від випускного отвору до випускного) при цих умовах сильно зростає.

Таким чином, по своєму принципу дії двороторні насоси подібні до обертальних масляних: газ, що надходить у насос із впускнуою стороною, викидається за його межі з випускної сторони.

Оскільки двороторні насоси працюють у парі з механічними форвакуумними, їх компонують у вигляді агрегату на єдиній основі.

6.3. Дифузійні паромасляні насоси

Дифузійні паромасляні насоси є найбільш розповсюдженим високовакуумним засобом відкачування і широко застосовуються в різних областях вакуумної техніки.

Паромасляні насоси дозволяють створювати вакуум до 10^{-5} Па.

Треступеневий дифузійний паромасляний насос (рис. 6.3) має циліндричний корпус 12, охолоджуваний холодною водою, що протікає по змійовику 2. Вхідний патрубок 1 у верхній частині корпусу служить для приєднання насоса до відкачуваного об'єму. Випускний патрубок 3 розташований у нижній частині корпусу, що являє собою кип'ятильник, куди заливається масло 5, що нагрівається ззовні електронагрівником 4. Паропроводи 6, 7, 8 розташовані в корпусі насоса і закінчуються парасолоподібними соплами 9, 10, 11.

При включенні насоса робоча рідина (спеціальне масло) нагрівається в кип'ятильнику, пара, що утворилася, піднімається по паропроводах 6, 7 і 8, проходить по паропроводах вгору і з великою швидкістю викидається у вигляді струменів через спрямовані під кутом до охоло-

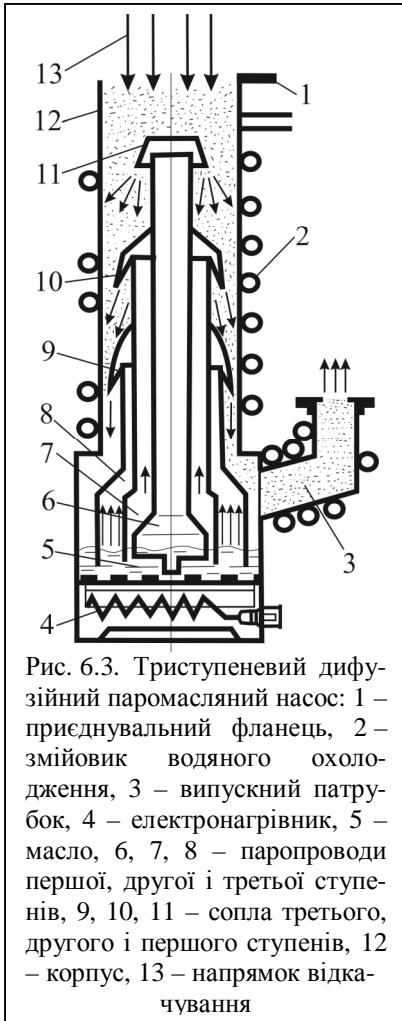


Рис. 6.3. Треступеневий дифузійний паромасляний насос: 1 – приєднувальний фланець, 2 – змійовик водяного охолодження, 3 – випускний патрубок, 4 – електронагрівник, 5 – масло, 6, 7, 8 – паропроводи першої, другої і третьої ступенів, 9, 10, 11 – сопла третього, другого і першого ступенів, 12 – корпус, 13 – напрямок відкачування

джуваної стінки насоса сопла 11, 10, 9 відповідно першого, другого і третього ступенів. Молекули відкачуваного газу дифундують у струмені пари першого ступеня і разом з ними направляються на охолоджувані водою стінки насоса. При цьому масляні пари конденсуються, і краплі, що утворилися, стікають у кип'ятильник.

Так забезпечується безперервна циркуляція робочої рідини в насосі. Захоплений струменем пари газ викидається, в основному, вниз, послідовно дифундує в струмені пари другого і третього ступенів і викидається через вихідний патрубок 3.

Паромалярний насос не працює без попереднього механічного насоса, який забезпечує попереднє розрідження і під'єднується до його вихідного патрубку, а також без водяного охолодження кожуха. Припинення подачі води у водяну сорочку може призвести до перегріву насоса і згоряння масла.

Недолік дифузійних паромалярних насосів – можливість попадання у відкачуючий робочий об'єм молекул масла, що може проходити двома способами: прольотом у паровій фазі і міграцією по стінках вакуумних трубопроводів. Оскільки молекули масла, що проникли

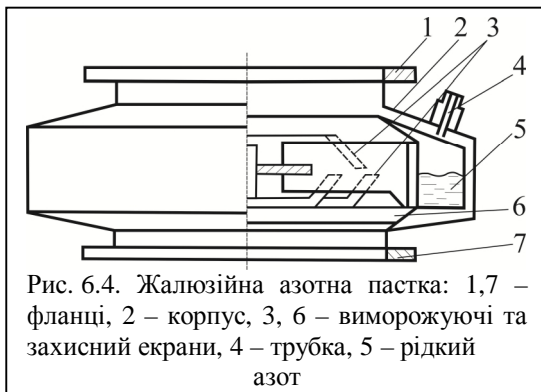


Рис. 6.4. Жалоюзійна азотна пастка: 1,7 – фланці, 2 – корпус, 3, 6 – виморожуючі та захисний екрани, 4 – трубка, 5 – рідкий азот

в технологічний об'єм, осідають на підкладках і забруднюють напилювані плівки, такі насоси застосовують в технологічних установках тільки в поєднанні з пастками парів масла.

Пастка повинна мати холодні поверхні достатніх

розмірів і такі шляхи проходження відкачуваного газу, а також парів масла, щоб вони могли потрапити до виходу з неї тільки після зіткнення по можливості зі всією холодною поверхнею. Крім того, повинна бути достатньою пропускну здатність пастки.

Найбільшого поширення одержали жалоюзійні пастки (рис. 6.4), охолоджувані рідким азотом до температури -196°C (77 K). Такі пастки мають розширений у середній частині корпус 2, до якого зверху і знизу приварені фланці 1 і 7 для приєднання відповідно до відкачуючого об'єму і дифузійного насоса. В середині корпусу розташований кільцевий резервуар, куди через тонкостінну трубку 4 зали-

вається рідкий азот 5. До резервуара припаяні жалюзійно розташовані захисні виморожуючі екрани 3. Рідкий азот у пастки заливається вручну чи автоматичними переливними пристроями прямо з транспортних посудин Дюара. При цьому його рівень також може контролюватися автоматично. Для захисту від прямого прольоту молекул газу внизу кільцевого резервуара є екран 6.

Перш ніж піддати пастку охолодженню, варто відкачати робочу камеру до досить низького тиску, при якому починається помітна дифузія пари робочої рідини з насоса у вакуумну систему. Такий порядок необхідний з ряду причин. Припустимо, що пастку охолодили із самого початку відкачування, коли у вакуумній системі ще був атмосферний тиск. Тоді на її поверхні будуть конденсуватися не тільки пара, наприклад волога з повітря, але і гази, що входять в нього. Тому при відкачуванні в міру зниження у вакуумній системі тиску, коли він стає нижчий за тиск насичення сконденсованих газів, що відповідає даній температурі пастки, з її стінок починається зворотне газовиділення, що, звичайно, сповільнює відкачування. Крім того, несприятливий вплив робить конденсація водяної пари, що завжди присутня у ваку-

умній системі як складова частина повітря, і пара, яка виділяється зі стінок камери. При передчасному охолодженні пастки значна частина водяної пари конденсується на її холодних стінках, тому наступне відкачування зводиться лише до повільного її видалення.



Рис. 6.5. Кріогенний насос:
1 – кріогенератор, 2, 10 –
циліндри першого і другого
ступенів, 3 – шар абсорбен-
ту, 4 – кріопанель, 5 –
ущільнююча прокладка, 6 –
відкачуваний об'єм, 7 –
фланець, 8 – захисний ек-
ран, 9 – корпус

6.4. Кріогенні насоси

Кріогенні насоси є безмасляними пристроями відкачування, тому одержали найбільше поширення при нанесенні тонких плівок.

Кріогенні насоси дозволяють створювати вакуум до 10^{-5} Па.

Принцип дії цих насосів ґрунтується на фізичних явищах, що відбуваються при наднизьких кріогенних (120–4 К) температурах: конденсації на охолоджених металевих поверхнях газів у твердий стан і абсорбції (поглиннанні) їх твердими

оохолодженими пористими абсорбентами.

Найбільш поширені криогенні насоси, оохолоджувані газовими оохолодильними машинами – криогенераторами. Криогенні насоси (рис. 6.5) складаються з чотирьох основних елементів: криопанелі 4, захисного екрану 8, корпусу 9 і системи оохолодження – криогенератора 1.

Криопанель 4 є активним (відкачуючим) елементом насоса і являє собою оохолоджувану до низьких температур (близько 20 К) металеву поверхню, на якій відбувається конденсація відкачуваних газів у твердий стан.

Водень, який виділяється з матеріалу, що випаровується, у процесі нанесення плівки, при цій температурі не конденсується і його видаляють абсорбцією. Як абсорбенти використовують гранули активованого деревного вугілля, що приклеюється у вигляді тонкого шару 3 до поверхні криопанелі.

Захисний екран 8, верхня частина якого виконується у вигляді шевронних жалюзі, оточує криопанель і служить для зниження теплового випромінювання на неї від стінок корпусу насоса 9, що знаходиться при кімнатній температурі. Температура захисного екрану повинна бути близько 100 К.

Корпус 9 крионасоса служить для монтажу елементів насоса і являє собою перехідний циліндричний патрубок із фланцем 7 для з'єднання з відкачуваним об'ємом 6 через ущільнюючі прокладки 5.

Криогенератор 1 є найбільш складною частиною криогенного насоса і служить для попереднього оохолодження криопанелі і захисного екрана від кімнатної температури до робочої і підтримання її на цьому рівні при роботі. Принцип дії криогенератора заснований на фізичному ефекті, що полягає в зниженні температури стиснутого газу при його різкому розширенні. Криогенератори мають два ступені розширення робочих газів: перший служить для оохолодження захисного екрану до 100 К, а другий – для оохолодження криопанелі до 20 К.

При роботі криогенного насоса газ з відкачуваного об'єму надходить (як показано на рисунку стрілками) через жалюзі захисного екрану 8 до криопанелі 4 і конденсується на її зовнішній поверхні чи поглинається порами абсорбенту.

Перед включенням криогенного насоса робочу камеру попередньо відкачують механічним форвакуумним насосом до тиску, приблизно рівного 2–2,5 Па. Потім при працюючому механічному форвакуумному насосі включають криогенератор, час виходу якого на робочий режим приблизно дорівнює 100–120 хв. Після виходу на режим,

тобто охолодження кріопанелі, починається відкачування кріонасосом, і форвакуумний насос відключають.

6.5. Турбомолекулярні насоси

Турбомолекулярні насоси належать до механічних високовакуумних пристроїв відкачування, і їхній принцип дії заснований на передаванні молекулам відкачуваного газу імпульсу поверхнею твердого тіла, яке обертається з великою швидкістю. Після зіткнення з цією поверхнею молекули газу починають рухатися переважно в напрямку руху твердого тіла, тобто в напрямку відкачування.

Турбомолекулярні насоси дозволяють створювати вакуум порядку 10^{-5} Па.

Турбомолекулярний насос (рис. 6.6, *a*) має циліндричний корпус 2 із впускним 1 і випускним 6 патрубками, на осі якого розташований ротор 4, який спирається на підшипник 5. Всередині на стінках корпусу встановлені нерухомі статорні диски 3, а в проміжках між ними розташовуються закріплені на роторі роторні диски 7. Зазор між дисками 3 і 7 приблизно дорівнює 1 мм. Частота обертання ротора 16000–20000 об/хв.

Щоб зрозуміти принцип дії турбомолекулярного насоса, розглянемо рис. 6.6, *б*, на якому показано кілька рядів роторних і статорних дисків зі спрямованими під кутом радіальними прорізами. Прорізи ста-

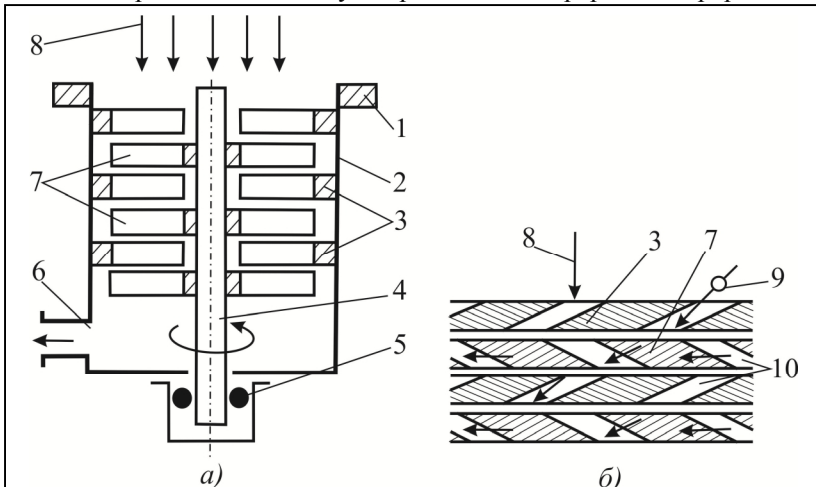


Рис. 6.6. Турбомолекулярний насос (*a*) і схема створення в ньому спрямованого потоку (*б*): 1, 6 – впускний і випускний патрубків, 2 – корпус, 3, 7 – статорні і роторні диски, 4 – ротор, 5 – підшипник, 8, 9 – потік і молекула відкачуваного газу, 10 – радіальні прорізи

торних дисків є ніби дзеркальним відображенням прорізів роторних дисків, тому утворюються клиноподібні канали. При швидкому обертанні роторних дисків молекули газу, вдаряючись об стінки їхніх прорізів, переважно рухаються в напрямку, показаному стрілками. У такий спосіб газ послідовно переміщується від однієї пари дисків до іншої, у чому і полягає відкачування турбомолекулярним насосом. У насосі, показаному на рис. 6.6, *a*, газ переміщується зверху вниз, тобто від вхідного патрубку до вихідного.

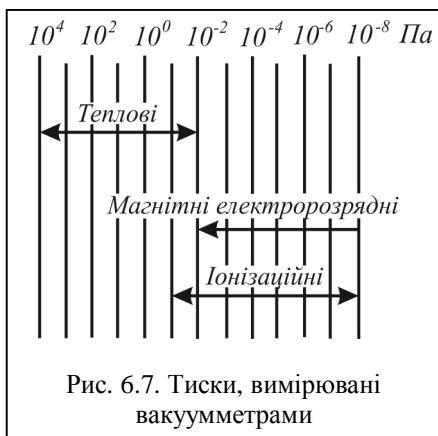
Диски турбомолекулярних насосів виконуються у вигляді металевих шайб товщиною в кілька міліметрів. Кожна пара дисків створює відносно невеликий стиск газу, але тому, що одночасно працює велика кількість дискових пар, досягається значний сумарний стиск. Незважаючи на це, турбомолекулярні насоси не можуть працювати без попереднього розрідження, що забезпечується приєднуванням до їх впускного патрубка механічного форвакуумного насосу.

При експлуатації турбомолекулярних насосів треба стежити, щоб у їхню порожнину не потрапили які-небудь тверді сторонні частинки і предмети, що може призвести до заклинювання швидкообертального ротора і виходу насоса з ладу.

6.6. Вимірювання вакууму

Тиск у вакуумних установках для нанесення тонких плівок звичайно складає 10^2 – 10^{-5} Па.

У такому широкому діапазоні вимірювати тиск одним універсальним приладом неможливо.



В даний час розроблено велику кількість приладів різних типів, принцип дії яких заснований на залежності того чи іншого фізичного параметра газу від тиску. Кожному з цих приладів відповідає визначений інтервал тисків.

Прилади для вимірювання тиску нижчого за атмосферний, називаються **вакуумметрами** і складаються з двох частин: манометричного перетворювача і вимірювального пристрою. Манометричний перетворювач (іноді називають манометричною лампою) призначений для перетворення вимірюваного тиску в

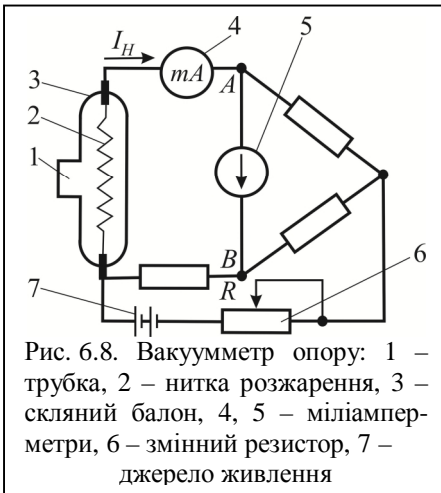


Рис. 6.8. Вакуумметр опору: 1 – трубка, 2 – нитка розжарення, 3 – скляний балон, 4, 5 – міліамперметри, 6 – змінний резистор, 7 – джерело живлення

Розглянемо принципи дії цих приладів.

Робота **теплових вакуумметрів** базується на пропорційній залежності теплопровідності газу від його густини, і розрізняють прилади опору і термопарні прилади. Відомо, що молекули газу здатні при русі переносити теплоту від нагрітої нитки, розташованої всередині вакуумного балона, до його стінок. При зниженні тиску теплопровідність газу зменшується, тому віддача теплоти нагрітим тілом також стає меншою.

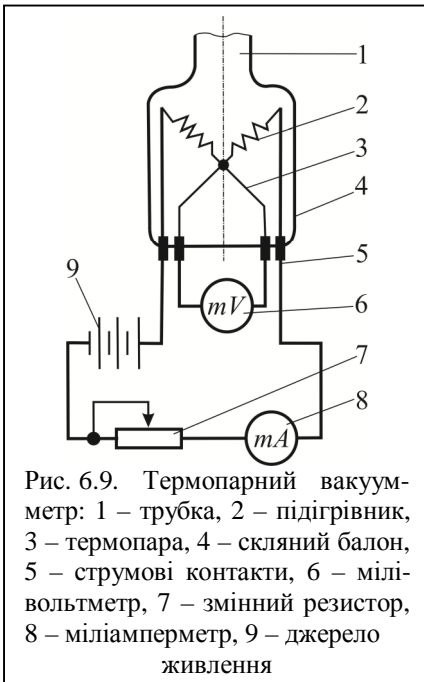
В основі дії вакуумметра опору (рис. 6.8) лежить залежність опору металеві нитки від температури. Перетворювач являє собою скляний балон 3 із трубкою 1 для приєднання до вакуумної системи. У балоні на двох входах змонтована металева нитка розжарення 2, що нагрівається струмом, який надходить від джерела живлення 7.

Вимірвальна частина приладу являє собою міст для вимірювання опорів. Для регулювання і підтримки стабільного струму розжарення в процесі вимірювання служить змінний резистор 6. Струм, що проходить через нитку перетворювача, вимірюють міліамперметром 4, а струм, що проходить між точками А і В моста, – міліамперметром 5, шкала якого проградуйована в одиницях тиску.

Термопарний вакуумметр (рис. 6.9) виконаний у вигляді скляного балона 4 із трубкою 1 для приєднання до вакуумної системи і вмонтованої в нього термопари 3 з тонких (близько 0,05 мм) дровів, приварених до підігрівника 2. Термопара і підігрівач з'єднані хрестоподібною перемичкою. У вимірвальну частину вакуумметра входять змінний резистор 7, мілівольтметр 6 і міліамперметр 8.

пропорційну йому електричну величину (струм чи напругу) і приєднується безпосередньо до вакуумної системи. Вимірвальний пристрій служить для вимірювання цієї величини з індикацією на шкалі, проградуйованою в одиницях тиску.

При нанесенні тонких плівок використовують теплові, магнітні електророзрядні й іонізаційні електронні вакуумметри. Області тисків, що вимірюються цими вакуумметрами, подані на рис. 6.7.



Підігрівник 2 нагрівається струмом, що подається через струмові контакти 5 від джерела живлення 9, регулюється змінним резистором 7 і вимірюється міліамперметром 8. Спай термопари 3, що нагрівається підігрівником, служить джерелом ЕРС, що вимірюють мілівольтметром 6.

Принцип дії термопарного вакуумметра полягає в тому, що при зниженні тиску газу його теплопровідність зменшується, а отже, підвищується температура хрестоподібної перемички і змінюється ЕРС, за значенням якої, використовуючи градуйовану криву, визначають тиск газу.

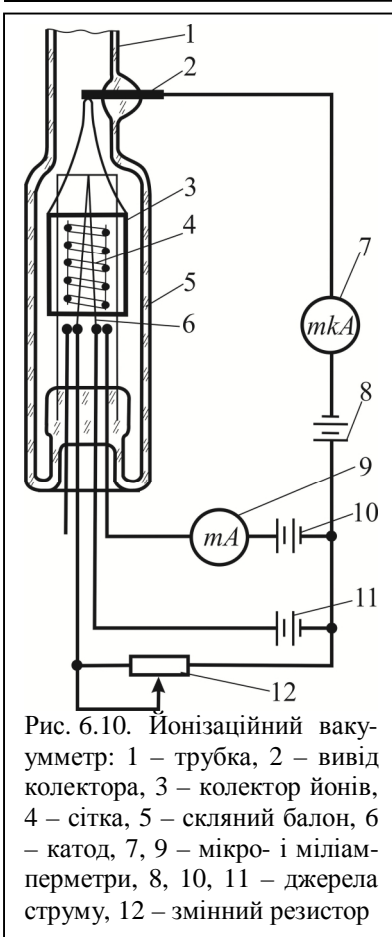
Однак, коли вакуум стає настільки високим, що втрата теплоти обумовлюється в ос-

новному тільки теплопровідністю і випромінюванням металевої нитки розжарення, покази вакуумметра перестають залежати від тиску.

Переваги теплових вакуумметрів – простота конструкції, можливість застосування для вимірювання тиску будь-яких газів і парів. Крім того, вони не реагують на аварійне порушення вакууму і мають, практично, необмежений термін служби. Недоліками таких вакуумметрів є інерційність і зміна в часі струму розжарення металевої нитки, що вимагає їхнього періодичного регулювання.

Йонізаційні вакуумметри (рис. 6.10) мають перетворювач, принцип дії якого заснований на прямій залежності між тиском і струмом, що утвориться в результаті йонізації молекул залишкових газів.

Йонізаційний перетворювач являє собою скляний балон 5 із трубкою 1 для приєднання до вакуумної системи, у який впаяні три електроди: катод 6, сітка 4 і колектор йонів 3. Катодом 6, який емітує електрони, служить вольфрамова нитка діаметром 0,1 мм, яка при нормальному струмі розжарення, що надходить від джерела 11, забезпечує одержання струму емісії електронів.



дають на нього. У точці простору з нульовим потенціалом електрони зупиняються і починають рух у протилежному напрямку – до позитивно зарядженої анодної сітки. Таким чином, навколо анодної сітки відбувається безупинне колювання електронів: перш ніж потрапити на анод, вони роблять в середньому до п'яти колювань. При зіткненні з електронами молекули газу йонізуються. Тому позитивні йони, що утворилися в результаті, збираються на колекторі, який знаходиться під негативним потенціалом, створюючи в його колі йонний струм, за значенням якого судять про тиск залишкового газу у вакуумному об'ємі.

Сітка 4 у вигляді подвійної спіралі служить прискорюючим електродом (анодом) для електронного потоку, емітованого катодом. Спіраль сітки має порівняно великий крок (3 мм при діаметрі дроту 0,2 мм) і кріпиться до двох виводів, тому добре дегазується при нагріванні струмом. У робочому режимі на сітку від джерела 10 подається позитивний щодо катода потенціал 200 В.

Колектор йонів 3 у формі циліндра закріплений на виводі 2, впаяному у верхню частину балона. Таке розташування виводу забезпечує високу електричну ізоляцію між ним і іншими електродами, що необхідно при вимірюванні йонних струмів порядку частки мікроампера. На колектор від джерела 8 подається негативна напруга 25 В.

При роботі йонізаційного вакуумметра вольфрамовий катод випускає електрони, частина яких, рухаючись до сітки і пролітаючи крізь неї, попадає в простір між нею і колектором. Оскільки потенціал колектора відносно катода негативний, електрони не попадають на нього.

У вимірювальну частину приладу входять: коло катода 6, що складається з джерела постійного струму 11 і змінного резистора 12; коло сітки 4, що складається з джерела постійного струму 10 і міліамперметра 9 (при цьому сітка служить анодом); коло колектора йонів 3, що складається з джерела постійного струму 8 і мікроамперметра 7.

Для визначення тиску досить при заданому електричному струмі виміряти йонний струм у колі колектора мікроамперметром 7, проградуїтованим в одиницях тиску.

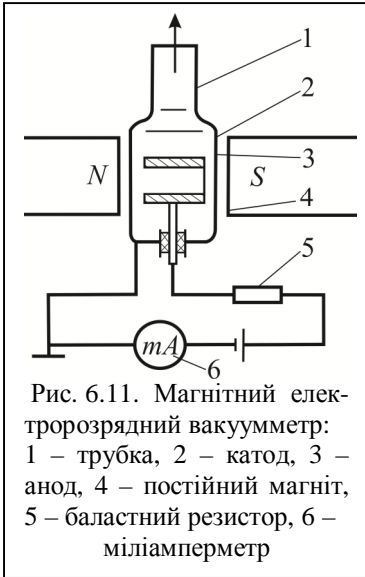


Рис. 6.11. Магнітний електророзрядний вакуумметр: 1 – трубка, 2 – катод, 3 – анод, 4 – постійний магніт, 5 – баластний резистор, 6 – міліамперметр

Магнітні електророзрядні манометри (рис. 6.11) мають перетворювач, принцип дії якого базується на залежності струму самостійного газового розряду, що виникає в схрещених магнітному і електричному полях (див. 3.1), від тиску. Електророзрядний перетворювач представляє собою металевий корпус – катод 2, всередині якого розташований виконаний у вигляді металічного кільця анод 3. Вся система поміщена в поле постійного магніту 4. В такий спосіб створюються схрещені магнітне і електричне поля.

Щоб зрозуміти, як працює такий перетворювач, розглянемо фізичні явища, що відбуваються при

зміні тиску у вакуумній системі, до якої він приєднаний.

Якщо вакуумна система, а отже, перетворювач відкачані до досить низького тиску, а до затискачів вимірювальної частини вакуумметра підведена висока постійна напруга, наприклад 2–6 кВ, то між електродами перетворювача виникає тліючий розряд. При цьому електрони рухаються по складній подовженій траєкторії та йонізують за рахунок високої робочої напруги газ, утворюючи йонний струм. Для стабілізації тліючого розряду служить зовнішній (баластовий) резистор 5, на якому в залежності від значення розрядного струму відбувається більше чи менше падіння напруги.

Таким чином, з ростом розрядного струму напруга між електродами перетворювача зменшується, і струм не може досягти небезпечного значення. При зменшенні розрядного струму, навпаки, напруга між електродами зростає і розряд підтримується тривалий час.

Мікроамперметр 6, який включений в коло вимірювальної частини вакуумметра і служить для вимірювання малих струмів, проградунований в одиницях тиску і дозволяє по розрядному струмі визначати тиск у вакуумній системі.

6.7. Контроль складу залишкової атмосфери

При проведенні технологічних процесів нанесення тонких плівок варто контролювати не тільки вакуум у робочій камері, але і склад залишкової атмосфери. Приладами для контролю складу залишкової атмосфери, так званими мас-спектрометрами, у даний час оснащується будь-яке вакуумне технологічне устаткування для нанесення тонких плівок.

Найбільш широке застосування одержав мас-спектрометр квадрупольного типу, який іноді називають також електричним фільтром мас (рис. 6.12). Датчик цього приладу являє собою циліндричний корпус 3 із фланцем 2 для приєднання до вакуумного об'єму. У вхідній частині приладу розташоване джерело йонів 1, що утворюються в результаті бомбардування молекул газів залишкової атмосфери прискореними електронами і через діафрагму 4 проходять в аналізатор. Чо-

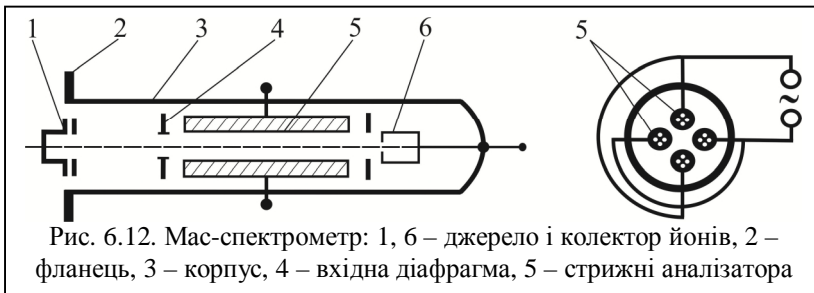


Рис. 6.12. Мас-спектрометр: 1, 6 – джерело і колектор йонів, 2 – фланець, 3 – корпус, 4 – вхідна діафрагма, 5 – стрижні аналізатора

тири діагонально розташованих циліндричних стрижні 5 аналізатора електрично з'єднані попарно.

Поділ йонів за масами в аналізаторі мас-спектрометра відбувається під дією квадрупольного електричного поля, створюваного при подачі на циліндричні стрижні змінної напруги. Йони, що рухаються вздовж осі аналізатора, коливаються у високочастотному полі, причому амплітуда коливань залежить як від їхнього масового числа, так і від напруги на стрижнях. Йони, амплітуда коливань яких виявляється менше половини відстані між двома діаметрально розташованими стрижнями, безперешкодно проходять через квадрупольне поле. При цьому можна так підібрати параметри високочастотного поля, що в

залежності від поданої напруги через фільтр будуть проходити йони тільки визначеної маси.

Таким чином, при відповідній змінній напрузі з загального йонного струму на колектор 6 попадають тільки йони визначеної маси, що проходять через аналізатор і створюють у колі колектора струм. Йони інших мас при русі вздовж аналізатора здійснюють наростаючі коливання, попадають на стрижні і нейтралізуються. Змінюючи параметри змінної напруги, можна аналізувати маси різних йонів, що складають атмосферу, і по йонному струмі на колекторі робити висновок про парціальні тиски кожної складової.

6.8. Вакуумні системи відкачування

Основною вимогою, яку ставлять перед вакуумними системами відкачування установок для нанесення тонких плівок, є забезпечення необхідного вакууму в робочій камері при проведенні технологічного процесу. При нанесенні тонких плівок методами термічного випаровування й йонного розпилення використовують два різних типи вакуумних систем відкачування.

Особливістю термічного випаровування, яке відбувається при робочому тиску порядку 10^{-4} Па, є різке збільшення газовиділення при нагріванні і випаровуванні матеріалу. Для компенсації газовиділення потрібні насоси, що забезпечують високу швидкість дії в області високого вакууму.

Особливістю йонного (магнетронного) розпилення, що відбувається при робочому тиску порядку 10^{-1} Па, є необхідність попереднього відкачування до високого вакууму, а потім тривала підтримка середнього вакууму при значному потоці інертного (аргону) і реактивних (кисню, азоту) газів.

Необхідно зазначити, що при йонному розпиленні проблема забруднення плівок домішками з залишкового середовища більш серйозна, ніж при термічному випаровуванні, тому що частина молекул домішкових газів йонізується і дисоціює, у результаті чого вони стають хімічно більш активними, ніж відповідні нейтральні молекули. Тому для одержання чистих плівок у робочих камерах установок йонного розпилення необхідно забезпечувати такий же низький рівень активних домішкових газів, як і в робочих камерах високовакуумних установок термічного розпилення. Таким чином, незважаючи на те, що йонне розпилення ведеться в області середнього вакууму, обслуговування систем відкачування використовуваних установок досить складне.

До систем відкачування установок відносяться камера, вакуумні насоси і трубопроводи, запірно-комутаційна арматура і прилади для вимірювання вакууму. Процес відкачування складається з трьох етапів:

- Ø видалення основної маси газу з об'єму робочої камери;
- Ø знегажування елементів внутрішньокамерного технологічного обладнання і внутрішніх стінок камери;
- Ø підтримки робочого тиску при нанесенні тонких плівок.

На першому етапі вакуумний об'єм в основному відкачується форвакуумним механічним чи двороторним насосами до тиску 1 Па.

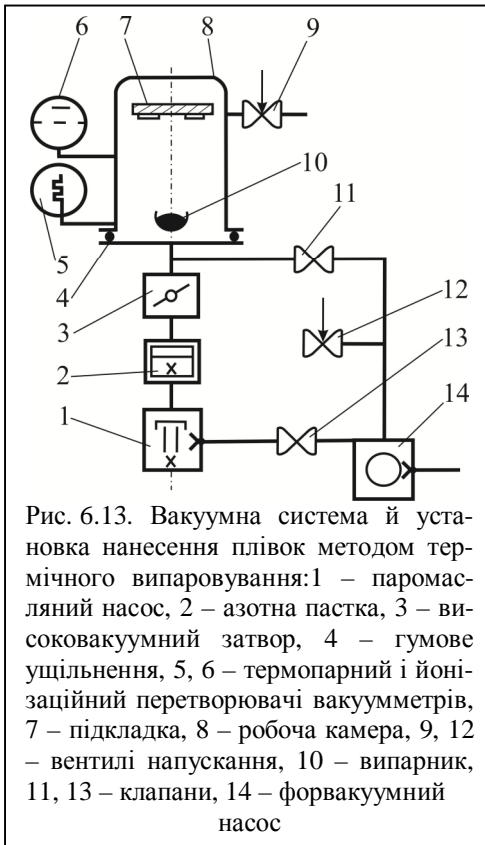
Другий етап відкачування (до тиску 10^{-5} Па) зв'язаний з тим, що матеріали, з яких виготовлені камери і їхня внутрішня арматура, містять значні кількості адсорбованих на поверхні молекул газів, що знаходяться всередині кристалічної ґратки матеріалу. Для інтенсивного видалення адсорбованих на поверхнях молекул газів необхідно знизити тиск і підвищити температуру. Видалення розчинених у об'ємі матеріалу молекул газів вимагає значно більшого часу, що зв'язано з їх дифузією між атомами металу.

При підвищенні температури й одночасному зниженні тиску посилюється тепловий рух як атомів металу, так і розчинених у ньому молекул газу, що сприяє інтенсифікації знегажування робочого об'єму. Звичайно, робочі вакуумні камери нагрівають гарячою водою, яка пропускається через змійовик.

На третьому етапі відкачуючою системою компенсується газо-виділення, яке відбувається при термічному випаровуванні чи йонному розпиленні матеріалів, що осаджуються, і підтримується необхідний робочий тиск.

Принцип будови систем відкачування розглянемо на прикладі найпростішої вакуумної системи – установки нанесення плівок методом термічного випаровування (рис. 6.13).

При піднятому робочому ковпаку 8 завантажують підкладки на підкладкотримач і матеріал, що випаровується, у випарник 10. При опусканні ковпака його фланець спирається на гумову прокладку 4 і в такий спосіб герметизується. При форвакуумному відкачуванні робочої камери до тиску порядку 1 Па спочатку включають механічний форвакуумний насос 14, а потім для з'єднання з ним робочого об'єму відкривають клапан 11. Вимірюють тиск у робочому об'ємі термометричним вакуумметром 5. Створивши необхідний вакуум, відкривають затвор 3 і клапан 13, закривають клапан 11 і відкачують дифузійну магістраль насоса 1. Після відновлення вакууму в системі, що понизився за рахунок повітря, що знаходиться в об'ємі дифузійного насоса 1 і



критому патрубку натікання 9 повітря проникне через затвор 3 у дифузійний насос, окислить масло і тим самим виведе насос з ладу.

Помістивши в робочу камеру оброблювані підкладки, знову відкачують її форвакуумним насосом при відкритому клапані 11. Затвор 3 і клапан 13 повинні бути при цьому закриті, щоб повітря з робочого об'єму не потрапило у дифузійний насос і не вивело його з ладу. У результаті працюючий дифузійний насос виявляється перекритим зверху і знизу, тобто працює вхолосту. При тиску в робочому об'ємі порядку 5 Па клапан 11 закривають, а затвор 3 і клапан 13 відкривають, і починається відкачування робочої камери дифузійним насосом. Після створення в ній тиску 10^{-5} Па проводять процес нанесення плівки на підкладки.

його магістралі, включають цей насос, попередньо подавши воду для охолодження його корпусу. Одночасно починають охолоджувати рідким азотом пастку 2. Після досягнення необхідного граничного розрідження порядку $5 \cdot 10^{-5}$ Па, що вимірюється йонізаційним вакууметром 6, приступають до проведення технологічного процесу нанесення тонких плівок (при робочому тиску порядку 10^{-4} Па).

Закінчивши процес на одних підкладках, виймають їх і закладають наступні. Для цього впускають повітря в робочий об'єм через патрубок натікання 9, закривши затвор 3 і тим самим припинивши доступ повітря в дифузійний насос. В іншому випадку при від-

Для вимикання вакуумної системи при закритих затворі 3 і клапані 11 і працюючому форвакуумному насосі 14 виключають дифузійний насос. Коли його кип'ятильник охолодиться, закривають клапан 13, виключають форвакуумний насос 14 і відкривають для напуску атмосферного повітря в його порожнину патрубків натікання 12.

Вакуумні системи будь-якого типу мають деякі ділянки, недостатньо надійні у відношенні герметичності. У першу чергу, це місця з'єднань окремих елементів. Ймовірність негерметичності вакуумної системи в місцях з'єднань пояснюється тим, що при роботі вони піддаються механічному чи температурному впливу. Навіть якщо всі з'єднання виконані досить ретельно, залишається небезпека, що ділянки, що не піддавалися небезпечному впливу, можуть мати дефекти, непомітні на око, але такі, що є місцем входу атмосферного повітря, що проникає в систему. Ознака великої течії у вакуумній системі – неможливість створення необхідного вакууму.

Для оцінки швидкості натікання (течі) одержують граничний вакуум p_1 і ізолюють вакуумну систему від насоса, закривши затвор. Вважаючи момент закриття затвора початковим, через якийсь час t вимірюють тиск p_2 у вакуумній системі. Знаючи об'єм V вакуумної системи над затвором, швидкість натікання (Па·л/с) визначають за формулою:

$$Q_T = \frac{V(p_1 - p_2)}{\tau}, \quad (6.1)$$

Якщо швидкість натікання перевищує допустиму, необхідно відшукати негерметичне місце й усунути течу. Для виявлення негерметичних місць існує ряд методів, а також приладів, які називають течешукачами. Найбільше поширення одержав гелієвий течешукач, основою якого є мас-спектрометр, що реагує на присутність незначної кількості гелію в його вакуумній системі.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С. Получение тонкопленочных элементов микросхем. М., 1977.
2. Кузнецов В.И., Немилов Н.Ф., Шемякин В.Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. М., 1978.
3. Панфилов Ю.У., Рябов В.Т., Цветков Ю.Б. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные роботы. М., 1988.
4. Минайчев В.Е. Вакуумное оборудование для нанесения пленок. М., 1978.
5. Моряков О.С. Устройство и наладка оборудования полупроводникового производства. М., 1988.
6. Моисеев О.К., Романов А.С. Технология полупроводникового производства. М., 1984.
7. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. Под ред Ж.И. Алферова. М., "Сов. радио", 1975.
8. Ченг Л., Плут К. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Пер. с англ., под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева-М.: Мир, 1989.
9. Технология тонких пленок (справочник), под ред. Л. Майссела и Р. Глэнга, М.: Советское радио, 1977.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ТОНКІ ПЛІВКИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДАХ І МІКРОСХЕМАХ.....	5
1.1. Основні положення.....	5
1.2. Нанесення плівок у вакуумі.....	11
1.3. Вакуум в тонкоплівковій технології.....	15
1.4. Вплив вакууму на процес нанесення плівок	18
1.5. Одержання конфігурацій тонкоплівкових елементів.....	20
2. НАНЕСЕННЯ ПЛІВОК МЕТОДОМ ТЕРМІЧНОГО ВИПАРОВУВАННЯ	25
2.1. Основні відомості	25
2.2. Випарники з резистивним нагріванням.....	28
2.3. Випарники з електронно-променевим нагріванням.....	35
2.4. Вирощування плівок напівпровідникових сполук методом гарячої стінки	38
2.5. Метод молекулярно-променевої епітаксії.....	40
3. НАНЕСЕННЯ ПЛІВОК МЕТОДОМ ІОННОГО РОЗПИЛЕННЯ.....	44
3.1. Основні відомості	44
3.2. Діодні системи йонного розпилення	47
3.3. Магнетронні системи йонного розпилення	49
3.4. Високочастотний і реактивний методи йонного розпилення ...	53
Контрольні питання.....	55
4. РІДИННО- ТА ГАЗОФАЗНА ЕПІТАКСІЯ	56
4.1. Рідиннофазна епітаксія.....	56
4.2. Газофазна епітаксія.....	59
5. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВОК І ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЇХНЬОГО НАНЕСЕННЯ	63
5.1. Основні відомості	63
5.2. Вимірювання товщини плівок	63
5.3. Вимірювання електричного опору плівок.....	64
5.4. Вимірювання адгезії плівок.....	66
5.5. Вимірювання швидкості нанесення плівок	66
6. ВАКУУМНІ СИСТЕМИ	69
6.1 Основні відомості	69
6.2. Механічні форвакуумні і двороторні насоси	70
6.3. Дифузійні паромасляні насоси	75
6.4. Криогенні насоси	77
6.5. Турбомолекулярні насоси.....	79
6.6. Вимірювання вакууму	80
6.7. Контроль складу залишкової атмосфери.....	85
6.8. Вакуумні системи відкачування	86
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	90
ЗМІСТ.....	91

Навчальне видання

ПРОКОПІВ Володимир Васильович

Фізика і технологія тонких плівок

Навчальний посібник

Том I

Технологія тонких плівок

Літературний редактор *Прокопів Л.М.*

Комп'ютерний набір *Ваньчук В.Б.*

Дизайнер *Туровська Л.В.*

Підписано до друку 28.07.2010 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура «Times New Roman».
Умов. друк. арк. 4,38. Наклад 300 пр. Зам. № 67.

Видавець

Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника,
вул. С. Бандери, 1, м. Івано-Франківськ, 76000.
Тел. 8(0342) 71-56-22.

E-mail: vdvcit@pu.if.ua

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №2718 від 12.12.2006.*

Друк: підприємець Голіней О.М.
76008 м. Івано-Франківськ, вул. Галицька, 128
Тел. +38 (0342) 58-04-32, +38 050 540 30 64
E-mail: gsm1502@ukr.net