

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Запорізький національний технічний університет

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до лабораторного практикуму з дисципліни  
**„ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ.  
ТОНКІ ПЛІВКИ“**  
для студентів спеціальності  
6.050801 „Мікро- та наноелектроніка“  
денної й заочної форм навчання

2014

Методичні вказівки до лабораторного практикуму з дисципліни „Технологічні основи електроніки. Тонкі плівки“ для студентів спеціальності 6.050801 „Мікро- та наноелектроніка“ денної й заочної форм навчання / Укл.: Є. Л. Жавжаров, А. В. Коротун, Н. А. Смирнова. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 54 с.

Укладачі: Є. Л. Жавжаров, доц., канд. фіз.-мат. наук,  
А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук,  
Н. А. Смирнова, ст. викладач

Рецензент: В. В. Погосов, проф., д-р фіз.-мат. наук

Відповідальний за випуск: Є.Л. Жавжаров, доц., канд.фіз.-мат.наук

Затверджено  
на засіданні кафедри  
мікро- та наноелектроніки  
Протокол №3  
від „15“ жовтня 2014 р.

## ЗМІСТ

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Підготовка до проведення лабораторної роботи й оформлення звіту.....       | 5  |
| 1 Лабораторна робота №1 „Розробка топології і технології ГІС”.....         | 6  |
| 1.1 Теоретичні відомості.....                                              | 6  |
| 1.1.1 Пасивні плівкові елементи. Плівкові резистори.....                   | 6  |
| 1.1.2 Плівкові конденсатори.....                                           | 11 |
| 1.1.3 Плівкові індуктивності.....                                          | 14 |
| 1.1.4 Плівкові елементи комутації.....                                     | 16 |
| 1.2 Завдання.....                                                          | 18 |
| 1.3 Контрольні запитання.....                                              | 18 |
| 2 Лабораторна робота №2 „Термічне вакуумне напылення”.....                 | 19 |
| 2.1 Теоретичні відомості. Методи осадження тонких плівок.....              | 19 |
| 2.1.1 Термічне випаровування у вакуумі.....                                | 19 |
| 2.1.2 Електронно-променевий метод.....                                     | 24 |
| 2.1.3 Властивості тонких плівок.....                                       | 24 |
| 2.1.4 Використовуване обладнання.....                                      | 26 |
| 2.2 Завдання.....                                                          | 29 |
| 2.2.1 Підготовка вакуумного поста ВУП-4 до роботи.....                     | 29 |
| 2.2.2 Робота з пристроєм для термічного розпылення.....                    | 30 |
| 2.2.3 Виконання роботи.....                                                | 30 |
| 2.4 Контрольні запитання.....                                              | 31 |
| 3 Лабораторна робота №3 „Магнетронне розпылення на постійному струмі”..... | 32 |
| 3.1 Теоретичні відомості.....                                              | 32 |
| 3.1.1 Принцип дії магнетронної системи.....                                | 32 |
| 3.2 Використовуване обладнання.....                                        | 39 |
| 3.2.1 Магнетронна розпылювальна система ВУП-5М.....                        | 39 |
| 3.2.2 Порядок проведення роботи на установці ВУП-5М.....                   | 41 |
| 3.2.3 Підготовка установки ВУП-5М до напылення.....                        | 41 |
| 3.2.4 Установка підшарів.....                                              | 41 |
| 3.2.5 Відкачування.....                                                    | 42 |
| 3.2.6 Напылення.....                                                       | 42 |
| 3.2.7 Виймання зразків з РВ.....                                           | 43 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.8 Вимкнення установки ВУП-5М.....                                 | 43 |
| 3.3 Лабораторне завдання.....                                         | 44 |
| 3.4 Контрольні запитання.....                                         | 44 |
| 4 Лабораторна робота №4 „Дослідження властивостей тонких плівок”..... | 45 |
| 4.1 Теоретичні відомості. Фізичні властивості тонких плівок....       | 45 |
| 4.1.1 Механічні властивості.....                                      | 45 |
| 4.1.2 Електрофізичні властивості.....                                 | 47 |
| 4.1.3 Вимірювання електричного опору тонких плівок .....              | 49 |
| 4.2 Завдання до лабораторної роботи.....                              | 50 |
| 4.3 Контрольні запитання.....                                         | 51 |
| Перелік рекомендованої літератури.....                                | 52 |
| Додаток А Метод кварцового мікрозважування.....                       | 53 |

## **ПІДГОТОВКА ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ Й ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ**

Лабораторна робота включає самостійне опрацювання теоретичного матеріалу, вивчення методик проведення і планування експерименту, вивчення вимірювальних засобів і приладів, обробку та інтерпретацію експериментальних даних. При проведенні лабораторного практикуму необхідно:

- підготуватися до опитування з теоретичного матеріалу, необхідного для виконання роботи (для отримання допуску до лабораторної роботи);

- уважно ознайомитися із порядком роботи на обладнанні;

- підготувати і оформити план виконання лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи провести необхідні розрахунки та опрацювання отриманих даних; оформити звіт, який повинен містити:

- титульний аркуш;

- мету роботи;

- методику роботи із обладнанням;

- опис, таблицю експериментальних даних, необхідні графічні залежності;

- основні результати (математичні залежності, алгоритми розрахунків, табличні дані, графіки тощо);

- стислі висновки по роботі, в яких:

- 1) вказати, що досліджувалось;

- 2) вказати методику (чи метод) дослідження;

- 3) вказати характер теоретичної залежності;

- 4) визначити характер експериментальної залежності;

- 5) навести конкретні встановлені факти, включаючи експериментальні й розрахункові дані;

- 6) відзначити подібність і відмінність експериментальної залежності та відмінності експериментальної залежності від теоретичної;

- здати звіт з виконаної лабораторної роботи і відповісти на запитання викладача (отримати залік за виконану роботу).

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

## „РОЗРОБКА ТОПОЛОГІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ ГІС“

**Мета роботи** – засвоїти принципи розрахунку розмірів плівкових елементів і розробки топології плівкових інтегральних схем.

### 1.1 Теоретичні відомості

#### 1.1.1 Пасивні плівкові елементи. Плівкові резистори

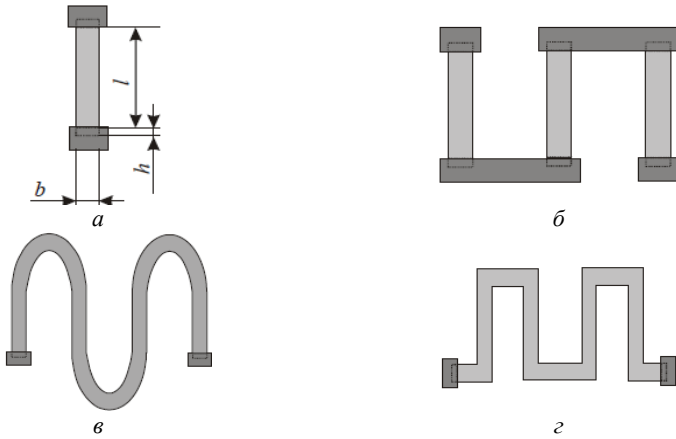
Плівкові резистори є найбільш поширеними елементами ГІС і МЗБ. Вони є резистивними плівками, обмеженими контактними ділянками з високою поверхневою провідністю.

Вихідні дані для розрахунку плівкових резисторів: номінальний опір  $R$ , розсіювана потужність  $P$  і допустима похибка опору.

Розрахунок резисторів починають з вибору резистивного матеріалу (табл. 1.1). При цьому необхідно врахувати, що коефіцієнт форми  $k_\phi$  тонкоплівкового резистора найпростішої прямокутної конфігурації (рис. 1.1, а) має перебувати в межах  $0,5 \leq k_\phi \leq 10$ . Верхня межа  $k_\phi$  тонкоплівкових резисторів складної форми (рис. 1.1, б–г) практично не обмежується.

Таблиця 1.1 – Властивості матеріалів для тонкоплівкових резисторів

| Матеріал       | Питомий поверхневий опір ( $\rho_{\kappa\phi}$ ), Ом/□ | Температурний коефіцієнт опору ТКО ( $\alpha_R$ ), К <sup>-1</sup> | Питома допустима потужність розсіювання ( $P_0$ ), Вт/см <sup>2</sup> | Незворотні зміни опору після 1000 год. роботи під навантаженням 1 Вт/см <sup>2</sup> при 85 °С $\gamma_{R_{cm}}$ , % |
|----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Хром           | 50...500                                               | $(0,6 \div 1,8) \cdot 10^{-4}$                                     | 1                                                                     | 2                                                                                                                    |
| Тантал         | 25... 100                                              | $-2 \cdot 10^{-4}$                                                 | 3                                                                     | 1                                                                                                                    |
| Нітрид танталу | 50...500                                               | $1 \cdot 10^{-4}$                                                  | 3                                                                     | 0,2                                                                                                                  |
| Ніхром         | 25...300                                               | $1 \cdot 10^{-4}$                                                  | 2                                                                     | 1                                                                                                                    |
| Реній          | 250...10000                                            | $-1 \cdot 10^{-4}$                                                 | 3                                                                     | —                                                                                                                    |
| МЛТ–ЗМ         | 50...500                                               | $0,6 \cdot 10^{-4}$                                                | 2                                                                     | 0,5                                                                                                                  |
| Кермет К–20С   | 1000...3000                                            | $0,5 \cdot 10^{-4}$                                                | 2                                                                     | 1                                                                                                                    |
| Кермет К–50С   | $(3...10) \cdot 10^3$                                  | $(-5...3) \cdot 10^{-4}$                                           | 2                                                                     | 1                                                                                                                    |
| Титан          | 100...2000                                             | $(-11...30) \cdot 10^{-4}$                                         | 3                                                                     | —                                                                                                                    |



*a* – проста прямокутна форма; *б* – складна форма з провідними перемичками;  
*в* – типу меандру; *г* – змієподібного вигляду

Рисунок 1.1 – Конструкції плівкових резисторів

Необхідно мати на увазі, що при розрахунку групи тонкоплівкових резисторів, які входять до складу однієї ІС та розміщуються на одній платі, край небажано використовувати різні резистивні матеріали. Недотримання цієї вимоги ускладнює технологію. Резисторам з  $k_\phi > 10$  необхідно надавати форму меандру або змієподібну форму.

За відомим питомим опором  $\rho_{\text{кв}}$  обраного резистивного матеріалу можна визначити коефіцієнт форми кожного резистора:

$$k_\phi = \frac{R}{\rho_{\text{кв}}}. \quad (1.1)$$

Потім необхідно визначити геометричні розміри резисторів. У разі  $k_\phi \geq 1$  розрахунок починають з визначення ширини  $b$ , оскільки у даному випадку ширина є найменшим геометричним розміром, тобто найбільш критичним до теплових навантажень і похибок виготовлення. Резистори з  $k_\phi < 1$  розраховують, починаючи з визначення їх довжини  $l$ .

Розрахунок ширини резистора з  $k_\phi \geq 1$  за умовами розсіюваної потужності резистора ведеться з використанням співвідношення

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 k_\phi}} = \sqrt{\frac{P \rho_{R_{\text{ге}}}}{P_0 R}}, \quad (1.2)$$

де  $P_0$  – допустима питома потужність розсіювання матеріалу;

$P$  – розсіювана потужність резистора;

$R$  – номінальний опір резистора.

Вимоги, що висувають до припустимої похибки номінального значення опору резистора, також обмежують номінальну ширину резистивної смужки. Якщо задана допустима відносна погрішність опору резистора  $\gamma_R$ , яка має забезпечуватися в інтервалі робочих температур мікросхеми протягом усього періоду експлуатації, то розрахунок резистора ведеться з урахування ТКО і зміни опору внаслідок процесів старіння.

Відносне відхилення опору внаслідок зміни температури визначають за формулою

$$\gamma_{R_T} = \alpha_R (T - 293,15), \quad (1.3)$$

де  $\alpha_R$  – ТКО матеріалу;

$T$  – максимальна робоча температура схеми, К.

Дані про відносне відхилення опору через процеси старіння ( $\gamma_{R_{\text{ст}}}$ ) є емпіричними довідковими параметрами (табл. 1.1).

Приймаючи до уваги вказані систематичні відхилення опору резистора від заданого, знайдемо розрахункове значення допустимої відносної погрішності:

$$\gamma_{R_{\text{розн}}} = \gamma_R - \gamma_{R_T} - \gamma_{R_{\text{ст}}}. \quad (1.4)$$

Отримане значення  $\gamma_{R_{\text{розн}}}$  може бути покладене в основу подальшого розрахунку резистора з урахуванням випадкових відхилень опору, які виникають в процесі виготовлення. Виразимо відносну технологічну погрішність (середньоквадратичне відхилення при нормальному законі статистичного розподілу) так:

$$\gamma_{R_{\text{техн}}}^2 = \gamma_{\rho_{\text{кв}}}^2 - \gamma_l^2 - \gamma_b^2, \quad (1.5)$$

де  $\gamma_l = \Delta l / l$ ,  $\gamma_b = \Delta b / b$  – відносні середньоквадратичні відхилення відповідних величин.

Технологічна підгонка опору резистора необхідна, коли  $|\gamma_{R_{\text{техн}}}| > |\gamma_{R_{\text{розр}}}|$ . Як правило, підгонку здійснюють у бік збільшення опору резисторів. У резистора, який підганяють по довжині, перерізають провідні перемички, а в резистора, який підганяють по ширині, перерізають резистивну плівку підгінних секцій (рис. 1.2).

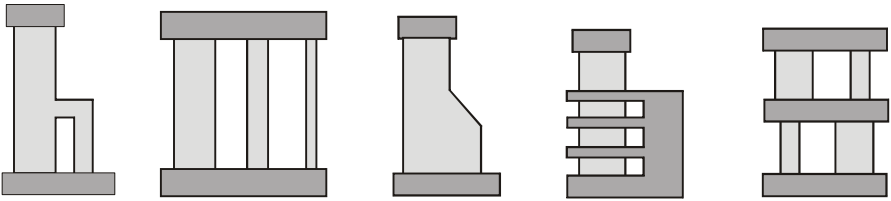


Рисунок 1.2 – Конструкції плівкових резисторів, які забезпечують підгонку номіналу

При розрахунку ширини резистора з метою забезпечення погрішності, яка не перебільшує задану, використовують формулу

$$b_{\Delta} = \frac{\Delta b}{\sqrt{\gamma_{R_{\text{розр}}}^2 - \gamma_{\rho_{\text{кв}}}^2}} \pm \frac{\sqrt{1 + k_{\Phi}^2}}{k_{\Phi}}. \quad (1.6)$$

Отримані після розрахунку за формулами (1.2) і (1.6) значення ширини резистивної смужки порівнюють з мінімальною шириною лінії, яка забезпечує роздільну здатність технології –  $b_{\text{техн}}$ . За ширину резистору  $b$  приймають максимальне з трьох отриманих значень

$$b = \max \{ b_p, b_{\Delta}, b_{\text{техн}} \}. \quad (1.7)$$

Довжину резистора  $l$  визначають за формулою

$$l = b k_{\Phi}. \quad (1.8)$$

Для розрахунку довжини резисторів з  $k_\phi < 1$  з урахуванням потужності розсіяння формула (1.2) перетворюється до виду:

$$l_p = \sqrt{\frac{PR}{P_o \rho_{\text{кв}}}}. \quad (1.9)$$

Для розрахунку довжини резистора з  $k_\phi < 1$  з метою забезпечення погрішності, яка не перевищує заданої, формула (1.6) перетворюється до виду

$$l_\Delta = \frac{\Delta l \sqrt{1 + k_\phi^2}}{\sqrt{\gamma_{R_{\text{розр}}}^2 - \gamma_{\rho_{\text{кв}}}}}. \quad (1.10)$$

Остаточно приймається максимальне з трьох отриманих значень

$$l = \max \{l_p, l_\Delta, l_{\text{техн}}\}. \quad (1.11)$$

Ширину резистора визначають із співвідношення (1.7).

Порівнюючи абсолютні величини  $\gamma_{R_{\text{розр}}}$  і  $\gamma_{R_{\text{техн}}}$ , роблять висновок про необхідність індивідуальної підгонки резистора. Якщо  $|\gamma_{R_{\text{техн}}}| \geq |\gamma_{R_{\text{розр}}}|$ , то забезпечується задана погрішність і підгонка не потрібна. Якщо  $|\gamma_{R_{\text{техн}}}| < |\gamma_{R_{\text{розр}}}|$ , то резистор необхідно підігнати по ширині (у разі  $k_\phi < 1$ ).

Для типових технологічних процесів виготовлення гібридних тонкоплівкових мікросхем і мікрозбірок можна приймати:  $\Delta l = \Delta b = 0,01$  мм,  $\gamma_{\rho_{\text{кв}}} = 0,05$ , роздільна здатність технології (мінімальні розміри  $l, b, h, m, n$ ) – 0,1 мм.

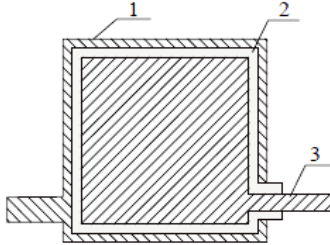
Якщо резистор має форму меандру з провідними перемичками (рис. 1.1, б), то сума довжин окремих ділянок резисторів має дорівнювати довжині, розрахованій за формулою (1.8).

Розрахунок резисторів типу меандр (рис. 1.1, в) або змієподібного виду (рис. 1.1, г) здійснюють з урахуванням зломів або згинів.

### 1.1.2 Плівкові конденсатори

Для плівкових конденсаторів характерна тришарова структура, яка складається з нижньої металевої обкладинки, діелектричної плівки і верхньої металевої обкладинки.

Конструкцію плівкового конденсатора наведено на рис. 1.3.



1 – діелектрик; 2 – нижня обкладинка; 3 – верхня обкладинка

Рисунок 1.3 – Конструкція плівкового конденсатора

Ємність конденсатора визначають за площею перекриття металевих обкладинок.

Плівковий конденсатор характеризується:

- номінальною ємністю  $C$  ;
- максимальною робочою напругою  $U_{роб}$  ;
- опором втрати  $R_{втр}$  ;
- діелектричними втратами.

Її параметри визначаються параметрами діелектрика:

- діелектричною проникністю  $\varepsilon$  ;
- електричною міцністю  $E_{мі}$  ;
- питомим об'ємним опором  $\rho_v$  ;
- тангенсом кута діелектричних втрат діелектрика  $\tan \delta$  ;
- конструктивними розмірами конденсатора.

Вихідними даними при розрахунку плівкових конденсаторів є:

- номінальна ємність  $C$  та її допустимі відхилення;
- максимальна робоча напруга  $U_{роб}$  ;
- максимальна площа обкладинок;
- діапазон робочих температур.

В якості діелектрика в плівкових конденсаторах застосовують монооксид кремнію, монооксид германію, оксид алюмінію, оксид танталу, двооксид титану, халькогенідне скло, боросилікатне скло, трисіркова сурма, полімерні плівки та ін. (табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Властивості діелектричних матеріалів для тонкоплівкових конденсаторів

| Матеріал           | $\epsilon$<br>на частоті 1 кГц | Питома ємність при $U_{роб} = 100 \text{ В}$ ,<br>$\text{пФ/см}^2$ | Електрична міцність $E_{мц}$ ,<br>$\text{МВ/см}$ | ТКЄ в інтервалі температур від $-60$ до $+85$ °C, $\text{K}^{-1}$ |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Монооксид кремнію  | 6...8                          | $(5...10) \cdot 10^3$                                              | 1... 2                                           | $(1...2) \cdot 10^{-4}$                                           |
| Монооксид германію | 10...12                        | $(5...20) \cdot 10^3$                                              | 0,5...0,8                                        | $3,5 \cdot 10^{-4}$                                               |
| Оксид алюмінію     | 10                             | $(30...80) \cdot 10^3$                                             | 9                                                | $(1,5...5) \cdot 10^{-4}$                                         |
| П'ятиоксид танталу | 21...27                        | $10^5$                                                             | 5                                                | $(2...3) \cdot 10^{-4}$                                           |
| Двооксид титана    | 30...100                       | $10^4...10^5$                                                      | 0,24                                             | $3 \cdot 10^{-4}$                                                 |
| Халькогенідне скло | 5...20                         | $10^4...3 \cdot 10^4$                                              | 0,2...2,0                                        | $(2...5) \cdot 10^{-5}$                                           |
| Боросилікатне скло | 4                              | $(2...10) \cdot 10^3$                                              | 3                                                | $(3...3,5) \cdot 10^{-5}$                                         |
| Трисіркувата сурма | 18...21                        | $(1...1,5) \cdot 10^3$                                             | 0,3...0,5                                        | $5 \cdot 10^{-4}$                                                 |

Товщину плівкового діелектрика  $d$  вибирають так, щоб конденсатор надійно витримував задану робочу напругу:

$$d = k_{напр} U_{роб} / E_{мц}, \quad (1.12)$$

де  $k_{напр}$  – коефіцієнт запасу по напрузі (приймається  $k_{напр} = 3$ ).

Питома ємність (ємність одиниці площі)  $C_o$  залежить від товщини і властивостей діелектрика:

$$C_o = \epsilon \epsilon_o / d. \quad (1.13)$$

Якщо необхідно забезпечити задану погрішність ємності, питому ємність конденсатора визначають із співвідношення:

$$C_o = C \left( \frac{\gamma_s}{\Delta L} \right)^2 \frac{k_\phi}{(1 + k_\phi)^2}, \quad (1.14)$$

де  $\gamma_s$  – значення відносного середньоквадратичного відхилення площі конденсатора;

$k_\phi$  – коефіцієнт форми, тобто відношення величини більшої сторони обкладинки конденсатора до величини меншої сторони (при рівних значеннях сторін  $k_\phi = 1$ ).

Для визначення величини  $\gamma_s$  спочатку знаходять розрахункове значення відносної погрішності ємності:

$$\gamma_{C_{розр}} = \gamma_C - \gamma_{C_T}, \quad (1.15)$$

де  $\gamma_C$  – задана допустима погрішність ємності;

$\gamma_{C_T}$  – погрішність, яка виникає в результаті зміни температури. Її визначають за виразом

$$\gamma_{C_T} = \alpha_C (T - 293,15), \quad (1.16)$$

де  $\alpha_C$  – температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ). Погрішність площі визначають так

$$\gamma_s = \sqrt{\gamma_{C_{розр}}^2 - \gamma_{C_o}^2}, \quad (1.17)$$

де погрішність відтворення питомої ємності  $\gamma_{C_o} = 0,05$ .

Відносна технологічна погрішність ємності

$$\gamma_{C_{техн}} = \sqrt{\gamma_{C_o}^2 + \gamma_s^2} \quad (1.18)$$

не має перевищувати розрахункової, тобто  $\gamma_{C_{розр}} \geq \gamma_{C_{техн}}$ . В іншому разі задана погрішність ємності не забезпечується, і необхідна підгонка конденсатора.

Після розрахунку питомої ємності конденсатора за формулами (1.13) і (1.14) остаточно обирають з двох значень менше, і визначають площу конденсатора  $S = C/C_o$ .

Розміри конденсатора, який має структуру, показану на рис.1.3, розраховують за наступними співвідношеннями. Розміри верхньої обкладинки:

$$L_1 = \sqrt{Sk_\phi}, \quad B_1 = L_1/k_\phi; \quad (1.19)$$

розміри нижньої обкладинки:

$$L_2 = L_1 + 2(\Delta L + \Delta l), \quad B_2 = B_1 + 2(\Delta B + \Delta b); \quad (1.20)$$

розміри діелектрика:

$$L_3 = L_2 + 2(\Delta L + \Delta l), \quad B_3 = B_2 + 2(\Delta B + \Delta b), \quad (1.21)$$

де  $\Delta L = \Delta B = 0,01$  мм,

погіршність суміщення масок  $\Delta l = \Delta b = 0,05$  мм.

При розрахунку конденсаторів малої площини ( $S = 1 \div 5$  мм<sup>2</sup>) необхідно врахувати збільшення ємності конденсатора, зумовлене впливом крайового ефекту (збільшення напруженості електричного поля на краях пластин). Площа конденсатора має бути зменшена:

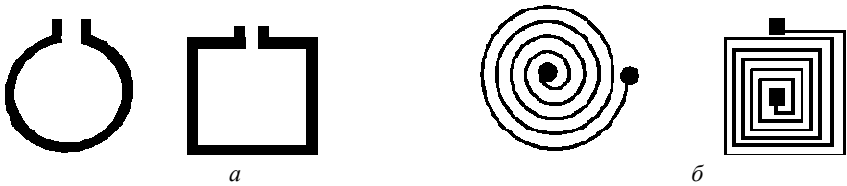
$$S = \frac{C}{kC_o}, \quad (1.22)$$

де  $k = 1,25 - 0,063 \left( \frac{C}{C_o} - 1 \right)$ , а  $\frac{C}{C_o}$  вимірюється у мм<sup>2</sup>.

### 1.1.3 Плівкові індуктивності

Плівкові індуктивності отримують напиленням плоских спіралей з немагнітного провідника на діелектричний або феритовий підшарок.

Основні конструкції плівкових індуктивностей наведено на рис.1.4. Найбільше розповсюдження отримали квадратична і кругова конфігурації плівкових індуктивностей.



*a* – у вигляді одновиткової спіралі; *б* – у вигляді спіралей

Рисунок 1.4 – Конструкція плівкових індуктивностей

Основними характеристиками індуктивностей є: індуктивність  $L$ , добротність  $Q$  і власна резонансна частота  $f_o$ .

Величина індуктивності визначається геометричною формою, розмірами і кількістю витків.

Для кругової спіралі:

$$L_{\text{кр}} = 0,0215KN^{\frac{5}{3}} \ln\left(\frac{8K}{C}\right), \quad (1.23)$$

де  $N$  – кількість витків;

$$K = 0,25(D_1 + D_2);$$

$$C = 0,5(D_2 - D_1) - \text{смуга, зайнята витками котушки.}$$

Для квадратної спіралі:

$$L_{\text{кв}} = 0,0241KN^{\frac{5}{3}} \ln\left(\frac{8K}{C}\right), \quad (1.24)$$

$$\text{де } K = 0,25(A_1 + A_2);$$

$$C = 0,5(A_2 - A_1).$$

Якщо розміри котушки визначені в сантиметрах, величину індуктивності отримують в мікрогенрі (мкГн).

Для випадку розміщення спіралі в магнітному доквіллі, результат, добутий із рівнянь (1.23) і (1.24), необхідно помножити на величину магнітної проникності.

Добротність  $Q$  відображує кількість розсіяваної електромагнітної енергії в котушці і залежить від опору провідника, втрат у діелектрику і магнітному матеріалі:

$$Q = \frac{2\eta f}{\rho_s(f)}, \quad (1.25)$$

де  $\eta = 1/n$ ,  $n$  – кількість квадратів провідників спіралі;

$\rho_s$  – поверхневий опір провідників спіралі;

$f$  – робоча частота.

Плівкові спіралі мають меншу індуктивність і відносно низьку добротність. При напыленні спіралей на феритовий підшарок індуктивність збільшується, але при цьому зменшується добротність за рахунок втрат у фериті.

Ширина провідників плівкової індуктивності знаходиться у межах 0,052...0,12 мм, зазор між витками – 0,1...0,12 мм.

Матеріалами провідників можуть бути: золото, срібло, мідь з підшарком хрому.

#### 1.1.4 Плівкові елементи комутації

До плівкових елементів комутації відносять контактні площадки (КП) і комутаційні доріжки (КД).

Контактні площадки – це невеликі ділянки плівки провідника, за допомогою яких в мікросхемі вмикаються навісні елементи або монтажні провідники, які з'єднують входи і виходи мікросхеми із зовнішніми виводами (штирями).

Комутаційні доріжки – це вузькі смуги плівкового провідника, через які здійснюється міжелементний зв'язок в мікросхемі.

Навісні елементи і монтажні провідники приєднуються до КП приклеюванням, паянням або зварюванням.

Вимоги до КП і КД:

- повинні мати високу провідність і створювати з провідниками, які до них приєднують, неவிпрямляючі контакти;
- провідність плівки не повинна мінятися з часом;
- бажано, щоб матеріал КП мав здатність до безфлюсового паяння і зварювання;
- матеріал має бути стійким до корозії;

– повинні мати міцне зчеплення з підшарком.

Найкращими провідниками є: мідь, срібло, золото і алюміній. Однак ні один з них не задовольняє повністю усім вимогам.

Мідь – окислюється при підвищених температурах і створює випрямляючий контакт.

Алюміній – має на своїй поверхні окисну плівку, яка ускладнює паяння.

Срібло – не окислюється і добре піддається паянню, але майже не використовується через підвищену його міграцію на підшарку, що спричинює збільшення втрат струму і навіть коротке замикання.

Золото – задовольняє найбільшій кількості вимог, однак це дорогий матеріал, до того ж він має низьку адгезію до підшарку.

Перелічені метали не використовують самостійно, а в поєднанні з іншими, які замінюють їх недоліки. Так, для поліпшення адгезії їх наносять не на підшарок, а на раніше нанесений підшар металів, які добре зчеплюються з підшарком, наприклад: хром, ніхром, марганець, титан, молібден, вольфрам.

Для комутаційних елементів використовують наступні поєднання: підшарок – провідний шар – захисний шар, наприклад, хром – золото, хром – золото – нікель, хром – срібло – нікель, хром – мідь – золото, хром – алюміній – золото, хром – марганець – золото, ніхром – золото, ніхром – мідь – золото, ніхром – мідь – нікель, титан – золото, титан – мідь – срібло, титан – мідь – нікель, титан – алюміній – нікель, тантал – хром – алюміній, марганець – мідь – золото, марганець – мідь – паладій.

Враховуючи міцність змішаних переходів, можна наносити комутаційні плівки складних сполук не окремо з чистих металів, а зразу їх сплави, наприклад: мідь – 94,5 %, паладій – 5 %, марганець – 0,5 %, або мідь – 94,5 %, нікель – 5 %, марганець – 0,5 %. Завдяки фракційній перегонці сплаву нижня частина плівки збагачується марганцем, що поліпшує адгезію, а верхня – нікелем, який поліпшує термостабільність і корозійну стійкість. Проміжний шар складається із збагаченої домішками міді, що підвищує провідність плівки.

Товщина КД, до якої паяють або приварюють виводи навісних елементів і перемичок до 50 мкм, перебувають у межах  $0,3 \pm 1$  мкм (іноді до 5 мкм). В останньому випадку тонкі плівки нарощують гальванічним осадженням міді або нікелю.

## 1.2 Завдання

**1.2.1** За заданою принциповою електричною схемою обрати матеріали і розрахувати геометричні розміри пасивних плівкових елементів ГІС. Зробити висновки про необхідність технологічної підгонки щодо кожного елемента (резистора, ємності, індуктивності). При розрахунку прийняти, що діапазон робочих температур складає  $20 \div 80$  °С, допустима погрішність:  $\gamma_R = \gamma_C = 0,08$ .

**1.2.2** При проектуванні ГІС вважати, що активні елементи використовуються навісні із розміром  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>.

**1.2.3** Розмістити елементи на діелектричному підшарку стандартного розміру. Контактні ділянки під виводи схеми розташовуються у відповідності з вибраним типом корпусу на однаковій відстані один від одного. Розміри всіх контактних ділянок (як під виводи схеми, так і під виводи навісних елементів) мають бути однакові, мінімальний розмір  $0,5 \times 0,5$  мм<sup>2</sup>.

**1.2.4** Прокласти необхідні з'єднання. Мінімальна ширина контактної доріжки, а також мінімальна відстань між доріжками 0,1 мм.

**1.2.5** Нарисувати топологію ГІС у вибраному масштабі.

**1.2.6** Розробити докладний технологічний процес виготовлення спроектованої ГІС (оформлюється у вигляді блок-схеми).

## 1.3 Контрольні запитання

1. Яку ІС називають тонкоплівковою?
2. Яку ІС називають товстоплівковою?
3. Які матеріали найбільш часто використовують для контактних площадок і доріжок, чому?
4. Йим зумовлена мінімальна ширина контактної доріжки?
5. Як розраховують геометричні розміри тонкоплівкового резистора?
6. Як розраховують геометричні розміри тонкоплівкового конденсатора?
7. Що таке поверхневий опір?
8. Які переваги і недоліки навісних компонентів?
9. Які переваги і недоліки розробленої конструкції ГІС?
10. Яка область використання даної мікросхеми. Її можна її розширити?

## **2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2**

### **«ТЕРМІЙНЕ ВАКУУМНЕ НАПИЛЕННЯ»**

**Мета роботи:** вивчення технологічних методів отримання тонких плівок і дослідження їх властивостей.

#### **2.1 Теоретичні відомості. Методи осадження тонких плівок**

Існує багато методів осадження тонких плівок. Загальними вимогами до тонких плівок є:

- рівномірність товщини плівки;
- однорідність її структури;
- надійне зчеплення (адгезія) з підшарком (або з іншими плівками, з якими контактує осаджувана плівка).

До основних методів осадження тонких плівок відносять:

- термічне випаровування в вакуумі:
  - 1) з непрямым підігрівом ниткою розжарення;
  - 2) з непрямым індукційним підігрівом;
  - 3) електронно-променевим методом;
- катодне розпилення:
  - 1) йонно-плазмове розпилення;
  - 2) реактивне розпилення;
- осадження із газової фази:
  - 1) за допомогою газотранспортних реакцій;
  - 2) відновлення в атмосфері водню;
  - 3) термохімічне розкладання;
- електрохімічне осадження.
- хімічне відновлення (осадження).

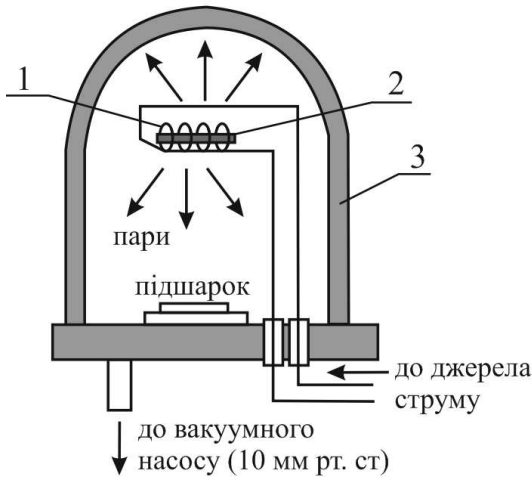
Розглянемо методи, які отримали найбільше розповсюдження.

##### **2.1.1 Термічне випаровування у вакуумі**

Термічне випаровування застосовують найбільш широко. Цим засобом осаджують метали і резистивні плівки.

Тиск у вакуумній системі встановлюють близько  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  Торр (рис. 2.1). За цих умов середня довжина вільного пробігу молекул випаровуваної речовини в багато раз перевищує діаметр ковпака, тому атоми випарованого матеріалу рухаються у всіх напрямках від джерела

прямолінійно і конденсуються на всіх поверхнях, які мають більш низьку температуру, включаючи підшарок.



1 – нитка розжарювача; 2 – випарюваний матеріал; 3 – ковпак

Рисунок 2.1 – Схема вакуумного наплення

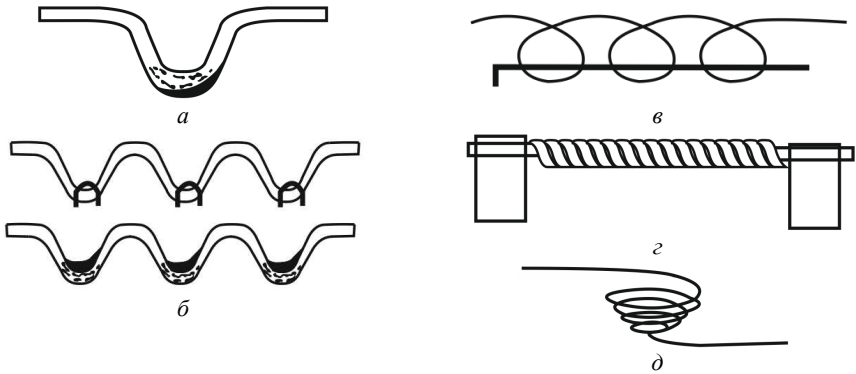
Підшарок для забезпечення надійного зчеплення з плівкою і контролю структури плівки в процесі випаровування, звичайно нагрівають і розташовують на значній відстані (як правило, декілька сантиметрів) від джерела випаровуваного матеріалу.

Існують наступні способи підігріву випаровуваного матеріалу.

**Підігрів ниткою розжарення (резистивний підігрів)** – випарюваний матеріал поміщують у випарник, який нагрівається струмом до тих пір, доки тиск пари матеріалу перевищить тиск у вакуумній системі. Випарники виготовляють із тугоплавких металів з низькою леткістю (вольфрам або молібден). На початку випаровування бажано застосовувати заслінку між джерелом і підшарком, на яку осаджується початковий шар плівки, яка містить леткі елементи. Даний спосіб використовують для наплення багатьох простих речовин, а також для деяких сполук, які не фракціонують за високих температур. Перевагою способу є простота. Недоліки: неможливо розпилювати деякі сполуки.

Нагрівання і випаровування речовини здійснюють за допомогою випарників. Резистивні випарники в залежності від їх конструкції поділяють на дровоті, стрічкові і тигельні.

*Дровоті* випарники характеризуються простотою конструкції і технології виготовлення. Матеріалом для випарників, як правило, є тугоплавкі метали: вольфрам, молібден, тантал тощо. Форма випарників може бути різною. Деякі найбільш поширені варіанти конструкцій дровотих випарників наведено на рис. 2.2.



*а* – нитка у вигляді шпильки; *б* – синусоїдальна нитка; *в* – багатожильна спіраль; *г* – стрижневий вольфрамовий нагрівач; *д* – кінцева спіраль

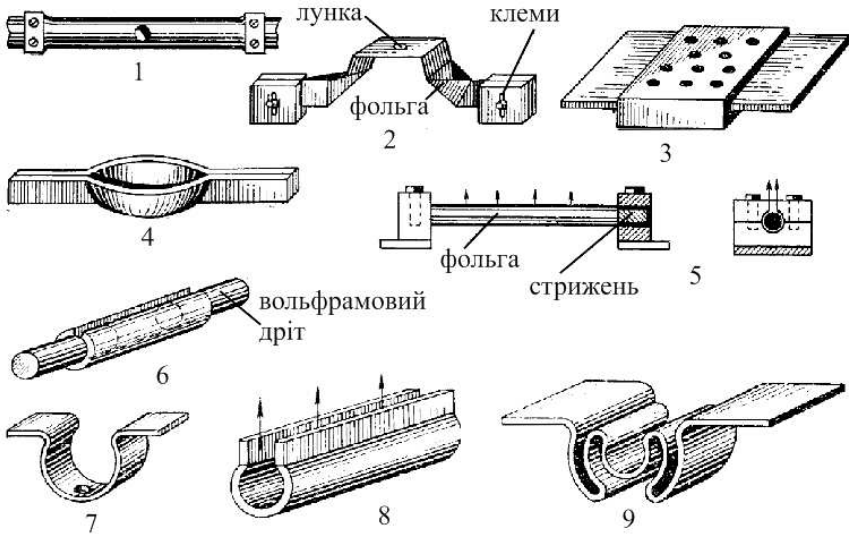
Рисунок 2.2 – Дровоті випарники

Діаметр дроту –  $0,5 \div 1,5$  мм, він має бути рівномірним по перерізу, інакше можливі локальний перегрів і наступне руйнування.

Дровоті випарники мають наступні недоліки:

- неможливо випаровувати порошки;
- випаровувані за допомогою дровотих випарників атоми речовини розпилюються у всіх напрямках і можливі її втрати (коефіцієнт корисного використання випаровуваної речовини низький).

*Стрічкові* випарники виготовляють із тонких пластин, стрічок тугоплавких металів і мають на поверхні спеціальні заглиблення, в які поміщують випаровувану речовину (рис. 2.3). Вони мають просту конструкцію і випаровують атоми металу в тілесному куті  $2\pi$ . Разом з тим вони менш економічні порівняно із дровотими випарниками.



1, 2 і 3 – поверхневі випарники; 4 – човниковий випарник;  
5–9 – циліндричні випарники

Рисунок 2.3 – Стрічкові випарники

Тигельним випарником є ванна, в яку поміщають метал. Тигель може бути виготовлений з матеріалу, який не проводить електричний струм. У цьому разі для досягнення необхідної температури випаровування використовують окремий нагрівальний елемент. Як матеріал тигля застосовують  $\text{BeO}$  ( $T_{\text{пл}} \sim 2570^\circ\text{C}$ ),  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $T_{\text{пл}} \sim 1887^\circ\text{C}$ ) графіт,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{ThO}_2$  ( $T_{\text{пл}} \sim 3390^\circ\text{C}$ ) та інші тугоплавкі матеріали. За допомогою тигельних випарників можливе нанесення товстих покриттів без застосування спеціальних систем подачі матеріалу, який випаровується в зону випаровування. В даний час розроблено велику кількість конструкцій випарників подібного типу. Основний недолік їх у тому, що газові потоки змушені проходити крізь об'єм розплавленого металу, оскільки температура найбільш висока поблизу стінок тигля. В результаті при високих температурах випаровування (швидкості випаровування) в газових потоках міститься крапельна фаза. При осадженні крапель металу на поверхні підшарку різко знижуються фізико-механічні властивості покриттів.

Певні труднощі має процес отримання покриттів із сплавів та сполук складного складу. Покриття із сплавів можна наносити двома основними способами:

- нагрівання і випаровування сплаву. При цьому необхідно враховувати, що спочатку випаровується компонента сплаву, яка має більш високий рівноважний тиск пари. У підсумку на поверхні утворюється покриття з неоднорідним по товщині хімічним складом. Для вирівнювання хімічного складу такі покриття обов'язково піддають термообробці (дифузійному відпалу);

- нанесення покриття випаровуванням компонент з окремих випарників. Таким методом, наприклад, отримують латунні покриття, випаровуючи окремо мідь і цинк. Основний недолік даного методу полягає в необхідності приймати спеціальні заходи для отримання однорідних за площею підшарка покриттів (перемішувати підшарок або випарники, використовувати екрани тощо).

Технологія отримання покриттів резистивним випаровуванням характеризується наступними основними перевагами:

- можливість нанесення покриттів з металів, діелектриків, напівпровідників;
- технологія реалізується за допомогою відносно простих пристроїв;
- можливість осадження покриттів з високою швидкістю та її регулювання в широких межах;

Разом з тим дана технологія має такі недоліки:

- висока інерційність процесу випаровування;
- труднощі керування потоком атомів;
- низька йонізація атомів в потоці і, як наслідок цього, невисока адгезія і суцільність осаджуваних покриттів;
- труднощі, а в ряді випадків неможливість отримання покриттів з тугоплавких металів.

**Індукційний підігрів.** Сполуки, які фракціонують при високих температурах, необхідно випарювати дуже швидко. Для цього використовують випарник з незначною тепловою інерцією. Нагрівання викликається вихровими струмами ВЙ, які виникають в провідному матеріалі, розміщеному в середовищі, в якому збуджується ВЙ магнітне поле. При керамічному тиглі вихрові струми виникають безпосередньо у металі, який випаровується. Непровідні матеріали випарюють

тільки з металевих тиглів. Переваги способу: мала інерційність при випаровуванні металів; можливість напилення сполук. Недоліки: неможливість безпосереднього розігрівання діелектричних матеріалів; низький коефіцієнт корисної дії; висока вартість і громіздкість обладнання.

### 2.1.2 Електронно-променевий метод

На розжарену вольфрамову нитку подається від'ємна відносно анода (випаровуваний матеріал) напруга в декілька кіловольт. Потік електронів, який виникає, фокусується на випаровуваному матеріалі і нагріває його до заданої температури. Матеріал, який випаровується, часто поміщують в охолоджуваній водою металевий тигель, який залишається холодним, оскільки він не перебуває в потоці електронів. Фокусуючи електронний промінь в невелику пляму, можна отримати високу концентрацію енергії (до  $5 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>). Можливе регулювання потоку електронів з точністю до 1 %. Метод отримав широке застосування. Переваги способу: випарювання практично будь-якого матеріалу; можливість випаровування (в одному циклі) матеріалів з різними тепловими властивостями (тобто створення плівок різних композицій); дозволяє контролювати швидкість напилення. Недолік: порівняно дорогий.

### 2.1.3 Властивості тонких плівок

Властивості тонких плівок суттєво залежать від параметрів процесу осадження: швидкості осадження, температури підшарка, залишкового вакууму і т.п.

Швидкість осадження (напилення) визначають за формулою:

$$v_u = \beta x q^{-1} R^{-2} v_u, \quad (2.1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт конденсації, який враховує умови конденсації (чистоту поверхні, температуру, інтенсивність потоку пари);

$x$  – стала, залежна від форми випарника;

$v_u = \frac{dm}{dt}$  – швидкість випаровування речовини з одиниці поверхні випарника.

Швидкість випаровування  $v_u$  обчислюють за формулою

$$\lg v_u = A - 0,5 \lg T - \frac{B}{T}, \quad (2.2)$$

де  $T$  – температура, К.

Коефіцієнти  $A$  і  $B$  визначають за таблицею. Їх значення різні для різних матеріалів.

Якість плівок в значній мірі залежить від температури підшарка. Крім того, підшарок прогрівається для знегажування його поверхні. При конструюванні нагрівачів підшарків необхідно враховувати, що підшарок отримує тепло за рахунок енергії молекул розпилюваного матеріалу.

Велика увага приділяється рівномірності розподілу температури на підшарку, оскільки ця задача є доволі складною через те, що підшарки (особливо на склі і ситалі) мають малу теплопровідність.

Плівки, осаджені на поверхню підшарків методом термічного випаровування у вакуумі, звичайно є полікристалічними. При цьому в деяких межах розміри кристалів можна контролювати. Наприклад, утворенню дрібнозернистої структури сприяє висока інтенсивність випаровування. З іншого боку, напilenня на поверхню під малими кутами падіння сприяє утворенню великих зерен, орієнтованих в напрямку падіння, що, як правило, є небажаним.

Опір шару дрібнозернистих плівок краще піддається розрахунку, ніж опір більш крупнозернистих плівок.

Товщина плівок, напilenних способами, при яких матеріал джерела випаровується повністю, визначається масою металу джерела і відстанню між джерелом і підшарком.

Товщина плівки для випарника з малою площею

$$d = \frac{M_e}{4\pi h^2 \left( 1 + \left( \frac{l}{h} \right)^2 \right)^{3/2}}; \quad (2.3)$$

для точкового випарника

$$d = \frac{M_e}{4\pi\rho h^2 \left(1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2\right)^{3/2}}, \quad (2.4)$$

де  $M_e$  – маса випареного матеріалу;

$\rho$  – його густина;

$h$  – відстань від випарника до підшарка;

$l$  – відстань від центра підшарка до даної точки.

#### 2.1.4 Використовуване обладнання

На сьогоднішній час широко застосовують метод вакуумного розпилення матеріалів: це й термічне випаровування у вакуумі і йонне розпилення. Всі ці операції проводяться на вітчизняному приладі ВУП-4 (вакуумний універсальний пост). Основна перевага приладу – його універсальність. На одній і тій самій вакуумній установці можна отримати однорідні шари металів і сплавів, здійснити металізацію поверхні будь-яких зразків, зробити очищення зразків і зменшити їх товщину йонним пучком.

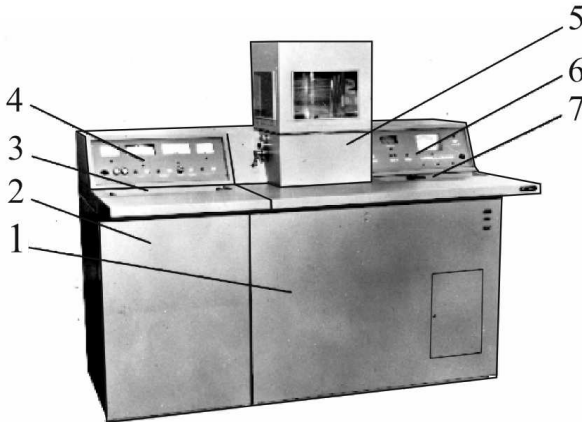


Рисунок 2.4 – ВУП-4

Прилад складається з вакуумної (1) і електричної (2) стійок (рис. 2.4). У вакуумній стійці розміщені вакуумна система, система напуску, розподільний щиток електроживлення для термічного випа-

ру. На стійці 1 у верхній частині встановлений столик 5 для вакуумного препарування (робочий об'єм). Праворуч і ліворуч від столика розташовані похилі й горизонтальні пульти керування (3,4,6,7). Усередині електричної стійки 2 розташовані високовольтний випрямляч, що живить пристрій для йонного травлення, блок живлення нагрівача й охолоджувача.

Конструкція робочого об'єму – столик для вакуумного препарування – представлена на рис. 2.5.

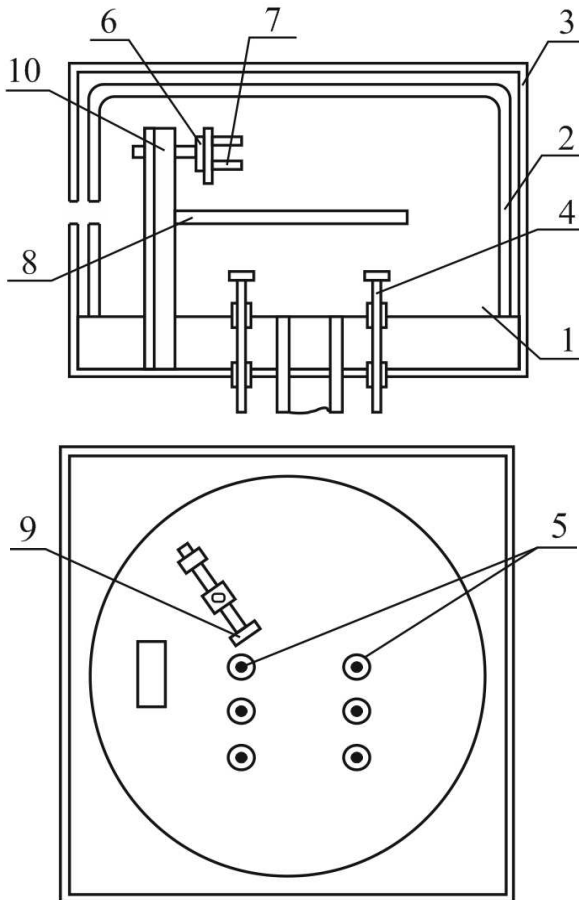


Рисунок 2.5 – Робочий об'єм ВУП-4. Схематичне зображення

Робочий об'єм утворюється основою 1 і ковпаком 2. В цілях забезпечення безпеки оператора ковпак захищений кожухом 3. Основа пристрою розташована на каркасі. До основи кріпиться термопарна манометрична лампа, вакуумне блокування та вакуумна система. Електричне з'єднання блоків живлення і контролю з пристроями, що встановлюються у робочому об'ємі, здійснюється за допомогою ізолюваних вводів. Так, наприклад, струмоведачі стійки 4 встановлюються на ізолюваних вводах, сполучених з трансформатором напруги випарників. Пристрій для термічного наплення змонтовано на столику. Воно включає стійки 4, тримачі випарників 5, маятниковий пристрій 6 зі столиком для підшарків 7, заслінку (шторку) 8, датчик індикатора наплення 9.

Маятниковий пристрій призначений для отримання під час наплення рівномірного за товщиною шару за всією площею підшарка. З цією метою столик 7 з підшарком здійснює рівномірний обертальний і коливальний рух. Пристрій встановлюється на стійці 10 (рис. 2.5) столика для термічного напильовання. Датчик індикатора напильованого шару (рис. 2.6) встановлюється на спеціальній стійці 7. Він складається з корпусу 6, в якому розташоване джерело світла 1, світлонепроникної пластинки 2 і фоторезистора 5.

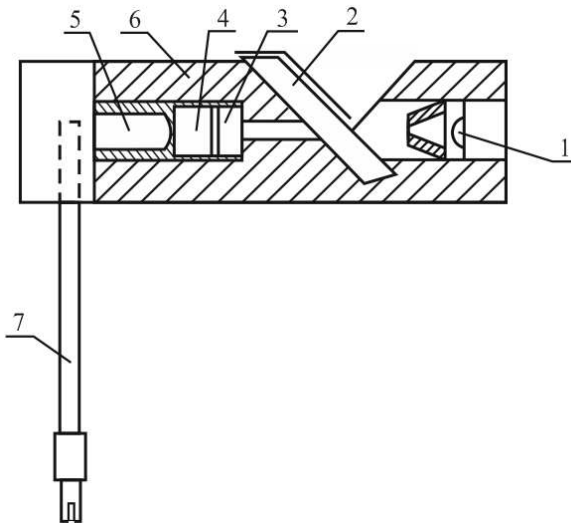


Рисунок 2.6 – Датчик індикатора товщини

Діафрагма 4 і порожнини 3 утворюють світлову пастку, яка вловлює промені, відбиті від випарника, і таким чином знищує вплив засвічення.

## **2.2 Завдання**

### **2.2.1 Підготовка вакуумного поста ВУП-4 до роботи:**

- установити контрольне скло на датчику індикатора напильювання;
- установити датчик на стійку, підключити сигнальне рознімання датчика до рознімання Ш17А;
- кнопка НАПИЛЮВАННЯ має бути виключена, а ручка РІВЕНЬ – у лівому крайньому положенні.

#### ***Порядок включення приладу:***

- натисніть кнопку "Сеть". При цьому має засвітитись сигнальна лампочка, яка знаходиться поряд з кнопкою.
- перевірте положення високовакуумного клапана і клапана напуску повітря. Вони мають бути у вимкненому положенні.
- натисніть кнопку "ФН", а через 2–3 хв кнопку "ДН" і "ВВ". При цьому мають засвітитись відповідні сигнальні лампи, які знаходяться під кнопками. Відкрийте вентиль подачі до дифнасосу;
- через 30–40 хв. натисніть кнопку "ПВ" і відкачайте робочий об'єм до 0,05–0,01 мм рт. ст. Вимірювання тиску здійснюйте з допомогою індикатора вакууму, розміщеного на правому пульті і датчика ПМТ-4М, розміщеного на робочому об'ємі, для чого:
  - 1) натисніть кнопку "ПМТ-4М" і встановіть струм накалу згідно паспорту датчика;
  - 2) натисніть кнопку "ФВ". Визначте вакуум згідно градуїрованої кривої датчика і показів вимірювального приладу.
- після досягнення вказаного вакууму натисніть кнопку "ВВ" і відкрийте високовакуумний клапан.
- виміряйте високий вакуум в робочому об'ємі, для чого:
  - 1) натисніть кнопку "ПРОГ" і витримайте в цьому режимі 10–15 хв;
  - 2) натисніть кнопку "ЭМИСС" і встановіть стрілку приладу на 5 mV;

- 3) натисніть кнопку "НУЛЬ" і встановіть нуль на вимірювальному приладі;
- 4) натисніть кнопку " $10^{-4}$ ". Якщо стрілка вимірювального приладу показує менше 1 mV даного діапазону, натисніть кнопку " $10^{-5}$ " і так далі.

Вимикання приладу:

- відкачайте робочий об'єм до тиску  $10^{-4}$  мм рт. ст.;
- закрийте високовакуумний клапан;
- натисніть кнопку над гравіюванням "індикатор вакуума".

При цьому має погаснути сигнальна лампа, розміщена над кнопкою.

- натисніть кнопку "ДН". При цьому має погаснути сигнальна лампочка, яка знаходиться над кнопкою;
- через 20–30 хв натисніть кнопку "0", натисніть кнопку "ФН" і кнопку "СЕТЬ". При цьому мають погаснути відповідні лампи;
- закрийте вентиль подачі води до дифузійного насоса.

### **2.2.2 Робота з пристроєм для термічного розпилення**

Виконайте збирання пристрою згідно рис.2.5.

Установіть випарник з досліджуваним матеріалом і столик зразків.

Відкачайте робочий об'єм до високого вакууму.

Встановіть перемикач випарників на горизонтальному пульті в положення, відповідне випарнику, із якого буде розпилюватись матеріал.

На випарниках і перемикачах є відповідні гравіювання.

Натисніть кнопку випарника "ИСП".

Рукою автотрансформатора ("РЕГ.НАПРЯЖЕНИЯ"), яка розміщена на горизонтальному пульті керування, плавно збільшуйте струм розжарювання випарника до значення, яке забезпечує повне випаровування матеріалу, який напилється.

Вимикання випарників здійснюється у зворотному порядку.

### **2.2.3 Виконання роботи**

**2.2.3.1** Провести підготовку підшарів. Для чого здійснити їх очистку за запропонованою викладачем методикою. Виміряти масу підшарків та навіски матеріалу для напилання.

**2.2.3.2** Виготовити випарник у вигляді човника, встановити в установку. Завантажити навіски матеріалу для напилення.

**2.2.3.3** Підготувати маску гребінчастої форми з металеві фольги. Встановити підшарки із маскою в робочий об'єм над випарником.

**2.2.3.4** Перевірити, при необхідності замінити датчик товщини напиленої плівки методом кварцового мікрозважування (Додаток А).

**2.2.3.5** Відкачати робочий об'єм на високий вакуум.

**2.2.3.6** Виконати осадження плівки товщиною 30–100 нм за методикою, вказаною у попередньому розділі. Для визначення товщини плівки слід скористатися показаннями приладу для кварцового мікрозважування.

**2.2.3.7** Розрахувати товщину отриманої металеві плівки ваговим методом та за допомогою мікроінтерферометра МП-2. Порівняти результати із результатами отриманими методом кварцового мікрозважування.

У випадку розпилення певної маси речовини, розрахунок виконується за формулою:

$$T = \frac{M \sin \theta}{4\pi\rho R^2},$$

де  $M$  – загальна маса випаровуваного матеріалу;

$\rho$  – питома вага;

$\theta$  – кут нахилу напиленої поверхні до випарника;

$R$  – відстань від випарника до напиленої поверхні;

$T$  – товщина напиленого шару.

Питома вага для: Pt –  $21,37 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; Au –  $19,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; Ag –  $10,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; Cu –  $8,96 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

## 2.4 Контрольні запитання

1. Методи отримання тонких металевих плівок.
2. Устрій і принцип дії установки ВУП-4.
3. Наведіть приклади використання тонких металевих плівок в технології мікроелектроніки.
4. Охарактеризуйте метод термічного випаровування у вакуумі з метою отримання тонких металевих плівок (можливості методу, область застосування, переваги і недоліки).

5. Охарактеризуйте метод термічного випаровування у вакуумі з точки зору динаміки процесу (стадії процесу, вплив умов, найбільш сприятливий режим проведення процесу).
6. Охарактеризуйте найбільш сприятливий механізм росту плівок.
7. Охарактеризуйте апаратне оформлення установки термічного випаровування у вакуумі (найважливіші блоки установки, їх призначення).
8. З якою метою необхідно проводити термічну обробку плівок після її нанесення?
9. Охарактеризуйте типи випарників у складі установки вакуумного напылення (можливості, принцип дії, переваги, недоліки).

### **3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 «МАГНЕТРОННЕ РОЗПИЛЕННЯ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ»**

**Мета роботи:** ознайомитися з методом магнетронного розпилення; отримати зразки тонких плівок та дослідити їх властивості.

#### **3.1 Теоретичні відомості**

##### **3.1.1 Принцип дії магнетронної системи**

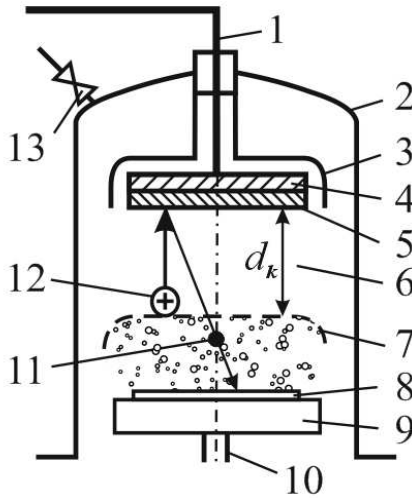
Магнетронні системи йонного розпилення є вдосконаленими діодними системами і відрізняються від них наявністю в прикатодній області електричного і кільцеподібного магнітного полів, спрямованих перпендикулярно один до одного.

Принцип дії діодної (двоелектродної) системи йонного розпилення наведено на рис. 3.1. Два основні елементи системи – катод 4 і анод 9 – розміщені в робочій вакуумній камері 2.

Катод 4 через високовольтний ввід 1 під'єднується до негативного полюсу високовольтного джерела. Напылюваний матеріал у вигляді пластини 5, яку зазвичай називають мішенню, прикріплюють до катода. Анод 9, що знаходиться під потенціалом землі, розміщують на відстані в кілька сантиметрів від катода. Підшарки 8, на які наносять плівки, закріплюють на аноді. При подачі на катод напруги близько  $3\div 5$  кВ у камері виникає тліючий розряд.

Як вже зазначалося, для тліючого розряду характерний певний розподіл потенціалу в просторі між катодом і анодом. Причому в основному падіння прикладеної напруги приходить на темновий катодний простір 6. Йони 12, які дифундують до межі позитивного стовпа 7, потрапляють на межу темного катодного простору і, прискорюючись в ньому під дією електричного поля, бомбардують мішень (катод). Вибиті з неї частинки 11 розпилюваної речовини летять у напрямку до анода 9 і осідають на підшарок 8 у вигляді тонкої плівки.

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



- 1 – високовольтний увід; 2 – вакуумна камера; 3 – екран; 4 – катод;  
 5 – пластина (мішень); 6 – темний катодний простір; 7 – позитивний стовп;  
 8 – підшарок; 9 – анод; 10 – патрубок до вакуумної системи;  
 11 – осаджувані частинки; 12 – йони; 13 – натікач

Рисунок 3.1 – Схема діодної (двоелектродної) системи йонного розпилення

Катод і анод охолоджуються проточною водою щоб запобігти перегріву. Крім того, із зворотного боку мішені на відстані 3÷5 мм розміщено екран 3 для того, щоб розряд локалізувався тільки на її лицьовому боці, а задня частина катода не піддається йонному розпиленню.

Розміром  $< d_k$  темного катодного простору визначається мінімальна відстань між мішенню і підшарком, яка зазвичай становить від 3 до 5 см. Якщо ця відстань менше, розряд гасне, оскільки шлях, пройдений електронами між катодом і анодом, занадто короткий для створення достатньої кількості йонів і електронів.

Для попередньої відкачки до вакууму порядку  $10^{-4}$  Па і подальшої підтримки робочого тиску порядку  $1 \div 10$  Па служить відкачувальна система, яку під'єднують до патрубку 10. Робочий газ вводять в камеру через натікач 13, одночасно продовжуючи відкачування через патрубок 10. Це роблять для того, щоб через камеру проходив потік чистого, постійно оновлюваного газу. Зазвичай в якості робочого використовують інертний газ – аргон дуже високого ступеня чистоти.

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

Порівняно з термовакuumним методом нанесення плівок метод діодного йонного розпилювання має ряд переваг:

- розпилюється велика площа мішені, яка виконує функції джерела атомів речовини, яка осаджується, що дозволяє осаджувати одномірні за товщиною плівки на підшарках великих розмірів і забезпечує ефективну реалізацію групового методу обробки;
- мішень є джерелом тривалої дії напилених частинок, що полегшує автоматизацію і підвищує однорідність процесу;
- значна енергія атомів, які конденсуються, забезпечує високу адгезію плівки до підшарків.

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

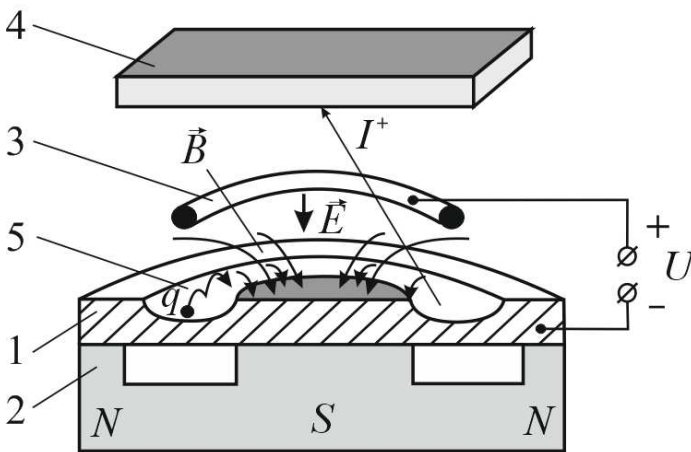
При проведенні процесу розпилення в діодних системах необхідно досить стабільно підтримувати тиск, оскільки його підвищення

збільшує ймовірність зіткнення розпиленних атомів з молекулами робочого газу. В результаті цього частина атомів не осаджується на підшарок, а розсіюється в об'ємі камери або повертається на мішень, а швидкості розпилення і осадження падають, що може спричинити невідтворюваність товщини плівки.

У даний час діодні розпилювальні системи використовують переважно при виробництві гібридних ІМС. Пояснюється це тим, що частина електронів може без зіткнення пройти простір катод – підшарок і, будучи сильно прискореними, бомбардувати анод (підшарок). Це викликає значне нагрівання підшарків, що може спричинити пошкодження напівпровідникових структур.

Основним елементом магнетронних розпилювальних систем (МРС) є катод-мішень, анод і магнітна система. Існує велика кількість різноманітних розпилювальних систем, які можуть бути поділені на 3 основні типи: системи з циліндричним катодом, системи з плоским катодом і кільцевим катодом S-типу.

Розглянемо принцип дії на прикладі магнетрона з плоскою мішенню (рис.3.2).



1 – катод-мішень; 2 – магнітна система; 3 – анод; 4 – підшарок;  
5 – зона розпилювання

Рисунок 3.2 – Схема магнетронної розпилювальної системи з плоским катодом

При подачі постійної напруги між анодом 3 і катодом 1 в області між ними виникає неоднорідне електричне поле  $E$ , яке збуджує аномальний тліючий розряд в середовищі робочого газу (зазвичай чистого Ar). Утворені йони бомбардують катод, що призводить до двох основних ефектів: емісії електронів і розпилення поверхні катода-мішені. Емітовані з катода під дією йонного бомбардування електрони прискорюються електричним полем  $E$  і починають рухатися у напрямку до анода. При наявності магнітного поля  $B$  на заряджену частинку із зарядом  $q$ , яка рухається зі швидкістю  $v$ , діє сила Лоренца  $F = qE + q[vB]$ , яка змінює напрямок руху електронів. При цьому електрони починають рухатися за складними циклоїдними траєкторіями поблизу поверхні катода – мішені. Електрони виявляються начебто в пастці, створеної дією двох складових сили  $F$ , зумовлених з одного боку електричним, з іншого – магнітним полем. Під час руху електрони здійснюють по кілька йонізуючих зіткнень з атомами робочого газу до тих пір, поки не анігілюють з йонами плазми. Такий циклоїдальний рух електронів істотно збільшує ефективність процесу йонізації, причому максимальна густина плазми виявляється сконцентрованою біля поверхні катода – мішені в області між полюсами магнітного поля. Це зумовлює збільшення інтенсивності йонного бомбардування поверхні мішені і значне зростання швидкості розпилення, а, отже, швидкості осадження атомів на поверхні підшарку 4. У результаті цього на поверхні катода утворюється канавка 5 (ерозія поверхні).

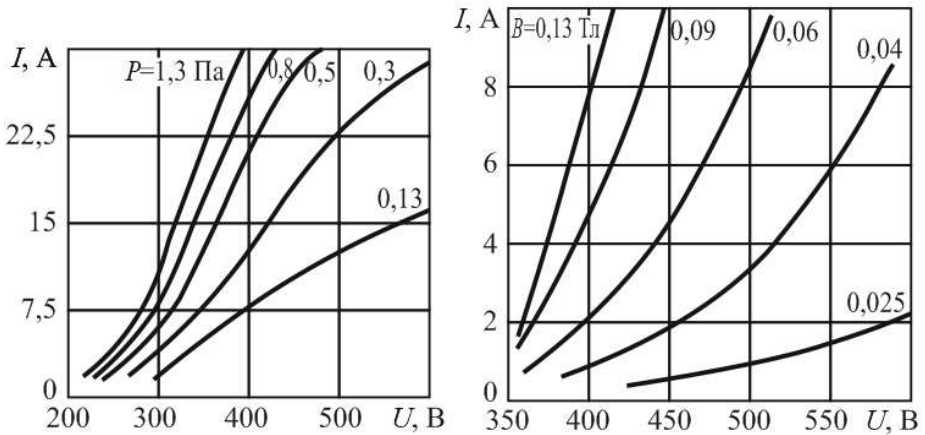
Важливою характеристикою методу магнетронного розпилення є відсутність бомбардування підшарка високоенергетичними вторинними електронами через їх захоплення магнітною пасткою. Це дозволяє уникнути перегріву поверхні підкладки 4, і, отже, дає можливість напильовати плівки на матеріали з низькою термостійкістю, причому з високою швидкістю осадження. Цей факт має велике значення для сучасних технологій, зважаючи на широке використання полімерів і композитних матеріалів. Зокрема, в мікроелектроніці і комп'ютерній техніці широко використовують такі матеріали як поліметилметакрилат (ПММА), поліімід, поліетілентерефталат, металополімерні плівки тощо, які мають температури розм'якшення і деструкції в діапазоні від 70 до 250 °C.

Для магнетронних систем основними джерелами нагрівання підшарку є:

- кінетична енергія осаджуваних атомів ( $5 \div 20$  еВ/атом);
- енергія конденсації розпилюваних атомів ( $3 \div 9$  еВ/атом);
- випромінювання плазми ( $2 \div 10$  еВ/атом<sup>2</sup>).

Сумарна теплова енергія, яка розсіюється на підкладці, а, отже, і температура підшарку залежать не тільки від конструкції і режимів розпилювальної системи, але й істотно від розпилюваного матеріалу. Типові значення сумарної теплової енергії змінюються від 10 до 70 еВ/атом, а температура підшарку при цьому, залежно від осаджуваних атомів, знаходиться в межах від 70 до 200 °С.

Однією з основних характеристик розряду є вольт-амперна характеристика (ВАХ).. Типові ВАХ магнетронних систем наведено на рис. 3.3. Як видно, істотно впливають на них робочий тиск  $P$  та індукція магнітного поля  $B$ .



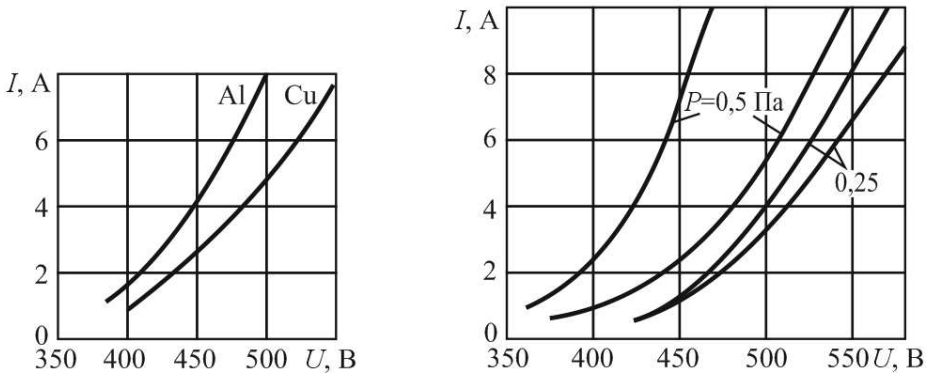
а) при різному тиску і постійному магнітному полі  $B = 0,03$  Тл;  
б) при різній індукції магнітного поля і постійному тиску  $P = 0,3$  Па

Рисунок 3.3 – Вольт-амперні характеристики магнетронних розпилювальних систем з алюмінієвою мішенню

Зі збільшенням тиску ВАХ зсуваються в область менших робочих напруг і наближаються до лінійної залежності. Аналогічно впливає й індукція магнітного поля. Близькі до лінійної залежності ВАХ спостерігаються при великих значеннях магнітного поля. Слід зазначити також, що на ВАХ розряду також впливають матеріал мішені та

її форма, яка видозмінюється по мірі розпилювання матеріалу (рис. 3.4). Так утворення виїмки в плоскій мішені призводить до зсуву ВАХ в область менших робочих напруг через поліпшення умов локалізації плазми, причому цей зсув зростає із збільшенням  $P$ .

Процес йонного розпилення матеріалу мішені залежить від безлічі факторів: енергії, маси, атомного номера і кута падіння бомбардуючих йонів; маси і атомного номера розпилюваних атомів; температури і якості обробки поверхні мішені та ін. На ефективність розпилення впливає також і величина тиску робочого газу. Очевидно, що при деякому пороговому тиску розпилення починає зменшуватися.



- а) з плоскою мішенню із різних металів при  $P=0,5$  Па і  $B=0,08$  Тл;  
 б) з конічною новою (суцільні лінії) і підданий ерозії (штрихові лінії) мішенями при  $B=0,06$  Тл і різному тиску

Рисунок 3.4 – ВАХ магнетронної системи розпилювання

Це пояснюється збільшенням імовірності повернення розпилених атомів на мішень при збільшенні тиску внаслідок процесів зворотної дифузії і зворотного розсіювання. Під зворотною дифузією слід розуміти повернення на мішень розпилених атомів, які мають середню кінетичну енергію, що дорівнює середній кінетичній енергії атомів робочого газу. Таке повернення може відбуватися з відстаней, які значно перевищують довжину вільного пробігу розпилених атомів  $\lambda_a$ . Зворотне розсіювання представляє собою повернення розпорошених атомів на мішень у результаті розсіювання на атомах робочого газу. Цей процес відбувається на відстанях, що не перевищують  $\lambda_a$  і характери-

зується відмінністю кінетичних енергій і мас частинок, які зіштовхуються. Залежно від співвідношення мас атомів розпилюваного матеріалу і атомів робочого газу переважає той чи інший процес повернення розпиленних атомів на мішень.

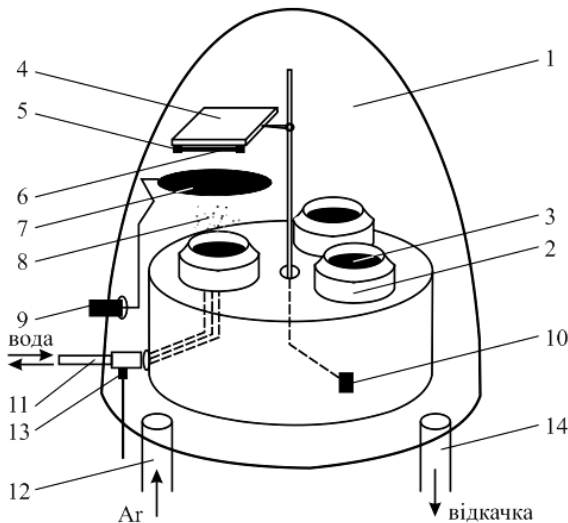
## 3.2 Використовуване обладнання

### 3.2.1 Магнетронна розпилювальна система ВУП-5М

Вакуумний універсальний пост ВУП-5М призначений для отримання плівок з різних матеріалів методом магнетронного розпилення.

Прилад виконаний однією стійкою, в якій розміщені робоча камера, вакуумна система, блоки живлення і пульт управління.

У робочій камері встановлено три магнетронних розпилювача з плоскою мішенню, схематичне зображення яких показано на рис. 3.5, з тією лише різницею, що зона розпилення замикається в коло.



- 1 – робочий об'єм; 2 – магнетрон; 3 – змінна мішень; 4 – підшаркотримач;  
 5 – притискач; 6 – підшарок; 7 – заслінка; 8 – плазма тліючого розряду;  
 9 – ручка для обертання заслінки в робочому об'ємі; 10 – ручка для обертання підшаркотримача в робочому об'ємі; 11 – водяний шланг; 12 – кран напуску робочого газу;  
 13 – високовольтний увід; 14 – відкачування дифузійним насосом

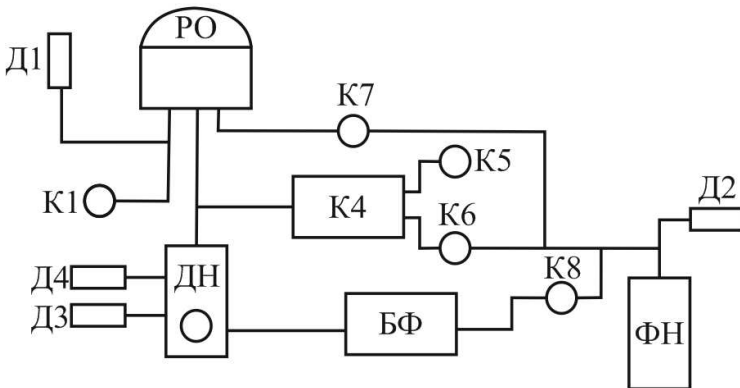
Рисунок 3.5 – Робоча камера магнетронної розпилювальної системи ВУП-5М

Перед напilenням на магнетрон 2 встановлюють катод – мішень 3, закріплюють підшарок 6 на тримачі 4, перевіряють роботу заслінки 7 і відкачують вакуумну камеру до  $\sim 10^{-4}$  Па. За допомогою крану 12 напускають робочий газ аргон, тиск якого дорівнює  $0,5 \div 5 \cdot 10^{-5}$  Па. На катод подають негативну напругу відносно анода.

*Основні параметри і характеристики МРСВУП-5М:*

- залишковий тиск в камері, створюваний дифузійним насосом при працюючій азотній пастці  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па;
- максимальна напруга на виході високовольтного випрямляча джерела живлення магнетрона – не менше 0,9 кВ;
- максимальний струм магнетрона – не менше 300 мА;
- температура підшарка – до 1000 °С;
- час нагрівання підшарка – не більше 30 хв;
- час зміни підшарків не більше 7 сек, швидкість обертання підшарків не менше 0,5 сек.

Керування магнетронною системою ВУП-5М здійснюється з пульта управління. За допомогою пульта забезпечується вихід в робочий режим вакуумної системи з холодного стану і комутація вакуумної системи під час роботи. Схему вакуумної комутації ВУП-5М наведено на рис. 3.6.



РО – об'єм робочий; ДН – насос дифузійний; ФН – насос форвакуумний; БФ – балон форвакуумний; К1...К8 – клапани комутації вакуумної системи;  
Д1, Д2, Д4 – датчики термпарні ПМТ-2; Д3 – датчик іонізаційний ПІМІ-2

Рисунок 3.6 – Схема вакуумної комутації ВУП-5М

### **3.2.2 Порядок проведення роботи на установці ВУП-5М**

**3.2.2.1** Вивчити устрій і принцип дії магнетронної розпилювальної системи ВУП-5М.

**3.2.2.2** Освоїти порядок проведення технологічних операцій з виготовлення тонких плівок методом магнетронного розпилення на установці ВУП-5М.

**3.2.2.3** Отримати експериментальну ВАХ розряду магнетронної системи і проаналізувати її.

**3.2.2.4** Отримати декілька зразків, використовуючи в якості мішені запропоновані матеріали.

**3.2.2.5** Визначити товщину, рівномірність плівки по товщині, швидкість напilenня.

### **3.2.3 Підготовка установки ВУП-5М до напilenня**

**3.2.3.1** Включити загальний рубильник 380 В.

**3.2.3.2** Відкрити воду через дифузійний насос ВУП-5М, перевірити її наявність.

**3.2.3.3** Натиснути кнопку "СЕТЬ" на блоці керування.

**3.2.3.4** Натиснути кнопку НФ (насос форвакуумний).

**3.2.3.5** Після досягнення вакууму  $1,5-10^{-1}$  мм рт.ст. на форвакуумному насосі (на індикаторі вакууму натиснута кнопка "Д2") натиснути кнопку "ВФ" для попереднього відкачування буферного балона.

**3.2.3.6** Після досягнення вакууму  $1,5-10^{-1}$  мм рт.ст. в буферному балоні (на індикаторі вакууму натиснута кнопка "Д4") включити дифузійний насос натискаючи кнопку "НД" на пульті керування.

**3.2.3.7** Після розігріву дифузійного насоса (~45 хв.) залити азот в азотну пастку.

### **3.2.4 Установка підшарків**

**3.2.4.1** Напустити повітря в робочий об'єм (РО) натисненням кнопки "НВ" на блоці керування (або на виносному пульті).

**3.2.4.2** Відкинути ковпак РО.

**3.2.4.3** Установити підшарки на тримачі під керівництвом лаборанта.

**3.2.4.4** Установити мішень розпалюваної речовини на катод магнетронної системи.

**3.2.4.5** Перевірити працездатність заслінки.

### **3.2.4.6 Закрити ковпак РК.**

## **3.2.5 Відкачування**

**3.2.5.1** Відкрити байпасний клапан натисненням кнопки "ПВ".

**3.2.5.2** Для контролю вакууму в камері натиснути кнопку "Д2" секції "індикація" блоку керування.

**3.2.5.3** Чекати досягнення значення вакууму  $(6 \div 8) \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. (на індикаторі сигнал буде понад 230 под.).

**3.2.5.4** Відкрити затвор, натискуючи кнопку "ВВ" виносного пульта.

**3.2.5.5** Чекати досягнення вакууму  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. (на індикаторі сигнал буде понад 999 под.).

**3.2.5.6** Включити йонізаційний датчик вимірювання тиску в камері. Для цього натиснути разом кнопки "эмис" і "накал". Чекати 5–10 хв. прогрівання йонізаційного датчика.

**3.2.5.7** Для контролю вакууму відтиснути кнопки "эмис" и "накал" і вибрати необхідний діапазон тиску  $10^{-5}$  або  $10^{-7}$  на секції "індикация".

**3.2.5.8** Чекати досягнення необхідного значення вакууму в об'ємі.

**3.2.5.9** Прокачати аргонову магістраль, послідовно відкривши п'єзоелектричний натікач і наступні крани аж до редуктора. Для відкривання п'єзоелектричного натікача натиснути кнопку "травление вкл" секції "режим" и вивести ручку "ток ИТр" по годинниковій стрілці до упора.

**3.2.5.10** При відкритій магістралі чекати відкачування до необхідного значення вакууму в камері.

## **3.2.6 Напилення**

**3.2.6.1** Регулятором напруги встановити по значенню ЕРС термомпарі необхідну температуру підшарків.

**3.2.6.2** Перед напуском газу закрити п'єзоелектричний натікач поворотом ручки "ток ИТр" проти годинникової стрілки до упора і відтиснувши кнопку " травление вкл" секції "режим".

**3.2.6.3** Відкрити кран балона за допомогою редуктора, виставити стрілку витратоміра на значення в області від 5 до 10 л/хв (під керівництвом лаборанта).

**3.2.6.4** Натиснути кнопку "травлення вкл" секції "режим" і за допомогою потенціометра "ток ІТр" і заслінки над дифузійним насосом виставити тиск аргону в камері на рівні  $(1 \div 4) \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. (на індикаторі 650-320 поділок). Тиск фіксується датчиком "Д1".

**3.2.6.5** Подати високу напругу на магнетрон, натиснувши наступні кнопки секції "режим": потужність "вкл"; випаровувач "ІТр".

**3.2.6.6** За допомогою ручки потенціометра "потужність І" виставити необхідну напругу (500 В), що фіксується на стрілочному індикаторі "напруга".

**3.2.6.7** Виставити струм розряду за допомогою стрілочного індикатора "ток".

**3.2.6.8** За допомогою регулювання тиску і потужності зкоригувати режим напilenня і зафіксувати його стабільне положення, що зберігається протягом не менше 1 хв.

**3.2.6.9** Відкрити заслінку, включити секундомір.

**3.2.6.10** По завершенні процесу напilenня закрити заслінку. За допомогою ручки "потужність І" зняти напругу, вимкнути кнопку потужність "вкл".

**3.2.6.11** Закрити редуктор балону з аргonom.

**3.2.6.12** Вимкнути нагрівач підшарку у зворотній послідовності.

**3.2.6.13** Прокачати аргонову магістраль до значення, яке відповідатиме початковому вакууму.

**3.2.6.14** Закрити магістраль у зворотній послідовності (від балона до п'єзоелектричного натікача).

**3.2.6.15** Чекати охолодження підшарку до необхідної температури (зазвичай до  $T < 80$  °С).

## **3.2.7 Виймання зразків з РВ**

**3.2.7.1** Натиснути кнопку "НВ" або на пульті, або на блоці управління.

**3.2.7.2** Відкинути ковпак РК, вийняти підшарки і контрольні зразки фотометричного контролю.

## **3.2.8 Вимкнення установки ВУП -5М**

**3.2.8.1** Закрити ковпак над робочим об'ємом.

**3.2.8.2** Відкачати робочу камеру до тиску  $3 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.

**3.2.8.3** Натиснути кнопку "Стоп" на пульті управління.

**3.2.8.4** Дочекатися остигання дифузійного насоса – загориться індикатор «Стоп».

**3.2.8.5** Відключити форнасос – відтиснути кнопку "ФН".

**3.2.8.6** Відтиснути кнопку "Мережа".

**3.2.8.7** Відключити за допомогою рубильника напругу 380 В.

**3.2.8.8** Закрити воду, охолоджуючу дифузійний насос.

### **3.3 Лабораторне завдання**

**3.3.1** Відкачати ВУП-5М на високий вакуум.

**3.3.2** Відкрити ковпак, встановити підшарок для плівки із сформованими контактними ділянками (отримані на попередній лабораторній роботі).

**3.3.3** Встановити в магнетрони матеріали для напилення (за вказівкою викладача).

**3.3.4** Закрити РО та відкачати на високий вакуум.

**3.3.5** Здійснити напилення тонких плівок методом магнетронного розпилення у послідовності вказаною викладачем.

**3.3.6** Дослідити неоднорідність товщини отриманих плівок за зміною електропровідності плівки. Зробити висновки.

**3.3.7** Виміряти товщину ваговим методом, а також на мікроінтерферометрі МІІ-2. Зробити висновки.

### **3.4 Контрольні запитання**

- 1 Основні методи отримання тонких плівок. Принципи, що лежать в основі цих методів. Переваги і недоліки.
- 2 Класифікація систем йонно-плазмового розпилення матеріалів.
- 3 Принцип дії магнетронної системи розпилення. Розпилення на постійному струмі.
- 4 Область розрядного проміжку. Рух заряджених частинок в схрещених електричному і магнітному полях.
- 5 ВАХ розряду. Умови існування стабільного розряду.
- 6 Порядок роботи на установці ВУП-5М.
- 7 Охарактеризуйте метод катодного розпилення з метою отримання тонких металевих плівок (можливості методу, область застосування, переваги і недоліки).

- 8 Охарактеризуйте метод катодного розпилення з точки зору динаміки процесу (стадії процесу, вплив умов, найбільш сприятливий режим проведення процесу).
- 9 Охарактеризуйте апаратне оформлення установки катодного розпилення (найбільш важливі блоки установки, їх призначення).
- 10 Під дію чого відбувається розпилення катода–мішені. Механізм йонізації робочого газу. Критерії вибору робочого газу.
- 11 Охарактеризуйте метод йонно-плазмового розпилення з точки зору динаміки процесу (стадії процесу, вплив умов, найбільш сприятливий режим проведення процесу).

## **4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 «ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОНКИХ ПЛІВОК»**

**Мета роботи:** ознайомитися з основними властивостями тонких плівок.

### **4.1 Теоретичні відомості. Фізичні властивості тонких плівок**

Фізичні процеси у тонких плівках протікають інакше, ніж у масивних зразках чи товстих плівках. Чим більш тонкою є плівка, тим наочнішими стають ці відмінності.

#### **4.1.1 Механічні властивості**

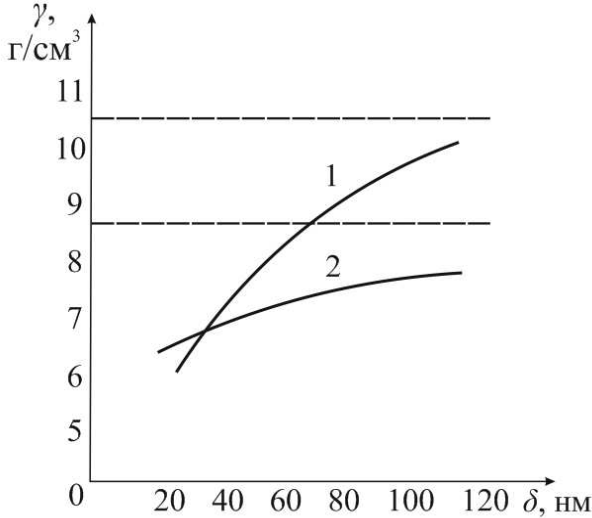
Густина тонких плівок, отриманих вакуумним напиленням, набагато менша за густину масивного зразка. Залежність густини від товщини для плівок міді і срібла зображена на рис. 4.1. Добре видно, що зі збільшенням товщини густина плівок наближається до густини масивного матеріалу (штрихові лінії).

Характер залежності щільності від товщини визначається умовами росту плівки. Плівки будуть щільніші як при збільшенні швидкості осадження, так і при підвищенні температури.

Міцність тонких плівок може бути значно більша міцності об'ємних зразків. Це пов'язано з тим, що в тонких плівках дислокації

блоковані на поверхні та майже не беруть участі в пластичній течії, а також з тим, що плівці взагалі властива розупорядкована структура.

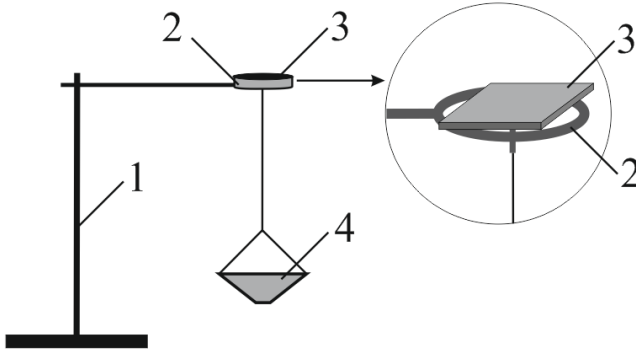
У плівках можуть виникати значні напруги через різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення плівки і підшарку, що приводить до температурного розширення (або стискання) плівок.



1 – плівка Cu; 2 – плівка Ag; пунктирні лінії – густина монолітних зразків Cu, Ag

Рисунок 4.1 – Криві залежності густини від товщини

Для дослідження механічних властивостей гетеромежі плівка–підшарок можна провести вимірювання адгезії плівки. Вимірювання адгезії може бути виконано проведенням руйнуючого контролю шляхом вимірювання зусилля відриву плівки від підшарку. Дослідження проводять у наступній послідовності. За допомогою, наприклад, швидкозсихаючого клею на основі ціанакрилату виконується приклеювання металевого стрижня діаметром 0,5 мм до поверхні зразка. Зразок, перед відривом, витримують протягом певного часу для того, щоб клейове з'єднання не вносило похибку в вимірювання. Схема проведення вимірів представлена на рис. 4.2.



1 – штатив; 2 – кільце – підшарок; 3 – зразок; 4 – кошик для гирьок

Рисунок 4.2 – Схема дослідження адгезійних параметрів

Зразок 3 з приклеєним до нього стрижнем закріплюється на підставці 2 штативу 1. До металевого стрижня прив'язана корзинка. В корзинку по чергово накладаються грузики до моменту руйнації з'єднання. Місце відриву стрижня фотографується через мікроскоп та аналізується, що дозволить одночасно оцінити як адгезію з'єднання плівка–підшарок, так і когезію самої плівки. Сила відриву може бути розрахована як відношення ваги до площі відриву.

#### 4.1.2 Електрофізичні властивості

Залежно від стадії росту плівка може бути острівцевою (складатися з дискретних частинок), пористою (сітчастою) або суцільною. Це значно впливає на її електрофізичні властивості.

Різні ефекти, які приводять до зміни електрофізичних властивостей матеріалів в тонких плівках порівняно з масивними зразками, і які пов'язані з товщиною плівки, називають розмірними ефектами.

Провідність дуже тонких (не суцільних) плівок на багато порядків менша провідності масивного матеріалу. Механізм провідності у цьому випадку не залежить від типу матеріалу і визначається одними і тими ж явищами як для металевих, так і для напівпровідникових і діелектричних плівок. В тонких плівках можуть виникати наступні розмірні ефекти:

- у металевих – довжина вільного пробігу електронів може бути обмежена товщиною плівки;

- у напівпровідникових – зменшення рухливості носіїв;
- у діелектричних – істотну роль відіграє об'ємний заряд носіїв, які інжектуються з контактів.

Властивості металів в плівках відмінні від об'ємних з наступних причин:

- при вакуумному напиленні плівок метали тривало взаємодіють з газами або залишковими середовищами вакууму: водою, киснем, тому окислені металеві фази виявляються на зовнішній або внутрішній межах плівки;

- металеві плівки взаємодіють з підшарком і оцінка властивостей (наприклад, електричних) йде спільна;

- адгезія (міцне зчеплення плівки з підшарком) має бути задовільною, інакше можливе відшарування плівки. Як правило, вище адгезія у металів перехідних груп (МПП), які утворюють міцні оксиди, наприклад, у Ti, Ni, Cr, сплаву ніхром. Адгезія у металів 1 групи Cu, Au – мінімальна. Отже для надійних провідних шарів потрібні тонкі адгезійні підшари. Крім того, адгезія поліпшується при підвищених температурах утворення плівок;

- ТКЛР на межі плівка – підшарок спричинює напруження, утворення дислокацій, навіть деформацію підшарків. Прогнуті навіть на одиниці мікрон напівпровідникові підшарки незручні і ненадійні (можуть розколотися!) при подальшій обробці;

- у деяких плівках після напилення йдуть активні дифузійні реакції на межі (відриваються приладові контакти на мікроприладах);

- у дуже тонких плівках з'являються розмірні ефекти провідності. При довжині пробігу електрона, порівняної з товщиною плівки, виникає додаткове розсіювання носіїв відбиття від обох меж плівки – від зовнішньої і від підшарку. Залежність опору і температурного коефіцієнта опору від товщини плівки металу наведено на рис.4.3;

– формула  $R = \frac{\rho l}{b\delta}$  стає обмежено вірною, з урахуванням

$$\rho = f(\delta).$$

- в основі формування властивостей плівок лежить острівцевий механізм зростання. Також властивості плівок залежать від способів отримання.

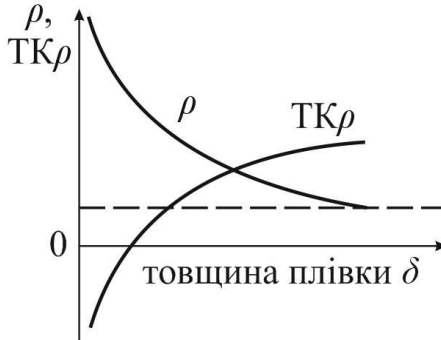


Рисунок 4.3 – Залежність питомого опору і температурного коефіцієнту опору від товщини плівки

#### 4.1.3 Вимірювання електричного опору тонких плівок

Структура і домішковий склад тонких плівок значно впливають на величину їх електропровідності. Крім того, електропровідність тонких плівок різко залежить від їх товщини (рис. 4.3), тому, вимірюючи електричний опір плівок, можна контролювати їх товщину, структуру і хімічний склад. А тому, що ці параметри залежать від режимів нанесення тонких плівок, то по електроопору можна сказати про умови їх отримання.

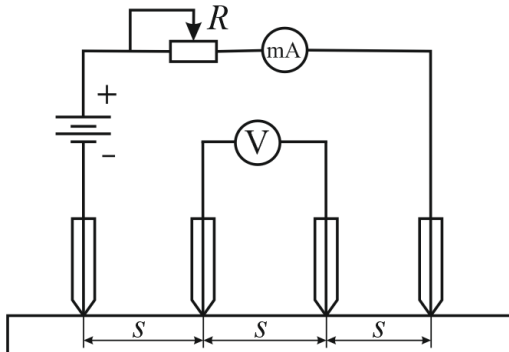


Рисунок 4.4 — Схема вимірювання питомого опору

Найбільш точним методом вимірювання електричного опору є 4-зондовий метод (рис. 4.4). За даними про міжелектродну відстань  $s$ , струм збудження  $I$  та напругу  $U$  обчислюють питомий електроопір  $\rho$ , Ом·см:

$$\rho = 2\pi s \frac{U}{I} . \quad (4.1)$$

Для визначення питомого опору тонкої пластини необхідно в (4.1) увести функцію поправок  $f$ , яка залежить лише від відношення товщини пластини  $h$  до міжелектродної відстані  $s$ :  $f = f(h/s)$ , і маємо

$$\rho = 2\pi s f \frac{U}{I} . \quad (4.2)$$

Значення функції  $f$  наведені у довідниках.

Чотиризондовий метод можна застосовувати і для вимірювання питомого поверхневого опору  $\rho_s$  тонких дифузійних шарів та шарів, отриманих методами напilenня. Питомий поверхневий опір можна розрахувати за формулою:

$$\rho_s = 4,532 \frac{U}{I} . \quad (4.3)$$

Питомий опір  $\rho$  за умов однорідності властивостей плівки пов'язаний з  $\rho_s$  співвідношенням:

$$\rho = \rho_s h . \quad (4.4)$$

## 4.2 Завдання до лабораторної роботи

**4.2.1** Занести до звіту схему вимірювальної установки та підготувати таблицю для запису результатів. Виміряти напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  у різних точках поверхні зразків плівок, отриманих при проведенні лабораторних робіт № 2 та № 3а на достатній відстані від країв з метою нейтралізації крайових ефектів. Розрахувати середнє арифметичне значення  $U$ .

**4.2.2** Розрахувати питомий об'ємний та поверхневий опори, використовуючи відповідно формули (4.2) і (4.3).

**4.2.3** Порівняти результати розрахунків із теоретичними даними, зробити висновки.

**4.2.4** Дослідити адгезію плівок, отриманих методом термічного напilenня у вакуумі та магнетронним розпиленням.

**4.2.5** Провести відпал зразків плівок отриманих різними методами у муфельній печі при температурі 300 °С протягом 30 хвилин.

**4.2.6** Провести дослідження адгезії плівок після відпалу.

**4.2.7** Порівняти результати досліджень 4.2.4 та 4.2.6, зробити висновки.

### **4.3 Контрольні запитання**

1. Як залежить густина плівки від товщини?
2. Чому міцність тонких плівок відрізняється від міцності масивного матеріалу?
3. Як розрізняють плівки в залежності від стадії росту?
4. Що таке розмірні ефекти?
5. Чому провідність тонких плівок відрізняється від провідності об'ємних зразків?
6. Як змінюється адгезія з підвищенням температури?
7. Які параметри можна контролювати, вимірюючи електричний опір плівок?
8. Які метали мають найменшу та найбільшу адгезію?
9. Із чим пов'язана залежність питомого опору і температурного коефіцієнту опору від товщини плівки?
10. Що відбувається при старінні плівок?
11. Які існують методи контролю механічних властивостей плівок?
12. В чому сутність 4-х зондових методів вимірювання опору, які його недоліки?
13. Від чого залежить адгезія плівок до підшарів?
14. Які області використання отриманих на лабораторній роботі тонких плівок?

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Парфенов О.Д. Технология микросхем. - М.: Высшая школа, 1986. - 320 с.
- 2 Матсон З.А. Конструкции и технология микросхем. - Минск: Высшая школа, 1985. - 208 с.
- 3 Жиров Г.А. Технология гибридных интегральных схем. - К.: Высшая школа, 1976. - 240 с.
- 4 Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технология микросхем. - М.: Советское радио, 1980. - 256 с.
- 5 Джовет Ч.Е. Технология тонких и толстых пленок для микроэлектроники. - М.: Металлургия, 1980. - 112 с.
- 2 Практичні методи в електронній мікроскопії. Під ред. Одримглоэра – Л.Л.1980. С. 44- 86.
- 3 Пост вакуумний універсальний ВУП-4: Технічний опис і інструкція для експлуатації ЦФ2. 950. 056 ТЕ. - Суми. 1986. - № I.
- 1 Кузьмичев А. Магнетронные распылительные систем. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. М.: Аверс, 2008. - 244 с.
- 2 Физика твердого тела: Лабораторный практикум / Под ред. Проф. А.Ф.Хохлова. Том 1. - Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2000.- 360 с.
- 3 Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 328с.
- 4 Технология тонких пленок. Справочник. Т1/ Под ред.Л.Майсела, Р.Гленга. М.: Сов.радио, 1977.- 664 с.
- 5 Данилин Б.С., Сырчин В.Н. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982.- 72 с.
- 6 Курносов А.И. Юдин В.К. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 366 с.
- 7 J. Musila, P. Barocha, J. Vlceka, K.H. Name and J.G. Hanc, Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends, Thin Solid Films, V. 475, Issues 1-2, 2005, P. 208-218
- 8 P. Kelly, C. F.Beevers, P. Henderson, R. D. Arnell, H. Backer, J. W. Bradley, A comparison of titanium-based films produced by pulsed and continuous DC magnetron sputtering, Surface and coatings technology, 2003, vol. 174/175, pp. 795-800.
- 9 I. Safi. Recent aspects concerning DC reactive magnetron sputtering of thin films: a review. Surface and Coatings Technology, V. 127, Issues 2-3, 2000, P. 203-218.

## Додаток А

### Метод кварцового мікрозважування

Методи визначення товщини плівок досить різноманітні. Гравіметричні методи (мікрозважування, метод кварцового резонатора) основані на вимірюванні мас тонкоплівкових покриттів, за якими потім розраховуються товщини. Оптичні методи основані на інтерференції, оскільки товщини плівок за порядком величини близькі до довжин хвиль оптичного випромінювання, зокрема поширеною в технології мікроелектронних приладів є так звана еліпсометрія. Використовуються також електричні методи (в основному контроль електричного опору для провідних плівок і ємності для діелектричних) і ряд інших.

Властивості тонких плівок дуже чутливі до технології їх виготовлення. Плівки, які мають однакову товщину, залежно від умов їх отримання можуть мати зовсім різні питомі опори, температурні коефіцієнти опору, діелектричні втрати, коефіцієнти поглинання світла і т.п. Тому в технології ІС часто більш важливо не вимірювання товщини плівки після її отримання, а можливість керувати товщиною в процесі нанесення.

*Метод кварцового вібратора* базується на вимірюванні відхилень резонансної частоти п'єзоелектричного кварцового вібратора. Відхилення зумовлено зміною маси кварцової пластини при напilenні на неї тонкої плівки. П'єзоелектричні властивості пластин кварцу в першу чергу визначаються кристалографічною орієнтацією зрізків по відношенню до головних осей монокристала.

Усі величини, що фігурують у формулі визначення товщини плівки, є відомими параметрами кварцової пластини і визначені з деякою погрешністю.

П'єзоелектричний резонатор (ПР) – різновид перетворювачів електромеханічного типу. Основа п'єзорезонатора – механічний вібратор з кристалічного або напівкристалічного п'єзоелектричного матеріалу, що виконується зазвичай у вигляді елемента правильної форми (прямокутної пластини, диска, стрижня і т.п.).

На вібратор (п'єзоелемент) наноситься система з двох або більше електродів, що використовуються для порушення в ньому механічних коливань. Для з'єднання з джерелом електричної енергії ПР забезпечується струмопідводами, а для фіксації в приєднаній конструкції – елементами кріплення.

В основі роботи п'єзоелектричного резонатора (рис. А.1) лежить п'єзоэффект, який забезпечує перетворення вхідної електричної напруги, яка підводиться до електродів, в механічне напруження в тілі

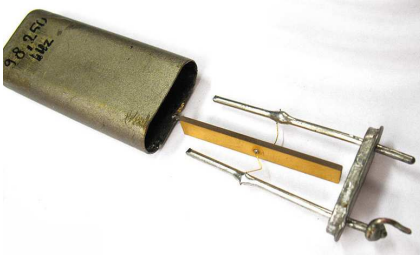


Рисунок А.1 – Кварцовий резонатор

вібратора (зворотний п'єзоэффект), і відповідну реакцію по ви ходу у вигляді зарядів на електродах , що виникають в результаті деформацій вібратора під дією механічних напруг (прямий п'єзоэффект).

Оборотність п'єзоелектричних перетворювачів дозволяє виконувати елемент у вигляді двополюсника.

Отже, блок-схема пристрою для вимірювання товщини тонких плівок на основі методу кварцового мікрозважування буде виглядати так, як наведено на рис. А.2.

У певному інтервалі товщин плівок зміна частоти кварцового генератора буде прямо пропорційна масі осадженої плівки, а, отже, і її товщині.



Рисунок А.2 – Блок схема пристрою для вимірювання товщини плівки