

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ №5

**ВИВЧЕННЯ МАГНЕТРОННИХ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ
СИСТЕМ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК**

**3 КУРСУ
«ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ»**
Для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої»

Київ 2014

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи магнетронних розпилювальних систем, їх конструкціями, виміряти основні параметри й вивчити технологію одержання за їх допомогою тонкоплівкових покриттів

Фізичні основи процесу іонно-плазмового напилювання плівок

Іонне розпилення при низьких тисках є одним з найбільш перспективних методів виготовлення мікросхем оскільки воно дозволяє одержувати різноманітні тонкі плівки при малому ступені забруднення. Сутність процесу нанесення тонких плівок полягає в створенні в робочому об'ємі установки газового розряду, подачі від'ємного потенціалу відносно газорозрядної плазми на електрод, що розпилюється, бомбардуванням іонами негативного електрода, а потім в осадженні розпиленого матеріалу на підкладці.

У такий спосіб для нанесення тонких плівок методом іонного напилювання необхідно вирішити два завдання: по-перше, створити інтенсивний потік іонів на електрод, що розпилюється, для одержання високої швидкості розпилення й збільшення продуктивності процесу, а по-друге, зменшити розсіювання матеріалу у робочому газі під час його підльоту до підкладки.

Основні відомості про магнетронні системи

У технології мікроелектронних приладів широко використовуються нові системи іонно-плазмового напилювання - магнетронні розпилювальні системи (МРС) різного типу, що слугує в основному для металізації ІМС. Типова МРС, як правило, містить один або кілька магнетронів, джерело живлення пристрою автоматичної підтримки тиску робочого газу й керування технологічним процесом і т.д.

Метод магнетронного розпилення заснований на використанні схрещених магнітних і електричних полів для підвищення ефективності іонізації робочого газу й створення над поверхнею катода-мішені області щільної плазми. Розроблено три базові конструкції магнетронів (рис. 1). Всі вони – циліндрична, планарна і з кільцевим катодом мають спільні риси. Ці конструкції являють собою двоелектродні розпилювальні системи, тобто містять анод і катод-мішень, виготовлений з матеріалу, що розпилюється, і перебуває під негативним потенціалом. У всіх випадках для формування плазми використається магнітне поле, лінії якого перпендикулярні до ліній електричного поля, мають значну кривизну й проходять через поверхню катода-мішені. Зона тліючого розряду щільної плазми низького тиску має замкнуту конфігурацію й локалізована над певною ділянкою поверхні катода-мішені, в області дії магнітного поля, де й відбувається активне розпилення матеріалу.

Області розряду в різних системах магнетронів мають неоднакову форму, тому й форми зони ерозії мішені, що являється однією з найважливіших характеристик магнетронів, різні.

Формування області розряду із заданими параметрами пов'язане з конструюванням всіх функціональних вузлів магнетронів, що забезпечує якісні характеристики розпилювальних систем, і зокрема, високі швидкості осадження матеріалу що розпилюється.

Розглянемо принцип роботи МРС із плоскою мішенню (рис. 2). При включенні напруги між катодом і анодом при тиску робочого газу порядку 0.3 Па запалюється тліючий розряд. Іони з розряду, бомбардуючи катод, викликають емісію електронів. Прискорюючись електричним полем ці електрони підтримують розряд, і, під впливом поперечного магнітного поля, рухаються по складних циклоїдних траєкторіях. При цьому електрони потрапляють ніби у пастку: з одного боку, магнітне поле повертає їх на катод, а з іншого - поверхня катода їх відштовхує. Тривала циркуляція електронів сприяє посиленню процесу іонізації, концентрація іонів у поверхні катода росте. Плазма концентрується в області магнітного поля безпосередньо в мішені. Інтенсивність бомбардування мішені іонами із плазми в такій конструкції і, отже, швидкість розпилення катода й нанесення плівок значно збільшуються.

Рух заряджених часток у плазмі, на якій накладені неоднорідні електричні й магнітні поля досить складний. Він складається зі спрямованого, дифузійного і дрейфового, переміщень, а також циклотронного обертання.

Робота магнетронних систем при відносно малих тисках робочого газу спричиняє переважно спрямований рух електронів і іонів у плазмі. Існуючі в ній області об'ємного заряду, катодного й анодного спадів напруги, характеризуються високими напруженостями полів. Відношення напруженості до тиску є критерієм оцінки виду руху часток у плазмі, перевищує 10^5 В/мПа .

Циклотронне обертання заряджених часток плазми відбувається в площині, перпендикулярній до магнітного поля. Це обертання характеризується циклотронною частотою:

$$\omega = \frac{e \cdot z \cdot B}{m}$$

де e - заряд електрона; z - кратність заряду іона; B - індукція магнітного поля; m - маса частки, а також ларморовським радіусом обертання:

$$r_{\tilde{e}} = \frac{v_1}{\omega}$$

де v_1 - складова швидкості переміщення частки в напрямку, перпендикулярному до силових ліній магнітного поля.

Дрейф частки в напрямку, перпендикулярному електричному й магнітному полям, характеризується швидкістю:

$$v_{\tilde{a}} = \frac{E}{B}$$

Якщо не враховувати початкову швидкість зарядженої частки, то в однорідному електричному й магнітному полях траєкторія її руху буде циклоїдою, висота якої дорівнює двом ларморовським радіусам:

$$h_{\tilde{o}} = \frac{2 \cdot m \cdot E}{e \cdot z \cdot B}$$

У магнетронних пристроях і магнітне, і електричне поле неоднорідні, внаслідок чого в плазмі існують і інші дрейфові рухи.

Енергія, одержувана електроном від електричного поля, витрачається на іонізацію атомів робочого газу й підтримку плазмового розряду. Прискорення електрона полем відбувається в основному в області темного катодного простору шириною $a_{\tilde{e}}$, а далі на відстані $h_{\tilde{o}}$ він попадає в область плазми. Ширина темного катодного простору, мм:

$$a_{\tilde{e}} = 3,37 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{U_{\tilde{e}}}}{B_{\tilde{e}}}$$

де U - спад напруги в області темного катодного простору, В; B_k - індукція магнітного поля в тій же області, Тл.

Електрони, що покинули область темного катодного простору, зіштовхуються з атомами робочого газу й іонізують їх. Втрачаючи свою первісну енергію електрони дифундують до анода. При цьому анод системи повинен бути розташований трохи далі границі області, де електрон в основному губить свою енергію на утворення плазми, область плазми називається умовним анодом, вилучена від поверхні катода на відстань

$$x_0 = \frac{2 \cdot m_e \cdot E \cdot U_p}{W \cdot B^2}$$

де m_e – маса електрона; U_p - напруга розряду; W – енергія, що витрачається електроном на один акт іонізації.

Внаслідок неоднорідності магнітного й електричного полів плазма приймає форму, близьку до тороїдальної, і розташовується безпосередньо біля поверхні мішені. Найбільш щільна плазма - у центральній частині, тому більш інтенсивне розпилення мішені спостерігається саме в цій області. Вибором раціональної геометрії мішені можна створити умови для нанесення рівномірних по товщині покриттів на нерухомі підкладки. Іншими способами одержання рівномірних покриттів є створення декількох зон розпилення, планетарне обертання підкладок і лінійне переміщення підкладок з використанням спеціальних профілюючих екранів.

У планетарних магнетронних системах магніти монтуються у водоохолоджувані корпуси і не забруднюють зарядну область. Ефект перехоплення розпилених атомів тут практично повністю усунутий. Високі щільності струму на охолоджуваній мішені дозволяють у планетарних системах досягати швидкості розпилення, порівнянних зі швидкостями, одержуваними методами термічного випару. Недоліком є мала площа катода й нерівномірна його ерозія (коефіцієнт використання матеріалу - 25...30%).

Установка для виконання лабораторної роботи.

Технічні дані.

Вакуумна установка УВН-1 (УВН-2) призначена для відпрацювання технології напилювання тонких плівок.

1. Гранично допустиме розрідження в робочій камері з використанням азотної пастки - 10^{-6} мм.рт.ст.
2. Швидкість відкачки робочого обсягу при тиску $2 \cdot 10^5$ - $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. - 700 л/сек.
3. Живлення установки здійснюється 3-х фазним струмом від 4-х провідної лінії (з нульовим проводом) частотою 50 Гц, напругою 380 В.
4. Електрична потужність, споживана установкою при сталому режимі, не більше 7,2 кВт.
5. Мінімальна витрата холодної води - 400 л/година.
6. Габаритні розміри:
7. довжина x ширина x висота, мм - 1550x1050x1950;
8. підйом ковпака - 650 мм.
9. Вага установки - 700 кг.

Установка (рис. 4) складається з металевих корпусу 1, що має знімні бічні, передні й задні щити. На передній панелі перебуває рукоятка керування вакуумним затвором 2 і органи управління гідроприводу 3 і 4 і підйому ковпака 5.

Вакуумний ковпак 5 виконаний з нержавіючої сталі, має два оглядових вікна 150 мм у діаметрі. Підйом і опускання ковпака здійснюється гідроприводом 6.

Вакуумна система складається з обертового насоса ВН-6-2Н (7), паромасляного високовакуумного насоса Н-2Т (8), клапанної коробки для перемикання механічного насоса, високовакуумного насоса, системи напісачів 9, 10 для напуску повітря й інших газів у ковпак, трубопроводів і охолоджуваної пастки.

Рукоятки клапанної коробки 11, 12 виведені на середню стійку каркаса. При витягуванні верхньої рукоятки 11 механічний насос відкачує робочий обсяг ковпака, при витягуванні нижньої рукоятки 12 відкачується порожнина паромасляного насоса.

Вентиль-напісач (голчастий 9), укріплений на ковпаку, дозволяє підтримувати заданий ступінь вакууму в діапазоні 10^{-1} - 10^{-5} мм.рт.ст. Напісач (грубий) 10 призначений для напуску атмосфери під ковпак. Електромагнітний вентиль-напісач відкриває напуск атмосфери в трубопроводі обертового вакуумного насоса й може використатися для напуску повітря у високовакуумний насос при висунутій рукоятці 12.

Вимір вакууму в підковпаковій частині здійснюється за допомогою приладу ВІТ-2 (14). На лівій стійці закріплені органи керування вакуумною установкою 15. У підковпаковій частині також перебуває підложкотримач і карусель 12, органи керування якої перебувають унизу стійки керування 17. У середині стійки керування розташований блок живлення 18 для магнетрона 19. В установці використовується магнетрон 19 із прямокутним катодом-мішенню. Магнетрон 19 закріплений вертикально - на стінці ковпака 5.

На рис. 5 показано поперечний переріз магнетрона.

На рис. 6 наведена схема вакуумної системи установки.

Блок живлення.

Блок живлення складається з 3-х частин: катодного вузла живлення, вузла живлення анода й системи підпалу.

Катодний вузол працює в такий спосіб: за допомогою системи керування СУ й семістора VS1 відбувається плавне регулювання струму в первинній обмотці трансформатора Тр1. Згладжування пульсацій здійснюється за допомогою RC - ланцюга (R3C3 і R4C4) і дроселя Др1. Вихідна напруга - 400...1000 В при струмі 2...10 А.

Анодний вузол створює напруга зсуву на аноді (50...100 В) щодо корпусу установки.

Система підпалу призначена для запалювання розряду магнетрона. Вона складається з підвищувального трансформатора Тр3, діодного випрямляча й RC-ланцюга фільтра С6-Р8. Вихідна напруга системи підпалу 1,5 кВ. Діод VD призначений для розв'язки катодного вузла живлення й системи підпалу.

Програма роботи.

1. Ознайомитися з описом установки типу УВН, що складається з вакуумного блоку, блоку живлення й керування, газомagnetронного пристрою.

2. Підняти ковпак робочої камери й установити попередньо зачищені підкладки в підкладкотримач. Опустити ковпак.

3. Включити установку відповідно до інструкції. Опустити робочу камеру до заданого лаборантом тиску й установити в камері заданий тиск робочого газу за допомогою натікача.

4. Включити магнетрон. Установити заданий струм магнетрона (у межах 0,2...10 А) і зробити напилювання плівки. Розрахувати й виміряти її товщину. Виміряти ВАХ магнетрона.

Записати в протоколі результати спостережень і розрахунків і зробити висновки по роботі.

Вимоги до звіту:

(Увага! Перед початком роботи кожен студент повинен мати протокол та бути теоретично підготовленим.)

Звіт повинен вміщувати:

1. Ціль роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. ескіз електродної системи магнетрона та схему його включення;
4. Виконані розрахунки.
5. Таблиці з результатами вимірювань та розрахунків.
6. Побудовані за результатами вимірювань та розрахунків графіки (за необхідності).
7. Висновки по роботі.

(Увага! Табличні данні, розрахунки, рисунки графіків, осцилограм, висновки повинні бути представлені в рукописному вигляді, без використання комп'ютерної та розмножувальної техніки.)

Контрольні питання

1. Фізична сутність іонного (катодного) розпилення.
2. Принцип дії магнетронних розпилювальних систем.
3. Різновиди конструкцій магнетронних систем і катодних вузлів.
4. Як орієнтовані електричні й магнітні поля в магнетроні? Траєкторії руху електронів у цих полях.
5. Основні параметри магнетронних систем.

6. Пристрій вакуумної напилювальної установки. Основні елементи й вузли.
7. Вакуумна система установки. Засоби відкачки.
8. Особливості електричного живлення магнетрона.
9. Який вид електричного розряду використовується в магнетроні?
10. Переваги й недоліки магнетронного напилювання плівок.
11. Які види плівок одержують за допомогою магнетронної системи?

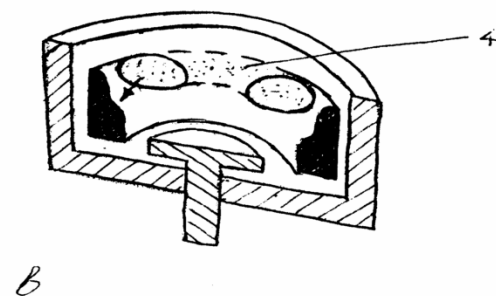
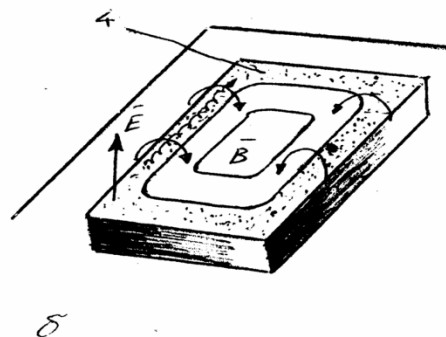
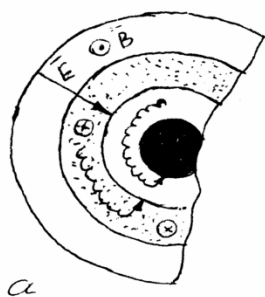
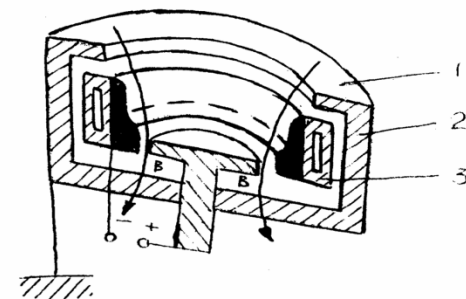
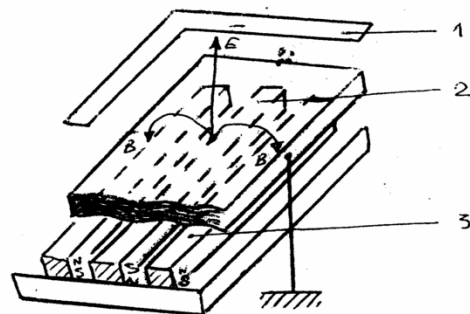
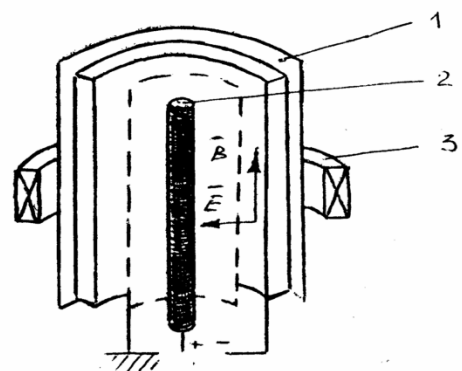


Рис. 1 Схема базових конструкцій магнетронів:

- а - із циліндричним катодом;
- б - із плоским катодом (планарна);
- в - з кільцевим катодом S-типу;
- 1 - анод; 2 - катод-мішень;
- 3 - магнітна система; 4 - зона розряду.

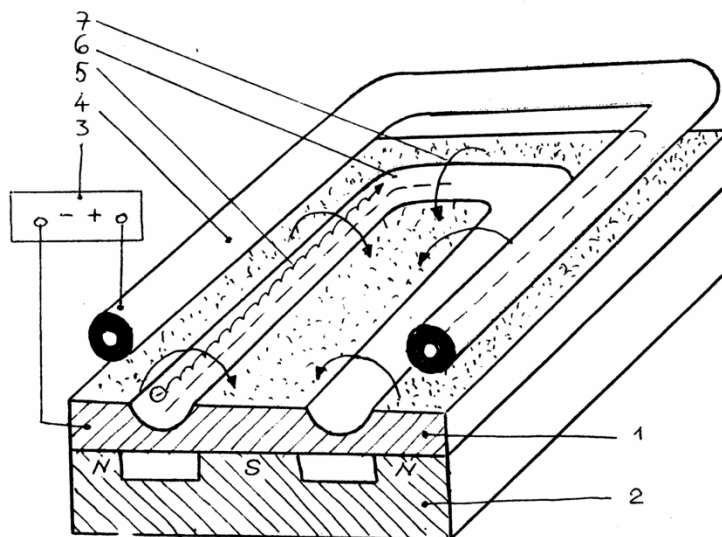


Рис. 2 Схема магнетронної системи розпилення із плоскою мішенню: 1 - мішень-катод; 2 - система постійних магнітів; 3 - джерело живлення; 4 - анод; 5 - траєкторія руху електронів; 6 - зона інтенсивного розпилення; 7 - силові лінії магнітного поля.

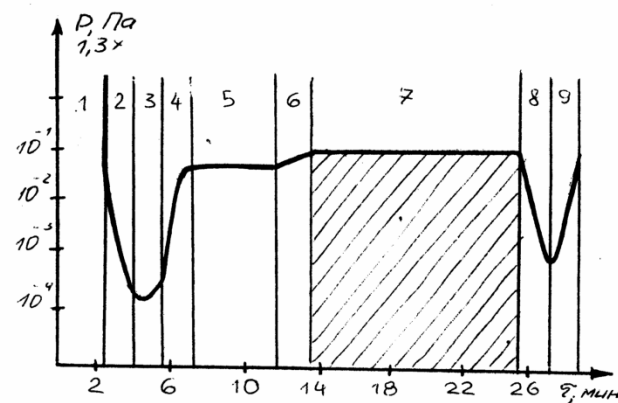


Рис. 3 Графік тимчасового циклу технологічного процесу формування металізації зі сплаву Al-Si товщиною 1 мкм на установці магнетронного розпилення: 1 - попередня відкачка; 2 - високовакумна відкачка; 3 - переміщення підкладок через шлюз; 4 - напуск аргону; 5 - іонне очищення; 6 - вихід на режим розпилення; 7 - розпилення; 8 - переміщення підкладок; 9 - закінчення циклу.

Таблиця 2
Характеристики систем для розпилення

Вид системи для розпилення	Робочий тиск, Па	Робоча напруга, кВ	Сила іонного струму, А	Потужність, що підводиться до системи, кВт	Коефіцієнт перетворення потужності	Енергетична ефективність (по міді), 10^{-9} кг/Дж		Енергія іонів, що бомбардують, кеВ
						процесу розпилення	Системи що розпилює	
діодна на постійному струмі	1,3...13	3...5	0,5...0,8	2...5	0,5...0,6	0,9...1,4	0,5...0,7	2...3,5
діодна ВЧ	0,6...6,6	1...2 (амплітуда)	1...2	3...5	0,3...0,6	1,6...2,5	0,5...1	0,7...1,5
тріодна	$(0,6...6,6) \times 10^{-1}$	1...2	3...5	10...15	0,3...0,7	1,4...2,1	0,6...1	1...2
тріодна з локалізацією плазми магнітним полем	$(1,3...13) \times 10^{-2}$	1...2	10...15	35...40	0,3...0,7	1,4...2,1	0,6...1	1...2
з автономним іонним джерелом	$(0,6...6,6) \times 10^{-1}$ у джерелі $(1,3...13) \times 10^{-2}$	1...3	0,2...0",5	8...10	0,03...0,15	1...2,1	0,06...0,15	1...3
магнетронна ВЧ	$(1,3...6,6) \times 10^{-1}$	0,7...1 (амплітуда)	2...4	3...5	0,3...0,6	2,5...3	0,9...1,5	0,5...0,7
магнетронна на постійному струмі	$(1,3...6,6) \times 10^{-1}$	0,4...0,8	15...20	8...15	0,6...0,7	3...3,8	2,1...2,3	0,3...0,5

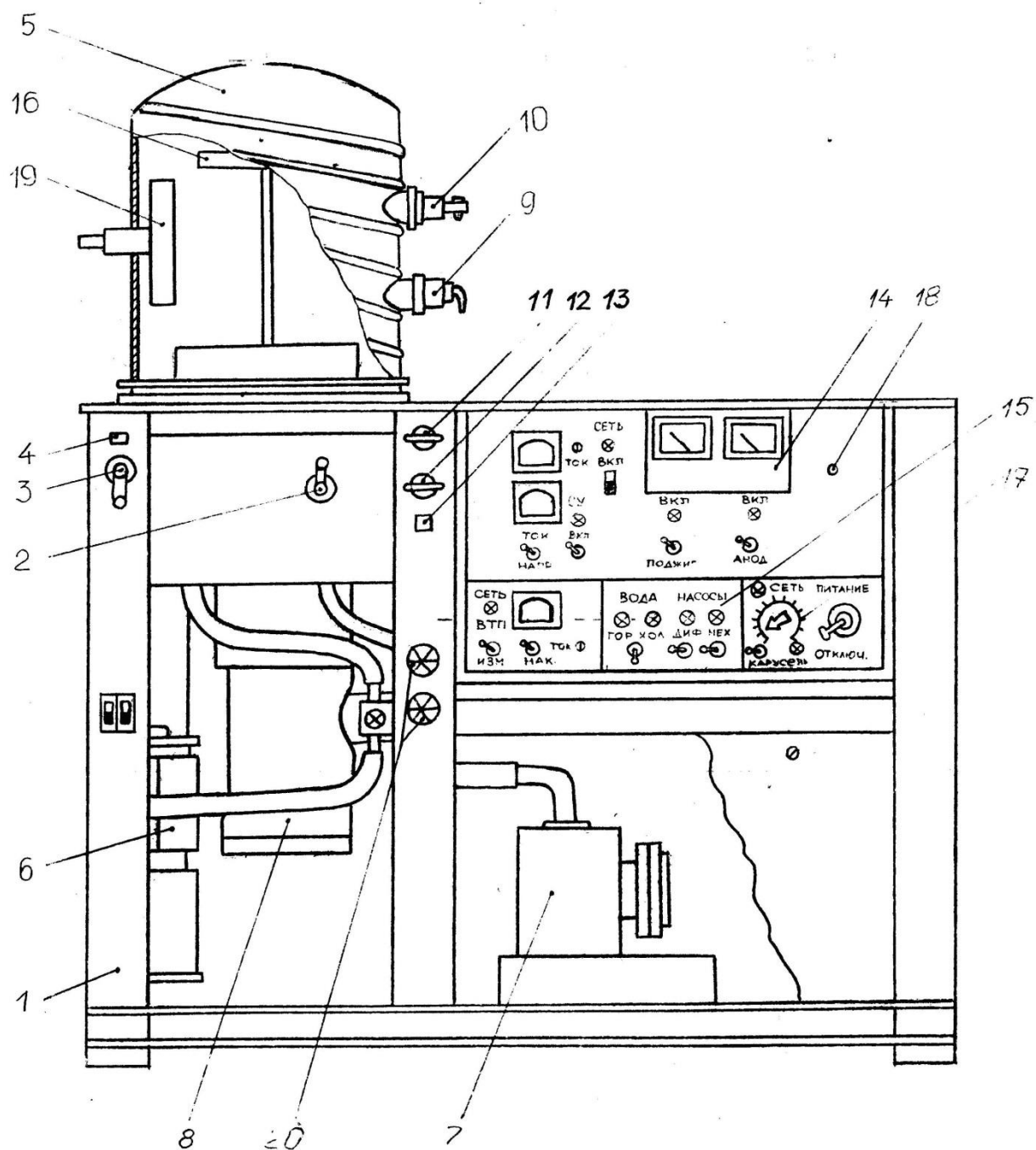


Рис. 4 Зовнішній вигляд агрегату

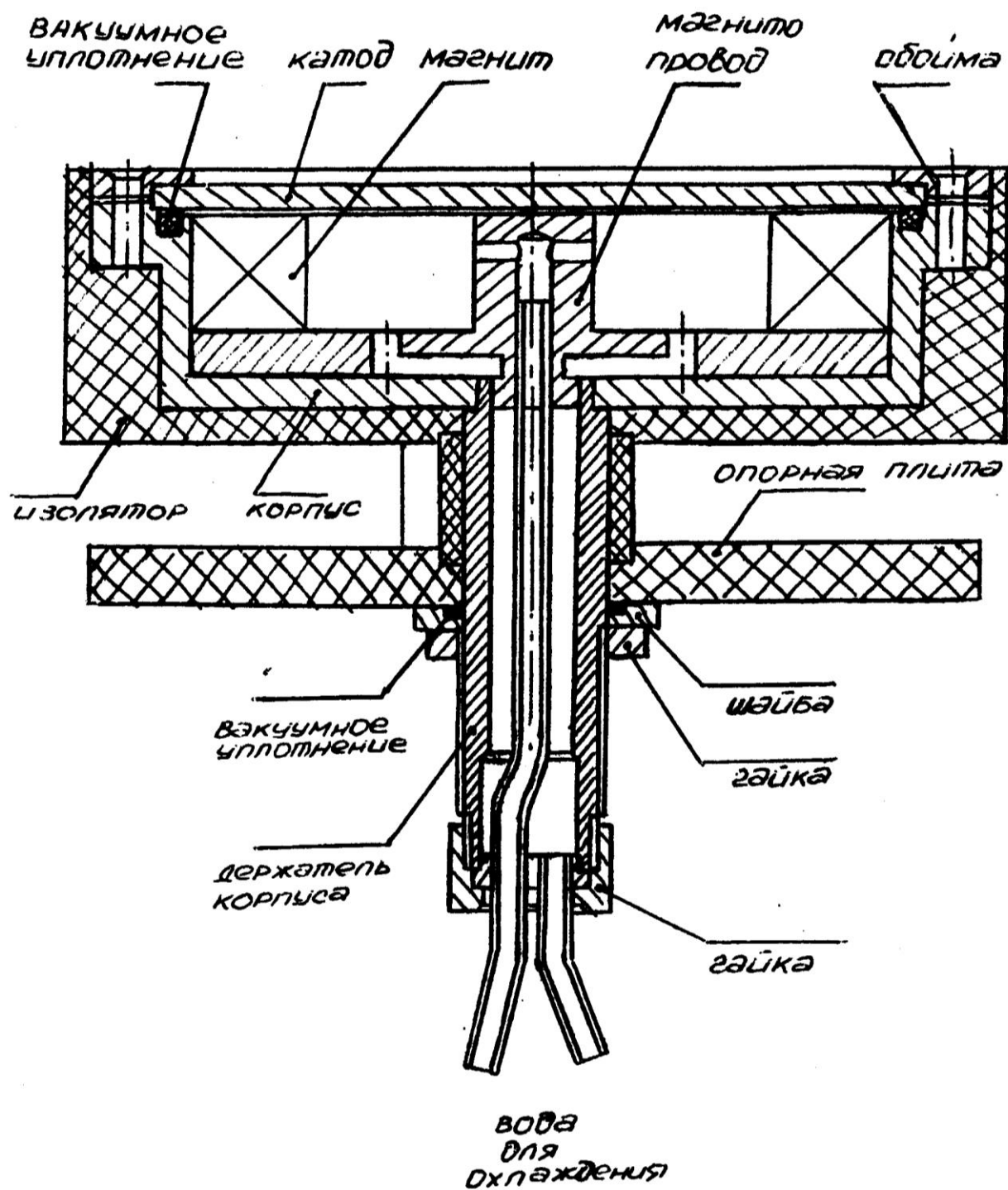


Рис. 5 Магнетронна система розпилення

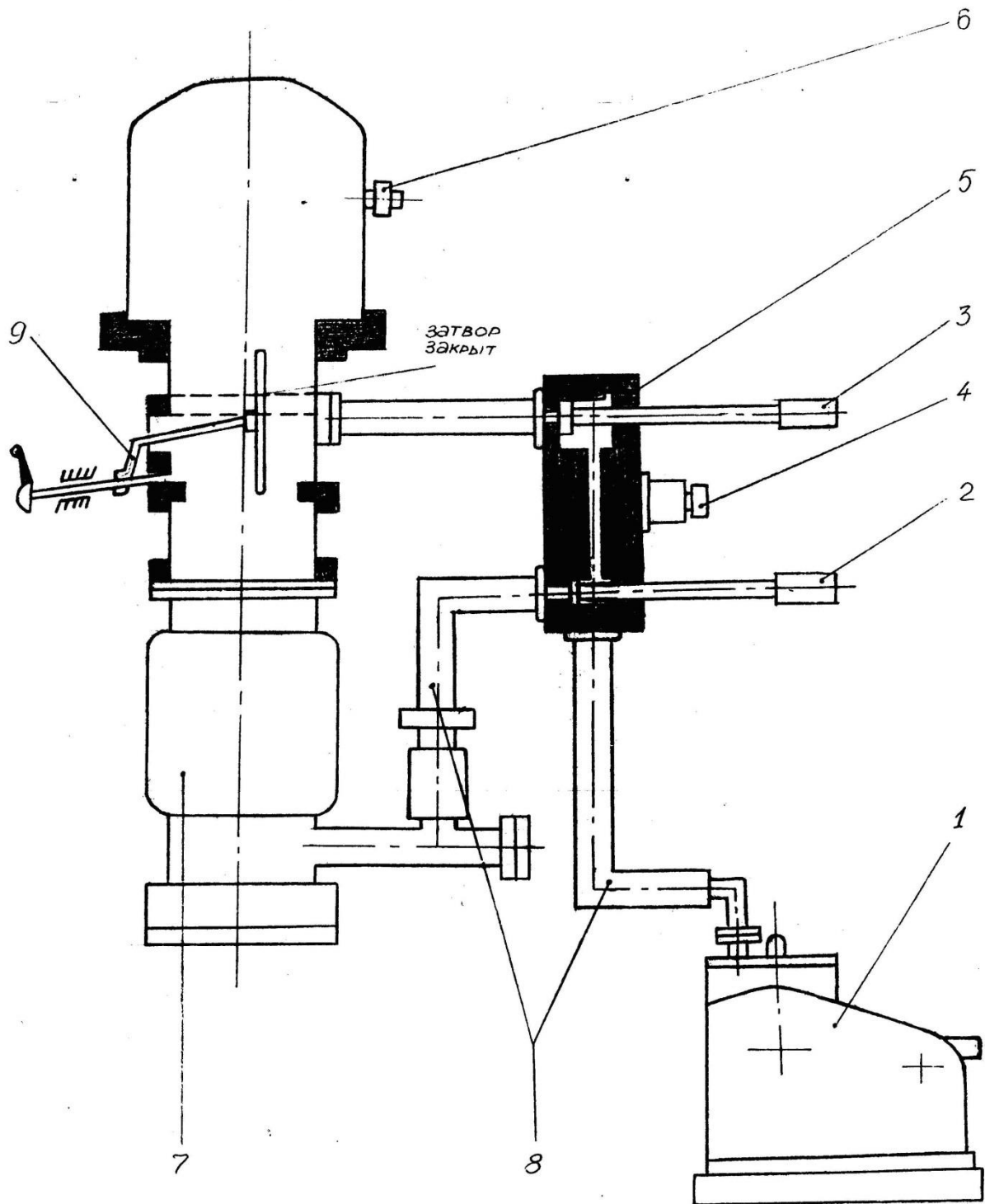


Рис. 6 Вакуумна система

1 - механічний насос НВР-5Д, 2 - рукоятка нижнього клапану, 3 - рукоятка верхнього клапану, 4 - електромагнітний натікач, 5 - клапанна коробка, 6 - натікач для швидкого напуску повітря, 7 - дифузійний паромасляний насос, 8 - трубопроводи, 9-затвор.

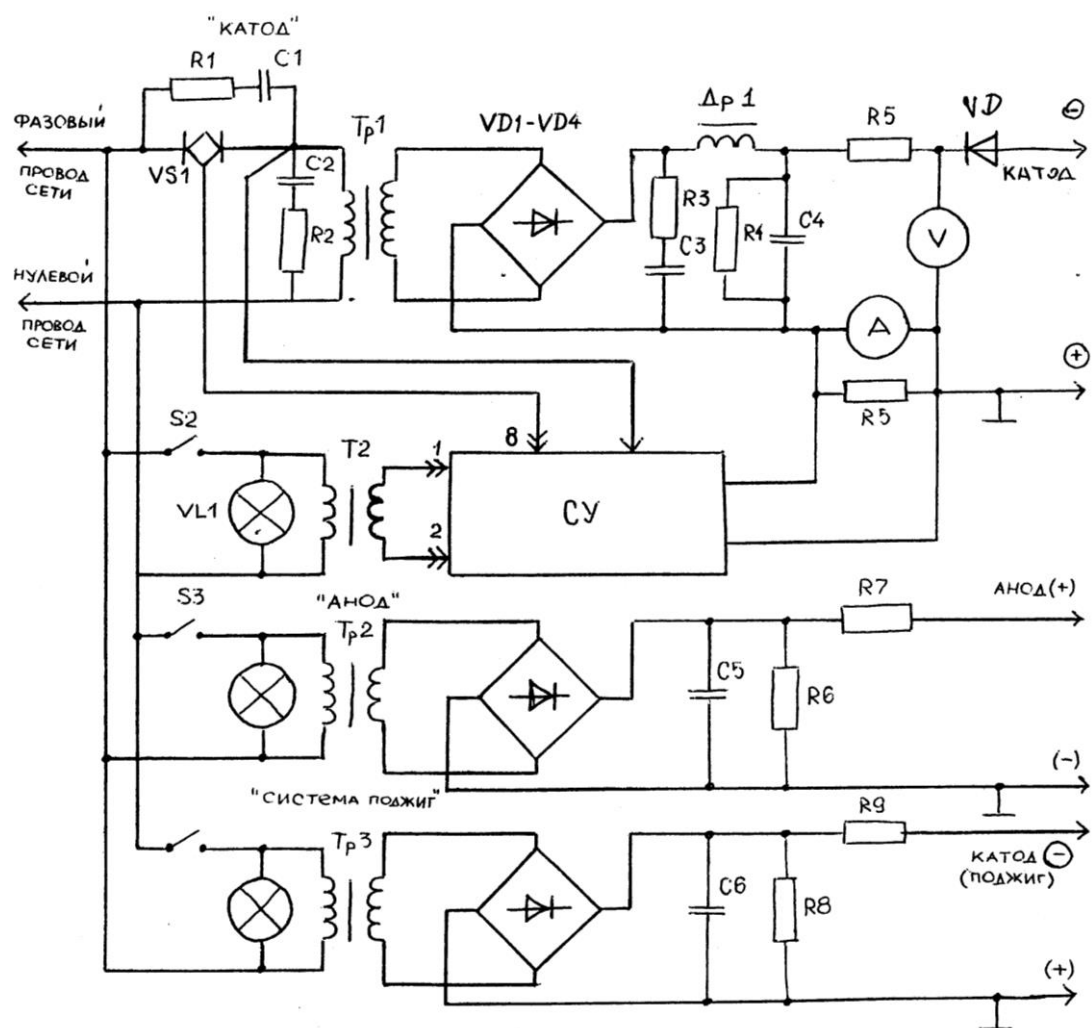


Рис. 7 Схема блоку живлення