

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

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка»
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка

Укладач О. В. Мачулянський

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Мельник І. В.*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних пристроїв та систем, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Татарчук Д. Д.*, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри мікроелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 02.06.2023 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол № 05/2023 від 22.05.2023 р.)*

Навчальний посібник узгоджений з навчальною програмою дисципліни «Технологічні основи електроніки» та забезпечує виконання лабораторного практикуму з цієї дисципліни. Комплексний лабораторний практикум призначений для розвитку та закріплення знань та навичок необхідних при виконанні технологічних процесів формування виробів електронної техніки

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра, які навчаються за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка» спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка.

Реєстр. № НП 22/23-875. Обсяг 6,2 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Перелік умовних позначень та скорочень	9
1. Дослідження основних електрофізичних параметрів матеріалів мікроелектронної технології	10
1.1. Основні теоретичні відомості.....	10
1.2. Порядок виконання роботи.....	21
2. Технологічні процеси нанесення тонких плівок методами термічного вакуумного осадження. Вакуумне обладнання, технологічне оснащення. Металізація.....	24
2.1. Основні теоретичні відомості.....	24
2.2. Порядок виконання роботи.....	40
3. Конструктивно - технологічні особливості створення омічних контактів в інтегральних напівпровідникових структурах.....	43
3.1. Основні теоретичні відомості.....	43
3.2. Порядок виконання роботи.....	53
4. Дослідження омічних контактів структур метал-напівпровідник.....	55
4.1. Основні теоретичні відомості.....	55
4.2. Порядок виконання роботи.....	59
5. Обладнання, технологічне оснащення для проведення високотемпературних технологічних процесів. Системи прецизійного регулювання технологічних параметрів термічних установок	61
5.1. Основні теоретичні відомості.....	61
5.2. Порядок виконання роботи.....	72
6. Дослідження одностадійного технологічного процесу легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії	75
6.1. Основні теоретичні відомості.....	75
6.2. Порядок виконання роботи.....	81

7.	Дослідження технологічних режимів легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії в двостадійному технологічному процесі.....	84
7.1.	Основні теоретичні відомості.....	84
7.2.	Порядок виконання роботи.....	87
8.	Особливості формування тонких діелектричних плівок для елементів інтегральних схем	90
8.1.	Основні теоретичні відомості.....	90
8.2.	Порядок виконання роботи.....	97
9.	Розробка друкованих схем	99
9.1.	Основні теоретичні відомості.....	99
9.2.	Порядок виконання роботи.....	112
	Перелік посилань.....	119
	Список рекомендованої літератури.....	120
	Додаток А. Структурна схема пристрою газорозподілу	121
	Додаток Б. Залежність коефіцієнтів дифузії атомів домішок від температури в кремній	122
	Додаток В. Конструкційні матеріали для виробництва друкованих плат фірми ISOLA	123

ВСТУП

Розвиток мікро- та наносистемної техніки тісно пов'язаний із досягненнями в технології матеріалів та виготовленні електронних приладів та систем різноманітного призначення. Мета навчальної дисципліни «Технологічні основи електроніки» полягає у формування у студентів компетентності для професійної діяльності в застосуванні технологій та матеріалів при вирішенні практичних та технологічних задач розробки, проектування, виробництва, експлуатації електронних приладів мікро- та наносистемної техніки.

Комплексний лабораторний практикум призначений для розвитку та закріплення теоретичних знань та набуття практичних навичок необхідних при виконанні технологічних процесів формування виробів електронної техніки. Тематика лабораторних занять охоплюють всі розділи навчальної дисципліни. Відповідно до навчальної програми дисципліни «Технологічні основи електроніки» передбачено наступні теми лабораторних занять: Дослідження основних електрофізичних параметрів матеріалів мікроелектронної технології; Технологічні процеси нанесення тонких плівок методами термічного вакуумного осадження. Вакуумне обладнання УВМ-15М, технологічне оснащення, металізація; Особливості формування тонких плівок для елементів інтегральних схем; Конструктивно - технологічні особливості створення омичних контактів в інтегральних напівпровідникових структурах: Дослідження омичних контактів структур метал-напівпровідник; Обладнання, технологічне оснащення для проведення високотемпературних технологічних процесів. Системи прецизійного регулювання технологічних параметрів термічних установок; Дослідження одностадійного технологічного процесу легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії; Дослідження технологічних режимів легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії в двостадійному технологічному процесі; Розробка друкованих плат.

При підготовці до занять лабораторного практикуму студент повинен ознайомитися із методичними рекомендаціями та завданням до виконання роботи. По кожній темі лабораторного практикуму наведено контрольні запитання та загальний список рекомендованої літератури, що повинно сприяти засвоєнню та закріпленню студентами матеріалу в процесі занять та індивідуальної підготовки.

Для захисту робіт лабораторного практикуму студент надає оформлений звіт за результатами виконання роботи. Процедура захисту складається з аналізу одержаних результатів та відповідей на уточнюючі питання викладача за темою роботи..

Заходи безпеки під час лабораторних занять.

Студенти, які працюють з електроустановками і електроприладами, повинні знати і дотримуватися правил технічної експлуатації та безпечної роботи. До роботи допускаються особи, що вивчили правила техніки безпеки в електронній промисловості і виробничі інструкції.

При порушенні правил техніки безпеки під час роботи з вакуумними установками й електроприладами може виникнути небезпека ураження електричним струмом. Сила струму 0,06 А небезпечна для життя людини. Електричний струм, пройшовши через організм людини, може викликати два види ураження – електричний удар та електричну травму. Більш небезпечним є електричний удар, тому що уражається весь організм. Летальний випадок настає від паралічу чи припинення серцевої діяльності. Електричними травмами називають ураження струмом зовнішніх частин тіла. Це – опіки, металізація шкіри та ін. Ураження струмом мають змішаний характер і залежать від величини і роду струму, що проходить через тіло людини, довжини його впливу, шляхів, якими проходить струм, а також від фізичного і психічного стану людини у момент ураження. Найбільш небезпечний струм, частота якого дорівнює 50–60 Гц. Зі збільшенням частоти струми починають

поширюватися по поверхні шкіри, викликаючи сильні опіки. При сухій неушкодженій шкірі опір людського тіла електричному струму дорівнює 40–100 кОм. Результат ураження багато в чому залежить також від шляху струму в тілі людини.

Електроприлади та термічне та вакуумне обладнання повинні бути заземлені. Для захисту від ураження електричним струмом необхідно використовувати інструменти з ізольованими ручками. Прилади й інструменти біля вакуумної установки необхідно розміщувати з урахуванням зручності та безпеки.

Усі роботи з підготовки до експерименту, складання схем під ковпаком вакуумної установки здійснювати тільки після вимкнення напруги живлення. Наявність напруги у схемах, випрямних блоках та інших електричних ланцюгах перевіряти тільки показчиками напруги або вольтметрами. Категорично забороняється робити перевірку напруги на іскру і на дотик.

Під час роботи з матеріалами для конденсації плівкових зразків дотримуватися правил виробничої й особистої гігієни. У лабораторіях категорично забороняється користуватися відкритим вогнем. При роботі із зрідженими газами користуватися захисними окулярами.

Під час виконання лабораторних робіт обов'язково використовувати як загальне, так і місцеве освітлення.

Будь-які дії, студентів з обладнанням під час виконання лабораторної роботи проводяться виключно під керівництвом викладача та інженерно – технічного персоналу лабораторії.

Напруга, яка використовується при роботі установки небезпечна для життя. Тому необхідно дотримуватися правил з охорони праці під час роботи високовольтного електричного обладнанням (напруга до 10000 В).

Забороняється вмикати установку в мережу 380 В та працювати з обладнанням без заземлення. Заборонено працювати на установці, при несправних системі блокування або їх замиканні.

Заборонено працювати на установці, якщо немає потоку води з магістралі через систему охолодження установки. Категорично заборонено студентам самостійно без нагляду персоналу працювати з обладнанням.

До роботи допускаються тільки ті особи, які вивчили порядок підготовки установки до експлуатації, засвоїли методику вимірювання на приладах та пройшли інструктаж з охорони праці з вакуумним високовольтним обладнанням та термічним обладнанням.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- ІМС – інтегральна мікросхема;
- МДН – метал-діелектрик-напівпровідник;
- КДБ – кремній, легований бором;
- КЕФ – кремній, легований фосфором;
- АДС – автоматизована дифузійна система;
- БПГ – блок підготовки газів;
- БПП – блок підготовки повітря;
- ДП – друкованих плат друкована плата;
- ОДП – односторонні друковані плати;
- ДДП – двосторонні друковані плати;
- БДП – багат шарові друковані плати;
- ГДП – гнучкі друковані плати;
- q – елементарний заряд;
- ε – діелектрична проникність;
- R – опір;
- R_s – поверхневий опір;
- ρ – питомий опір;
- ρ_s – питомий поверхневий опір;
- Φ_m – робота виходу металу;
- Φ_n – роботи виходу напівпровідника;
- k – постійна Больцмана;
- D – коефіцієнт дифузії;
- N – концентрація дифузанта;
- E_A – енергія активації;
- erf – символ, функція помилок;
- Q – доза легування

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Мета роботи: дослідження питомого опору напівпровідникових матеріалів та плівкових структур чотиризондовим методом.

1.1. Основні теоретичні відомості

В технологічних процесах виробництва напівпровідникових матеріалів, приладів важливою операцією є контроль електрофізичних параметрів матеріалів у вигляді монокристалічних злитків, зразків різної геометричної форми, пластин, дифузійних, іонно-легованих шарів, тонких плівок. Одним з основних електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів є їх питомий опір. Вимірювання, дослідження питомого опору здійснюється не тільки для встановлення його значення, але також для визначення інших важливих електрофізичних параметрів матеріалів на основі теоретичних розрахунків або додаткових експериментальних даних.

Питомий опір матеріалу визначається концентрацією носіїв заряду n та їх рухливістю μ :

$$\rho = \frac{1}{qn\mu},$$

де q - заряд електрона.

При дослідженні тонких шарів матеріалу використовується величина опору на одиницю площі, або поверхневий опір (*Ом на квадрат*). Поверхневий опір R_s однорідного шару визначається через ρ :

$$R_s = \frac{\rho}{t},$$

де t – товщина шару.

Вибір методу вимірювання здійснюють з урахуванням факторів: властивостей матеріалу, можливості виготовлення електричних контактів досліджуваного зразка, його геометричної форми, метрологічних особливостей методу вимірювання. В ідеальному випадку вимір характеристик матеріалів не повинен призводити до руйнування зразка і не повинен вимагати його спеціальної обробки.

Багато методів вимірювання питомого опору напівпровідникових матеріалів засновані на вимірюванні різниці електричних потенціалів на деякій ділянці зразка, через який пропускається електричний струм. Історично одним із перших методів вимірювання питомого опору був двозондовий метод, що застосовувався для вимірювання питомого опору металів. Вимірювання з допомогою методів, котрим необхідна суворо певна геометрія зразка, пов'язані з значними витратами часу, головним чином виготовлення зразків і контактів до них. Для швидкого вимірювання питомого опору використовують чотиризондовий метод, метод опору розтікання точкового контакту, а також метод Ван-дер-Паулі. Зазначені методи зручні, дозволяють виконувати вимірювання не тільки на однорідних зразках, а й на дифузійних, епітаксійних та іонно-легованих шарах, а також досліджувати просторову зміну питомого опору. Для зондових методів силові лінії напруженості електричного поля непаралельні і розподілені неоднорідно за перерізом зразка, через що спочатку необхідно теоретично розраховувати розподіл електричного потенціалу у зразку, а потім знаходити взаємозв'язок між питомим опором і вимірюваними величинами, струмом і напругою.

При використанні зондових методів потрібний безпосередній контакт із напівпровідниковим зразком. Є кілька підходів до здійснення безконтактних вимірів. Вони засновані на використанні відображення або поглинання електромагнітної хвилі, індуктивного або ємнісного зв'язку зразка з вимірювальною схемою. Через це безконтактні методи є оптичними та високочастотними.

Найбільш поширеним методом вимірювання питомого опору в мікроелектронній технології є чотиризондовий метод [1]. Переваги чотиризондового методу полягають в тому, що для його застосування не потрібно створювати омичні контакти до зразка. Метод дозволяє вимірювати питомий опір об'ємних зразків найрізноманітнішої форми та розмірів, а також питомий опір шарів напівпровідникових структур.

Розглянемо чотиризондовий метод стосовно зразка, що являє собою напівнескінченний об'єм, обмежений плоскою поверхнею. На плоскій поверхні зразка (рис. 1.1) вздовж прямої лінії розміщені чотири металевих зонди з малою площею дотику, відстані між якими s_1 , s_2 , s_3 . Через два зовнішніх зонда 1 і 4 пропускають електричний струм I_{14} , на двох внутрішніх зондах 2 і 3 вимірюють різницю потенціалів U_{23} . За вимірними значеннями різниці потенціалів між зондами 2 і 3 та струмом, що протікає через зонди 1 і 4, можна визначити питомий опір зразка.

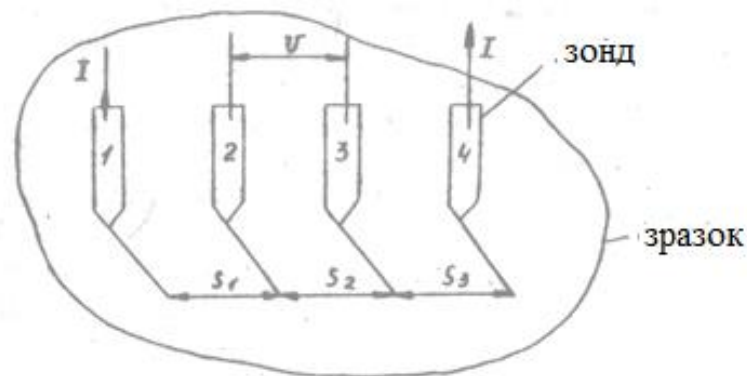


Рисунок 1.1 – Схема розміщення зондів

Щоб знайти аналітичний зв'язок між питомим опором ρ , струмом I_{14} і напругою U_{23} , необхідно розглянути окремий точковий зонд, що знаходиться в контакті з плоскою поверхнею зразка напівнескінченного об'єму.

Оскільки просторовий розподіл електричного потенціалу $U(r)$ у зразку має сферичну симетрію, то для його визначення досить вирішити рівняння Лапласа в сферичній системі координат, у якому залишено лише вираз, який залежить від r :

$$\Delta U(r) = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dU}{dr} \right) = 0$$

За умови, що потенціал у точці $r = 0$ позитивний і прагне нуля за дуже великих r . Інтегрування цього рівняння з урахуванням зазначених граничних умов дозволяє отримати наступне рішення:

$$U(r) = \frac{-c}{r}.$$

Константу інтегрування можна обчислити з умови напруженості електричного поля при деякому значенні $r = r_0$.

$$\varepsilon(r_0) = \left. \frac{dU(r)}{dr} \right|_{r=r_0}$$

Так як щільність струму, що протікає через півсферу радіусом r_0 ,

$$j = \frac{I}{(2\pi r_0^2)},$$

а відповідно до закону Ома

$$j = \frac{\varepsilon}{\rho}, \text{ то } \varepsilon(r_0) = \frac{I\rho}{2\pi r_0}.$$

Остаточно отримаємо

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r}.$$

Очевидно, що розподіл потенціалу буде таким самим, коли форма контакту зонда з поверхнею зразка має вигляд напівсфери кінцевого діаметру.

Нехай радіус контакту дорівнює r_1 . Тоді електрична напруга на зразку дорівнює електричному потенціалу зонда:

$$U(r_1) = \frac{I\rho}{2\pi r_1}. \quad (1.1)$$

Напруга на приконтактному шарі завтовшки $r_2 - r_1$

$$U(r_1) - U(r_2) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}. \quad (1.2)$$

З порівняння співвідношень (1.1) та (1.2) випливає, що основний вимір потенціалу відбувається поблизу зонда. Наприклад, при $r_2 = 10r_1$ напруга на зразку перевищує напругу на шарі товщиною $r_2 - r_1$ лише на 10%. Це означає, що значення струму, що протікає через зонд, визначається головним чином опором приконтактної області, протяжність якої тим менше, чим більше радіус контакту.

Припущення, на яких заснований чотиризондовий метод вимірювання питомого опору:

- 1) зонди розташовані на плоскій поверхні однорідного ізотропного зразка напівнескінченного об'єму;
- 2) зонда мають контакти з поверхнею зразка в точках, які розташовані вздовж прямої лінії;
- 3) інжекція носіїв заряду в об'єм зразка відсутня.

За принципом суперпозиції електричний потенціал в будь-якій точці зразка дорівнює сумі потенціалів, створюваних в цій точці струмом кожного зонда. При цьому потенціал має позитивний знак для струму, що втікає в зразок (зонд 1) і негативний знак для струму, що витікає з зразка (зонд 4) для системи зондів, відстань між якими s_1, s_2, s_3 , потенціали вимірювальних зондів 2 і 3.

$$U_2 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} \right),$$

$$U_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_3} \right)$$

Різниця потенціалів

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} + \frac{1}{s_3} \right) \quad (1.3)$$

Згідно (1.3), питомий опір зразка

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} + \frac{1}{s_3}} \frac{U_{23}}{I_{14}} [\text{Ом} \cdot \text{см}] \quad (1.4)$$

Для випадку коли $S_1 = S_2 = S_3 = S$, рівняння (1.4) набуває вигляду:

$$\rho = 2\pi S \frac{U}{I}. \quad (1.5)$$

Методика вимірювання

Спрощена електрична схема вимірювання питомого опору чотиризондовим методом показана на рис. 1.2. Струм I від регульованого джерела напруги пропускається через зонди 1 і 4. Бажано, щоб джерело напруги мав високий вихідний опір, тобто. був генератором струму. Напруга, що виникає при цьому між зондами 2 і 3, реєструється вольтметром V . Сила струму фіксується міліамперметром або знаходиться шляхом вимірювання напруги на еталонному резисторі, послідовно включеному в ланцюг зондів 1 і 4. Найменший робочий струм визначається можливістю вимірювання малих значень напруги, максимальний робочий струм обмежується нагріванням зразка.

Система із чотирьох зондів конструктивно оформляється у вигляді чотиризондової головки. Відстані між зондами строго фіксовані, кут заточування вістря зонду становить $45-150^\circ$. Чотиризондову головку кріплять до маніпулятора, за допомогою якого зонди встановлюються на поверхні зразка. Зонди індивідуально притискаються до поверхні із силою до $2H$. Як матеріал зондів використовують тверді метали і сплави.

При проведенні вимірювань в інтервалі високих температур аж до $950^\circ C$ з ряду напівпровідникових матеріалів для виготовлення зондів використовують карбід вольфраму. Щоб зменшити руйнування поверхні, застосовують зонди з рідких металів, наприклад галію (при температурах вище за температуру плавлення галію $29,8^\circ C$). Матеріал зондів не повинен хімічно реагувати із напівпровідниковим матеріалом.

Щоб контактні опори потенційних зондів не впливали на результати вимірювань, різницю потенціалів необхідно фіксувати за відсутності струму через них. Тому вимірювання проводять компенсаційним методом за допомогою напівавтоматичних потенціометрів. Доцільно також застосування

електронних цифрових вольтметрів та високим вхідним опором. У такому разі струм через вимірювальні зонди зневажливо малий, що дозволяє відмовитись від використання компенсаційних методів вимірювань. Застосування мілівольметра з вхідним опором порядку 10^8 Ом дає можливість вимірювати питомий опір на злитках і пластинах кремнію до 3000 Ом*см .

Похибка вимірювання питомого опору чотиризондовим методом визначається як складовими похибки величин, що входять у формулу (1.5), так і розміром контакту зонда, опором контактів, нестабільністю температури зразка, термо-ЕРС, освітленістю зразка, інжекцією носіїв заряду та ін.

Відмінність у відстанях між зондами веде до похибки вимірювання питомого опору. Якщо, наприклад, кожен із зондів зміщений щодо свого номінального положення на величину Δx_1 , то відносна похибка

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{1}{4s} - (3\Delta x_1 - 5\Delta x_2 + 5\Delta x_3 - 3\Delta x_4)$$

Це співвідношення можна використовувати для коригування значення питомого опору, якщо Δx_1 відомі.

Коли конструкція вимірювальної головки допускає незалежне усунення кожного зонда щодо свого номінального положення, яке характеризується відхиленням Δs , то випадкова похибка вимірювання

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = 2,06\left(\frac{2\Delta s}{s}\right)$$

при довірчій ймовірності 0,95.

Неточність розміру контакту (тобто площі контакту) вносить систематичну похибку в результати вимірювань. Ця похибка залежить від значення $\left(\frac{r_0}{s}\right)^2$ та вона відрізняється для струмових та потенційних контактів. Практично цієї похибки можна знехтувати, якщо відношення $\left(\frac{r_0}{s}\right)^2 < 0,05$.

Щоб уникнути похибки при вимірюваннях струму та напруги, які можуть виникнути внаслідок витоків струму та виникнення напруги на контактних

опорах, необхідно забезпечувати високий опір ізоляції та використовувати прилади для вимірювання напруги з вхідним опором, що перевищує опір зразка та контактів у 10^5 разів. Джерелом похибки можуть бути фотопровідність і фото-ЕРС, що виникають під дією освітлення і особливо сильно проявляються у зразках з високим питомим опором.

Так як напівпровідники мають відносно високий температурний коефіцієнт опору, то при протіканні через зразок струму може статися не тільки локальне нагрівання, але й підвищення температури всього зразка. Наприклад, підвищення температури кремнію з питомим опором 10 Ом см на 5°C призводить до зміни питомого опору на $4,0\%$. Тому для зменшення нагріву зразка необхідно вибирати робочий струм мінімально можливим, а температуру зразка підтримувати постійної. Робочий струм, однак, повинен забезпечити необхідну точність вимірювання різниці потенціалів. Вимірювання різниці потенціалів можна проводити при двох напрямках струму та отримані значення усереднювати, виключаючи таким чином поздовжню термо-ЕРС, що виникає на зразку внаслідок градієнта температури. Зменшення робочого струму одночасно знижує модуляцію провідності зразка, викликану інжекцією носіїв заряду при проходженні струму.

Для зменшення впливу інжекції та отримання малих значень контактних опорів металевих зондів поверхню зразка, на якій вимірюють, механічно обробляють (наприклад, шліфують). Однак, подібна обробка, особливо для високоомних зразків, іноді недостатня. Наприклад, механічно оброблена поверхня германію дозволяє отримати малі значення опору контакту, а поверхня кремнію з металевим зондом, навпаки, дуже високі значення опору. Високі значення опору контакту не тільки обмежує струм, що протікає, але як правило, нестабільно в часі і значною мірою ускладнює проведення вимірювань.

Слід зазначити, що високий контактний опір між зондом і зразком є однією з основних причин, що обмежують застосування чотиризондового методу для вимірювання питомого опору широкозонних напівпровідників типу

A^3B^5 і A^2B^5 . Методика призначена для вимірювання питомого електричного опору на торцевій поверхні злитків кремнію від 10^{-4} до 10^3 Ом·см. Вимірювання проводять на плоских поверхнях, що мають шорсткість не більше 2,5 мкм при фіксованій температурі (23 ± 2) °С. Наприклад, використовують чотиризондову вимірювальну головку з чотирма лінійно розташованими зондами з карбиду вольфраму з міжзондовою відстанню $(1,3 \pm 0,01)$ мм і максимальним лінійним розміром робочого зонда не більше 60 мкм. Зусилля притиску зонда до поверхні зразка становить 0,5-2,0 Н. Вимірювальні прилади забезпечують вимірювання сили електричного струму з похибкою не більше 0,5%, а електричної напруги з похибкою не більше 1% при необхідному для правильного вимірювання вхідному опору,

Питомий опір обчислюють як середньоарифметичне значень, отриманих при кількох вимірах, що відрізняються напрямом струму. Вимірювання злитків з питомим опором понад 200 Ом·см проводять при їх затемненні.

При виконанні всіх вимог до засобів вимірювання і дотримання необхідних умов інтервал, в якому знаходиться випадкова похибка вимірювання питомого опору, що характеризує збіжність результатів, дорівнює 2% при довірчій ймовірності 0,95. Інтервал, в якому знаходиться похибка вимірювання, що визначає відтворюваність вимірювань при дотриманні вимог стандарту, дорівнює 5% при довірчій ймовірності 0,95.

На практиці в багатьох випадках необхідно визначати величину ρ в тонких пластинах напівпровідникового матеріалу та в технологічних шарах, товщина (t) яких значно менше відстані між зондами S ($t \ll S$). Тоді:

$$\rho = 4,532t \frac{U}{I}. \quad (1.6)$$

Для більш товстих шарів, коли $t/S > 0,4$ співвідношення (1.6) необхідно уточнити за допомогою поправочної функції F_t , що залежить від товщини t

$$\rho = 4,532tF_t \frac{U}{I}. \quad (1.7)$$

Значення поправочної функції F_t приведені у таблиці 1.

Якщо виміри проводяться поблизу краю пластин або шарів, необхідно враховувати крайові ефекти, тобто вплив співвідношення D/S , де D - діаметр у випадку зразка у вигляді кола, або b/S та a/b у випадку прямокутного зразка (рис. 1.2). В цьому разі співвідношення (1.6) необхідно уточнити за допомогою поправочної функції F_D , що залежить від D/S , b/S та a/b .

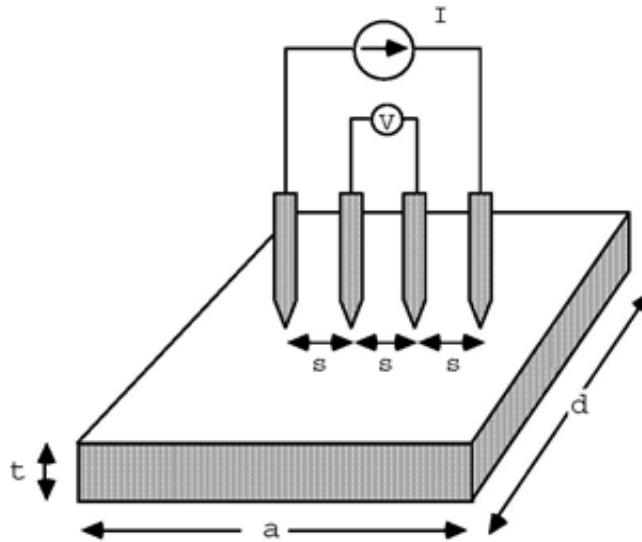


Рисунок 1.2 – Схема чотиризондовий метод

Таблиця 1.1

Значення поправочної функції F_t

t/s	F_t
0.4	0.9995
0.5	0.9974
0.5555	0.9948
0.6250	0.9898
0.7143	0.9798
0.8333	0.9600
1.0	0.9214

Тоді питомий опір описується співвідношенням:

$$\rho = 4,532tF_D \frac{U}{I}. \quad (1.8)$$

Значення F_D приведені у таблиці 1.2.

Щоб уникнути похибки при вимірах струму і напруги, які можуть виникнути внаслідок відтікання струму та виникнення напруги на контактних опорах тощо, необхідно ряд вимірювань n .

Таблиця 1.2

Значення поправочної функції F_D

D/S, b/S	Коло	Прямокутник			
		a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b ≥ 4
1.0				0.9988	0.9994
1.25				1.2467	1.2228
1.5			1.4788	1.4893	1.4893
1.75			1.7196	1.7238	1.7238
2.0			1.9454	1.9475	1.9475
2.5			2.3532	2.3541	2.3541
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324

Обладнання, матеріали

Схема дослідного стенда наведена на рис.1.3. 1 – досліджуваний зразок, 2 – плівка, 3 – магазин опорів, 4 – блок живлення.

Обладнання: зондовий стенд, стабілізоване джерело живлення Б5-47, цифровий вольтамперметр В7-35.

Матеріали: напальчники, бязеві серветки, зразки для досліджень.

Зразками для досліджень: напівпровідникові пластини кремнію КЭФ, КДБ; зразки тонких плівок на діелектричних підкладках. На всіх зразках попередньо повинна бути визначена товщина.

Примітка. Відповідно до завдання запропонованого викладачем уточнюється досліджувані зразки та комплектація вимірювального стенду .

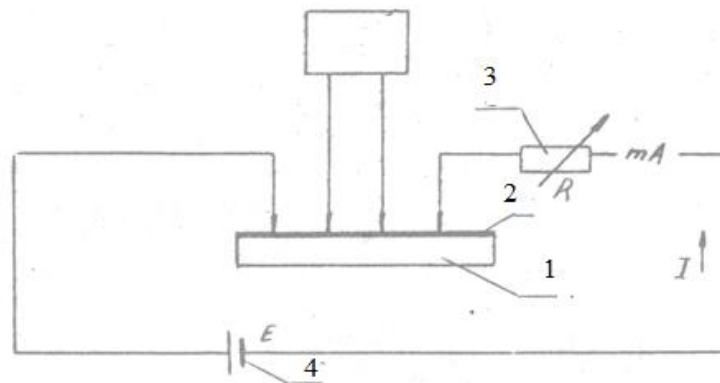


Рисунок 1.3 – Схема дослідного стенда – чотиризондовий метод

1.2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати дослідний стенд відповідно до завдання запропонованого викладачем.
2. Підготувати досліджуваній зразок та розмістити на столик установки.
3. Провести вимірювання. Виконати ряд n вимірювань в різних точках зразка.
4. Визначити значення питомого опору досліджуваного зразка.
5. Провести статистичну обробку результатів дослідження.

Наприклад розрахувати:

- Значення точкової оцінки вимірюваної величини:

$$\tilde{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

де x_i – i -та виміряна величина;

- Значення оцінки середньоквадратичного відхилення одиничного вимірювання (n вимірів):

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m})^2};$$

- Значення оцінки середньоквадратичного відхилення середнього арифметичного виконаних вимірів:

$$\tilde{\sigma}_0 = \tilde{\sigma} / \sqrt{n};$$

- Значення квантиля вважаючи, що довірна ймовірність

$$\rho_{\text{дв}} = 0,95:$$

$$t_s \left(\frac{1 + \rho_{\text{дв}}}{2}; n - 1 \right);$$

- Значення півширини довірчого інтервалу:

$$\delta_\rho = t_s \left(\frac{1 + \rho_{\text{дв}}}{2}; n - 1 \right) \tilde{\sigma}_0;$$

- Значення абсцис кінців довірчого інтервалу:

$$\bar{m}_н = \tilde{m} - \delta_\rho,$$

$$\bar{m}_в = \tilde{m} + \delta_\rho;$$

- Відносну похибку вимірювання:

$$\Delta = \frac{\delta_\rho \cdot 100}{\tilde{m}}.$$

6. Провести аналіз одержаних результатів та сформулювати висновки по роботі.

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Одержані результати відповідно до порядку виконання роботи.
3. Аналіз результатів роботи.
4. Висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Суть та особливості чотиризондового методу визначення питомого опору матеріалів. Метод Ван-дер-Паули

2. Які фізичні параметри матеріалу визначають його опір?
3. Чотирьохзондовий метод вимірювання питомого опору, облік неоднорідності у розподілі питомого опору.
4. Електрична схема та методика вимірювання.
5. Який фізичний зміст мають поправочні функції F_t , F_D при визначенні опору матеріалів.
6. Оцінка точності вимірювання питомого електричного опору.

2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ НАНЕСЕННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ВАКУУМНОГО ОСАДЖЕННЯ. ВАКУУМНЕ ОБЛАДНАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ. МЕТАЛІЗАЦІЯ

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією та принципом роботи промислового вакуумного обладнання; ознайомитися з технологією формування тонких металевих плівок методом термічного вакуумного осадження.

2.1. Основні теоретичні відомості

Характерною особливістю плівок являється структурна відмінність від об'ємних матеріалів. На структуру плівок великий вплив мають методи нанесення, матеріал і структура підкладки, на яку наноситься плівка.

Для формування тонких плівок застосовують різні способи, які можна поділити на дві групи, фізичне та хімічне осадження.

Тонкі плівки отримують, в основному методами фізичного осадження (термічне випаровування, іонне розпилення) конденсацією з газової фази в вакуумній камері. Вибір того чи іншого методу отримання тонких плівок залежить від її призначення і матеріалів, що використовуються.

Термовакuumний метод (випаровування та конденсація речовини у високому вакуумі) є одним з найпоширенішим способів отримання тонких плівок. Це обумовлено наступними особливостями методу:

- низька вартість та відносна простота реалізації процесу;
- за наявності високого вакууму отримувати плівки можливість отримання плівок з мінімальними забрудненнями;
- можливість не тільки осаджувати плівки на пластину, але й отримувати потрібну конфігурацію у разі використання механічних масок;
- висока швидкість випаровування речовини та можливість регулювання її в

широких межах;

- можливість проводити процес у високому вакуумі в атмосфері технологічних газів;

- універсальність, яка дозволяє в одній вакуумній камері отримувати плівки різних матеріалів;

- висока продуктивність у разі групового завантаження та обробки пластин.

Властивості тонких плівок залежать від умов осадження (ступеня вакууму у камері, температури), структури пластини, стану поверхні, властивостей осаджуваної речовини, та інших факторів. На структуру і властивості плівок сильно впливає ступінь вакууму. Залишкові гази діють на плівку, по-перше, під час її утворення, коли атоми залишкових газів, осідають на підкладку одночасно з атомами речовини, яка напиллюють. Залишкові гази можуть вступати в хімічну взаємодію з матеріалом плівки, а також після закінчення процесу росту плівки адсорбуватися на її поверхні. В процесі росту плівки змінюються її структура і властивості, при цьому структура може змінюватись від аморфної до монокристалічної. В залежності від стадії росту плівка може бути гранульованою чи острівковою (тобто складатись з дискретних частинок), пористою (сітчастою) і, на кінець, суцільною, а отже, може характеризуватись особливими електричними властивостями. Різні ефекти, які приводять до зміни електрофізичних властивостей матеріалів в тонких шарах і пов'язані з товщиною плівки, називають розмірними ефектами.

Техніка високого вакууму

Загальна структура установки для вакуумного осадження тонких плівок включає основні вузли: робоча камера, вакуумна система, блоки керування та живлення, прилади контролю параметрів технологічного процесу [2].

.Загальна схема вакуумної системи вакуумного обладнання наведена на рис. 2.1.

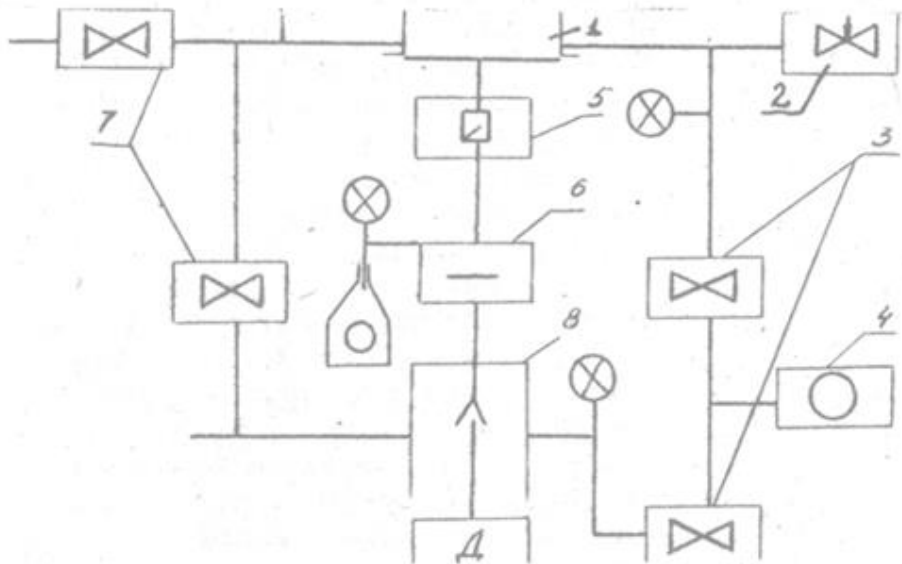


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема вакуумної системи вакуумного обладнання:

1 - робоча камера, 2 – клапан напуску атмосферного газу, 3 – клапани, 4 - механічний насос, 5 – заслін, 6 – азотна пастка, 7 – клапани подачі води, 8 - дифузійний насос

Робоча вакуумна камера - замкнутий об'єм в якому проводиться технологічний процес формування тонких плівок та розміщені технологічна оснастка, система випаровування, або розпилення речовини для осадження плівки. У вакуумній робочій камері тиск повітря менше за атмосферний. Умовно, розрізняють три ступені вакууму. Низький вакуум – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у робочій вакуумній камері менша за її геометричні розміри. Середній вакуум – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у робочому об'ємі співмірна з його геометричними розмірами. Високий вакуум – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі більше геометричних розмірів об'єму. Основними одиницями вимірювання тиску у вакуумній камері є – Торрічелі (Торр) та Паскаль (Па). 760 мм ртутного стовпчика (760 Торр) дорівнює тиску природного повітря у 1 атмосферу, а 1 Торр дорівнює $1,33 \cdot 10^2$ Па.

Вакуумна система включає засоби зменшення тиску в робочому об'ємі. Для зменшення тиску у вакуумній камері можемо використовувати два різних принципи. В першому – газ фізично видаляється з камери і виводиться назовні (механічні та дифузійні насоси). Другий метод відкачки заснований на

конденсації або захопленні молекул газу на деякій частині внутрішньої поверхні камери без видалення газу назовні (кріогенні, кріосублимаційні, сублімаційні та гетероіонні насоси).

В механічних насосах газ переноситься циклічним рухом системи механічних деталей. Використовують три типи механічних насосів: обертальні з масляним ущільненням, двох роторні та турбо молекулярні. Для отримання попереднього вакууму (форвакууму), який необхідний для роботи високовакуумних насосів, широко використовуються насоси з масляним ущільненням (рис. 5.4.). Перенесення газу відбувається обертанням циліндрів, та відрізняється, головним чином, будовою ковзного механізму, котрий захоплює та виводить газ. Механічний форвакуумний насос відкачує систему та робочий об'єм до тиску $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Для створення високого вакууму порядку $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. в робочій камері використовується паромасляний насос типу.

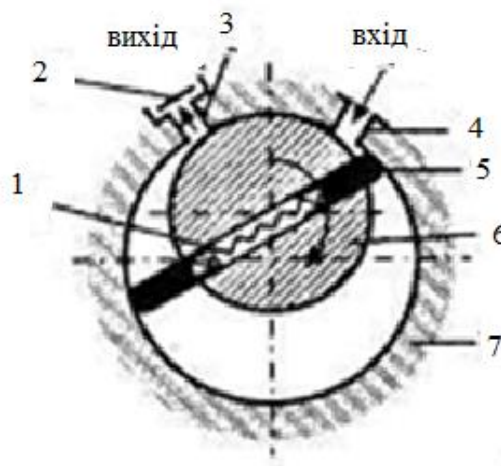


Рисунок 2.2 – Схема пластино – роторного насосу

Основні елементи паромасляного насосу схематично зображені на рис. 2.3. Температура робочої рідини збільшується за допомогою нагрівача, а гарячий пар піднімається в паропровід. Зонтичний ковпачок змінює напрямок потоку так, що пар, пройшовши крізь сопло, уноситься з вакуумної частини насоса. Переходячи з області відносно високого в область відносно меншого тиску, пар розширюється. При цьому нормальний розподіл швидкостей молекул

змінюється, збільшується компонент напрямку розширення, причому направлена швидкість стає більшою за теплову для газу в стані спокою.

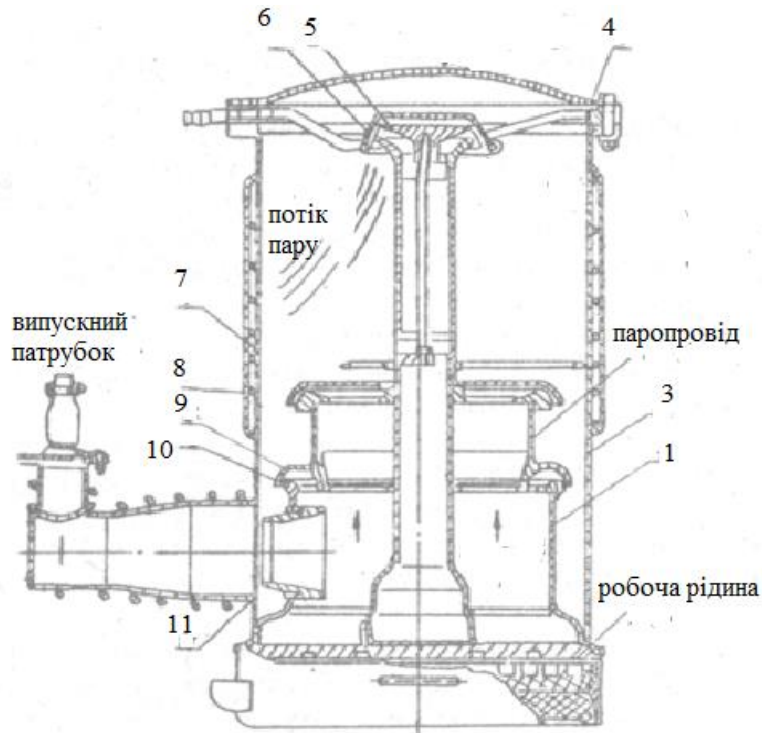


Рисунок 2.3 – Схема дифузійного насосу

Таким чином, струмінь пари рухається з надзвуковою швидкістю для даної температури. Цей факт має велике значення, оскільки молекули, які виходять з нормальним розподілом швидкостей, поширюються дифузно, не визивають ефекту відкачки. Молекули газу з високо вакуумної частини дифундують через випускний отвір та під час зіткнень з молекулами робочої рідини набувають компонент швидкості в напрямку форвакуумної частини насосу. В результаті в області сопла виникає зона пониженого тиску газу, і по напрямку до цієї зони посилюється дифузія газу з високовакуумної області. В міру того, як струмінь пари розповсюджується все далі від сопла, густина її стає меншою, а через зіткнення частково втрачається направленість руху. Отже, розсіюється також і потік газу, який переноситься, і в нижній частині насосу створюється область високого тиску, із якого акумульований газ повинен бути видалений обертальним насосом.

Для конденсації робочої речовини та отримання більш густішого граничного шару за рахунок видалення розсіяних молекул газу, які не дають внеску в потік газу, зовнішні стінки насоса охолоджуються водою.

Для збільшення направленості та швидкості потоку пари в більшості насосів використовується декілька щаблів – зазвичай три сопла, які працюють послідовно.

Для зменшення емісії парів масла у високовакуумну область речовина повинна бути стійкою до термічного розкладання та окисленню при робочих температурах та, по-друге, мати низький тиск парів при температурах, близьких до кімнатної.

Затримка молекул пару, що проникають у вакуумну камеру, здійснює пастками та відбивачами. Для покращення конденсації парів відповідні конструкції охолоджують рідким азотом.

Завдяки своїй властивості працювати в широкому діапазоні тиску та зручності в експлуатації, масляні дифузійні насоси знаходять широке застосування.

Вимірювання тиску.

Схема вимірювання вакууму за допомогою термопарного манометру показана на рис. 2.4. Термопара 1 своїм спаєм припаяна до підігрівача 2. При незмінному струмі підігрівача при зміні тиску змінюється температура спаю, відповідно, і термо-ЕРС, по величині якої оцінюють тиск. Термопарні манометри дозволяють вимірювати тиск до 10^{-3} мм рт. ст.

Для вимірювання високого вакууму в діапазоні $10^{-3} \dots 10^{-7}$ мм рт. ст. використовують іонізаційні манометри. Спрощена схема вимірювання тиску за допомогою іонізаційного манометра показана на рис. 2.5. Робота манометра основана на іонізації молекул залишкового газу електронами з розжареного катоду 1, та вимірюванні іонного струму. Іонний струм пропорційний густині газу та служить мірою тиску:

$$I_H = K_H I_e p,$$

де K_H – чутливість манометра; I_e – електронний струм; p – тиск.

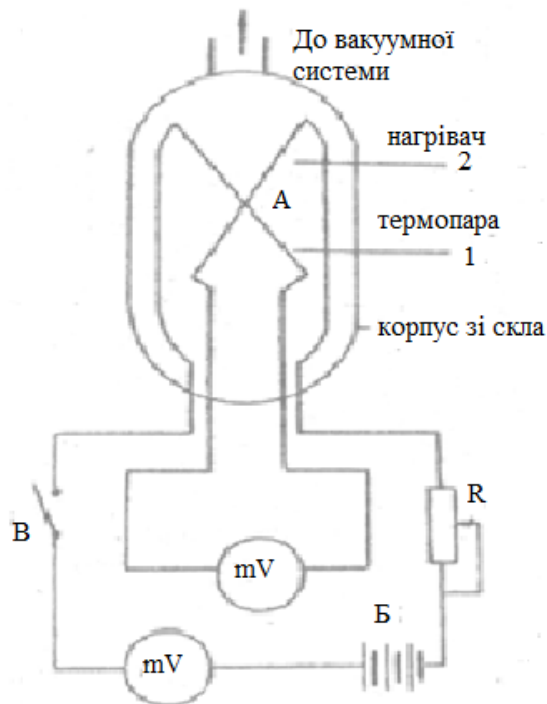


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання тиску на основі термопарного манометра

В області дуже низьких тисків область вимірювання іонізаційних манометрів лімітується так званим рентгенівським ефектом: сітка тріодної лампи безперервно бомбардується електронами з енергією близько 150 eV та з інтенсивністю, визначеною емісійним струмом. Ці електрони збуджують рентгенівське випромінювання, яке, потрапляючи на колектор іонів, може викликати фотоелектронну емісію. Коли вторинна електронна емісія стає вже співрозмірною зі струмом іонів, пропорційність між тиском та іонним струмом порушується. В тріодних лампах вторинний емісійний струм еквівалентний іонному струму, який відповідний тиску $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$. Точність вимірювання тиску іонізаційними манометрами до $10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$

Один зі способів зниження рентгенівського порогу іонізаційних вакуумметрів полягає в такому збільшенні довжини вільного пробігу електронів, щоб пов'язаний з цим фактором ріст числа іонізуючих зіткнень для кожного електрона дозволяв різко зменшити іонізаційний струм. Ця умова виконується під час накладання магнітного поля, перпендикулярного

електричному полю, котре прискорює електрони. Цей принцип реалізований у магнітному вакуумметрі ВМБ-8 з діапазоном вимірювальних тисків від 10^{-9} до 10^{-2} мм рт. ст.

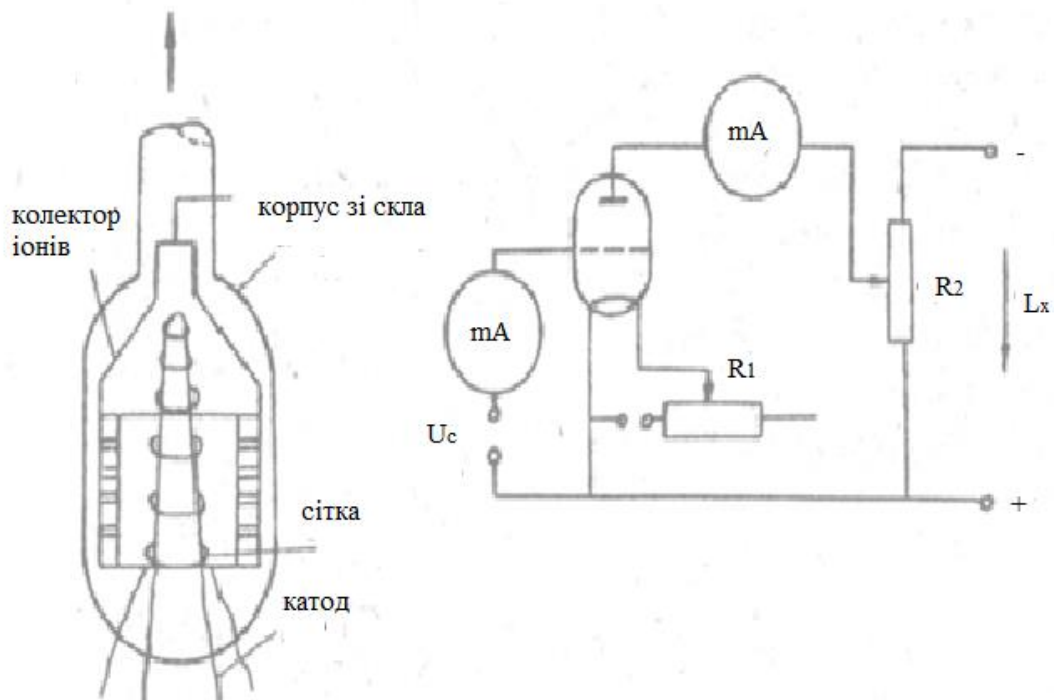


Рисунок 2.5 – Спрощена схема вимірювання тиску на основі іонізаційного манометра

Формування тонких плівок методом термовакuumного випаровування [2, 3].

Метод заснований на створенні направленої потоку пари речовини і подальшої конденсації його на поверхнях підкладок, що мають температуру нижче за температуру джерела пари.

В робочому об'ємі вакуумної установки за допомогою форвакуумних і дифузійних насосів створюють тиск залишкових газів $10^{-4} - 10^{-6}$ Па. В окремих варіантах використовують безмасляну відкачку з застосування молекулярних і титанових гетероіонних насосів, які дозволяють досягти розрідження до $7,5 \cdot 10^{15}$ Па. В робочій камері розміщені: підкладки, які закріплюються на тримачі, нагрівач підкладок і випаровувач для нагрівання речовин, що напилюють. Матеріал, що підлягає випаровування, нагрівається до температури, при якій процес випаровування протікає з заданою швидкістю

Процес можна розділити на наступні етапи:

Випаровування, утворення пари речовини;

Розповсюдження пари (частинок, що випаровуються) від випарника до підкладки;

Конденсація частинок, що випаровувались на підкладці,

Утворення плівкової структури.

При випаровування в високому вакуумі частинки, що випаровуються летять незалежно друг від друга по прямим без взаємних зіткнень і зіткнень з молекулами остаточного газу, не змінюючи свого напрямку.

Утворення пари речовини виконується шляхом його випаровування або сублімації. Речовини переходять в пару при будь-якій температурі вище за абсолютний нуль, але щоб збільшити інтенсивність паротворення речовини нагрівають. Із збільшенням температури підвищується середня кінетична енергія атомів і вірогідність розривів міжатомних зв'язків. Атоми відриваються від поверхні і розповсюджуються у вільному просторі, утворюючи пару. Тиск насиченої пари сильно залежить від температури. Прирости температури на кожні 5-10% понад температуру випаровування приводять до збільшення тиску насиченої пари, а отже, і швидкості випаровування на один порядок.

Нагрівання відбувається різними методами: пропусканням електричного струму через матеріал, що випаровується, через спеціальний випарник, впливом на матеріал сфокусованим пучком електронів чи променем лазера. Вибір того чи іншого способу випаровування залежить від властивостей матеріалу, головним чином від температури його плавлення і випаровування і його можливості випаровуватись з твердої чи рідкої фази при заданій температурі.

Випарники. Якість плівок, що отримуються термічним випарюванням у вакуумі, в значній мірі визначається типом і конструкцією випарників. Вибір випарника залежить від властивостей речовини, що випаровується і його форми (гранули, порошок, проволока), потрібної швидкості випаровування, її постійності в часі і інших факторів. В багатьох випадках необхідно, щоб випарник забезпечив розподілення молекулярного потоку, при якому досягалось би максимально рівномірне осадження.

В залежності від способу нагрівання випарники підрозділяються на резистивні і електронно-променеві.

Резистивні випарники

В резистивних випарниках теплова енергія для нагрівання речовини, що випаровується отримується за рахунок виділення теплової енергії при проходженні струму через нагрівач.

Переваги резистивного нагрівання: а) простота пристроїв; б) зручність контролю; в) зручність регулювання режимів роботи випарника; г) осадження з дротяних випарників може відбуватись в тілесному куті до 4π.

Вимоги до матеріалів для резистивних випарників:

а) тиск пару матеріалу нагрівача при температурі випаровування речовини, що осаджується повинен бути малим;

б) матеріал нагрівача повинен добре змочуватись розплавленим матеріалом, що випаровується (це необхідно для забезпечення гарного теплового контакту між ними);

в) між матеріалами нагрівача і речовиною, що випаровується не повинно виникати хімічних реакцій, а також не повинні утворюватися легко летючі сплави цих речовин, так як в протилежному випадку відбувається забруднення плівок і руйнування нагрівачів.

Конструкції резистивних випарників: а) дротяні; б) стрічкові і в) тигельні. На рис. 2.6 показані види випарників.

Дротові випарники. Основна перевага: проста конструкція і висока економічність. Виготовляються з проволоки тугоплавких металів (вольфраму чи молібдену). Форми: циліндрична спіраль, конічна спіраль, V-подібні, хвилеподібні і інші. Проволока, що застосовується (зазвичай діаметром 0,5-1,5 мкм) повинна мати по всій довжині однаковий переріз, оскільки в протилежному випадку із-за місцевих перегрівів буде порушуватись рівномірність шару, який осаджується і, окрім того, проволока швидко перегорить. При гарному змочуванні матеріалу нагрівача металом, що

випаровується завжди має місце більш-менш активна взаємодія між ними, що в кінцевому рахунку приводить до руйнування випарника.

За допомогою дротяних випарників складно проводити випаровування порошкоподібних матеріалів.

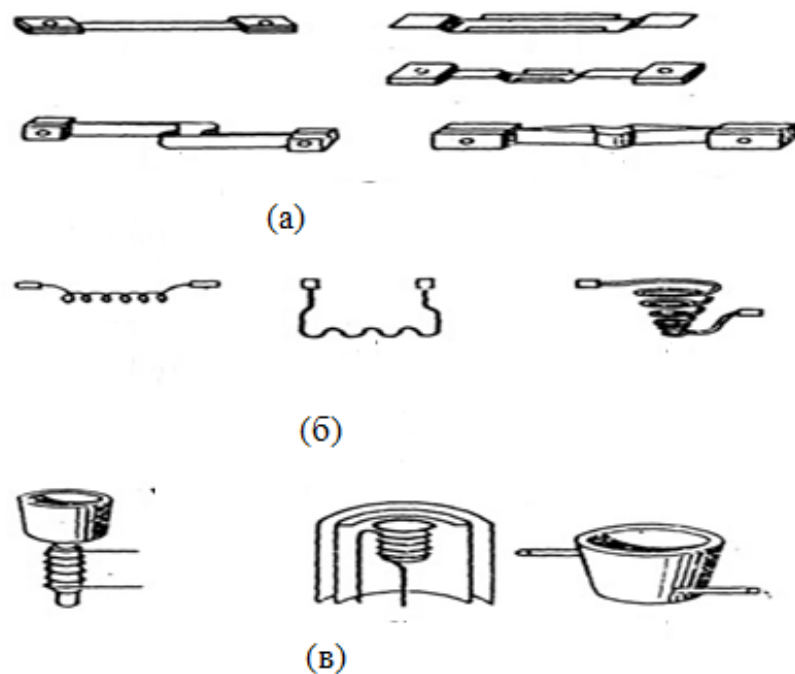


Рисунок 2.6 – Види випарників: а – стрічкові; б – дровові; в – тигельні

Стрічкові випарники. Виготовляються з тонких листів тугоплавких металів. Мають спеціальні поглиблення в вигляді жолобів, човників, чашок чи коробочок, в яких розміщується матеріал, що випаровується. Стрічкові випарники застосовуються для випаровування порошкоподібних матеріалів, в тому числі і неорганічних з'єднань. За конструкцією прості, але порівняно з дротяними вживають більшу потужність при тому ж перерізу із-за більших втрат на випромінювання. Потребує підводу підвищеної потужності. Стрічкові випарники мають більшу направленість випаровування і практично гранично можлива область випаровування їх обмежена тілесним кутом 2π .

Тигельні випарники. Можуть застосовуватись тільки для випаровування матеріалів, що не вступають в реакцію з матеріалом тигля і не утворюють з ним сплавів. Тигельні випарники виготовляються з тугоплавких металів (вольфраму, танталу, молібдену), з окислів алюмінію, берилію, цирконію, торію

і ін., а також графіту. Для осадження матеріалів з низькою температурою випаровування можна також застосовувати тиглі з кварцу і тугоплавкого скла.

Тиглі з окису алюмінію використовують до температури 1600°C , з окису берилію - до 1750°C , з окису торію - до 2200°C ; при більш високих температурах застосовуються тиглі з графіту. Останній гарно піддається механічній обробці, однак багато матеріалів при високих температурах реагують з вуглецем, утворюючи карбід (алюмінію, кремнію, титану). Недоліком графітових тиглів являється також здатність легко поглинати газу, що ускладнює технологічну обробку їх у вакуумі. З графітових тиглів ефективно випаровуються срібло, берилій, стронцій; багато окислів активно відновлюються вуглецем, що дає можливість очищувати метали при застосуванні графітових тиглів. Графітові тиглі можуть використовуватись до температур порядку 2500°C , яка обмежується пружністю пару вуглецю при цій температурі (10^{-1} Па).

Переваги тигельних випарників:

- а) можна здійснювати випаровування великої кількості речовин;
- б) вони являються більш інерційними, оскільки маючи теплопровідність тигельних матеріалів не дозволяє забезпечити швидкий нагрів матеріалів, що випаровується.

Недолік: за допомогою тиглів може бути отриманий тільки вузький пучок речовини, що випаровується.

Поверхневі випарники. Для випаровування сплавів і речовин складного складу (наприклад керамічних чи металокерамічних сумішей), які складаються з компонентів з різко відмінними швидкостями випаровування, застосовуються поверхневі випарники дискретної дії. В цих випарниках використовується метод "вибухового" випаровування. Температура поверхні випарника, на яку падають дрібнодисперсні частинки, вибирається такий, щоб всі падаючі частинки на поверхні розпеченої фольги чи човника виробляється з швидкістю, що дорівнює швидкості випаровування частинок цієї речовини, що забезпечує отримання плівок потрібного складу.

Електронно-променеві випарники

Під час бомбардування електронним пучком поверхні матеріалу, що випаровується, значна частина кінетичної енергії електронів перетворюється на тепло, і поверхня нагрівається до такої температури, що стає джерелом пари. Електронно-променеві випарники завдяки локальному розплавленню навіски матеріалу, що випаровується дозволяють усунути взаємодію її з матеріалом тримача навіски (зазвичай тигель) і можуть використовуватись багатократно. Фокусування електронного пучка в цих випарниках дозволяє отримувати велику концентрацію потужності (до $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$) і високу температуру, що забезпечує можливість випаровування з більшою швидкістю тугоплавких металів.

Швидке переміщення нагрітої зони в результаті відхилення потоку електронів, можливість регулювання і контролю потужності нагріву і швидкості осадження створюють передумови для автоматичного керування процесом. Метод дозволяє отримувати високу чистоту і однорідність плівки.

Недоліки методу: висока напруга (біля 10 кВ); наявність постійних магнітів чи електромагнітів, які являються джерелами небажаного газовиділення в камері осадження.

Схема електронно-променевого випарника з кільцевим випромінюванням показана на рис.2.7.

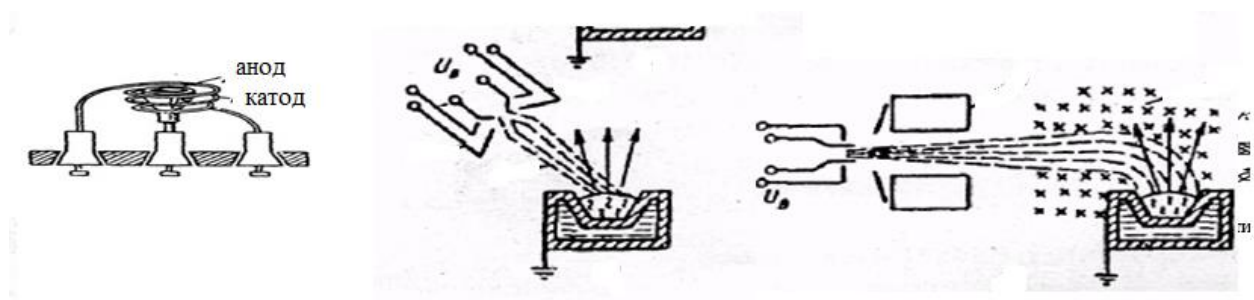


Рисунок 2.7 – Схеми електронно-променевих випарників

Підігрівний катод оточений металічним екраном, який має потенціал катода. Завдяки цьому електрони відхиляються спрямовуються по

криволінійній траєкторії до тигля. Найбільша напруга виникає частіше за все на катоді, в той час як тигель, що охолоджується водою і служить анодом, зазвичай заземлений. Такий вид керування процесом випаровування являється прийнятним лише при малих швидкостях напilenня, а при великих швидкостях може утворюватися просторовий заряд, що зменшує енергію і погіршує фокусування променя. При великих навантаженнях застосовується електронно-променева пушка.

Розповсюдження пари від джерела до підкладок здійснюється шляхом дифузії і конвекції, на які в першу чергу впливає ступінь вакууму. Для зменшення втрат випарованого матеріалу за рахунок напilenня на внутрішньо камерне оснащення і стінки камери, а також для підвищення швидкості напilenня і отримання більш рівномірної по товщині плівки необхідно забезпечити прямолінійний рух частинок пари у напрямі підкладки. Це можливо при умові, якщо довжина вільного пробігу частинок пари буде більше відстані джерело – підкладка.

Можна вважати, що частинки напленої речовини розповсюджуються прямолінійно направленим молекулярним (атомарним) потоком, зберігаючи свою енергію до зустрічі з підкладкою. Рівномірність доставки частинок до поверхні підкладки поліпшується із зменшенням відношення лінійних розмірів поверхні випаровування речовини до відстані до підкладки.

Обладнання, матеріали

Установка вакуумна металізації УВМ – 15У – 1, вакуумметр ВИТ - 1М, прилад для вимірювання поверхневого опору плівок ИУС-3, пластини кремнію, алюміній, спирт етиловий, серветка бязева безворсова, транспортна касета, пінцет, гумові рукавички.

Вакуумна установка призначена для нанесення плівок металів на підкладки у вакуумній камері методом випаровування для лабораторних та наукових досліджень. Структурна схема, склад вакуумної системи обладнання наведена на рис. 2.1, рис. 2.8. Вона складається: вакуумна камера з рухомою кришкою на консолі з пневмоприводом, високовакуумних затворів, блоку

керування вакуумною системою, форвакуумного та двох високовакуумних дифузійних насосів, системи водяного охолодження елементів обладнання, вакуумних клапанів, системи натікачів для напуску повітря й інших газів у робочу камеру, трубопроводів і охолоджуваної пастки та стійки – шафи живлення і керування технологічним процесом. Для вимірювання ступеня розрідження у ВК під час нанесення плівок використовується вакуумметр ВІТ - 1М.



Рисунок 2.8 – Установа вакуумна металізації УВМ – 15У – 1

Техніка термічного вакуумного напилення.

Процес осадження плівок виконують у вакуумних камерах з граничним тиском $1,3 \cdot 10^{-5}$, $6 \cdot 10^{-4}$ Па. Нагрів речовини здійснюють прямим або непрямим (теплопередачою від випарника) способами: шляхом пропускання електричного струму, струмами індукції, електронним бомбардуванням. Приклад структурної схеми технологічної оснастки методу термічного вакуумного напилення представлена на рис. 2.9. Стационарне і знімне оснащення вакуумної камери

періодично необхідно очищати від нашарувань попередніх технологічних операцій. Процес починають із завантаження вакуумної камери: випаровуваний матеріал поміщають в випарник, підкладки встановлюють в тримачі. Залежно від конструкції внутрішньо камерних пристроїв техніки виконання завантаження можуть розрізнятися. Потім камеру герметизують і виробляють відкачування повітря. При закритій заслінці виконують нагрів підкладок до заданої температури і випарників до температури випаровування. Проводять іонне очищення поверхонь підкладок. Відкачують камеру до граничного вакууму. Після цього відкривають заслінку і ведуть напilenня плівки. При отриманні заданої товщини плівки процес напilenня припиняють, перекриваючи атомарний потік заслінкою. Підкладки охолоджують і після цього в камеру напускають повітря і виробляють вивантаження підкладок.

Основні параметри процесу термічного вакуумного напilenня: тиск у вакуумній камері, температура випарників, температура підкладок, час напilenня.

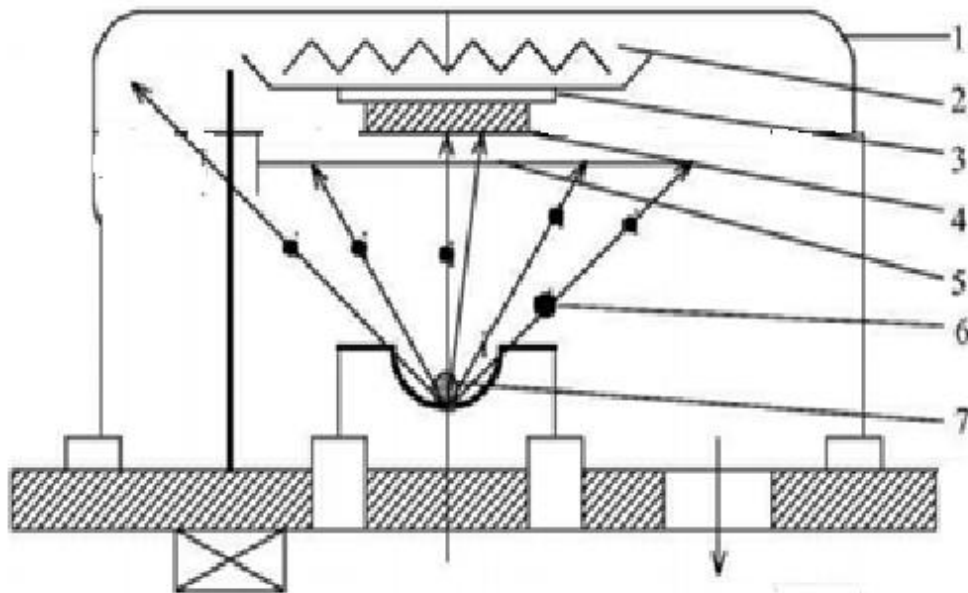


Рисунок 2.9 – Структурна схема технологічної оснастки методу термічного вакуумного напilenня: 1 - робоча камера; 2 - нагрівач підкладки; 3 - утримувач підкладки; 4 — підкладка; 5 - заслінка; 6 – потік частинок; 7- випарник

Заходи безпеки в лабораторії

Будь-які дії, студентів з обладнанням під час виконання лабораторної роботи проводяться виключно під керівництвом викладача та інженерно – технічного персоналу лабораторії. Напруга, яка використовується при роботі установки небезпечна для життя. Тому необхідно дотримуватися правил з охорони праці під час роботи високовольтного електричного обладнанням (напруга до 10000 В). Забороняється вмикати установку в мережу 380 В та працювати з обладнанням без заземлення. Заборонено працювати на установці при несправності в системі блокування. Заборонено працювати на установці, якщо немає потоку води з магістралі через систему охолодження установки. Категорично заборонено студентам самостійно без нагляду персоналу працювати з обладнанням. До роботи допускаються тільки ті особи, які вивчили порядок підготовки установки до експлуатації, засвоїли методику вимірювання на приладах та пройшли інструктаж з охорони праці з вакуумним високовольтним обладнанням та термічним обладнанням

2.2. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з описом установки УВМ – 15У – 1, що складається з вакуумного блоку, блоку живлення й керування,
2. Підготувати обладнання та включити установку відповідно до інструкції (технологічні операції виконує інженерно – технічний персонал лабораторії).

Послідовно виконати (відповідно до інструкції) наступні операції:

- Підключити установку до мережі 380 В з частотою 50 ГЦ;
 - Відкрити вентиль холодної води на підходящій магістралі;
 - Увімкнути механічний насос.
 - Відкрити клапан відкачки об'єму дифузійних насосів. Вести контроль за тиском в вакуумній системі.
3. Увімкнути нагрівач дифузійних насосів;
 4. Відкрити робочу камеру та установити попередньо підготовлені (очищені) підкладки в фіксатор, закріпити технологічну оснастку.

5. Після підготовки вакуумної системи (прогрів дифузійного насосу) закрити робочу камеру та провести технологічний процес (відповідно до завдання запропонованого викладачем).
6. Провести відкачку залишкових газів в робочій камері .
7. При досягненні тиску $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. в робочій камері провести відкачку робочого об'єму дифузійним насосом (відповідно до технологічного режиму заданого викладачем).
8. Контролювати тиск у робочій камері відповідно до інструкції з користування.
9. Після завершення технологічного процесу (заданого викладачем), напустити в робочу камеру повітря. Відкрити кришку вакуумної камери.
10. Одягнути рукавички, зняти пружинні кріплення пластин та витягнути їх пінцетом і покласти у транспортну касету.
11. Установку привести у вихідне положення
12. Записати в протоколі результати спостережень

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Завдання та порядок виконання роботи.
3. Одержані результати, опис результатів спостережень.
4. Аналіз результатів роботи.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Які Ви знаєте методи осадження тонких плівок? Які з них знайшли широке розповсюдження в технології інтегральних мікросхем?
2. Представити схему вакуумної системи установки для нанесення плівок металів.
3. Вакуумна система. Засоби відкачки.
4. Пояснити принцип дії механічних вакуумних насосів

5. Пояснити принцип дії вакуумного дифузійного насоса
6. Перерахувати та описати методи вакуумного нанесення металів.
7. Типи вакуумних систем, що використовуються в мікроелектронних технологіях.
8. Як працює термопарний манометр?
9. Як працює іонізаційний манометр?
10. Назвіть основні етапи термічного випаровування у вакуумі. Опишіть механізм випаровування.
11. Чим визначаються умови прольоту і характер руху частинок, що випаровуються?
12. За рахунок чого відбувається ріст зародків? Опишіть процес утворення плівкової структури. Як Ви розумієте коалесценцію?
13. Які ви знаєте типи випарників?
14. Яким чином можна керувати швидкістю випаровування речовини і швидкістю росту плівки?
15. Основні типи структури плівки, вплив технологічних умов на формування певної структури плівки.
16. При яких технологічних умовах формується кристалічна структура плівки?
17. Назвіть переваги і недоліки термічного вакуумного напилення.

3. КОНСТРУКТИВНО - ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ В ІНТЕГРАЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ

Мета роботи: вивчити особливості створення омічних контактів в напівпровідникових інтегральних структурах; ознайомитися з вакуумними методами осадження тонких плівок для формування контактів метал - напівпровідник

3.1. Основні теоретичні відомості

Під час виготовлення інтегральних схем напівпровідникових виробів велике значення має формування не випрямляючих (омічних) контактів метал-напівпровідник. Під контактом метал-напівпровідник будемо розуміти область, до складу якої входить границя розділу між металом та напівпровідником та прилегла до неї область просторового заряду.

До таких контактів пред'являються наступні вимоги:

- лінійність вольт-амперних характеристик в діапазоні робочих струмів;
- мінімальне значення контактного опору;
- мінімальна інжекція неосновних носіїв;
- можливість приєднати до контактних площадок виводи методом термокомпенсації або зварювання;
- висока адгезія;
- стійкість до корозії.

Відповідно до названих вимог омічні контакти характеризуються наступними параметрами:

- контактним опором для контакту вибраної конфігурації R_k [Ом];
- питомим контактним опором ρ_k [Ом·см²];
- максимальною густиною струму, до якої зберігається лінійність вольт-амперних характеристик j [А/см²];

- діапазоном робочих температур контакту ΔT [$^{\circ}\text{C}$];
- рівнем шумів в режимі робочих струмів $\Delta U_{\text{ш}}$ [мкВ];
- глибиною проникнення контактного матеріалу в об'єм напівпровідника [мм];
- міцністю з'єднання виводів σ [кг/см^2].

При контактуванні металу з напівпровідником їх рівні Фермі повинні співпадати. Якщо робота виходу металу відрізняється від роботи виходу напівпровідника, то за рахунок дифузії носіїв біля границі М-Н виникне збіднення або збагачення напівпровідника носіями. В цій утвореній області виникає електричне поле, яке протидіє дифузійному струму та змінює енергетичні зони в приконтактній області напівпровідника на величину, яка дорівнює різниці робіт виходу металу та напівпровідника.

Розглянемо на основі спрощеної зонної теорії контакт напівпровідника *n*-типу з металом:

якщо робота виходу металу $\Phi_{\text{м}}$ менша роботи виходу напівпровідника $\Phi_{\text{н}}$, тобто $\Phi_{\text{н}} > \Phi_{\text{м}}$, електрони будуть дифундувати в напівпровідник, утворюючи збагачений шар. Накопичений заряд створює електричне поле, направлене від металу в напрямку напівпровідника, яке тягне електрони в напрямку металу, урівноважуючи таким чином дифузійний струм. Електричне поле вигинає вниз енергетичні зони в напівпровіднику поблизу контакту М-Н (рис. 3.1).

Направлений потік електронів буде мати місце до тих пір, поки рівні Фермі в системі не вирівняються і не буде встановлена термодинамічна рівновага, яка характеризує рівність струмів термоелектронної емісії:

$$j_{\text{м0}} = j_{\text{н0}}$$

або

$$AT^2 e^{-\Phi_{\text{м}}/kT} = AT^2 e^{-(\Phi_{\text{н}} + e\varphi_{\text{к}})} \quad (3.1)$$

де

$A = 12 \cdot 10^5$ – постійна Річардсона, $\text{А}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^2)$;

T – температура;

Φ_M , Φ_N – термодинамічна робота виходу відповідно металу та напівпровідника;

k – постійна Больцмана;

φ_K – контактна різниця потенціалів.

З формули (3.1) нескладно визначити контактну різницю потенціалів, яка виникла між металом та напівпровідником:

$$e\varphi_K = \Phi_M - \Phi_N. \quad (3.2)$$

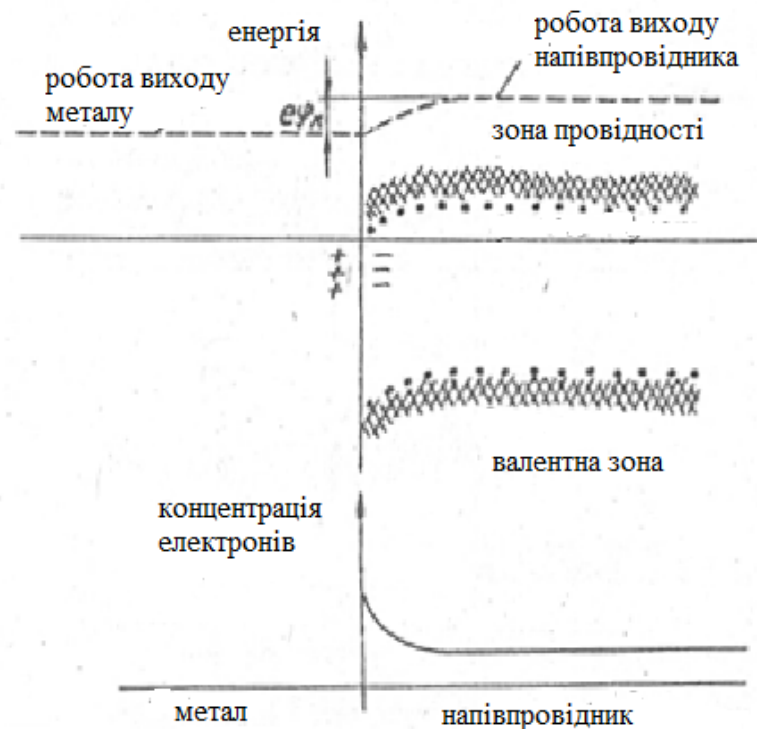


Рисунок 3.1 – Спрощена зонна структура і концентрація електронів поблизу контакту М-Н за умови рівноваги, яка показує утворення збагаченого шару в напівпровіднику n-типу

$$\Phi_N > \Phi_M$$

Збагачений шар на границі слабо впливає на контактний опір. Тому контакт для основних носіїв буде не випрямляючий. В результаті носії без труднощів будуть рухатись під дією як прямого, так і зворотного зміщень. Якщо робота виходу електронів з металу більша за роботу виходу напівпровідника, тобто $\Phi_M > \Phi_N$, то за рахунок дифузії носіїв поблизу границі

М-Н виникне збіднення напівпровідника носіями (рис. 3.2), перехід електронів з напівпровідника в метал приведе до підйому енергетичних зон.

При підключенні зовнішнього джерела такий контакт буде мати нелінійну вольт-амперну характеристику, тобто володіти випрямляючими властивостями, якщо збіднена область достатньо широка. Проте, якщо збіднений шар дуже тонкий, то за рахунок тунелюванню можлива лінійна вольт-амперна характеристика контакту М-Н. Особливе значення має тунелювання при створенні алюмінієвих контактів на кремнії. Як правило зростання концентрації носіїв в кремнії зменшує товщину збідненого шару та приводить до утворення не випрямляючого (омічного) контакту.

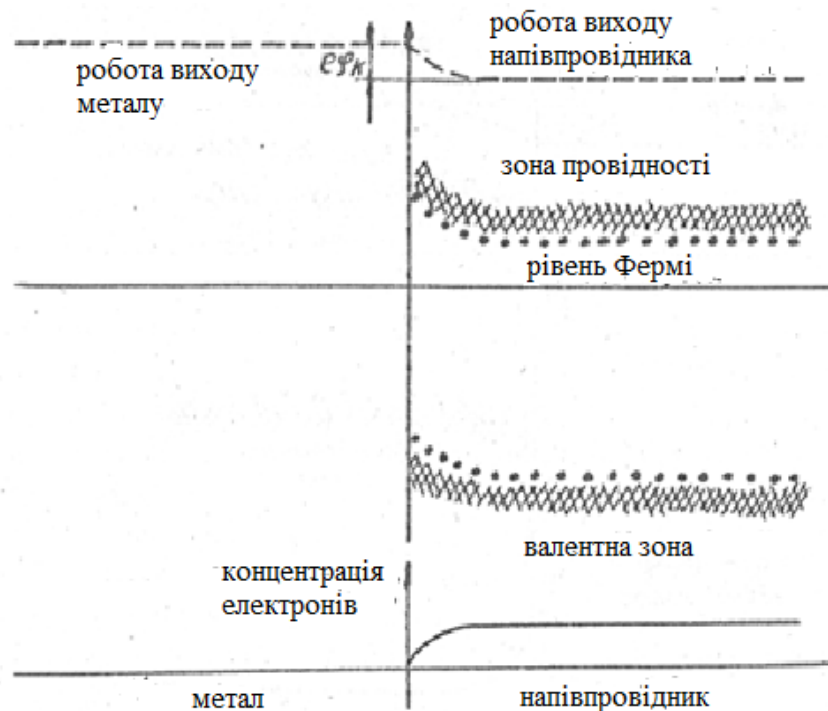


Рисунок 3.1 – Спрощена зонна структура і концентрація електронів поблизу контакту М-Н за умови рівноваги, яка показує утворення збідненого шару в напівпровіднику *n*-типу

$$\Phi_{\text{м}} > \Phi_{\text{н}}$$

Для контакту металу з напівпровідником *p*-типу вольт-амперна характеристика буде лінійною у випадку, коли робота виходу металу більша роботи виходу напівпровідника, тобто $\Phi_{\text{м}} > \Phi_{\text{н}}$, і нелінійною, коли $\Phi_{\text{м}} < \Phi_{\text{н}}$.

Омічні контакти, які зустрічаються на практиці являються проміжними між контактами рекомбінаційного та анізотропного типу.

Рекомбінаційними називають контакти, які характеризуються високою швидкістю рекомбінації носіїв на границі розділу М-Н. В них концентрація носіїв на контакті близька до рівноважної, а в приконтактній області просторовий заряд відсутній.

Для створення таких контактів проводять спеціальну обробку поверхні напівпровідника, наприклад шліфування, тим самим дозволяючи знизити час життя неосновних носіїв заряду на поверхні.

Анізотропні контакти характеризуються підвищеною концентрацією носіїв (p^+ або n^+) в контактному шарі ($M - n^+ - n$ або $M - p^+ - p$).

Такі контакти створюють ідеальний запірний бар'єр для неосновних носіїв. Шари, які мають підвищену концентрацію домішків, можуть бути отримані дифузією, іонним легуванням, епітаксією.

Основним параметром, який визначає якість омичного контакту, є його питомий опір. Теоретичне значення питомого опору менше 10^{-7} Ом \cdot м².

Дослідження омичних контактів ускладнено рядом труднощів:

- не достатньо даних про роботу виходу тонких плівок металу, які залежать від стану поверхні металу та кристалічної структури;
- в певних умовах температурні режими, які використовуються під час створення контактів можуть привести до появи неомичного бар'єру через створення з'єднань металу з напівпровідником або нових фаз;
- відносно мало відомо про вплив поверхневих станів, які можуть викликати подальші викривлення енергетичних зон незалежно від величини роботи виходу металу та напівпровідника, а також змінити конфігурацію та розміри збідненого шару тощо.

Вимоги до матеріалів контакту

1. Розглянемо матеріали контактів, які застосовують для виготовлення інтегральних схем.

В наш час в якості металу для контактів в інтегральних схемах найбільш широко використовують алюміній. Тонкі Al плівки $0,8 \div 1,0$ мкм наносять

методом вакуумного напилювання. Алюміній досить добре забезпечує виконання більшості вимог:

- технологічність нанесення та обробки;
- процес нанесення сумісний з сучасними методами літографії;
- можливість отримання поверхневого опору металічної плівки не вище 0,04 Ом/□, так як питомий опір плівок біля $3 \cdot 10^{-6}$ Ом · см;
- Al утворює задовільні омичні контакти з сильно легованим кремнієм;
- плівки Al витримують густину струму більше 10^5 А/см² при 150 °С;
- плівки Al стабільні до температури евтектики з кремнієм (577 °С).

Недоліки алюмінієвих контактів – схильність до корозії та м'якість.

Широко використовуваними сплавами для контактів з Si та Ge є системи Au-Sb для *n*-типу та Au-In для матеріалу *p*-типу.

Прикладами нових розроблених контактних систем:

- нанесення перед напиленням алюмінію підшару титана та золота з підшаром молібдену;
- нанесення іонного шару платини (0,05 мкм), який вплавляється при температурі 600...700 °С, потім створюються з'єднання з плівки титану-платини та золота.

2. Розглянемо матеріали контактів, які використовуються під час виготовлення напівпровідникових приладів (квантові генератори, тунельні діоди, індикатори, НВЧ-діоди) на арсеніді галію (GaAs) *n*-типу.

Арсенід галію являється бінарною сполукою $A^{III}B^V$, тому при створенні омичних контактів необхідно враховувати наступні особливості:

- здатність сполуки дисоціювати;
- залежність опору контакту від якості попередньої обробки поверхні напівпровідникової пластини (механічна обробка та шліфівка, хімічна поліровка, відмивання тощо).

Технологічні вимоги

Матеріал контакту повинен утворювати в напівпровіднику домішкові центри відповідного типу або бути нейтральними; бути розчинним з

напівпровідником (розчинність в $GaAs$ визначає степінь можливості легування приконтактних шарів напівпровідника); мати більш низьку, ніж напівпровідник температуру плавлення або утворювати з напівпровідником легкоплавку евтектику; мати при температурі плавлення малий тиск парів; добре змочувати поверхню напівпровідника; мати високу тепло- та електропровідність; мати коефіцієнт лінійного розширення σ , який дорівнює або близький до коефіцієнта розширення напівпровідника (для арсеніду галію $\sigma = 5,9 \text{ град}^{-1}$) і не утворювати механічних напружень в контактній області; не створювати фазових перетворень в робочому діапазоні температур та ін.

Для арсеніду галію, як правило, використовується сплав Au або Ag з Ge чи Sn для матеріалу n -типу або з Mg для p -типу.

Олово є донорною домішкою та використовується для контактування з матеріалом електронного типу провідності. Олов'яні контакти мають малий контактний опір, низьку температуру вплавлення, рівний фронт плавлення, рівні механічні напруги.

Застосування олова в якості контактного металу в приладах, працюючих при підвищених напругах електричного поля, обмежується високим коефіцієнтом дифузії олова ($6 \cdot 10^{-4} \exp^{-2,5/kT}$) при температурі $500 \text{ }^\circ\text{C}$, низькій температурі плавлення ($232 \text{ }^\circ\text{C}$).

Під час роботи готових приладів з олов'яними контактами виникає деградація електричних параметрів з часом за рахунок створення тонких дифузійних каналів в об'ємі напівпровідника.

Індій є в арсеніді галію нейтральною домішкою. Вольт-амперна характеристика переходів індій-арсенід-галію лінійна незалежно від концентрації електронів в арсеніді галію та температури вплавлення. Індієві контакти використовуються як в електронному, так і дірковому матеріалі. Недоліки таких контактів – низька теплопровідність та високий питомий опір.

Золото являється нейтральною домішкою в арсеніді галію, має достатньо високу теплопровідність $0,707 \text{ ккал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град})$ та малий питомий опір ($2,04 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Ці властивості золота, а також прямолінійні ділянки вольт-амперних

характеристик переходів золото-арсенід-галію дають можливість застосовувати його в якості контакту до арсеніду-галію.

Недоліки, які обмежують застосування контактів: висока температура плавлення золота (1063 °C), значні механічні напруження, велика вартість контактів.

Розглянуті властивості простих металічних контактів одночасно задовольнити всім вимогам, пред'явленим до них не можуть. Тому використовують складні контакти, до складу яких входить тугоплавкий метал з хорошою електропровідністю, наприклад, золото, срібло, нікель, які розширюють його температурний діапазон, та легуючий компонент, наприклад, олово, германій, телур, які забезпечують його низький опір.

Контакт олово-германій (відповідно 88% та 12%). Такий контакт має температуру плавлення 356 °C. Наноситься у вакуумі не нижче $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., потім проходить вплавлення контакту в атмосфері чистого водню при температурі 350...400 °C протягом 2 хвилин, що приводить до дифузії германію в арсенід галію та підвищує концентрацію основних носіїв. Сплав *Au-Ge* не змочує поверхні *GaAs* та при нагріванні намагається зібратися в кульки. Цей процес може бути припинений осаджуванням тонкої плівки Ni поверх сплаву *Au-Ge*, яка має властивість "утримувати" цей сплав від стягування в кульки. Сплав *Au-Ge* підходить для *GaAs* як *n*-типу, так і *p*-типу, оскільки *Ge* являється для нього амфотерною домішкою, тобто він може вести себе як і донор, так і акцептор.

Якість та властивості контактних структур залежить від технологічних умов формування плівок. Конденсація пари на поверхні підкладки залежить від температури підкладки і густина атомарного потоку. Атоми пари, що досягли підкладки, можуть миттєво відобразитися від неї (пружне зіткнення), адсорбуватися і через деякий час відобразитися від підкладки (рееіспаріння), адсорбуватися і після короткочасної міграції по поверхні остаточно залишитися на ній (конденсація). Конденсація атомів відбувається, якщо їх енергія зв'язку з атомами підкладки більше середньої енергії атомів підкладки, інакше атоми

відображаються. Якщо підкладка нагріта, енергія її атомів вища, вірогідність конденсації пари нижча. Температура, вище за яку при даній густині потоку пари всі атоми відображаються від підкладки і плівка не утворюється, називається критичною температурою конденсації. Критична температура залежить від природи матеріалу плівки і підкладки і від стану поверхні підкладки. При певній температурі підкладки, менше критичної, конденсація пари можлива тільки за умови перенасичення пари, тобто для конденсації існує критична густина атомарного потоку. Критичною густиною атомарного потоку для даної температури підкладки називається густина, при якій атоми конденсуються на підкладці.

Утворення зародків відбувається в результаті знаходження атомами місць, відповідних мінімуму вільної енергії системи атом - підкладка. Зростання зародків відбувається за рахунок приєднання нових атомів, мігруючих по поверхні або осаджуються на зародки безпосередньо з проміжку джерело - підкладка. У міру конденсації пари зародки ростуть, між ними утворюються сітчаста структура, зародки зливаються в крупні острівці. Після цього настає стадія злиття острівців з утворенням єдиної сітки. Сітка переходить в суцільну плівку, яка починає рости в товщину. З цього моменту вплив підкладки виключається і частинки пари від поверхні плівки практично не відображаються.

На етапі утворення зародків і зростання плівки дія залишкових газів на плівку, що росте, повинна бути зведена до мінімуму. Забезпечити це можна підвищенням ступеня вакууму або збільшенням швидкості паротворення. Створення високого вакууму представляє значні труднощі, і крім того, час відкачування робочих камер великий. Тому на практиці процес, в основному, проводять при тиску $1,3 \cdot 10^{-5}$, $6 \cdot 10^{-4}$ Па, яке досягається за допомогою форвакуумного і дифузійного насосів.

На чистоту плівки, що росте, впливає також наявність в потоці пари частинок матеріалу випарника і забруднення, присутніх на поверхні підкладки. Тому застосовують випарники з матеріалів з тиском насиченої пари при

температурі випаровування істотно меншому, ніж у випаруванні речовини, а також виконують очищення поверхні підкладок у вакуумній камері безпосередньо перед напиленням плівок.

Для збільшення швидкості паротворення з метою зменшення впливу залишкових газів на властивості напилених плівок випаровування майже завжди ведуть при температурах, що перевищують умовну температуру випаровування речовини (форсований режим). При низьких швидкостях випаровування можливе утворення рихлих, шорстких плівок. Якість плівки визначається також розміром зерна і величиною адгезії до поверхні підкладки. Підвищення температури підкладок зменшує густину центрів зародкового утворення і, отже, сприяє формуванню грубозернистих плівок і, навпаки, підвищення густини потоку пари речовини сприяє отриманню плівок з дрібнозернистою структурою.

За інших рівних умов схильністю до утворення дрібнозернистої структури володіють метали з високою температурою випаровування W, Mo, Ta, Pt, Ni. Низькотемпературні метали Zn, Cd і інші утворюють грубозернисті плівки. Адгезія, тобто міцність зчеплення плівки з підкладкою, при значній різниці в їх ТКЛР зменшується через внутрішні напруги, що виникають в плівці при охолодженні після напилення. Недостатня адгезія - причина відшаровування плівок. Плівки товщиною більше 1,5— 2 мкм мають недостатню адгезію, тому термовакuumне напилення застосовують для отримання плівок меншої товщини. Велика адгезія забезпечується для напилюваних матеріалів, хімічно споріднених з матеріалом підкладки. В цьому випадку конденсація супроводжується утворенням міцних хімічних зв'язків (хемосорбція). Матеріали підкладок для тонких плівок (ситал, кераміка, скло) складаються з оксидів металів і неметалів. Хемосорбція відбувається при напиленні оксидів, а також легко окисних металів Al, Cr, Mn, Ti, W. Золото, платина, паладій мають до цих підкладок низьку адгезію. Для поліпшення адгезії і структури плівок напилення проводять на нагріті до температури 200-400 °С підкладки.

Обладнання, матеріали

Установка вакуумна металізації УВМ – 15У – 1, вакуумметр ВИТ - 1М, прилад для вимірювання поверхневого опору плівок ИУС-3, пластини кремнію, алюмінію, спирт етиловий, серветка бязева безворсова, транспортна касета, пінцет, гумові рукавички.

3.2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати обладнання та включити вакуумну установку відповідно до інструкції (технологічні операції виконує інженерно – технічний персонал лабораторії).

Послідовно виконати наступні операції:

- Підключити установку до мережі 380 В з частотою 50 ГЦ;
- Відкрити вентиль холодної води на підходящій магістралі;
- Увімкнути механічний насос.
- Відкрити клапан відкачки об'єму дифузійних насосів. Вести контроль за тиском в вакуумній системі.

13. Увімкнути нагрівач дифузійних насосів;

14. Відкрити робочу камеру та установити попередньо підготовлені (очищені) підкладки кремнію та закріпити навіски алюмінію у випарнику.

15. Після прогріву дифузійного насосу

16. Провести відкачку залишкових газів в робочій камері .

17. При досягненні тиску $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. в робочій камері провести відкачку робочого об'єму дифузійним насосом (відповідно до технологічного режиму заданого викладачем).

18. Контролювати тиск у робочій камері відповідно до інструкції з користування.

19. Провести напилення металевої плівки (алюмінію) на пластинку кремнію. (технологічний режим задає викладач).

20. Після завершення технологічного процесу (заданого викладачем), напустити в робочу камеру повітря. Відкрити кришку вакуумної камери.
21. Одягнути рукавички, зняти пружинні кріплення пластин та витягнути їх пінцетом і покласти у транспортну касету.
22. Провести дослідження нанесених плівок. Виміряти поверхневий опір плівок.
Примітка. За вказівкою викладача об'єм експериментальних досліджень може бути уточненим.
23. Установку привести у вихідне положення
24. Записати в протоколі результати спостережень
25. Сформулювати висновки за результатами роботи.

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Завдання та порядок виконання роботи.
3. Одержані результати, опис результатів спостережень.
4. Аналіз результатів роботи.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Вимоги до омичних контактів метал-напівпровідник.
2. Типи омичних контактів.
3. Фізика омичного контакту типу метал-напівпровідник.
4. Якими параметрами характеризуються омичних контактів
5. Вибір матеріалу для омичних контактів.
6. Які Ви знаєте методи осадження тонких плівок? Які з них знайшли широке розповсюдження в технології інтегральних мікросхем?
7. Представити схему вакуумної системи установки для нанесення плівок металів.
8. Вакуумна система. Засоби відкачки.
9. Назвіть переваги і недоліки термічного вакуумного напилення.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ СТРУКТУР МЕТАЛ-НАПІВПРОВІДНИК

Мета роботи: ознайомитись з методикою вимірювань та визначення опору омичних контактів метал - напівпровідник.

4.1. Основні теоретичні відомості

При дослідженні електрофізичних параметрів матеріалів та формуванні напівпровідникових структур виникає задача визначення опору контакту метал - напівпровідник, оскільки такий контакт являється неодмінною складовою частиною будь-якого напівпровідникового пристрою

Визначення опору контакту метал - напівпровідник при малих значеннях струму пов'язане зі значними експериментальними труднощами, оскільки падіння напруги на контакті в таких умовах, як правило, мале в порівнянні з падінням напруги на об'ємному опорі та опорі *p-n*-переходу.

Для дослідження контактного опору R_k використовують наступні методи [4, 5].

1. Оцінюють різницю між повним опором $R_{пов}$ структури певної геометричної форми та розрахованим опором $R_{н/п}$ об'єму напівпровідника з заданим питомим опором:

$$R_k = \frac{R_{пов} - R_{н/п}}{2}.$$

2. На торцеві грані напівпровідникового кристалу, який має правильну геометричну форму наносять досліджувані контакти. Вимірюють розподіл потенціалу вздовж поверхні та екстраполюючи його до границі, визначають падіння напруги на контакті та відповідно контактний опір (рис. 4.1)

3. Контакти наносять на поверхню напівпровідникової пластини у вигляді площадок малого діаметру та пропускають струм між контактами 1, 2. Вимірюють падіння напруги на контактах 2 і 3 (рис. 4.2) .

Модифікацією даного методу є нанесення n контактних площадок на поверхню напівпровідника (рис. 4.2). Струм пропускають між крайніми контактами та знімають потенціал послідовно між точками 1-2, 1-3, ..., 1- n . Визначають R_K екстраполюючи отриману залежність до контакту 1.

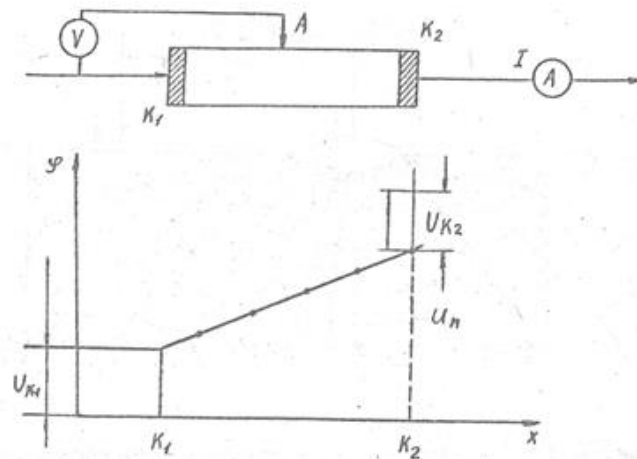


Рисунок 4.1 – Схема методу визначення опору контактів нанесених на торцеві грані напівпровідникового кристалу

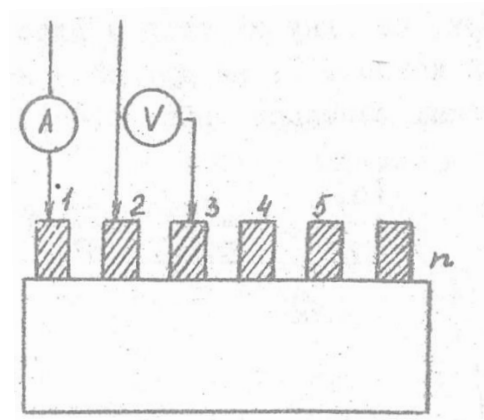


Рисунок 4.2 – Схема методу визначення опору контактів нанесених на поверхню напівпровідникової пластини

4. Комплексний метод оцінки опору контактів включає метод торцевих та поверхневих контактів. Вимірювання проводять на змінному струмі з використанням мостової схеми, щоб уникнути виникнення ефекту Пельтьє на струмопровідних контактах.

5. В методі поверхневого потенціалу вимірюють розподіл потенціалу на поверхні напівпровідникової пластини при протіканні струму від

дослідного контакту (2) до омичного контакту великої площі (1) (рис. 4.3).

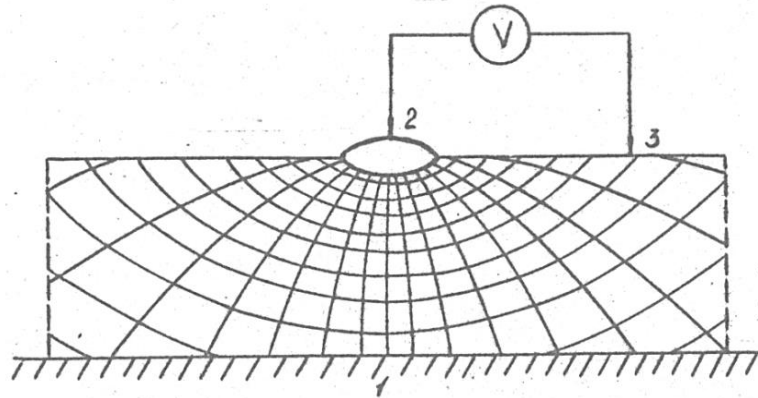


Рисунок 4.3 – Схема методу поверхневого потенціалу

Ці методи визначення опору омичного контакту складні та мають низьку точність, тому їх використання обмежене.

Метод визначення омичного контакту метал-напівпровідник, в якому усунені означені недоліки, досліджено в роботі [6]. В даному методі на одну зі сторін пластини напівпровідника наносять металевий невідпрямлюючий контакт (1), на протилежну сторону – контакти різних геометричних розмірів (рис. 4.4). Вважають, що досліджуваний зразок має товщин L , а інші розміри пластини необмежені.

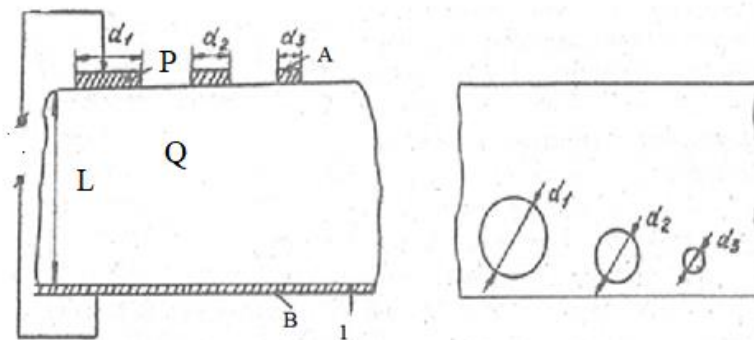


Рисунок 4.4 – Схема структури дослідного зразка для визначення омичного контакту метал-напівпровідник

При пропусканні через омичний контакт з металу в напівпровідник електричного струму густиною j падіння напруги між точкою P в металі та точкою Q в напівпровіднику (рис. 4.4) визначається виразом:

$$U_{PQ} = R_{PQ}j$$

Якщо точки P та Q вибрати дуже близько на границі метал-напівпровідник, то R_{PQ} буде опором контакту метал-напівпровідник.

Повний опір зразка R_{AB} (рис. 4.4) (точки A та B знаходяться на поверхні контактних шарів) складаються з приконтактного опору R_k на границі метал-напівпровідник та опора об'єму зразка:

$$R_{AB} = R_k + (\rho_m a_m + \rho L),$$

де ρ_m , ρ – питомий опір відповідно металічного контакту та напівпровідника; a_m , L – товщина відповідно контакту та напівпровідної пластини.

Зазвичай вплив $\rho_m a_m$ незначний, тому їм нехтуємо, тоді

$$R_{AB} = R_k + \rho L$$

Повний опір R для зразка, структура якого зображена на рис. 4.4 при умові $L > d$, аналітично визначений в роботах [5, 6]:

$$R = \frac{\rho}{\pi d} \operatorname{arctg} \frac{4L}{d} + \frac{4\rho_k}{\pi d^2} + R_q,$$

де ρ – питомий опір зразка; L – товщина напівпровідникової пластини; d – діаметр контакту, ρ_k – питомий опір контакту; R_q – додатковий опір, обумовлений нижнім плоским контактом.

Досвід свідчить, що R_q має величину менше 0,5 Ом, тому нею можемо нехтувати.

При відомих значеннях діаметру контакту, товщини пластини та повного опору зразка, можна визначити опір контакту ρ_k та питомий опір зразка ρ .

Для цього необхідно провести вимірювання повного опору зразка при різних діаметрах контакту (рис. 4.4) та скласти систему рівнянь:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\rho}{\pi d_1} \operatorname{arctg} \frac{4L}{d_1} + \frac{4\rho_k}{\pi d_1^2}; \\ R_2 &= \frac{\rho}{\pi d_2} \operatorname{arctg} \frac{4L}{d_2} + \frac{4\rho_k}{\pi d_2^2}. \end{aligned} \tag{4.1}$$

Розв'язавши систему рівнянь відносно ρ_k та ρ , визначимо питомий опір напівпровідника та омичного контакту метал-напівпровідник. .

Обладнання, матеріали

Обладнання: стабілізоване джерело живлення Б5-47, цифровий вольтамперметр В7-35, зондовий стенд.

Матеріали: напальчники, бязеві серветки, зразки для досліджень.

Зразки для досліджень. Тестові структури сформовані на основі пластин кремнію: КДБ та високолегованих КЭФ. На всіх зразках попередньо повинна бути визначена товщина кремнію. На пластини методом вакуумного термічного осадження нанесені шари металізації. Тестові структури відрізняються товщинами шару металу. На одній зі сторін пластини напівпровідника наносений суцільний металевий невідпрямлюючий контакт, на протилежній стороні пластини контакти різних геометричних розмірів (діаметром: 220, 170, 130, 80, 40 мкм). відповідно до шаблону фотолітографії. Структура тестового зразка схематично наведена на рис. 4.4.

Примітка. Відповідно до завдання запропонованого викладачем уточнюють досліджувані зразки та комплектація вимірювального стенду .

4.2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати дослідний стенд та тестовий зразок відповідно до інструкції на робочому місці та завдання запропонованого викладачем.
2. Підготувати досліджуваний зразок та розмістити на столик установки.
3. Провести дослідження опору зразка для двох омичних контактів на тестовій структурі (номера контактів задаються викладачем). Провести повторні вимірювання для заданих омичних контактів.
4. Використовуючи значення опору зразка при різних діаметрах контакту та їх геометричні розміри, на основі системи рівнянь (4.1) визначити питомий опір напівпровідникової пластини ρ , питомий опір омичного контакту ρ_k .
5. Провести статистичну обробку результатів дослідження.

6. Провести аналіз отриманих результатів.
7. Сформулювати висновки за результатами роботи роботи.

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Одержані результати відповідно до порядку виконання роботи.
3. Аналіз результатів роботи.
4. Висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Типи омічних контактів.
2. Фізика омічного контакту типу метал-напівпровідник.
3. Вимоги до омічних контактів метал-напівпровідник.
4. Якими параметрами характеризуються омічних контактів
5. Вибір матеріалу для омічних контактів.
6. Особливості методів визначення опору омічних контактів метал – напівпровідник.

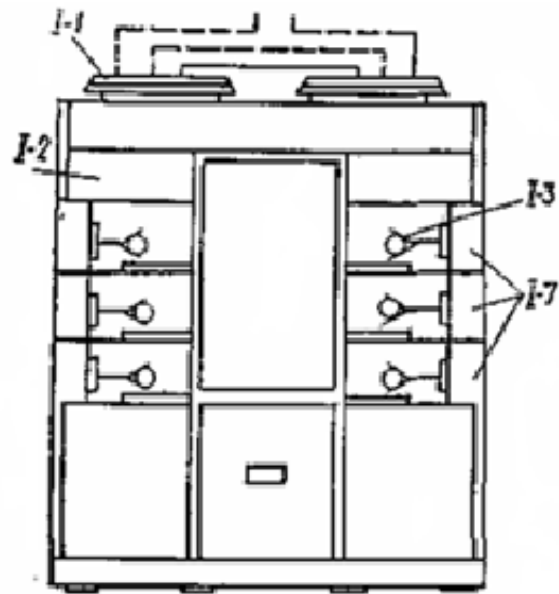
5. ОБЛАДНАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. СИСТЕМИ ПРЕЦИЗІЙНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНИХ УСТАНОВОК

Мета роботи: вивчити структуру і принцип роботи систем прецизійного контролю та регулювання параметрів високотемпературних технологічних процесів; ознайомитися з порядком керування технологічними режимами та виходом на необхідний температурний режим.

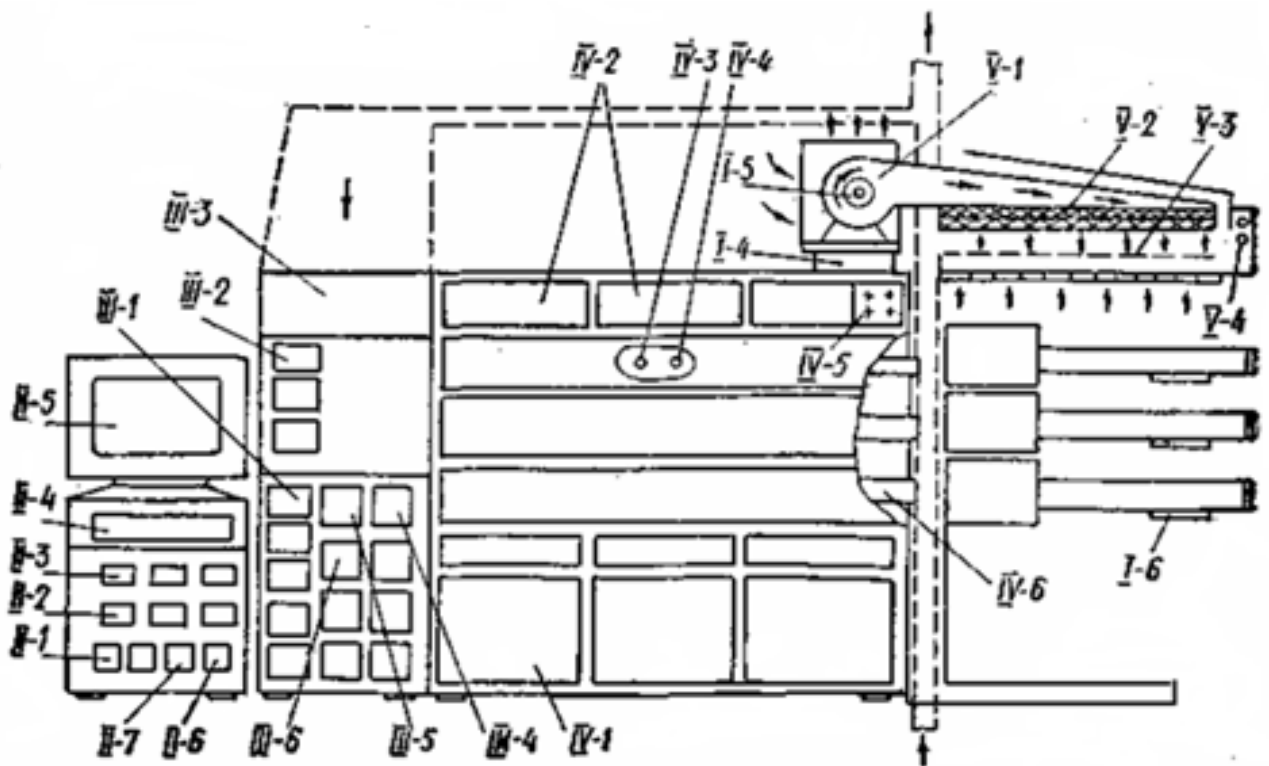
5.1. Основні теоретичні відомості

Високотемпературні процесі застосовуються в дифузійних й окисних технологічних операціях. Для проведення високотемпературних технологічних процесів використовуються прецизійні установки, які забезпечують підтримку температурного режиму з точністю до $\pm (0,25...0,5) ^\circ\text{C}$, його відтворюваність із точністю до $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$, високу продуктивність (до 100 пластин з одночасним їх завантаженням і вивантаженням) і стабільність роботи.

Широко поширені наступні термічні установки: однозонні: СДО-125/А (можуть бути одно-, двох- і чотирьохканальні); СДОМ-3/125 (трьох- і шестиканальні) та ін. Всі вони розроблені на основі автоматизованої дифузійної системи (АДС) із застосуванням уніфікованих елементів і блоків. АДС використовуються для виконання процесів дифузії, окислювання, відпалу, піролізу та інших термічних процесів на напівпровідникових пластинах діаметром до 100 мм із автоматизацією їхнього завантаження в реактор і вивантаження з нього при плавному регулюванні швидкостей завантаження й вивантаження. Основні вузли термічні установки показані на рис. 5.1 [7] .



(a)



(б)

Рисунок 5.1 – Структурна схема термічної установки: (а) вид з зони завантаження, (б) вид з боку

Завантажувальна система містить у собі: блок пило захисту 1-1; камери 1-2; модулі завантаження 1-3; пульт керування 1-4 блоком пило захисту; нагнітач повітря 1-5; пульт керування завантаженням 1-6; блок керування

завантаженням 1-7. Система забезпечує завантаження кварцових касет із пластинами в реактори печі, а також їхнє вивантаження на площадку роторного пристрою.

Модуль завантаження дозволяє подати кварцову касету із пластинами до вікна реактора печі, помістити касету в реактор, здійснити її зворотно-поступальний рух, а після закінчення процесу встановити касету у вихідне положення. Керування роботою, механізмів модулів завантаження здійснюється від пульта й блоку управління завантаженням, а також від пульта програмного керування.

Блок пило захисту служить для створення пило відсутньої атмосфери при проведенні термічних процесів у зоні завантаження й складається з наповнювача повітря V-1, фільтрів V-2, розподільних ґрат V-3, світильника V-4. Його робота заснована на безперервному продуванні об'єму потоком чистого повітря, спрямованого зверху вниз через ряд фільтрів.

Термічну обробку пластин проводять у такий спосіб. У зону реактора з високою рівномірністю розподілу температури вводять на касеті групу пластин, прогрівають їх при температурі на 100...150 °C нижче температури, заданої за технологією, і подають парогазову суміш. Керування нагріванням пластин здійснюється програмним пристроєм, що визначає температуру й час завантаження касети із пластинами, час її нагрівання до робочої температури (період форсажу), час легування й час термічної обробки (режим).

Температура в робочій зоні підтримується автоматично. Високі вимоги по точності підтримки температури і рівномірності температурного поля в робочій зоні забезпечуються застосуванням трьохканальної системи авторегулювання. Приклад спрощеної схеми керування технологічним режимом термічної установки представлений на рис. 5.2. Трисекційний нагрівальний елемент 2 забезпечує рівномірний розподіл температури уздовж реактора нагрівальної камери 1, що визначається рівномірністю витків і сталістю теплових втрат по довжині нагрівача, а також конструкцією нагрівальної камери й однорідністю теплового опору теплоізоляції.

Регулювання температурного поля реактора здійснюється по трьох точках у місцях розташування восьми вимірювачів температури (термопар) 3, так що система регулювання температури підтримується тільки в цих точках, а кожна секція нагрівального елемента виділяє певну потужність.

Робота центрального каналу регулюється двома термопарами, які розташовані посередині центральної секції нагрівального елемента. Для збільшення чутливості термопари з'єднані послідовно. Поруч із ними перебувають дві додаткові термопари, які включені диференційно (зустрічно) щодо термопар крайніх секцій нагрівального елемента. Завдяки такому їхньому з'єднанню кожен дві термопари показують відхилення температури тієї або іншої секції нагрівального елемента стосовно поточному значенню температури його центральної секції..

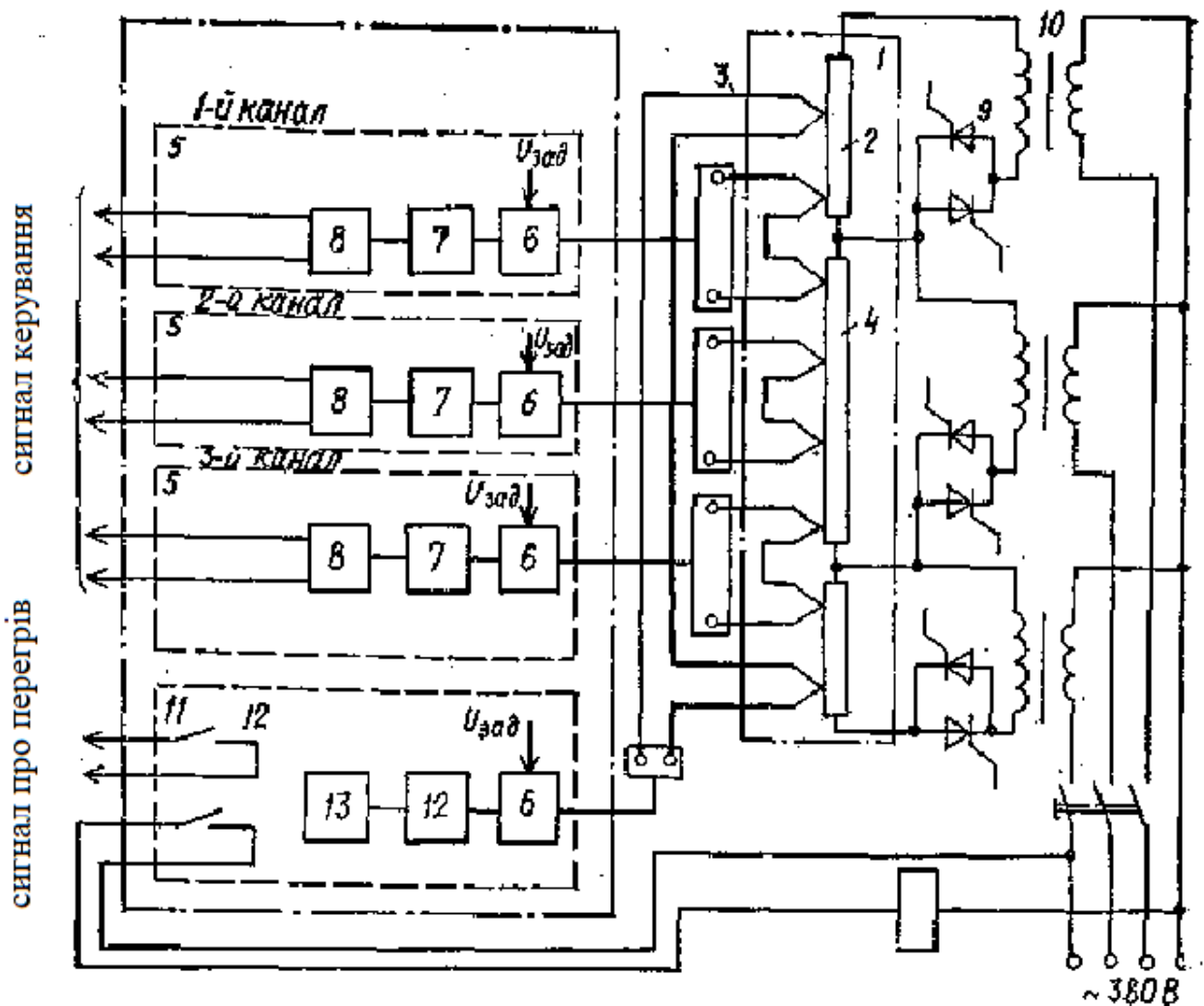


Рисунок 5.2 – Спрощена схема керування технологічним режимом термічної установки

Термопари підключені до регуляторів температури 5, робота яких заснована на функціональному перетворенні сигналу відхилення термо - е. р. с. (U_T) термопари від значення, встановленого пристроєм завдання температури 6. Останнє видає постійну напругу (мілівольти), що відповідає заданій температурі в реакторі. Різниця між заданим і поточним значеннями термо-е.р.с. термопари у вигляді постійної напруги розбалансу надходить на наступний каскад регулятора температури - підсилювач постійного струму 7, що підсилює сигнал розбалансу й подає його на функціональний підсилювач 8, де він підсилюється й перетворюється у сигнал, необхідний для керування моментом включення тиристорів 9, включених у вторинну обмотку понижуючого силового трансформатора 10. Силовий блок, що складається із трансформатора й тиристорів, подає необхідну для підтримки заданої температури потужність на відповідну секцію нагрівального елемента.

При відхиленні температури в центральній секції нагрівального елемента система регулювання одержує сигнал розбалансу й формує відповідний керуючий сигнал, що за допомогою силового блоку змінює потужність нагрівального елемента до встановлення заданої температури. Система керування крайніми секціями нагрівального елемента відрізняється від системи керування його центральної секції диференціальним включенням термопар і подачею на вхід регулятора температури різниці термо-е.р.с. зустрічно включених термопар, що дозволяє використати пристрої завдання температури з одним потенціометром. Для захисту нагрівального елемента від перегріву застосований обмежувач температури 11, на вхід якого подається сумарний сигнал, що надходить з термопар, встановлених у крайніх секціях нагрівального елемента.

Такий спосіб контролю температури дає можливість обмежувати температуру кожної із трьох секцій нагрівального елемента з використанням одного вимірювального приладу. При збільшенні температури комутуючий пристрій 12 відключає живлення магнітного пускача 13, що, у свою чергу,

знімає напругу із трансформатора 10. Керування нагріванням касет (програмна зміна їх температури), необхідний перепад між заданою робочою і встановленою у регуляторі температурами здійснюються сумуванням температури центрального каналу регулювання й температури, заданої зовнішнім програмним пристроєм ("Програма"). Швидкість наростання й зниження програмувального сигналу визначає якість перехідного процесу залежно від температури, що задається додатково, враховуючи довжини й маси касети із пластинами.

Конструкція установки містить (рис. 5.1): панель приладів *IV-1*; панель керування *IV-2*; термоелементи *IV-3*, *IV-4*; панель сигналізації *IV-5*; нагрівальні камери *IV-6*.

На панелі приладів розташована система автоматичного регулювання, силові блоки живлення, органи комутації. Камера для нагріву містить циліндричний нагрівальний елемент, виконаний у вигляді спіралі, розділеної на три самостійні секції. Нагрівальний елемент, з шаром теплоізоляції зі смуг пресованого кремнеземного волокна, поміщений у циліндричний кожух з алюмінієвого сплаву, на поверхні якого встановлені коробки для кріплення контрольних і регулюючих термоелементів з термопарами. Нагрівальні камери мають панель керування й зовнішню систему водоохолодження.

У цілому електропіч характеризується параметрами: 3 реактори - (залежно від виконання); внутрішній діаметр нагрівального елемента - 180 мм; діапазон зміни температури в робочій зоні реактора - 700...1250 °С; в робочій зоні - не менш 600 мм із точністю розподілу температури $\pm 0,5$ °С; нестабільність температури в опорній точці - не більше 0,25 °С, а відтворюваність температури в реакторі - не менш $\pm 0,5$ °С; максимальна електрична потужність, споживана піччю із трьома реакторами під час її розігріву - не більше 100 кВт, а в сталому режимі - 35 кВт.

Для підготовки сумішей газів застосовуються пристрої газорозподілу типу УГ-2 або УГ-5. Пристрій газорозподілу призначений для підготовки сумішей газів (азоту або аргону, кисню, хлористого водню, пару дистильованої води,

бромистого бору або трихлористого фосфору) і їхньої автоматичної подачі по заданій програмі в камери реактора з безпосереднім виміром споживання при окислюванні, дифузії, відпалу, піролізу.

Розглянемо коротко пристрій газорозподілу типу УГ-5 (рис. 5.1). У верхній частині розташована панель індикації III-3, на якій установлені три панельних цифрових вольтметри для контролю витрати газу й температури дифузанта, індикатори контролю тиску у вхідних газових магістралях й обриву нагрівачів, звукова сигналізація. У середній частині розташовані три ідентичних газових блоки III-4, які містять регулятори витрати газу, пневматичні й електричні клапани. З лицьової сторони газові блоки залежно від модифікації закриваються панелями III-2, на яких розміщені датчики, кнопки керування і сигналізація відповідних газових ліній мнемосхеми. Верхня й нижня частини пристрою газорозподілу умовно розділені панеллю, на якій розташовані автоматичні вимикачі й лампочки контролю мережі. У його нижній частині встановлені блоки підготовки газів III-1, плата трансформаторів III-5, панель із вимикачем і запобіжниками, плати реле й блоки живлення III-6. Пневматична схема пристрою газорозподілу типу УГ-5 представлена в додатку А. На вхід пристрою (блоки підготовки газів БПГ1...БПГ5 і блок підготовки повітря БПП) надходять осушені гази й повітря.

Блок підготовки газів, наприклад блок підготовки хлористого водню БПГ1, складається з кульового крану Кр1, регулятора тиску РТ1 для редукування й автоматичної підтримки заданого тиску газів й їхніх сумішей, манометра МН1 для виміру тиску газів, фільтра Ф1 для захисту пневматичних елементів і газової магістралі від забруднень. Інші такі ж блоки забезпечують роботу магістралей аргону або азоту, кисню й повітря. Газові блоки БГ1...БГ3 містять регулятори витрати газів А7...А11 типу РРГ-6, пневматичні й електричні клапани А1...А6, В1...В6. Крани Кр1...Кр19 комутують гази, що подаються на входи БПГ1...БПГ5, і повітря на вході БПП при подачі їх на блок дозатора дифузанта БДД або на зволожувач повітря ЗП. Блок дозатора дифузанта

складається з камер $KA1$, $KA2$, клапанів $DO01...DO04$, нагрівача $EK1$, клапанів $A1$, $A2$ і камери обігріву $A3$.

Пристрій для подачі дифузанта, схема якого представлена на рис. 5.3) складається зі корпусу 1 , у який вставляється колба 2 , а між ними є теплоізоляція 4 . Нагрівання дифузанта відбувається через обмотку 5 , що після нагрівання заповнює об'єм 6 , що закритий кришкою 3 . Газо-носій захоплює пари дифузанта й парогазова суміш надходить у реактор.

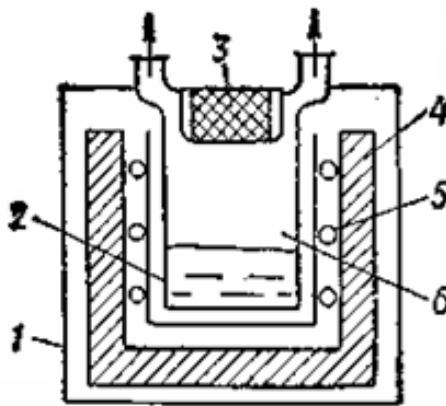


Рисунок 5.3 – Схема пристрою для подачі дифузанта

Система зволоження газу показана на рис. 5.4. У камеру 1 через пробку 2 заливається дистильована вода. При відкриванні клапана 7 газ проходить через регулятор витрати 6 , попадає в простір 4 , давить на поверхню води й витісняє її по трубці 5 у камеру 10 , що має кварцеву трубку 9 , у яку вставлений нагрівач 11 . Вода, потрапляючи на нагріту поверхню кварцевої трубки, випаровується й пар, що утворився, надходить у реактор. Капіляр 12 створює гідравлічний опір й охороняє від швидкого заповнення водою парогенераторну камеру. При відкриванні клапана 3 тиск у просторі 4 через отвір 5 вирівнюється з атмосферним і подача води в парогенераторну камеру закінчується. Потужність нагрівального елемента розрахована на одержання 600 м^3 пари в годину.

Пульт програмного керування. У його склад (рис. 5.1) входять: вимірювальний блок П-1, П-5; програматор "час_команда" П-2; програматор "час-параметр" П-3; каркас П-4; пристрій формування команди "Пуск" П-6;

формувач сигналу "Аварія" П-7. Структурно пульт складається із трьох ідентичних каналів, приклад схеми одного з яких зображена на рис. 5.5.

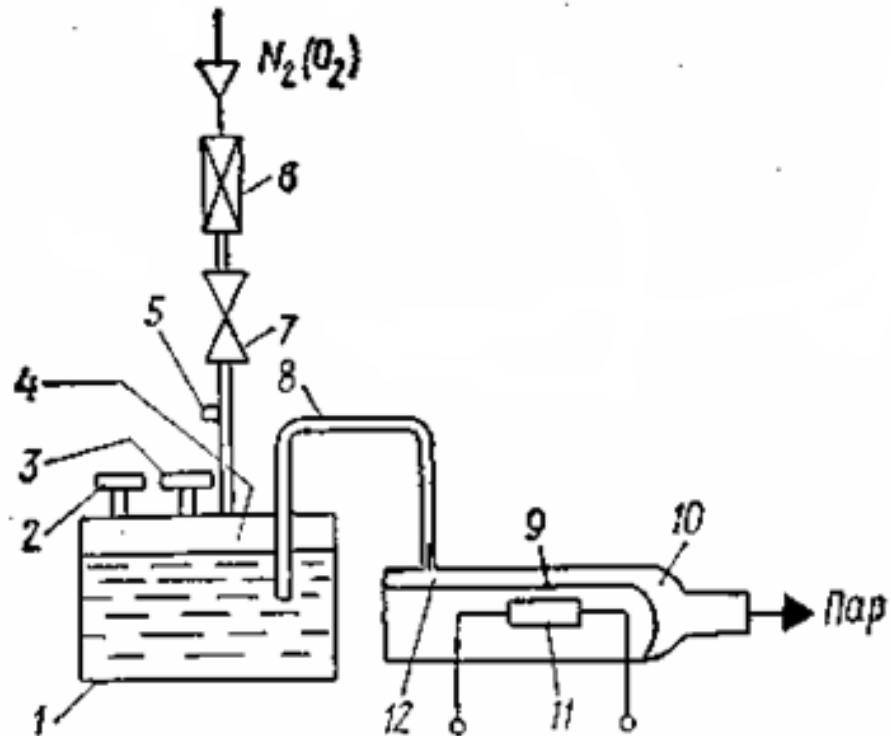


Рисунок 5.4 – Схема системи зволоження газу

Блок "час-команда" видає команди завдання часу виконання тих або інших технологічних операцій, наприклад команди для подачі азоту, дифузанта і інших. Блок "час-параметр" служить для вироблення сигналу завдання з метою регульованої зміни температури в робочій зоні реактора. Блок сигналу "Аварія" виробляє сигнал при відхиленні сигналу центрального датчика температури. Вимірювальний блок призначений для контролю температури за допомогою температурних перетворювачів.

Програмне керування забезпечується установкою штирів на програмуючих картах програматорі. Для програматора "час-команда" штирями на одній програмуючій карті по осі у встановлюється номер команди, а по осі х - номер інтервалу її тривалості; на іншій - номер інтервалу команди (по осі х) і його тривалість (по осі у).

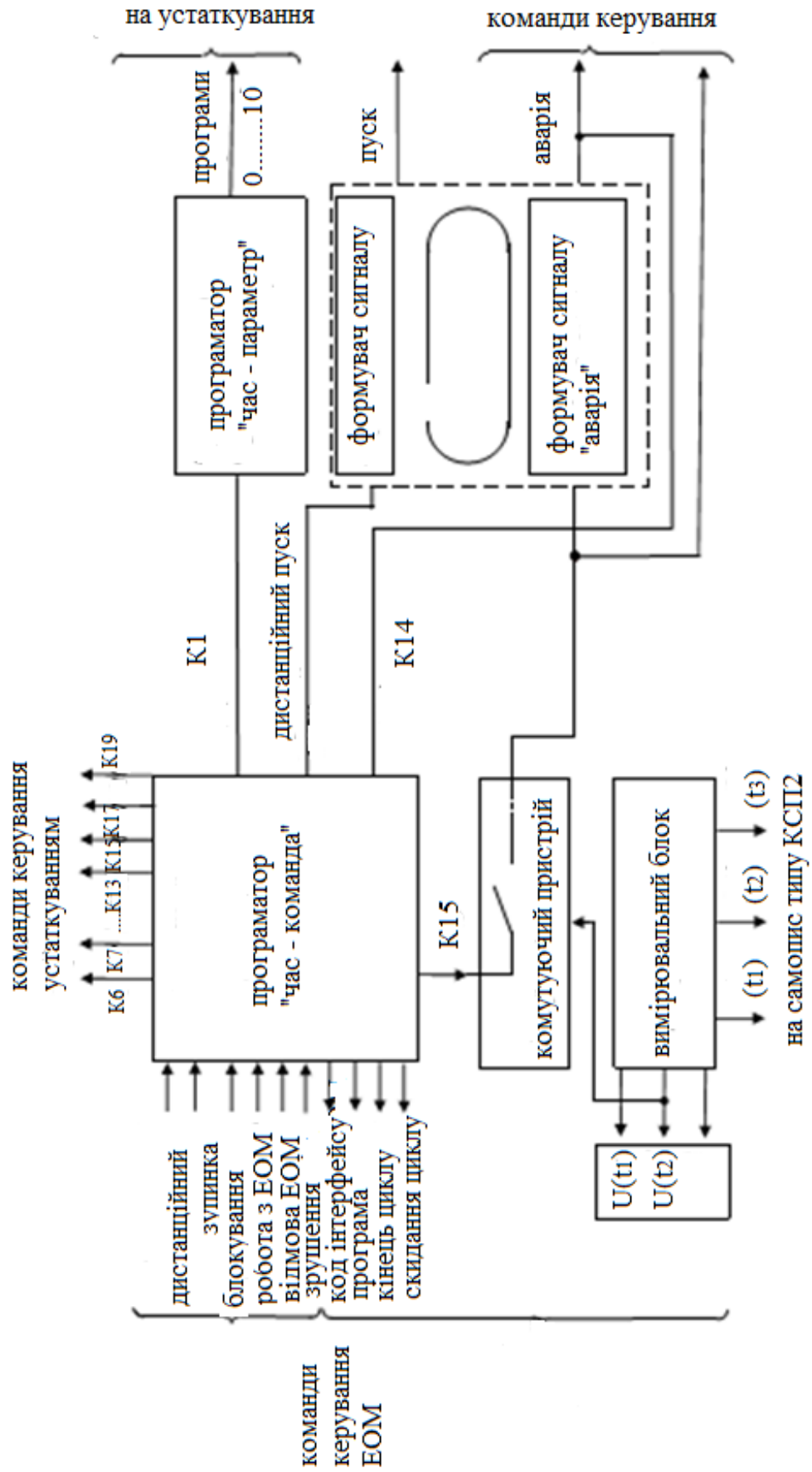


Рисунок 5.5 – Схема одного з каналів пульта програмного керування

Для прецизійного проведення технологічних процесів у процесі експлуатації необхідно регламентно перевіряти технічний стан установки. При цьому контролюють наступні параметри:

- розподіл температури по довжині робочої зони реактора,
- стабільність підтримки температури в опорній точці в межах робочої теплової зони,
- включення аварійної сигналізації,
- час розігріву електропечі з холодного стану,
- працездатність термоелектричних перетворювачів і регуляторів витрати газу,
- стабільність підтримки температури рідких реагентів
- граничне розрідження в реакторі,
- герметичність газової системи.

Обладнання, матеріали

Обладнання: термічна установки СДОМ 3-125-М; контрольний термоелектричний перетворювач в кварцовому корпусі; посудина Дьюара; футляр кварцевий; касета кварцова; пінцети.

Матеріали: бязеві серветки, спирт ізопропіловий ОСЧ; рукавиці гумові.

Схема для контролю робочої теплової зони показана на рис. 5.6 (1- термоелектричний перетворювач, 2 – робоча камера, 3 - посудина Дьюара, ; 4 – блок контролю).

Заходи безпеки

Будь-які дії, студентів з термічним обладнанням проводяться виключно під керівництвом викладача та інженерно – технічного персоналу лабораторії. Напруга, яка використовується при роботі установки небезпечна для життя. Тому необхідно дотримуватися правил з охорони праці під час роботи високовольтного електричного обладнанням (напруга до 10000 В). Забороняється вмикати установку в мережу 380 В та працювати з обладнанням

без заземлення. Заборонено працювати на установці, при несправних блокуваннях або їх замиканні. Категорично заборонено студентам самостійно без нагляду персоналу працювати з обладнанням. До роботи допускаються тільки ті особи, які вивчили порядок підготовки установки до експлуатації, засвоїли методику вимірювання на приладах та пройшли інструктаж з охорони праці з високовольтним та термічним обладнанням.

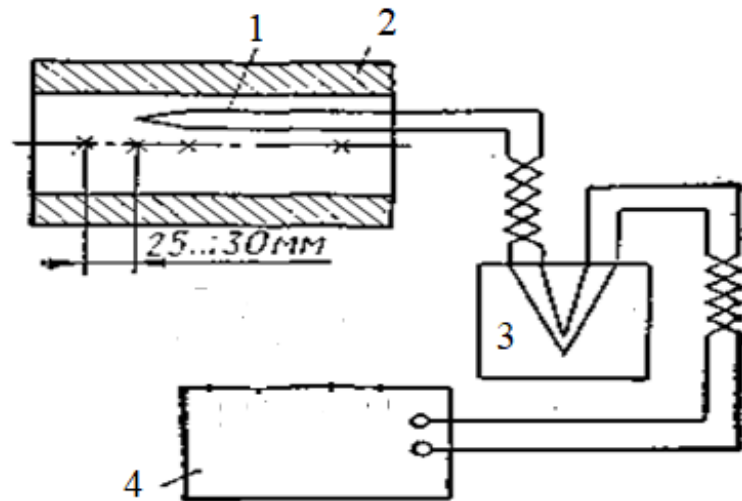


Рисунок 5.6 – Схема для контролю робочої теплової зони

5.2. Порядок виконання роботи

1. Включити і вивести на тепловий режим термічну установку (відповідно до завдання запропонованого викладачем). Зафіксувати параметри режиму (час повного виходу системи на необхідний тепловий режим, струми управління і напруги).

2. Провести контроль температури в робочій зоні термічної установки. Після виходу установки на заданий температурний режим (сигнали розбалансу дорівнюють нулю) провести контроль температури за допомогою контрольної термопари.

Методика вимірювань.

2.1 Помістити контрольний термоелектричний перетворювач I у камеру в середині робочої теплової зони. (Схема для контролю робочої теплової зони рис. 5.6)

2.2 Через 10 хвилин після виконання підпункту 2.1. виміряти U_T : встановити тумблер блок 4 в положення "Вкл"; виміряти значення U_T .

2.3 Помістити робочий кінець термопари на лівий край зони, тобто в місце, віддалене від центру зони на відстані $(L/2 - 2) \text{ см}$, де L - довжина робочої зони.

2.4 Витримати робочий кінець термопари у вказаному місці не менш 3-х хвилин і повторити вимірювання U_T згідно п. 2.2.

2.5 Переміщують гарячий спай контрольного термоелектричного перетворювача I до середини робочої зони, вимірюючи температурний профіль через 25...30 мм. У кожній вимірювальній точці гарячий спай витримують близько 3 хв.

2.6. Повторити вимірювання для правого краю робочої зони.

3. Налаштування теплового режиму.

Виходячи з отриманих даних розподілу температури п.2 у відповідній секції робочої камери налаштовують тепловий режим камери.

Приклад. Для 1150°C величина U_T рівна 11.2 мВ .

Допустиме відхилення температури $\pm 1^\circ\text{C}$, що відповідає $0,011 \text{ мВ}$.

Отримано наступний розподіл U_T в зоні- рис. 5.7.

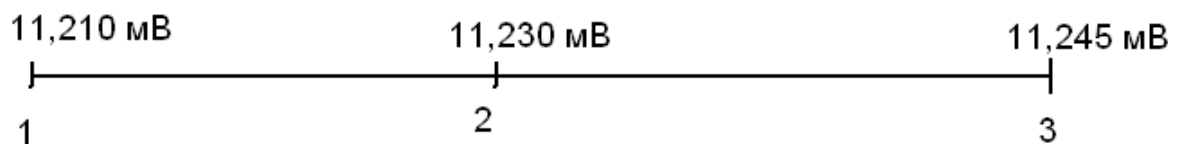


Рисунок 5.7 – Розподіл U_T по довжині робочої зони

Різниця між необхідним значенням U_T в положенні (2) рівна:

$$11,230 - 11,200 = + 0,03 \text{ (мВ)}.$$

Різниця між U_T в положенні (2) і в положеннях (1) і (3) рівна:

у положенні (1) $11,210 - 11,230 = -0,02$ (мВ);

у положенні (3) $11,245 - 11,230 = +0,015$ (мВ).

Для налаштування теплового режиму необхідно провести зміну показань на отримані величини різниць U_T узяті із зворотним знаком, тобто в точці (1) - $(+0,02)$ мВ ; у точці (2) - $(-0,03)$ мВ, в точці (3) - $(-0,015)$ мВ.

3.2. Провести повторний вимір U_T після того, як струми розбалансу стануть рівними нулю.

4. Виключити термічну установку.
5. Провести аналіз отриманих результатів.
6. Сформулювати висновки за результатами роботи.

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Порядок виконання роботи.
3. Одержані результати.
4. Аналіз результатів роботи.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Опишіть основні методи легування напівпровідників.
2. За допомогою яких параметрів керують технологічним процесом легування напівпровідників методом високотемпературної дифузії.
3. Які види дифузантив використовують в процесі легування.
4. Принцип роботи термічних установок.
5. Структура і принцип роботи систем прецизійного контролю температури.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОСТАДІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛЕГУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДИФУЗІЇ

Мета роботи: вивчити та дослідити одностадійний технологічний процес легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії.

6.1. Основні теоретичні відомості

Дифузія є найпоширенішим методом легування напівпровідників. Для утворення p - n переходу методом дифузії у вихідний матеріал, наприклад n типу провідності ($N_{ноч}$ - концентрація вихідної домішки n -типу) вводять домішку протилежного p -типу (N_0 – концентрація p домішки, що вводиться на поверхні кристала), концентрація якої компенсує концентрацію носіїв у вихідному матеріалі (рис. 6.1). Перехід утвориться на глибині $x_{пер}$.

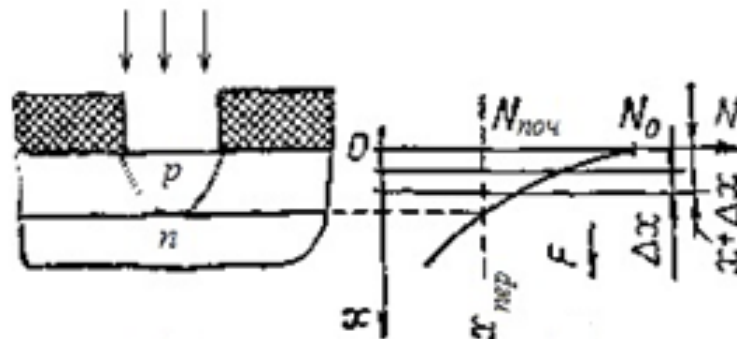


Рисунок 6.1 – Утворення p - n переходу в процесі дифузії домішки

Як легуючі домішки застосовують хімічні елементи, які характеризуються високою швидкістю дифузії і розчинністю в напівпровіднику при температурі дифузії. Для одержання дифузійних областей з дірковою провідністю (p типу) в кремнії Si використовують акцепторні домішки (3-валентні елементи): бор (B), індій (In), галій (Ga), на зовнішніх електронних оболонках яких не доставає одного валентного електрона для утворення ковалентного зв'язку з атомом чотирьох валентного кремнію. Для забезпечення електронної провідності можна використовують донорні домішки (5-валентні) елементи) фосфор (P),

миш'як (As), сурму (Sb), , які мають зайвий валентний електрон по відношенню до кремнію Si.

Переміщення атомів в кристалічній ґратці під час дифузії відбувається з одного положення рівноваги в інше. Схеми переміщення атомів показані на рис. 6.2. У реальних кристалах можливі наступні механізми дифузії: обмін місцями двох сусідніх атомів (рис. 6.2, а), кільцевий обмін атомами (рис. 6.2, б), обмін атомами по вакансіях (рис. 6.2, в) і міжвузольний (рис. 6.2, г). Імовірність переміщення атомів при дифузії зростає зі збільшенням температури.

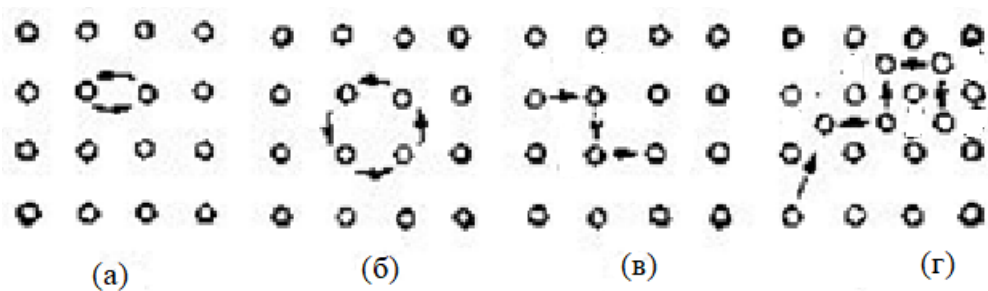


Рисунок 6.2 – Схема переміщення атомів при дифузії

Процес дифузії здійснюється при температурах близько 1000...1300 °С, що обумовлено необхідністю введення домішок з високою концентрацією (до 10^{21} см^{-3}) більшими значеннями коефіцієнту дифузії при високих температурах. У межах температур (1000...1300 °С) коефіцієнт дифузії D (наприклад, бору, фосфору тощо) при зміні температури на 100 °С змінюється приблизно в п'ять разів. Тому в робочій зоні термічних установок, де проводиться термічна дифузія напівпровідникових пластин, точність підтримки температури повинна бути не гірше 0,5 °С.

При високотемпературній дифузії легуючі домішки вводяться з концентрацією, що не перевищує їхньої граничної розчинності при обраній температурі (максимально можливою кількістю домішок в одиниці об'єму напівпровідника при заданій температурі). Залежність твердої розчинності домішок у кремнії від температури представлено на рис. 6.3.

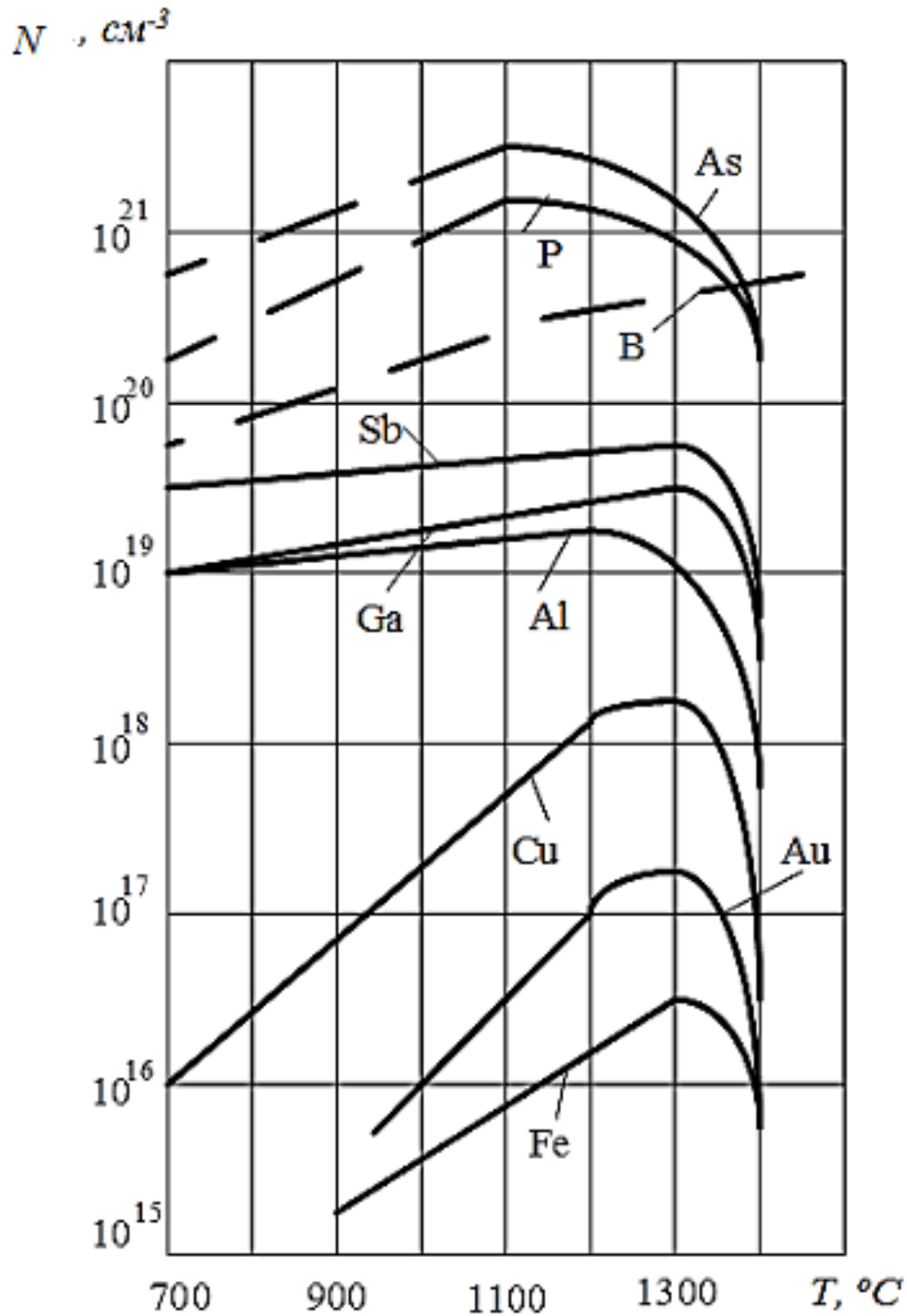


Рисунок 6.3 – Залежність граничної розчинності домішок у кремнії від температури

При проведенні технологічного процесу високотемпературної дифузії необхідно контролювати наступні параметри: температуру та час дифузії; кількість домішки; тиск пару та чистоту дифузанта; рівномірний розподіл його в робочій зоні. Термічну дифузію домішок проводять у приміщеннях другого-третього класів чистоти.

Практичні способи проведення дифузії.

Використати легуючі домішки в чистому виді практично неможливо, тому що, наприклад, бор у чистому виді дуже тугоплавкий, чистий фосфор легко запалюється. Тому в якості джерел домішки застосовують різні сполуки (галогеніди, гідриди) легуючого елемента, які мають достатню летючість і дозволяють забезпечити потрібну концентрацію домішки. Дифузанти використовують твердому, рідкому та газоподібному стані. Широке застосування знаходять наприклад: газоподібні речовини - PH_3 , B_2H_6 ; рідкі - PCl_3 , VBr_3 ; тверді - P_2O_5 , B_2O_5 та ін.

При проведенні дифузійних процесів використовується метод відкритої труби в потоці газів-носіїв (рис. 6.4). Пластини (5) завантажують у кварцову трубу (1) через відкритий вихід (2), що сполучений з атмосферою. У трубу по магістралі (3) подають газ-носієв ГН . Рідкий або газоподібний дифузанти (3) вводять у зону дифузії разом з газом-носієм (рис. 6.4, а). У випадку твердого дифузанта (б) застосовують двухзонні термічні установки (рис. 6.4, б) .

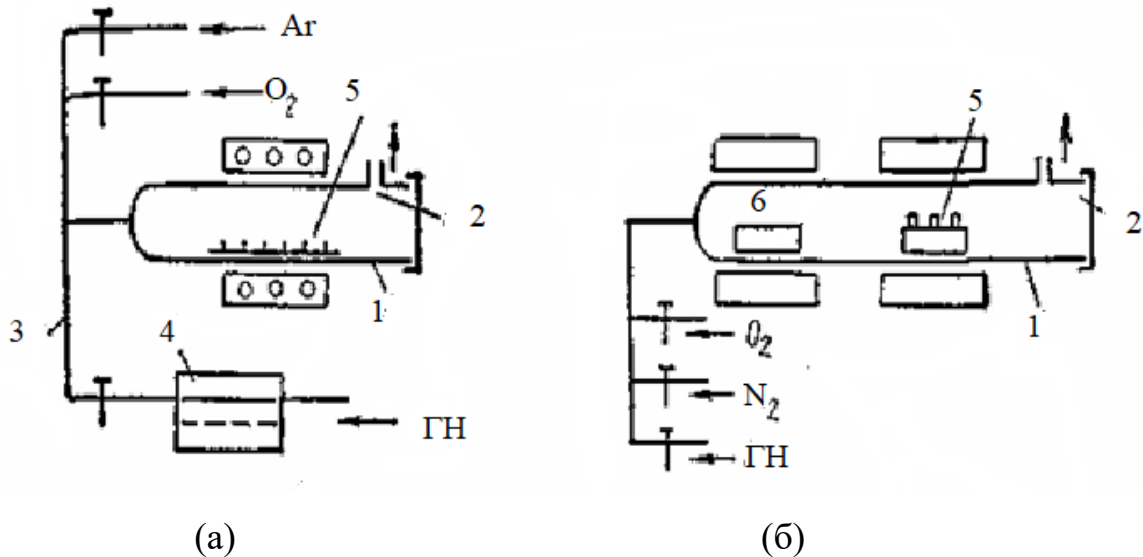


Рисунок 6.4 – Схеми проведення дифузійних процесів у відкритій трубі: (а) однозонна, (б) двухзонна

Процес дифузійного переносу речовини в напівпровідниках визначається двома законами (рівняннями) Фіка. Перший закон Фіка стверджує: якщо в замкнутому середовищі має місце градієнт концентрації речовини, то виникає її

потік, густина якого для одновимірного випадку визначається співвідношенням:

$$J_{\text{диф}} = -D \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (6.1)$$

де $\frac{\partial N}{\partial x}$ - градієнт концентрації дифундуючої речовини; D – коефіцієнт дифузії, що залежить від типу напівпровідника й домішки, що дифундує, а також від її кристалографічної будови та температури; N - концентрація дифундуючої речовини.

Знак “—” означає, що рух речовини виникає у напрямку зменшення її концентрації. Коефіцієнт дифузії D чисельно дорівнює кількості домішкових атомів, які проходять через площу 1 см^2 за 1 секунду при градієнті концентрації атомів домішок — 1 см^{-3} , іншими словами коефіцієнт дифузії являє собою густину потоку при одиничному градієнті концентрації.

Зміна коефіцієнта дифузії з температурою описується рівнянням Арреніуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right), \quad (6.2)$$

де D_0 – температурно незалежний коефіцієнт, або коефіцієнт дифузії речовини при температурі рівній нескінченності; E_A – енергія активації дифундуючої речовини, T – температура, при якій проводиться процес дифузії; k -стала Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Другий закон Фіка визначає концентрацію введеної в напівпровідник домішки в будь-який момент часу й на будь-якій відстані від його поверхні при заданій температурі дифузії. Для одновимірного випадку записується:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (6.3)$$

У випадку необмеженого джерела домішок (режим загонка) концентрація домішок на поверхні пластини постійна ($N_0 = \text{const}$), розв’язок рівняння другого закону Фіка буде мати вигляд:

$$N(x,t) = N_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right), \quad (6.4)$$

де N_s – концентрація домішки на поверхні напівпровідника на етапі загонки, erf – символ, функція помилок; D – коефіцієнт дифузії домішки при температурі загонки, t – час технологічної операції загонки домішки.

На етапі загонки приймають значення поверхневої концентрації легуючої домішки N_s наближеним (приблизно рівним) до граничної розчинності легуючої домішки у напівпровіднику (кремнії).

Величину Dt називають фактором температурного впливу, який визначає дозу легування Q . Доза легування визначає кількість атомів легуючої домішки, введеної в кристал через одиницю площі (1 см^2) за час дифузії та записується виразом:

$$Q = 1,13N_s\sqrt{D_3t_3}, \quad (6.5)$$

Задавши значення коефіцієнта дифузії D , товщину легованого шару напівпровідника і початкові рівні поверхневої концентрації домішок, можна визначити $N(x, t)$ – концентрацію домішки, що дифундує, на будь-якій глибині напівпровідника в будь-який час.

На рис. 6.5, а представлений якісний графік розподілу домішки при одностадійному технологічному процесі дифузії з нескінченного (постійного) джерела (режим загонка).

На рис. 6.5, б зображений розподіл домішки при дифузії з кінцевого (обмеженого) джерела, коли кількість домішки в приповерхньому шарі напівпровідника в процесі дифузії зменшується. Для цього використовують метод двостадійного процесу високотемпературної дифузії. На першому етапі (режим загонка) в приповерхньому шарі напівпровідника створюють надлишкову концентрацію домішки. На другому етапі (режим розгонка) для остаточного формування дифузійної області, введена на першому етапі “загонка” домішка дифундує на більшу глибину (перерозподіляється в об’ємі напівпровідника).

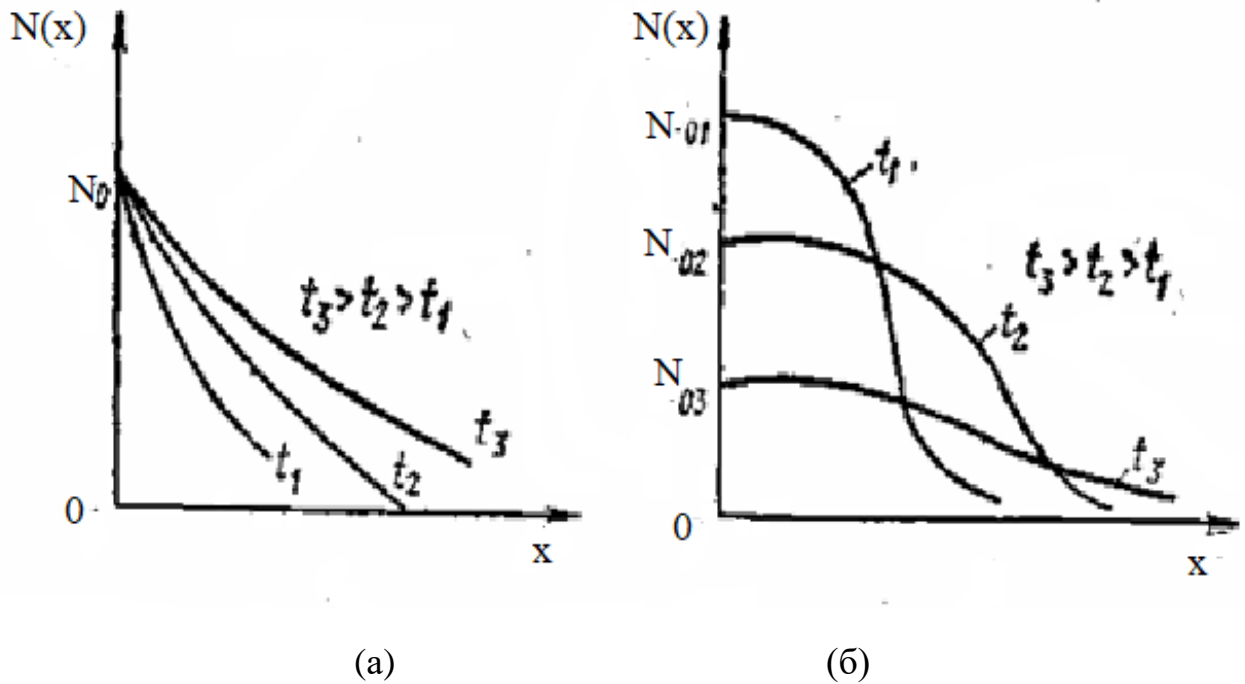


Рисунок 6.5 – Графіки розподілу концентрації домішки в напівпровіднику при дифузії з нескінченного (а) і обмеженого (б) джерел дифузанта

Обладнання, матеріали

Обладнання: термічна установки СДОМ 3-125-М; шафа витяжна ЩЗ-1НЖ; установка відмивання та сушки пластин (центрифуга); секундомір; футляр кварцевий; тара для ізопропилового спирту; касета з пластинами кремнію; пінцети.

Матеріали: напівпровідникова пластинка з операції "хімічна обробка кремнієвих пластин перед термічними операціями "; дифузанта; спирт ізопропиловий ОСЧ; бязеві серветки; рукавиці гумові.

6.2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати обладнання, оснастку згідно інструкції на робочому місці.
2. Визначити параметри технологічних режимів (T_3 – температуру загонки, t – час технологічної операції загонки; дозу легування) одностадійного процесу (режим загонка) легування напівпродникових структур методом високотемпературної дифузії.

Зауваження. Вихідні дані, для визначення параметрів технологічних режимів процесу дифузії задає викладач. А саме:

- тип напівпровідникової підкладки;
- матеріал легуючої домішки;
- глибина залягання р-n переходу – x_1 ;
- концентрація домішки на рівні переходу – N .

3. а) Задати значення температури T_3 (°C) одностадійного технологічного процесу високотемпературної дифузії (режим загонка).

б) Обґрунтувати вибір значення температури для режиму загонка.

в) Задати значення N_s – концентрація домішки на поверхні напівпровідника для режиму загонки. Обґрунтувати вибір значення N_s .

4. Визначити значення коефіцієнту дифузії D для заданого матеріалу легуючої домішки в напівпровідникову пластину (Si) при T_3 (пункт 3.а).

5. Визначити значення фактору температурного впливу ($D t$) для даної технологічної операції.

Рекомендації. З виразу (6.4) розв'язок рівняння другого закону Фіка для режиму загонка можна визначити значення функції помилок і відповідно значення фактору температурного впливу ($D t$):

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = \frac{N_s - N}{N_s}, \quad (6.6)$$

6. Знаючи значення коефіцієнту дифузії D_3 при температурі T_3 , визначити час технологічної операції загонки t .

7. Визначити значення дози легування Q .

8. Побудувати профіль розподілу легуючих домішок ($N(x, t) = f(x)$) для встановлених значень технологічного режиму.

9. Включити і вивести на тепловий режим термічну установку (відповідно до завдання запропонованого викладачем). Зафіксувати параметри режиму (час повного виходу системи на необхідний тепловий режим, струми управління і напруги). Провести контроль температури в робочій зоні термічної установки.

10. Представити циклограму в координатах температура-час одностадійного технологічного процесу легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії на основі визначених параметрів технологічного режиму дифузії.

11. Сформулювати висновки за результатами роботи.

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Одержані результати відповідно до порядку виконання роботи.
3. Аналіз результатів роботи.
4. Висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Опишіть механізми дифузії в напівпровідниках.
2. Які механізми дифузії найбільш вірогідні в кремнії для домішок третьої і п'ятої груп.
3. Поясніть перший і другий закон дифузії.
4. Наведіть графіки розподілу концентрації домішки в напівпровіднику при дифузії з нескінченного джерела домішок.
5. Опишіть основні методи легування напівпровідників.
6. За допомогою яких параметрів керують технологічним процесом легування напівпровідників методом високотемпературної дифузії.
7. Які види дифузантив використовують в процесі легування.

7. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЛЕГУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДИФУЗІЇ В ДВОСТАДІЙНОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Мета роботи: вивчити та дослідити двостадійний технологічний процес легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії.

7.1. Основні теоретичні відомості

При проведенні технологічних процесів високотемпературної дифузії вирішують два основних типи завдань: визначення профілю розподілу концентрації домішки на підставі заданих параметрів технологічного режиму (пряме завдання) і визначення технологічні параметри процесу дифузії на підставі кінцевого розподілу домішки в структурі (обернена задача).

Використовуючи основні рівняння дифузії (6.1), (6.3) можна визначити основні параметри технологічних режимів легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії, зокрема температури і тривалість процесів загонки та розгонки легуючої домішки.

Обернені задачі мають велике практичне значення. Специфіка їх розв'язку пов'язана з реальною практикою – вони неоднозначні стосовно вибору температури і тривалості процесу дифузії, вибір цих параметрів визначають конкретні особливості технологічного процесу і можливості технологічного устаткування. Розв'язок обернених задач може зводитись до визначення фактору температурного впливу ($D t$). За відомим значенням коефіцієнта дифузії при заданій температурі T визначають тривалість технологічного процесу дифузії t . При виборі режимів необхідно враховувати не лише температурну залежність коефіцієнта дифузії, а й граничну розчинність легуючої домішки.

Закон розподілу домішок, як функція координат x та часу t може бути отриманий шляхом розв'язку другого рівняння Фіка при певних граничних умовах проведення процесу дифузії. Найбільш практичне значення мають два випадки:

1) дифузія із необмеженого джерела домішок (у технологічному процесу називається режим загонка домішки);

2) дифузія із обмеженого джерела домішок (режим розгонка домішки).

Дифузія із необмеженого джерела є першим етапом технологічного процесу високотемпературної дифузії, метою якого є введення в кристал певної кількості домішок.

Другий етап – режим розгонки домішок з метою перерозподілу введеної на першому етапі домішки на визначену глибину для остаточного формування дифузійної області.

У випадку необмеженого джерела домішок (режим загонка) концентрація домішок на поверхні пластини постійна, розв'язок рівняння другого закону Фіка описується виразом (6.4). Заданий розподіл домішок по глибині можна отримати при різних значеннях D і t . Величина Dt (фактор температурного впливу) визначає дозу легування Q , вираз (6.5).

У другому граничному випадку (дифузія з обмеженого джерела) домішки дифундують з поверхневого шару кремнію усередину, в цьому випадку надходження домішки ззовні відсутнє ($Q = const$). В результаті дифузії поверхнева концентрація з часом зменшується. Розв'язок рівняння дифузії у цьому випадку представляє собою розподіл Гауса

$$N(x, t_2) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D_2 \cdot t_2}} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{2 \cdot D_2 \cdot t_2}\right)}, \quad (7.1)$$

де D_2 – коефіцієнта дифузії домішок при температурі розгонки,

t_2 – час розгонки домішки,

Q – доза легування.

Вираз описує реальний розподіл тим точніше, чим тонше зразок, в який дифундує домішка і отриманий при умові, що випаровування з поверхні відсутнє.

Таким чином, використовуючи вище приведені рівняння розв'язку другого закону Фіка можна визначити основні параметри технологічних режимів легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії.

Для вирішення оберненого завдання вихідними даними є: $x_{пер}$ – глибина залягання p - n переходу; розподілу домішки в структурі; N_1 – концентрація домішки на рівні переходу.

Методика вирішення оберненого завдання

1. З розв'язку рівняння другого закону Фіка (7.1) за умови $x = 0$ і $x = x_{пер}$ отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} N_0(t_2) = Q/\sqrt{\pi D_2 t_2}, \\ N_2(x_{пер}, t_2) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \cdot \exp\left(-\frac{x_{пер}^2}{2\sqrt{D_2 t_2}}\right), \end{cases} \quad (7.2)$$

де N_0 концентрація домішки на поверхні ($x = 0$) після процесу розгонки.

Звідки

$$D_2 t_{2p} = x_{пер}^2 / 4 \ln(N_0/N_2), \quad (7.3)$$

2. Задаємо температуру розгонки T_2 домішки в інтервалі 1000...1300 °С. Визначаємо з довідкової літератури значення коефіцієнта дифузії домішки в кремній D_2 при температурі розгонки T_2 .

3. Розраховуємо час розгонки t_2 з рівняння (7.3).

4. При відомих D_2 і t_2 з рівняння (7.2) визначаємо Q .

5. Задаємо температуру загонки T_1 в інтервалі 900...1000 °С. Визначаємо значення D_1 при температурі загонки T_1 . Приймаючи значення поверхневої концентрації легуючої домішки N_s на етапі загонці, наближеним (приблизно рівним) до граничної розчинності легуючої домішки у напівпровіднику (кремнії), знаходимо фактор $D_1 t_1$ з рівняння

$$Q = 1,13 N_s \sqrt{D_1 t_1}, \quad (7.4)$$

6. Визначити час технологічної операції загонки домішки t_1 .

Обладнання, матеріали

Обладнання: термічна установки СДОМ 3-125-М; шафа витяжна ЩЗ-1НЖ; установка відмивання та сушки пластин (центрифуга); секундомір; футляр кварцевий; касета кварцова; пінцети.

Матеріали: напівпровідникова пластинка з операції "хімічна обробка кремнієвих пластин перед термічними операціями "; дифузанти; ацетон ОСЧ; бязеві серветки; рукавиці гумові.

7.2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати обладнання, оснастку згідно інструкції на робочому місці.

2. Визначити параметри технологічних режимів (T_1 – температуру загонки, t_1 – час технологічної операції загонки домішки; t_2 – час технологічної операції розгонки; дозу легування) двостадійного технологічного процесу легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії.

Зауваження. Вихідні дані, для визначення параметрів технологічних режимів процесу дифузії задає викладач. А саме:

- тип напівпровідникової підкладки;
- матеріал легуючої домішки;
- температура розгонки T_2 ;
- глибина залягання р-п переходу – $x_{пер}$;
- концентрація домішки на рівні переходу – N_2 ;
- концентрація домішки на поверхні ($x = 0$) після процесу розгонки – N_0 .

3. а) Задати значення температури T_1 (°С) технологічного процесу високотемпературної дифузії на стадії загонки.

б) Обґрунтувати вибір значення температури для режиму загонка.

в) Задати значення N_s – концентрація домішки на поверхні напівпровідника для режиму загонки. Обґрунтувати вибір значення N_s .

4. Визначити значення коефіцієнту дифузії D_1 для заданого матеріалу легуючої домішки в напівпровідникову пластину (Si) при температурі T_1 .

5. Визначити значення коефіцієнту дифузії D_2 для заданого матеріалу легуючої домішки в напівпровідникову пластину (Si) при температурі T_2 .

6. Визначити час технологічної операції розгонки домішки t_2 .

7. Визначити значення дози легування Q .

8. Визначити час технологічної операції загонки домішки t_1 .

9. Побудувати профіль розподілу легуючих домішок в координатах $N(x,t_2)=f(x)$ для встановлених значень технологічного режиму.

10. Включити і вивести на тепловий режим термічну установку (відповідно до завдання запропонованого викладачем). Зафіксувати параметри режиму (час повного виходу системи на необхідний тепловий режим, струми управління і напруги). Провести контроль температури в робочій зоні термічної установки.

11. Представити в координатах температура - час циклограму двостадійного технологічного процесу легування напівпровідникових структур методом високотемпературної дифузії на основі визначених параметрів технологічних режимів дифузії.

12. Сформулювати висновки за результатами роботи.

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Одержані результати відповідно до порядку виконання роботи.
3. Аналіз результатів роботи.
4. Висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Опишіть механізми дифузії в напівпровідниках.
2. Які механізми дифузії найбільш вірогідні в кремнії для домішок третьої

і п'ятої груп.

3. Які види дифузантив використовують в процесі легування.
4. Поясніть перший і другий закон дифузії.
5. Опишіть основні режими легування напівпровідників методом високотемпературної дифузії.
6. Наведіть графіки розподілу концентрації домішки в напівпровіднику при дифузії з обмеженого джерела домішок.
7. За допомогою яких параметрів керують технологічним процесом легування напівпровідників методом високотемпературної дифузії.
8. Чим пояснюється використання двохстадійної дифузії.

8. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛІВОК ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

Мета роботи: вивчити та дослідити технологічний процес формування тонких діелектричних шарів методом термічного окислення кремнію для конструктивних елементів інтегральних схем.

8.1. Основні теоретичні відомості

У технології виготовлення інтегральних схем використовують діелектричні плівки оксиду, нітриду та карбіду кремнію відіграють важливу роль у сучасній мікроелектронній технології. Тонкі діелектричні плівки використовують в якості технологічних, ізолюючих, пасивуючих шарів та для формування конструктивних елементів інтегральних схем. Зокрема, як технологічні шари діелектричні плівки застосовують для створення маски при локальній обробці поверхні напівпровідникових пластин (технологічні операції дифузії, іонного легування, травлення). Як захисний шар використовують для захисту інтегральних мікросхем від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища. Як конструктивні елементи інтегральних схем тонкі діелектричні шари застосовують в ізолюючих структурах та як елемент заслону у МДН транзисторах.

Залежно від призначення до тонких діелектричних плівок висувають різні вимоги. Наприклад, маскувальні плівки не мають бути пористими, оскільки вони є бар'єром для дифузії легуючої домішки, а також гальмувати іони під час іонного легування. При технологічній операції локального травлення мають забезпечити отримання мінімального клину травлення (вертикальної стінки протравлених вікон). Ізолюючі плівки повинні мати також високі діелектричні властивості, щоб уникнути замикання металізованих шарів. Пасивуючі шари мають бути стійкими до вологих та агресивних середовищ і стабільними в часі.

Діелектрик як матеріал заслону МДН структур повинен мати мінімальний позитивний заряд, високі захисні та діелектричні властивості.

Технологічний процес формування діелектричних плівок ґрунтується на формуванні плівок за рахунок матеріалу пластини (термічне, іонно-плазмово окислення кремнію тощо) або осадженні матеріалу плівки із зовнішнього середовища (піроліз, плазмо-хімічне осадження і інші).

Важливу роль в технології кремнієвих інтегральних схем відіграють діелектричні плівки діоксиду кремнію (SiO_2). Їм характерні: високі діелектричні й пасивуючі властивості; маскуючі властивості для легуючих домішок, які використовуються для легування кремнію; значення температурного коефіцієнту лінійного розширення майже такі ж, як у кремнію; високі діелектричні властивості.

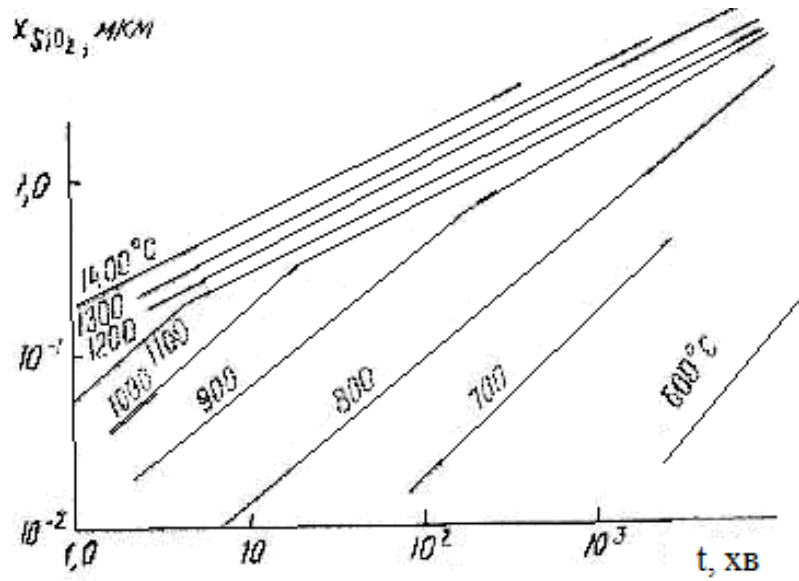
Плівки діоксиду кремнію одержують шляхом термічного окислення кремнію, осадження з газової фази й реактивного розпилення.

Для формування плівок SiO_2 найбільш широко застосовується окислення кремнію при високих температурах (термічне окислення). Термічне окислювання кремнію може відбуватися в атмосфері сухого кисню, парах води й комбіновано - в атмосфері вологого кисню. Вибір методу окислення визначається потрібною товщиною та властивостями плівки діоксиду кремнію.

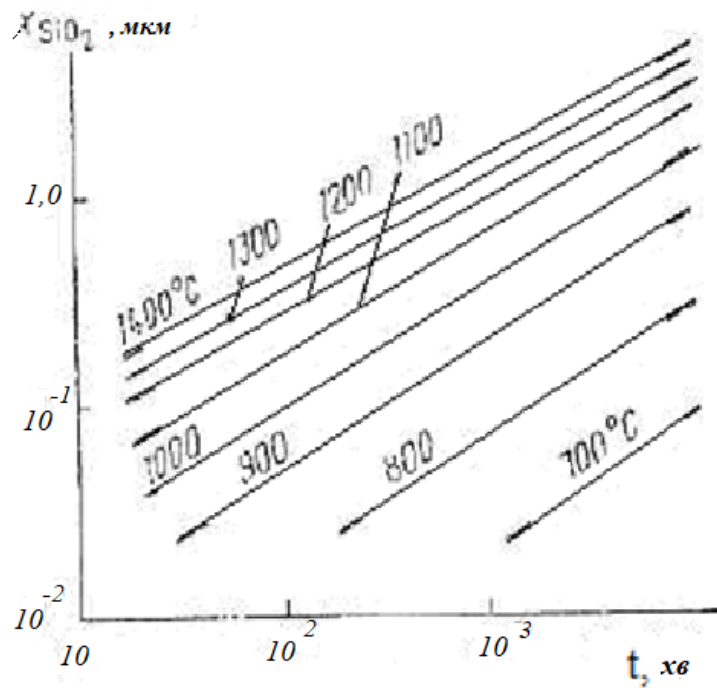
При термічному окисненні плівки SiO_2 формуються завдяки хімічній взаємодії частинок окислювача з атомами кремнію. Ріст плівок відбувається в поверхневому шарі кремнієвої пластини, завдяки чому приблизно 40 % товщини оксидної плівки формується за рахунок матеріалу кремнієвої пластини. Через значну спорідненість кремнію до кисню вже навіть при кімнатній температурі товщина покриття оксидної плівки може бути $50 \div 100 \text{ \AA}$. Для отримання її необхідної товщини необхідна термічна стимуляція окислення.

В атмосфері сухого кисню реакція окислювання кремнію ($\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$) проходить повільно: для одержання плівки товщиною 1 мкм при температурі $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ потрібно 15 год. Якість плівки при цьому виходить високою.

Залежність товщини оксиду від температури робочої зони і часу окислення представлена на рис.8.1.



(a)



(б)

Рисунок 8.1 – . Залежність товщини плівки двоокису кремнію від часу і температури при окисленні в парах води (а) і в сухому кисні (б)

Процес окислювання кремнію істотно прискорюється, якщо його проводити в атмосфері водяного пару ($\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$). Очищений азот пропускають через зволожувач (деіонізована вода). Далі зволожений водяною парою азот поступає в реактор, де в високотемпературній зоні розміщені пластини кремнію. Плівка діоксиду кремнію товщиною 1 мкм при температурі 1300 °С утвориться за 1 ч, але якість плівки є більш низькою. Швидкість утворення плівки залежить від тривалості процесу, тиску кисню й концентрації парів води. У даному методі можна варіювати швидкість утворення плівки від швидкості, що відповідає окислюванню кремнію в атмосфері сухого кисню, до швидкості, відповідної його окисленню в парах води.

Іноді окислювання кремнію в парах води проводять при підвищеному тиску. При цьому швидкість росту плівки збільшується в 3...5 разів. Такий метод використовується для одержання шарів товщиною 2...4 мкм, але якість плівки невисока. Якщо технологічний процес утворення плівок налагоджений, то можна за часом окислювання кремнію контролювати їхню товщину. Товщину плівки і її якість можна оцінити за допомогою мікроскопі. Переваги термічного окислення: технологічність, висока якість плівок. Недоліки: висока температура підкладок.

Оксидну плівку на поверхні кремнію переважно вирощують методом відчиненої труби. Старанно очищений азот пропускають через деіонізовану воду. Далі зволожений водяною парою азот потрапляє в трубу, де в робочій зоні при температурі (1100 ÷ 1300 °С) знаходяться пластини кремнію. Для створення досконалої плівки пластини полірують механічно або хімічно та проводять окислення пластини кремнію у чистому кисні або в спеціальному атмосферному повітрі.

Кінетика росту плівки оксиду кремнію за різних вимог характеризується виразом

$$h^m = k \cdot t,$$

де h – товщина плівки, t – час, k – константа, яка пов'язана з тиском та температурою.

Якщо окислення проводиться в чистому кисні або водяній парі, при тисках, які відрізняються від атмосферного не більш ніж на порядок, тоді $m=2$.

При окисленні в водяній парі:

$$h^2 = 2,5 \cdot 10^{15} \cdot P^{1,6} \cdot \exp(-1,7)$$

При окисленні в чистому кисні:

$$h^2 = 8,4 \cdot 10^{10} \cdot P^{0,8} \cdot \exp(-1,7).$$

Якщо тиск P виразити в атмосферах, час t в хвилинах, то товщина плівки буде в ангстремах. Як видно з формули, коефіцієнти окислювальних агентів при використанні водяної пари на декілька порядків більші, ніж у випадку з чистим киснем, та по-різному залежать від тиску.

Оскільки в процесі окислення у водяній парі отримують великі коефіцієнти дифузії окислювальних агентів, унаслідок досягнення високих температур та тиску дифузія перестає бути обмежувальним фактором швидкості росту оксидної плівки. На практиці широко використовують комбінований спосіб термічного окислення, який базується на одночасному використанні чистого кисню та водяної пар.

Визначення товщини плівки діоксиду кремнію.

Для виміру товщини оксиду плівок на кремнії частіше за все використовуються оптичні методи.

В даному випадку розглянемо колірний метод. Використовуються інтерференційні кольори, що виникають при відображенні білого світла біля розділу плівка - повітря. Забарвлення створюється рівномірним білим світлом за вирахуванням тієї його частини яка бере участь в інтерференції. Умова інтерференції записується таким чином:

$$2d = \frac{(2k - 1) \cdot \lambda}{2} \cdot \frac{1}{n}$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$, - коефіцієнт заломлення плівки.

За наявності повітряного клину, що не поглинається, між двома прозорими скляними пластинками відсутність деяких компонентів спектру у відбитій хвилі сприймається візуально як певний колір.

Типовий технологічний процес термічного окислення кремнієвих пластин складається з ряду послідовних операцій: завантаження пластин у термічну камеру, нагрівання пластин і подача реагенту для окислення; припинення подачі реагентів; припинення нагрівання і продувка реактора азотом розвантаження реактора.

Цикл процесу термічного окислення пластин в координатах температура-час зображений на рис. 8.3.

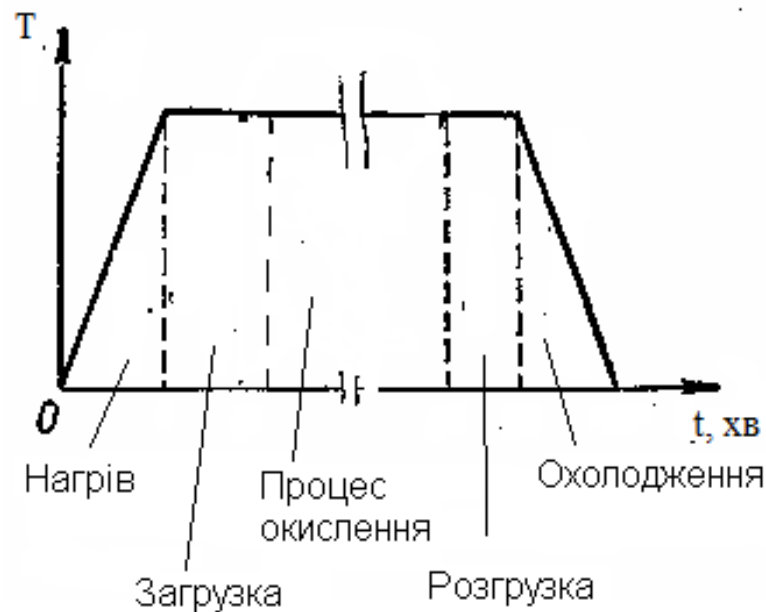


Рисунок 8.2 – Цикл технологічного процесу термічного окислення кремнієвих пластин в координатах температура-час

Обладнання, матеріали

Обладнання: термічна установки СДОМ 3-125-М; шафа витяжна ЩЗ-1НЖ; установка відмивання та сушки пластин (центрифуга); секундомір; футляр кварцевий; касета кварцова; пінцети; мікроскоп МКИ-2М.

Матеріали: напівпровідникова пластинка з операції "хімічна обробка кремнієвих пластин перед термічними операціями "; дифузанти; ацетон ОСЧ; напальчники; бязеві серветки; рукавиці гумові.

Термічне окислення кремнію проводиться в термічних установках (наприклад, тип СДО, АДС й ін.) при температурах 950...1300°C,

підтримуваних з точністю $\pm 0,5$ °С, з використанням спеціального оснащення для розміщення кремнієвих пластин, забезпеченням необхідних умов і контролем режиму окислення. Кремнієві пластини завантажуються в човник, виготовлений з чистого кварцу. Блок - схема термічної установки для окислення представлена на рис. 8.1.

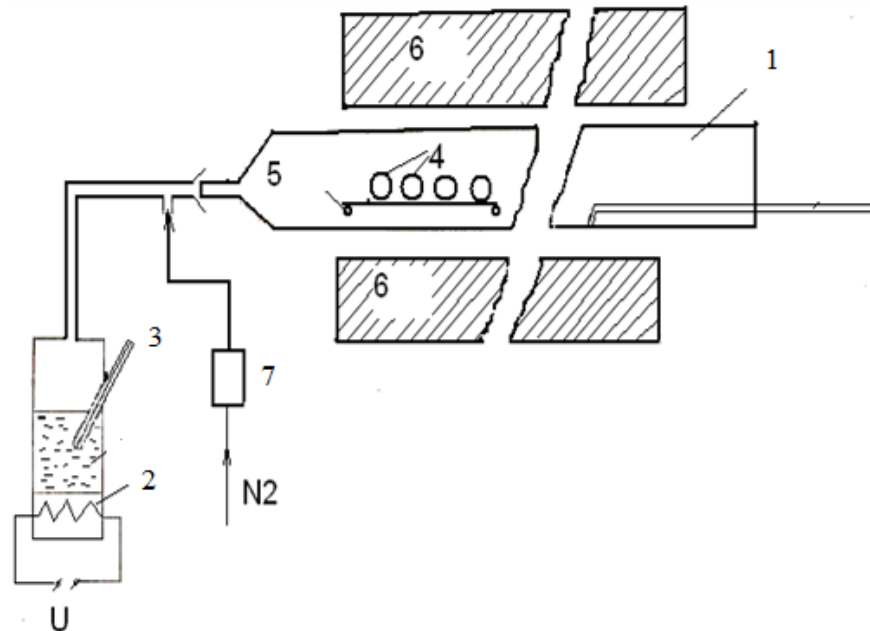


Рисунок 8.3 – Блок-схема термічної установки для окислення в парах води

Робочий реактор (1). складається з кварцової труби (2), яка проходить через муфель з резистивними нагрівачами (6). Для виготовлення труби використовують спеціально очищений кварц (двічі переплавлений у вакуумі) для уникнення потрапляння домішок із оснастки в поверхневий шар пластин. Температура в робочій зоні реактора можна підтримувати в межах від 700 до 1250 °С з точністю до 0,5 °С автоматичними системами регулювання. Пластини (4) розташовані вертикально в пазах спеціального човника (5), виготовленого із кварцу або високоякісного кремнію. Відстань (крок) між пластинами 2÷4 мм. Касету поміщають у робочу зону автозавантажувачем. Газову суміш подають із газової магістралі, а пару води - із камери випаровування (2). Витрату та концентрацію парогазової суміші регулюють сенсорами витрати газів та дозаторами.

8.2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати робоче місце та обладнання згідно інструкції.
2. Перевірити температуру термічної камери.
3. Підготувати технологічну оснастку (завантажувальний скафандр, човник, підставку, гачок, пінцет, касету).
4. Завантажити пластини в касету.
5. Завантажити касету в робочу зону термічної камери.
6. Продути робочу зону азотом, виставити витрату азоту за ротаметром - 60 л/год.
7. Перевірити термопарою температуру в робочій зоні.
12. Провести технологічну операцію (відповідно до завдання запропонованого викладачем).
15. Продути робочу зону азотом, виставити витрату азоту за ротаметром - 60 л/год.
16. Вивантажити пластинами з підставки для човника в пенал.
17. Представити в координатах температура - час циклограму технологічного процесу термічного окислення.
12. Сформулювати висновки за результатами роботи.

Примітка. За рекомендацією викладача об'єм експериментальних дослідень може бути уточненим

Зміст звіту

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Одержані результати відповідно до порядку виконання роботи.
3. Аналіз результатів роботи.
4. Висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Для чого використовується діелектричні плівки в виробництві інтегральних схем.

2. Властивості плівок діоксиду кремнію.
3. Методи контролю товщини плівки SiO₂
4. Методи термічного окислення кремнію.
5. Чому при проведенні високотемпературних операцій використовують кварцову технологічну оснастку.
6. Які фактори впливають на швидкість росту плівок діоксиду кремнію.
7. За допомогою яких параметрів керують процесом термічного окисдування?

9. РОЗРОБКА ДРУКОВАНИ СХЕМ

Мета роботи: ознайомитися з конструктивно - технологічними обмеженнями розробки друкованих плат, набути практичні навички щодо обґрунтування вибору технології їх виготовлення; ознайомитись з розробкою друкованих плат у системах автоматизованого проектування на прикладі Altium Designer.

9.1. Основні теоретичні відомості

Конструктивні особливості друкованих плат.

Конструктивно-технологічні різновиди друкованих плат (ДП) представлені на рис.9.1 і рис.9.2. В залежності від числа нанесених друкованих провідникових шарів та матеріалу основи ДП поділяються на одно-, двосторонні і багат шарові, гнучкі, провідні.

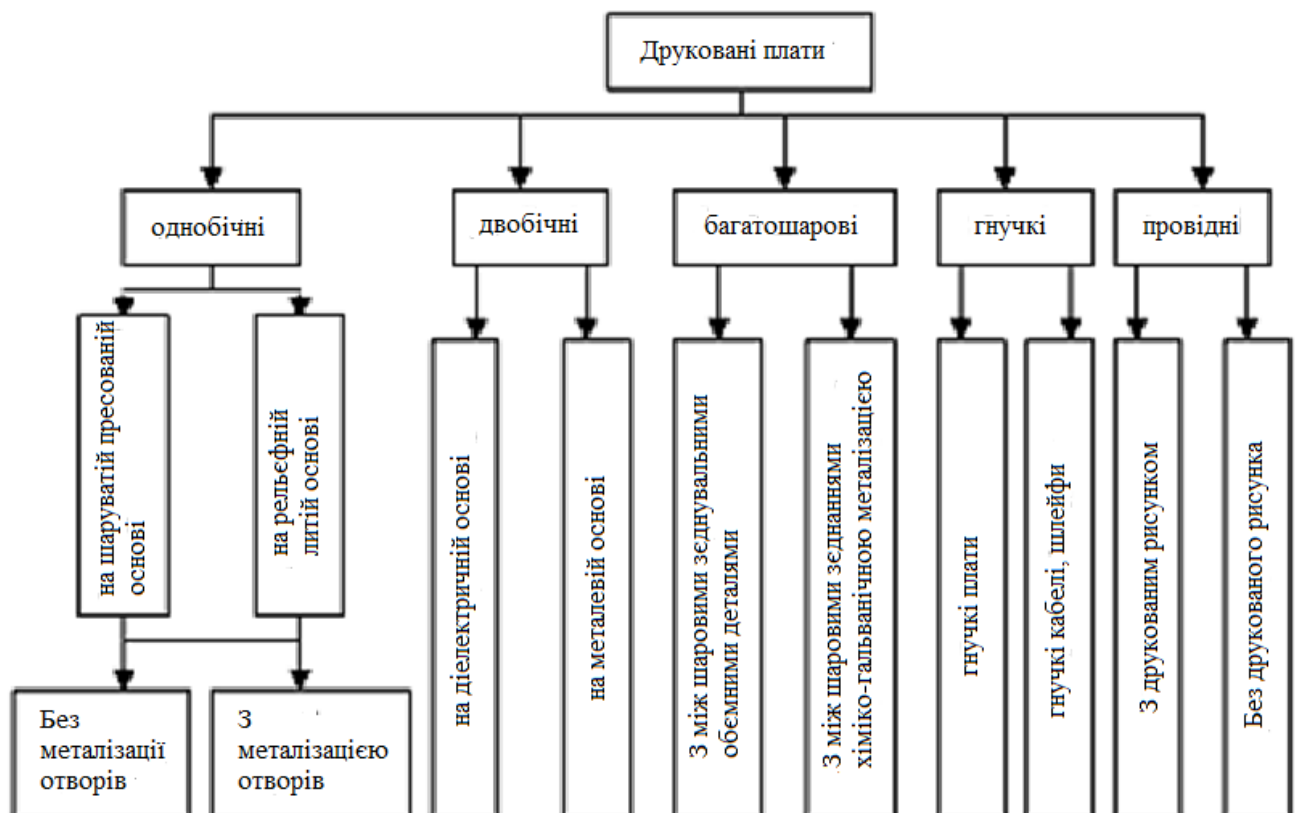


Рисунок 9.1 – Класифікація конструкцій друкованих плат

Односторонні ДП (ОДП) виконуються на шаруватій пресованій основі.

Двосторонні ДП (ДДП) мають провідниковий рисунок на обох сторонах діелектричної чи металевої основи. Електричний зв'язок шарів друкованого монтажу здійснюється металізацією отворів.

Багатошарові ДП (БДП) складаються із шарів ізоляційного матеріалу, що чергуються, і провідного малюнка, з'єднаних клейовими прокладками в монолітну структуру шляхом пресування. Електричний зв'язок між провідними шарами виконується спеціальними об'ємними деталями, друкованими елементами чи хіміко-гальванічною металізацією.

Гнучкі ДП (ГДП) оформлені конструктивно як ОДП чи ДДП, але виконані на еластичній основі товщиною 0,1 - 0,5 мм. Вони застосовуються в тих випадках, коли плата після виготовлення піддається вібраціям, багаторазовим вигинам або їй після установки ЕРЕ необхідно додати компактну форму.

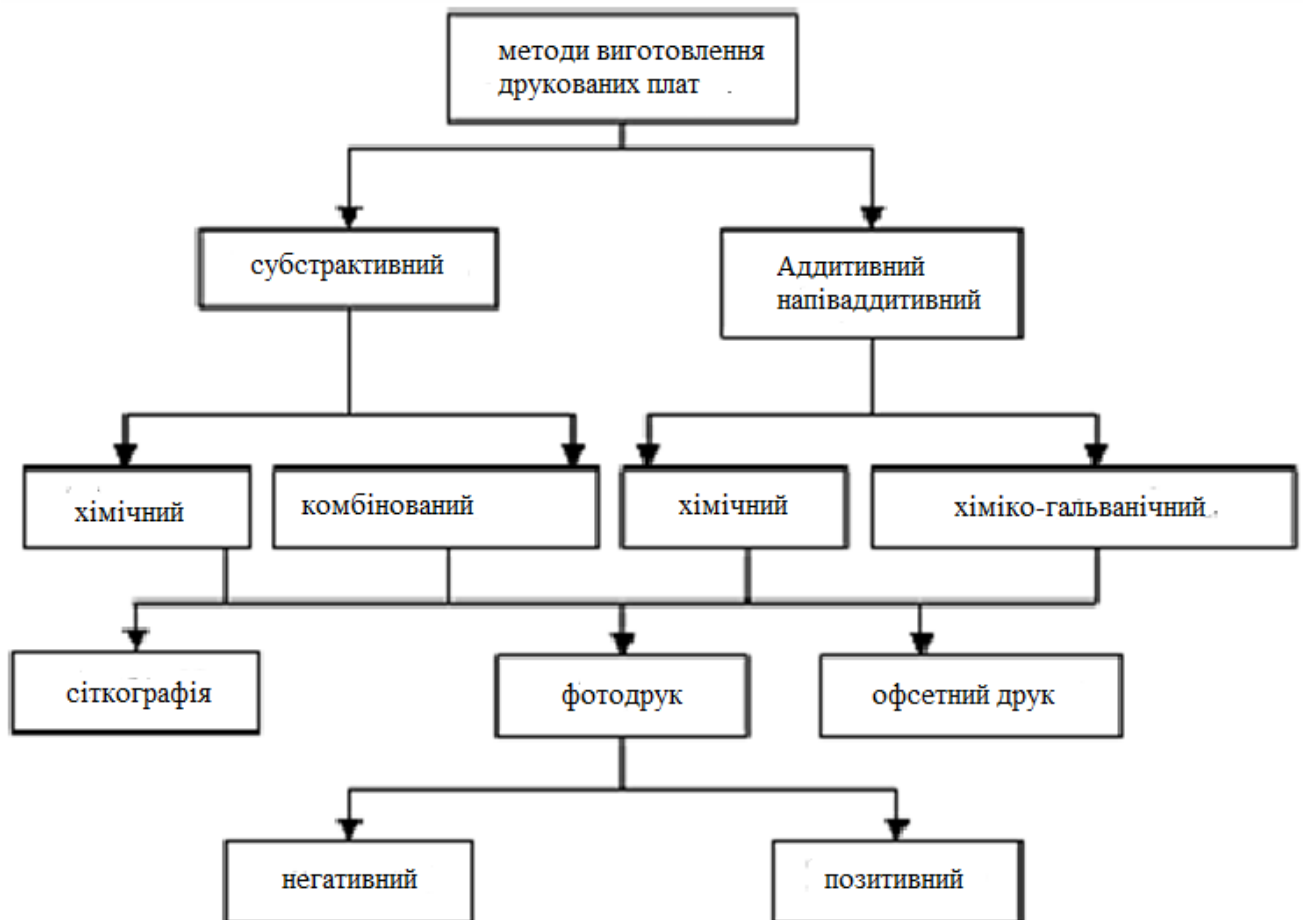
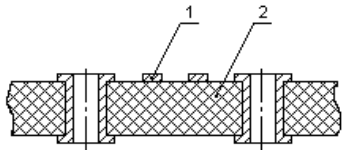
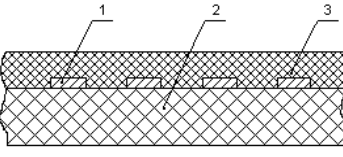
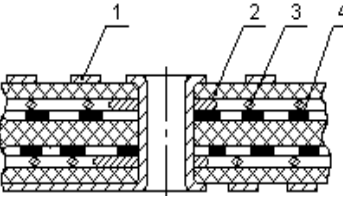
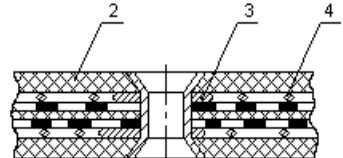


Рисунок 9.2 – Класифікація методів виготовлення друкованих плат

Провідні ДП (ПДП) являють собою діелектричну основу, на якій виконується друкований монтаж чи його окремі елементи (контактні площадки, шини живлення і заземлення), а необхідні електричні з'єднання проводять ізольованими проводами діаметром 0,1...0,2 мм. Схеми перерізів різних ДП приведені в табл. 9.1 та на рис.9.3.

Таблиця 9.1

Схеми перерізу провідних та гнучких друкованих плат

Тип плати	Вид плати	Схема перерізу	Позначення
ГДП	Гнучкі друковані плати		1 – провідний рисунок; 2- діелектрична основа; 3 – лавсанова плівка
	ГПК (шлейфи)		
ПДП	З друкованим монтажем		1-провідний рисунок; 2 – діелектрична основа; 3- провідник; 4 – адгезив
	Без друкованого монтажу		

При виборі конструкції друкованих плат повинні бути розглянуті наступні питання:

- габаритний критерій;
- критерій щільності рисунка і товщини провідного шару;
- критерій числа шарів;
- матеріал основи.

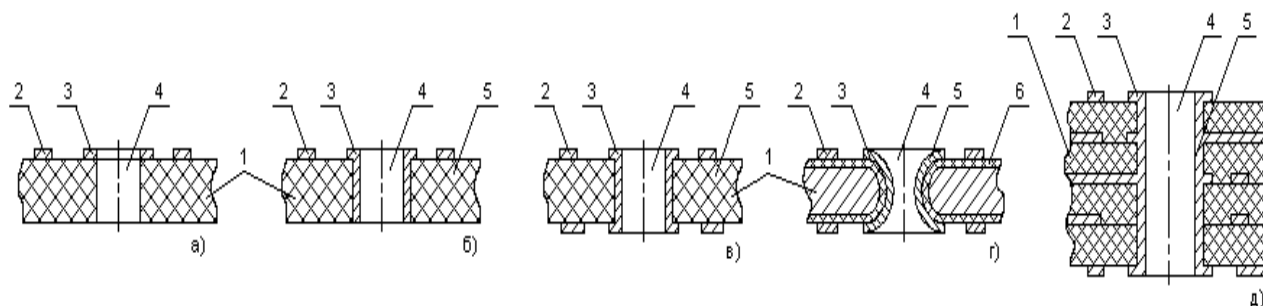


Рисунок 9.3 – Перерізи друкованих плат: а) – ОДП без металізації; б) – ОДП з металізацією; в) – ДДП на діелектричній основі; г) – ДДП на металевій основі; д) – БДП.
(1 – основа діелектрична чи металева, 2 – друкований провідник, 3 – контактна площадка, 4 – монтажний отвір, 5 – металізація, 6 – діелектрик)

Вибір габаритів друкованих плат відповідно до ОСТ4.010.019-81:

- габаритні розміри, конфігурацію і місця кріплення ДП вибирають у залежності від установчих розмірів, елементної бази, експлуатаційних характеристик, використання автоматизованих методів установки навісних елементів, пайки, контролю і техніко-економічних показників;

- габаритні розміри ДП варто вибирати з урахуванням класу точності відповідно до табл.1.2, при цьому варто враховувати, що зі збільшенням габаритних розмірів збільшуються відхилення, які допускаються при виконанні елементів конструкції плати;

- рекомендується розробляти ДП простої прямокутної форми, конфігурацію, відмінну від прямокутної, варто застосовувати тільки в технічно обґрунтованих випадках;

- при виборі розміру ДП у першу чергу необхідно скористатися типовим рядом розмірів;

- при виборі співвідношення сторін кращим є співвідношення 2:1;

- товщину матеріалу основи ДП визначають, в основному, в залежності від навантаження, умов експлуатації та призначення;

Встановлено розмірний ряд значень товщини основ ДП - як гнучких, так і твердих:

- для гнучких (0,1-0,2-0,4) мм;
- для твердих (0,8-1,0-1,5-2,0-3,0) мм.

Матеріал для друкованих плат вибирають за технічними умовами. Він впливає на властивості ДП: твердість, власну ємність, теплопровідність.

Основні конструкційні матеріали, які застосовують для виготовлення друкованих плат, наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Основні конструкційні матеріали для виробництва друкованих плат

Вид матеріалу, марка	Товщина		Призначення	Властивості
	фольги, мкм	матеріалу, мм		
1	2	3	4	5
Гетинакс фольгований: ГФ-1-35(50) вогнестійкий ГОФ-2-50М вологостійкий ГОФВ-2-35	35, 50	1...3	ОДП, ДДП	$\rho_s=1 \cdot 10^9$ Ом; $\sigma=4$ Н; $t=-60...+90^\circ\text{C}$; $b=70...130\text{мг}$; $k=1...1...1,5$; $\tau=15\text{с}$
Склотекстоліт:з адгезійним шаром СТІК з каталізатором СТАМ	35, 50	1,0...1,5 0,7...2,0	ДДП ДДП	$\rho_s=10^{10}$ Ом; $\sigma=4$ Н; $k=1...1...1,5$; $\rho_s=1 \cdot 10^9$ Ом; $b=20\text{мг}$; $U_{\text{пр}}=15\text{кВ/мм}$
Склотекстоліт фольгований СФ-1(2)- 35(50)	35, 50	0,8...3	ОДП, ДДП	$\rho_s=10^{10}...10^{11}$ Ом; $\sigma=3...4...4$ Н; $t=-60...+105^\circ\text{C}$
Фторопласт фольгований:ФФ-4 армований ФАФ-4Д ФЛАН-2,8(3,8; 5; 7,2; 10; 16)	50 50 35	1,5...5 0,5...3 1...10	ОДП, ДДП ГДК ДДП, НВЧ	$\rho_s=1 \cdot 10^{13}$ Ом; $\sigma=3...3...3,2$ Н; $t=-60...+200^\circ\text{C}$; $\rho_s=5 \cdot 10^{14}$ Ом; $\sigma=3\text{Н}$; $t=-60...+150^\circ\text{C}$; $U_{\text{пр}}=15\text{кВ/мм}$
Лавсан фольгований: ЛФ-1 ЛФ-2	35, 50	0,05; 0,1	ГДП, ГДК	$\rho_s=1 \cdot 10^{13}$ Ом; $\sigma=2,4$ Н; $\Pi=400$; $t=-60...+100^\circ\text{C}$; $c=0,5...1...1\%$
Поліімід фольгований: ПФ-1 ПФ-2	35, 50	0,05...0,1	ГДП, ГДК	$\rho_s=10^{12}$ Ом; $t=-60...+250^\circ\text{C}$; $b=0,1\%$; $\Pi=600$; $U_{\text{пр}}=50\text{кВ/мм}$; $b=0,5...2\%$

де ρ_s – питомий поверхневий опір; b –поглинання вологи; δ - границя міцності, щеплення фольги з діелектриком; k – властивості до штампування; τ - час горіння; $U_{\text{пр}}$ – напруга пробиття; ϵ – діелектрична проникність ($\epsilon_{\text{ом}}=4...11$).

Діаметри монтажних і перехідних отворів, металізованих і неметалізованих, повинні відповідати ГОСТ 10317-79, який встановлює наступний ряд: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм.

Технологічність конструкції друкованих плат.

Виробнича технологічність друкованих плат визначається трудомісткістю виготовлення. Експлуатаційна технологічність друкованих плат оцінюється контролепридатністю і взаємозамінністю.

При такій оцінці порівняння конструкцій за технологічністю проводять між типами ДП у ряді: ОДП – ДДП - ДДП дм - БДП (рис. 9.3).

Ряд побудований за зростанням трудомісткості виготовлення плат при однаковій роздільній здатності малюнків. Трудомісткість до кінця ряду підвищується на порядок у порівнянні з початком ряду).

Згідно із типовою оцінкою технологічності, впливає, що конструктор повинен прагнути застосовувати в першу чергу перший тип ДП у ряді (ОДП) і переходити до наступного типу тільки в тому випадку, якщо не можливо забезпечити задані вимоги до розміщення і трасування при використанні попереднього типу, або при обов'язкових технічних вимогах заказчика:

–типова оцінка технологічності ставить другу умову: кращим є використання сіткографії замість фотолітографії. Ця вимога при трьох класах щільності рисунку виконується для ДП розмір до 170×150мм, не більше. Третя умова типової оцінки технологічності відмова від субтрактивної технології там, де це можливо;

–технологічний процес виготовлення ДП не повинен погіршувати електрофізичні і механічні властивості застосованих конструкційних матеріалів.

При розробці конструкції друкованих плат (ДП) розв'язуються ряд задач, які є взаємозв'язаними. Основні задачі:

- схемо – технічні задачі — розташування компонентів, трасування доріжок, мінімізація кількості шарів тощо;

- радіотехнічні задачі — врахування паразитних ефектів, параметрів ліній зв'язку (геометричні розміри, топологія розташування відносно інших компонентів та доріжок) тощо;
- теплотехнічні задачі — температурний режим роботи друкованої плати, тепло відвід тощо;
- технологічні задачі — вибір методу виготовлення ДП, параметри підкладки, товщина мідного шару, тип маскування тощо.

Основні правила конструктивно - технологічної розробки друкованих плат:

- максимальний розмір друкованої плати (одношарової або багатошарової) не повинен перевищувати 50 x 50 см;
- рекомендовані форми ДП є прямокутні, а саме співвідношення розмірів сторін друкованої плати наступні: 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 3:2, 5:2 тощо;
- ширина друкованих провідників та мінімальна відстань між ними визначається класом друкованого монтажу. У вітчизняній промисловості встановлено два класи друкованого монтажу: А — малої щільності, Б — великої щільності. Для плат класу А вказані величини допускаються в межах 0,5 — 0,8 мм, для плат класу Б — у межах 0,2 — 0,4 мм;
- по краях ДР слід передбачати технологічну зону шириною 1,5 — 2,0 мм. Розташування установочних та інших отворів, а також друкованих провідників у цій зоні не допускається. Усі отвори повинні розташовуватися у вузлах координатної сітки;
- для правильної орієнтації корпусу мікросхем при їх встановленні на друковану плату на неї наносять «ключ», що визначає положення першого контакту мікросхеми;
- конденсатори, резистори, та інші навісні елементи слід розташовувати паралельно координатної сітки. Відстань між

корпусами повинна бути не менше 1 мм, а відстань між контактами елементів — не менше 1,5 мм;

- діаметр монтажних отворів задається більшим від діаметру контактів на 0,5 мм;
- для правильної орієнтації друкованої плати при виготовленні на ДР необхідно вказати орієнтуєчий паз (або зрізаний лівий кут) або технологічні базові отвори;
- друковані доріжки не повинні мати різких перегинів та зовнішніх гострих кутів (що автоматично закладено в програмному забезпеченні).

Зазвичай розміри плати вибирають з урахуванням вимог автоматизації виготовлення. Рекомендований ряд: 110x170 мм, 170x200, 170x280; 150x240. Уніфікація розмірів плати зменшує число регулювань засобів технологічної та кількість необхідної оснастки.

Товщина плати, залежить від вимог, що пред'являються до конструкції виробу. Зокрема від методу виготовлення плати, маси і габаритів встановлюваних елементів. У переважній більшості випадків вона не перевищує 3 мм.

Поверхневий монтаж (англ. – surface mount technology, SMT) -це технологія, при якій компоненти встановлюються безпосередньо на поверхню ДП. Компоненти такого монтажу – SMD (surface mount device), характеризуються невеликими розмірами. Наприклад двох контактний пасивний елемент – 0805 (розмір корпусу, довжина якого 08 мм, а ширина 05 мм). Також застосовують в залежності від компонентів і інші корпуси. Наприклад: SOT, SOIC, DPAK.

У порівнянні з традиційними, плати поверхневого монтажу характеризуються:

- Великою густиною електронних компонентів.
- Меншими відстанями між провідниковими елементами і контактними площадками.

- Меншою кількістю рівнів металізації та перехідних отворів.
- Крок між контактними площадками повинен бути мінімальним, але достатнім для запобігання їх замиканню при розміщенні компонентів на ДР.
- Всі компоненти і SO корпуси розташовуються паралельно один одному.
- Довгі сторони SO корпусів і чіп-компонентів повинні розташовуватися у взаємно перпендикулярних напрямках.
- У свою чергу, чіп-компоненти повинні розташовуватися довгими сторонами перпендикулярно напрямку руху плати уздовж доріжки.

Для мініатюрних компонентів розмірами 0805 0603, 0402 і 0201 відстані між корпусами можна зменшити, проте при цьому слід пам'ятати, що мінімальна відстань між компонентами повинна бути не менша ніж висота більшого компоненту.

Надмірне зменшення розмірів контактних площадок може привести до зниження надійності паяних з'єднань та не забезпечує їх якість. Також важливо забезпечити однакові форми контактних площадок для монтажу кожного компонента. Невиконання цієї вимоги призводить до зміщення, або підйому (вертикально) компонента.

При розробці ДП та розташуванні провідників необхідно враховувати наступні вимоги:

- Провідні доріжки (ПД) застосовувати прямі та паралельні краям плати.
- Рекомендуються виконувати ПД мінімальної довжини та максимальні по ширині. Мінімальна ширина провідника – не менше 0,1 мм, перевага надається ширині не менше 0,4 мм
- Відстань між ПД повинна бути не менше 0,1 мм. На практиці зазвичай використовується відстані між ПД 0,5 мм. Між елементами, що розташовані близько один до одного, рекомендується відстань не менше 0,4 мм.

- Рекомендується при розробці ДП не великих розмірів використовувати одну сторону плати для установки елементів. Двостороннє розташування ускладнює технологію і знижує продуктивність.
- При розробці мультиплікативних ДП, які складаються з двох або більше плат, та кріпляться один до одного за допомогою шин для не основної плати допускається мінімальна відстань ПД від краю 0,6 мм, зазвичай застосовують відстань 0,75 мм.

Для автоматизації монтажу ДП вказують фіксуючі отвори. Їх діаметр і розташування не регламентується та визначається конструкцією обладнання. Граничні відхилення на міжцентрову відстань між фіксуючими отворами не повинні перевищувати (\pm) 0,05 мм, між монтажними отворами і контактними площадками - повинна бути не більше 0,1 мм.

При конструюванні друкованої плати необхідно враховувати, що застосування мультиплікативних заготовок плати дозволяє значно збільшити продуктивність виготовлення за рахунок скорочення допоміжних операцій.

При автоматизованому виготовленні ДП необхідно враховувати спосіб фіксації плати в обладнанні. Існують два способи фіксації ДП: по базових отворах і по краях. Базові отвори, як правило, робляться на відстані 5 мм від кутів друкованої плат. Компоненти встановлюють на відстані не менше 3-10 мм.

Для підвищення точності виконання технологічних операцій застосовують реперні знаки. Відповідно до міжнародного стандарту (SMEMA) реперні знаки підрозділяються на загальні і локальні.

Загальні реперні знаки використовуються для прив'язки до топології друкованої плати. При використанні мультиплікаційної друкованої плати реперні знаки розділяють на панельні і відбиваючі. Панельні реперні знаки розташовують на технологічних полях заготовки, а відбиваючі безпосередньо на краях окремої плати. Для установки складних компонентів (мікросхем) з малим кроком контактів використовують два локальних реперних знаки поряд з

компонентом. На краях плати необхідно розміщувати мінімум 2 загальних реперних знаки на максимальній відстані. Поверхня реперного знаку може мати покриття: мідь, золото або олово-свинець.

У процесі розробки ДП потрібно враховувати розміщення компонентів, щоб забезпечити наступні вимоги:

- Максимальну надійність виробу.
- Розміри контактних площадок і відстані між корпусами компонентів з урахуванням способу складання, процесу паяння, візуального і функціонального контролю, а також ремонтпридатності друкованих вузлів.
- Мінімальна відстань між контактними площадками сусідніх компонентів.

Мінімальні відстані повинні задовольняти виробничим вимогам і забезпечити:

- Установку компонентів із заданою точністю. Наприклад, мінімальна відстань між сусідніми корпусами повинна бути більше, ніж можливий сумарний зсув компонентів при встановленні.
- Пайка компонентів. Пайка може здійснюватися вручну, інфрачервоним або конвекційним оплавленням, хвилею припою.
- Можливість візуального контролю, який обмежується максимальним кутом огляду виводів компонента.
- Внутрішньо - схемний контроль.
- Доступ до компонентів при ремонті.

Практично не існує обмежень по максимальній відстані між контактними площадками сусідніх компонентів. Проте, в сучасних умовах, з урахуванням постійно зростаючих вимог по мініатюризації виробів, особливо в портативній техніці, виникає необхідність застосування максимальної густини монтажу компонентів.

Міжнародний стандарт IPC-SM-782 визначає правила конструювання друкованої плати і контактних площадок із застосуванням технології

поверхневого монтажу. У стандарті приведені універсальні розміри контактних площадок, незалежно від методу пайки для всіх стандартних корпусів компонентів. Відповідно до стандарту IPC-SM-782, мінімальні відстані між контактними площадками сусідніх компонентів повинні складати 0,63-1,5 мм залежно від типів компонентів і їх взаємного розташування.

Розробка друкованих плат у системах автоматизованого проектування

Система автоматизованого проектування Altium Designer є професійним інструментом для розробки друкованих плат. Включає необхідний набір засобів для створення електричних схем та їх топології, розміщення компонент на друкованій платі з великою щільністю установки елементів, трасування з'єднань і створення конструкторської документації.

Топологічний трасувальник Situs використовує повністю налаштований алгоритм для вирішення завдань розведення друкованих плат (ДП) з великою щільністю установки елементів.

Включає необхідний набір інструментів для створення електричних схем та їх топології. Редактор дозволяє працювати з проектами будь-якого розміру і складності. Він містить унікальні засоби для автоматичного і інтерактивного розміщення компонентів. Топологічний трасувальник Situs використовує повністю налаштований алгоритм для вирішення завдань розведення друкованих плат (ДП) з великою щільністю установки елементів.

Існує можливість розробки друкованої плати в тривимірному вигляді з імпортом/експортом даних в інші середовища розробки (SolidEdge, SolidWorks, AutoCAD, ProEngineer). У програмному забезпеченні Altium проект ДП є набором документів (файлів), необхідні для виготовлення друкованої плати. Основні можливості Altium Designer:

- Створення та пошук компонентів сучасних виробників.
- Перевірка конструкції за допомогою вбудованого моделювання аналогових / цифрових схем.
- Автоматизована маршрутизація складних топологій, керована користувачем.

- Порівняння зміни документації відносно старих версій в процесі роботи.

Процес проектування друкованої плати в програмі Altium Designer поділяється на кілька етапів:

- 1) Створення та налаштування проекту розробки друкованої плати;
- 2) Створення бібліотек елементів;
- 3) Створення схеми електричної принципової;
- 4) Створення та розведення друкованої плати;
- 5) Експортування проекту та конструкторської документації. Ці етапи виконуються за допомогою редактора схем (Schematic) і редактора друкованих плат (PCB). На кожному етапі проектування створюються власні типи файлів. Структура проекту зображена на рис. 9.4 [8].

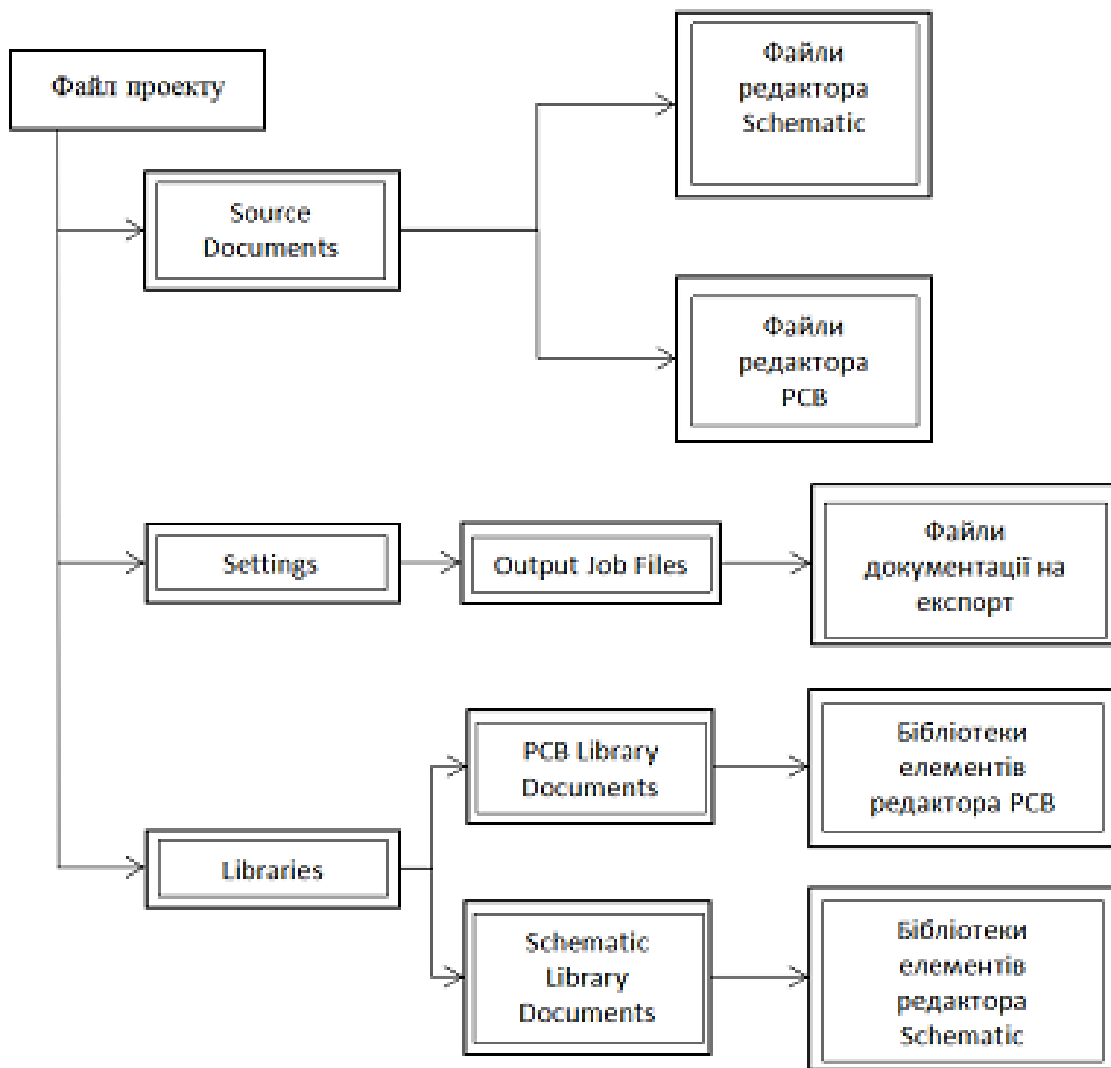


Рисунок 9.4 – Структура проекту розробки друкованої плати

Обладнання

Altium Designer призначений для роботи під управлінням 32- або 64-розрядних операційних систем Windows 7/8/10. Мінімальні системні вимоги: - Windows 7 x32 або вище. -Intel® Core™ i3 чи аналогічний. Монітор з роздільною здатністю 1280x1024

9.2. Порядок виконання роботи

1. Провести аналіз конструктивно-технологічних обмежень розробки друкованих плат щодо обґрунтувати вибору технології виготовлення різних типів ДП.
2. Ознайомитись з розробкою друкованих плат у системах автоматизованого проектування на прикладі Altium Designer.
3. Встановити програмне забезпечення
4. Завантажити пакет бібліотеки з гугл класу.
5. Створити проект друкованої плати.
6. Виконати початкові налаштування.
7. Створити схему та провести трасування друкованої плати відповідно до схематичного зображення (за завданням запропонованим викладачем).
8. Зберегти результати роботи.

Рекомендації для виконання завдання.

1. Встановити програмне забезпечення .

Для створення нового проекту на верхній панелі керування вибрати пункти меню **File** » **New** » **Project**, (рис. 9.5). При цьому буде відкрито діалогове вікно **Create Project**.

2. У полі **Project Name** ввести назву проекту, наприклад «Example1» та вибрати розташування проекту, натиснути кнопку **Create**.

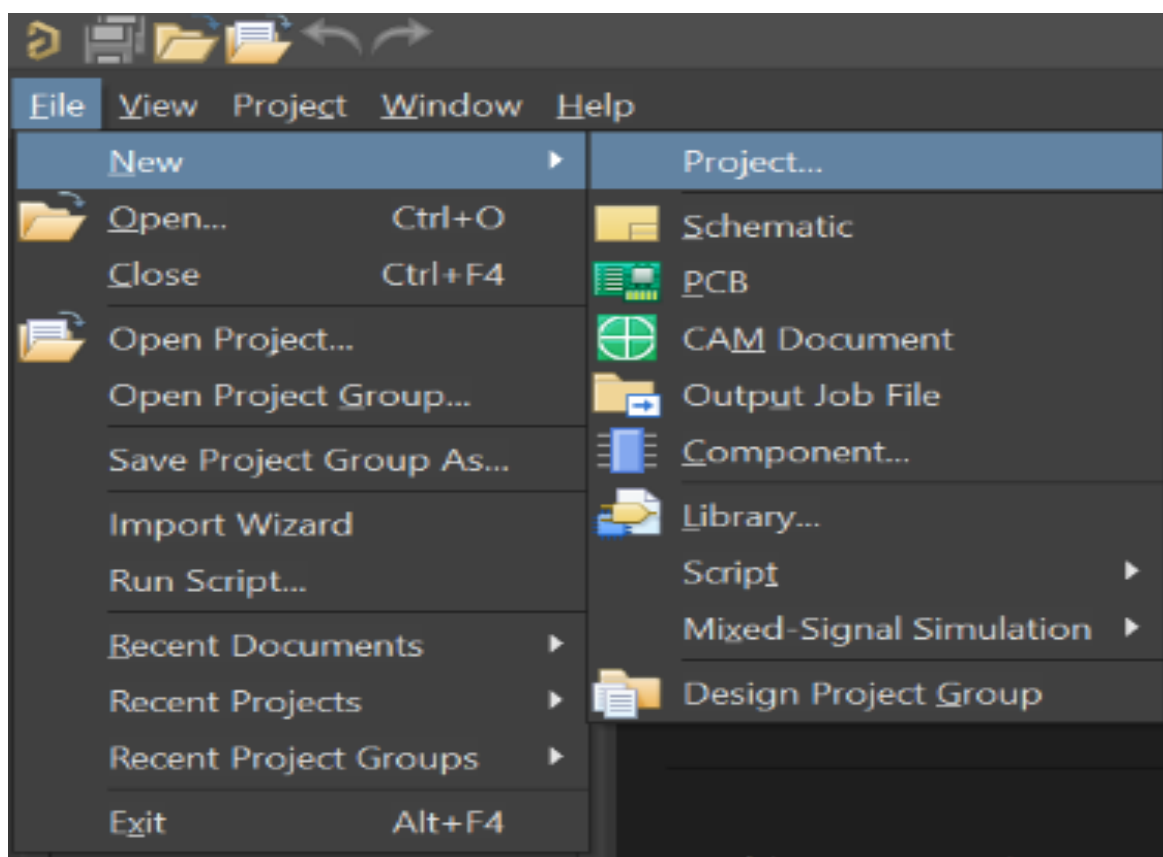


Рисунок 9.5 – Зображення екрану №1

3. Наступним етапом є додавання нового документа схеми до проекту: На панелі **Projects** натиснути **ПКМ** по назві файлу проекту.

У розгорнутому вікні вибрати пункт **Add New to Project » Schematic** (рис. 9.6). У робочій області буде відкрито порожній документ схеми під назвою **Sheet1.SchDoc**, а на панелі **Projects** у папці **Source Documents** з'явиться іконка документа схеми, пов'язаної з проектом.

Зберегти проект, натисніть **ПКМ** по назві файлу проекту вибрати **Save**. Відкриється діалогове вікно **Save As**, яке запропонує зберегти схему в тому ж місці, де знаходиться файл проекту. У полі **File Name** ввести назву проекту, наприклад **Example1**, та натиснути **Save**.

Примітка. Всі файли проекту необхідно зберігати у одну теку розташування.

4. Створити файл нової друкованої плати:

Натиснути **ПКМ** по назві файлу проекту на панелі **Projects**.

У розгорнутому вікні вибрати пункт **Add New to Project » PCB** (рис. 1.3).

У робочій області буде відкрито порожній документ схеми під назвою

PCB1.SchDoc, а на панелі Projects у папці Source Documents з'явиться іконка документа друкованої плати.

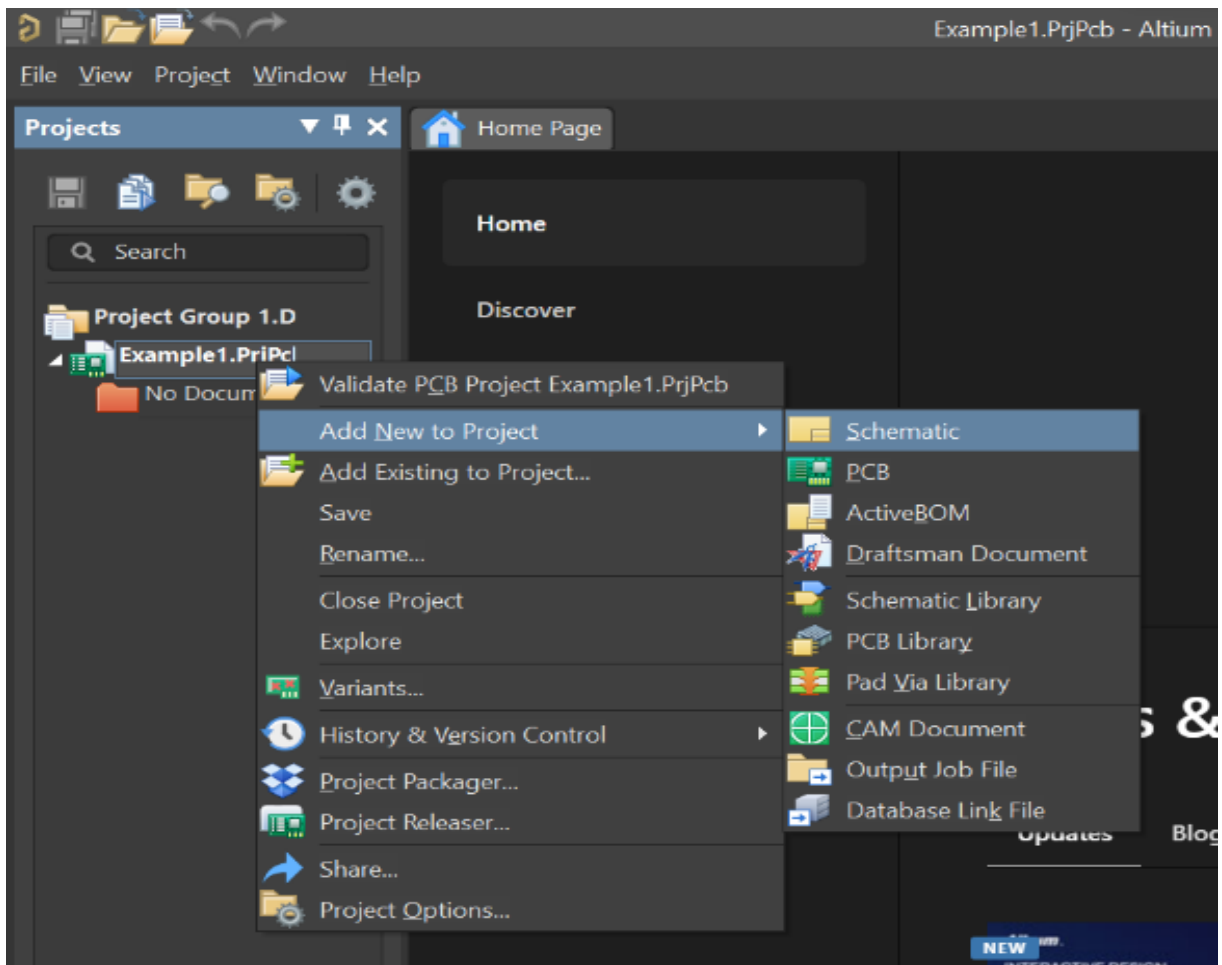


Рисунок 9.6 – Зображення екрану №2

Зберегти проект, натиснути **ПКМ** по назві файлу проекту вибирати **Save**. Відкриється діалогове вікно **Save As**, яке запропонує зберегти файл друкарської плати в тому ж місці, де знаходиться файл проекту. У полі **File Name** ввести назву проекту, наприклад **Example1**, та натиснути **Save**.

Завантажити пакет бібліотеки та видобути вміст з архіву. Натиснути **ПКМ** по назві файлу проекту на панелі **Projects**. У розгорнутому вікні вибрати пункт **Add Existing to Project**, та вибрати два файли з назвою **base_v2.0**.

5. Наступний етап розміщення компонентів на схемі. Для цього необхідно відкрити файл схеми та на правій панелі керувань натиснути на меню **Components** (рис. 9.8). Та у вікні вибору бібліотеки натиснути на **base_v2.0**.

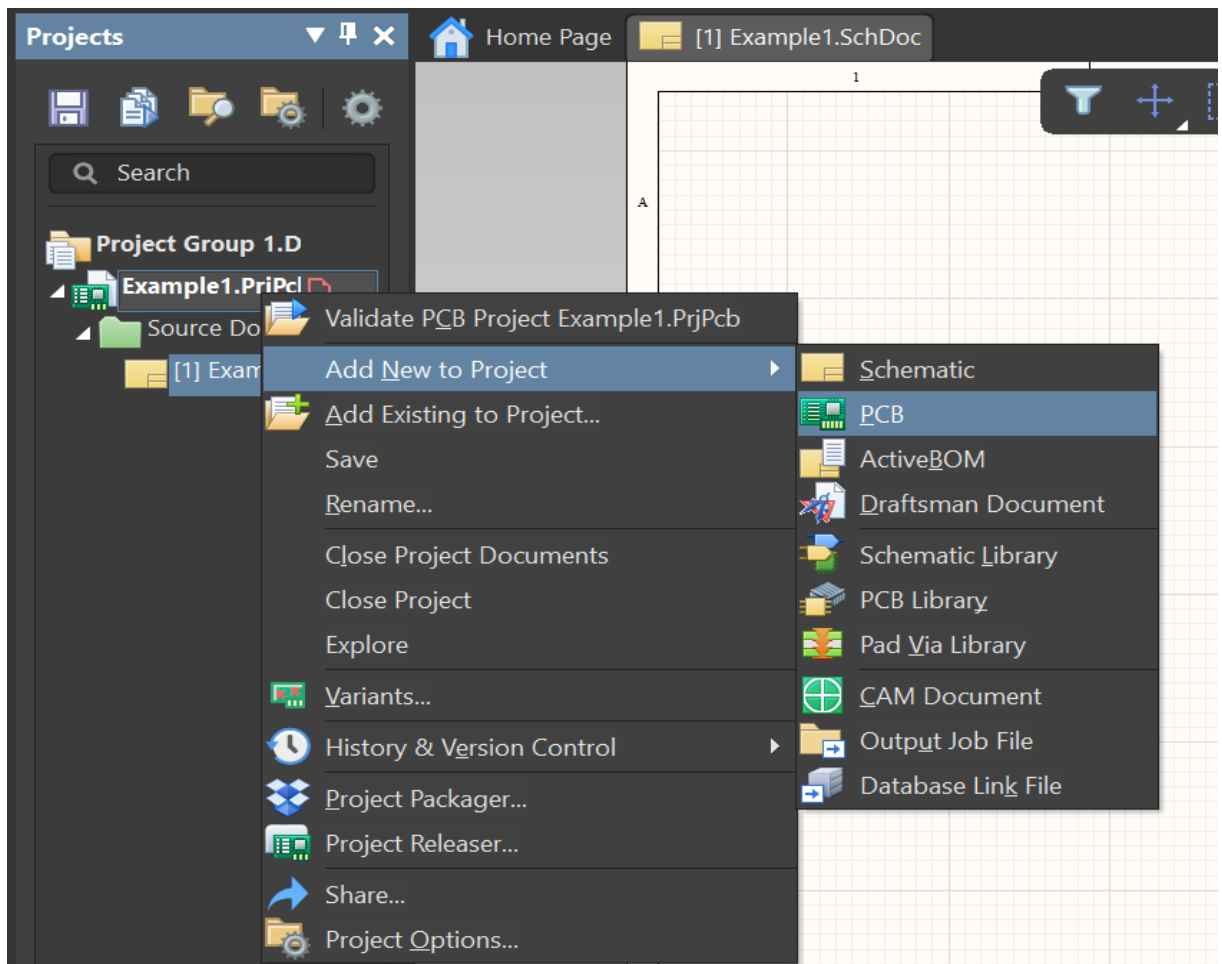


Рисунок 9.7 – Зображення екрану №3

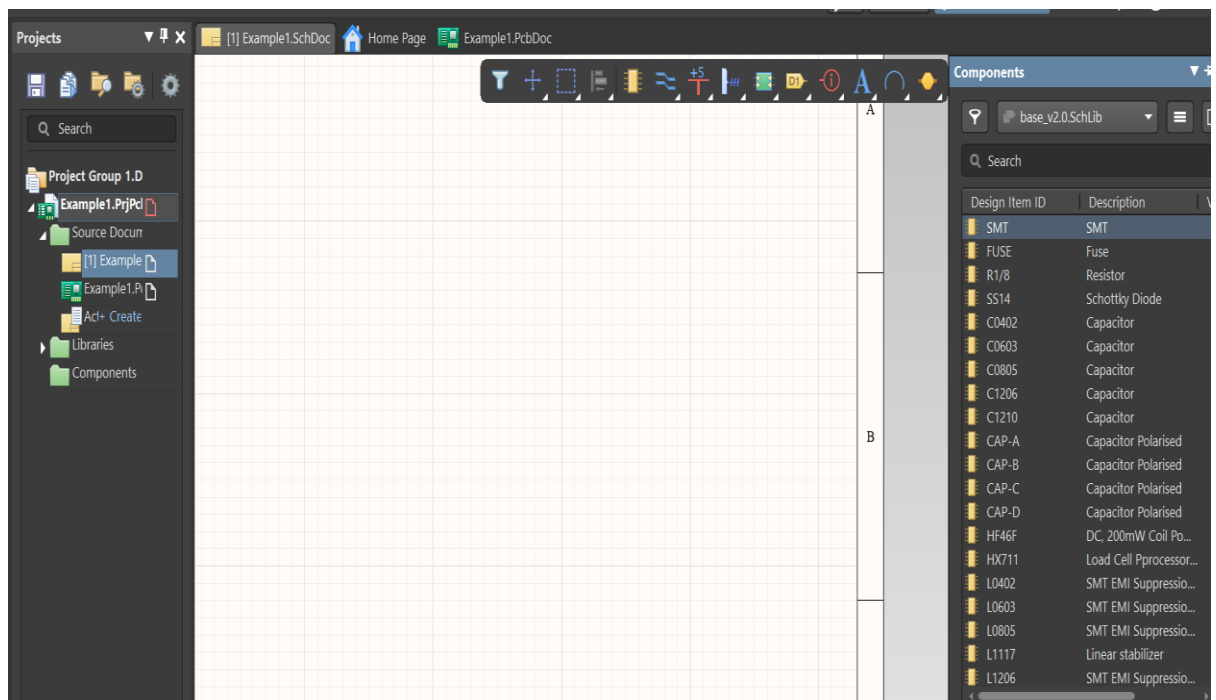


Рисунок 9.8 – Зображення екрану №4

6. Розмістити всі компоненти на листку схеми (див. рис. 9.9). Для цього

на боковій панелі у пошуковому рядку (Search) ввести назву потрібного компонента. Резистори і конденсатори вибирати типу SMD, номінал вказувати у графі **Comment** після розташування у робочій області.

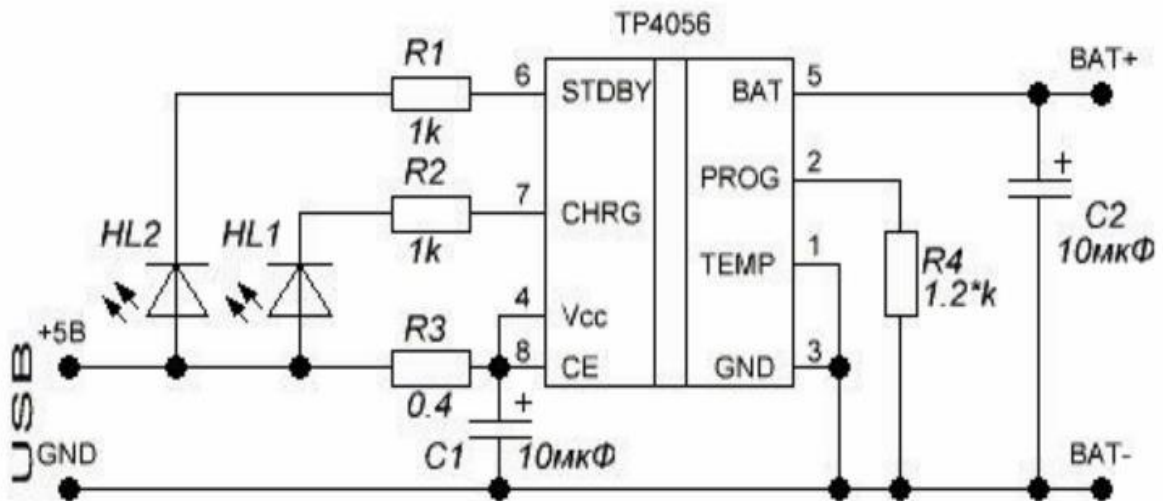


Рисунок 9.9 – Схема

7. Після розміщення компонентів (див. рис. 9.10) необхідно присвоїти кожному з них свій номер для цього натиснути на верхній панелі керування **Tools » Annotation » Annotate Schematics**.

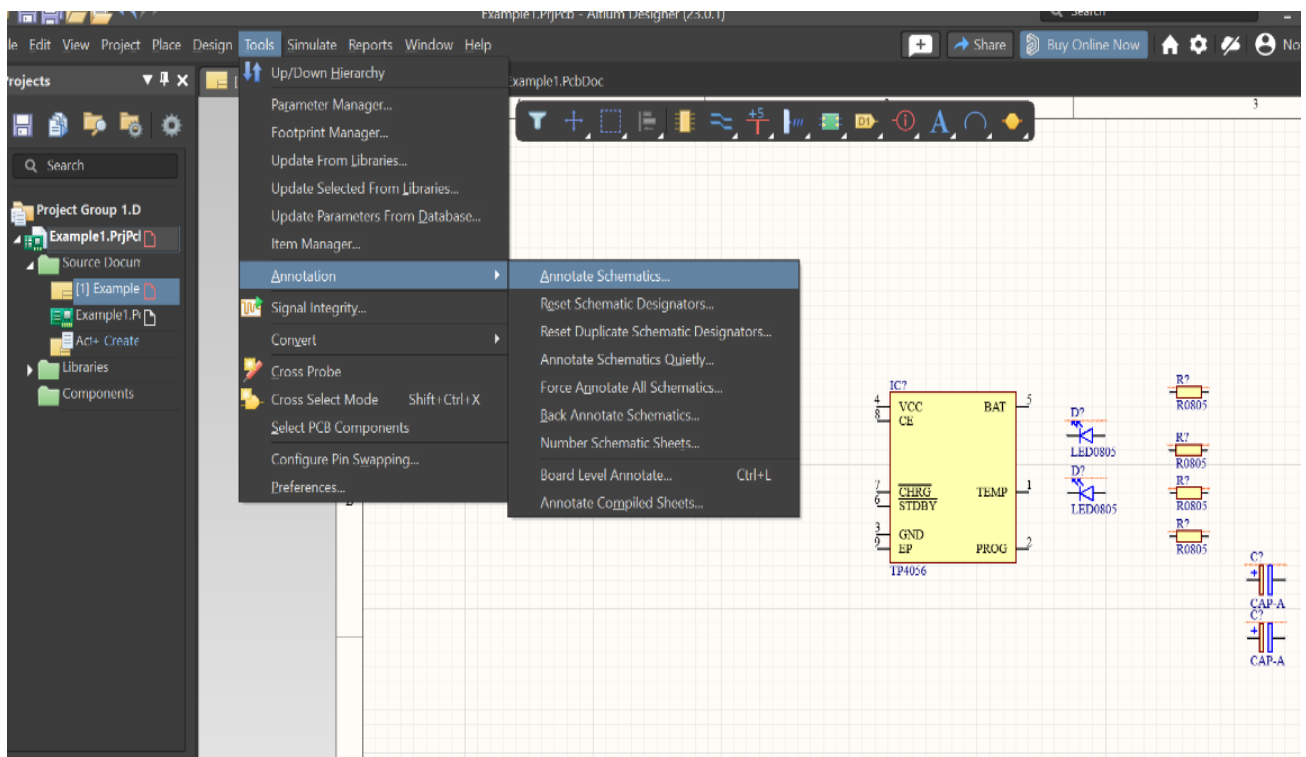


Рисунок 9.10 – Зображення екрана №5

8. Відкриється діалогове вікно **Annotate**, натискаємо **Update Changes List** » **Accept Changes(Create ECO)** » **Validate Changes** » **Execute Changes** » **Close** (див рис. 9.11).

9. Після цього за допомогою інструменту **Place Wire** з'єднати компоненти згідно схеми.

Для перенесення посадкових місць у файл друкованої плати натиснути на верхній панелі керування **Design** » **Update PCB Document**. З'явиться вікно **Engineering Change Order**, прибрати відмітку з пункту **Room Example1**, та натиснути **Validate Changes** » **Execute Changes** » **Close**.

10. Провести трасування плати згідно з рекомендаціями. У файлі **PCB** розташувати компоненти відносно один одного. Трасування проводиться за допомогою інструмента **Interactively Route Connections(Ctrl + W)**.

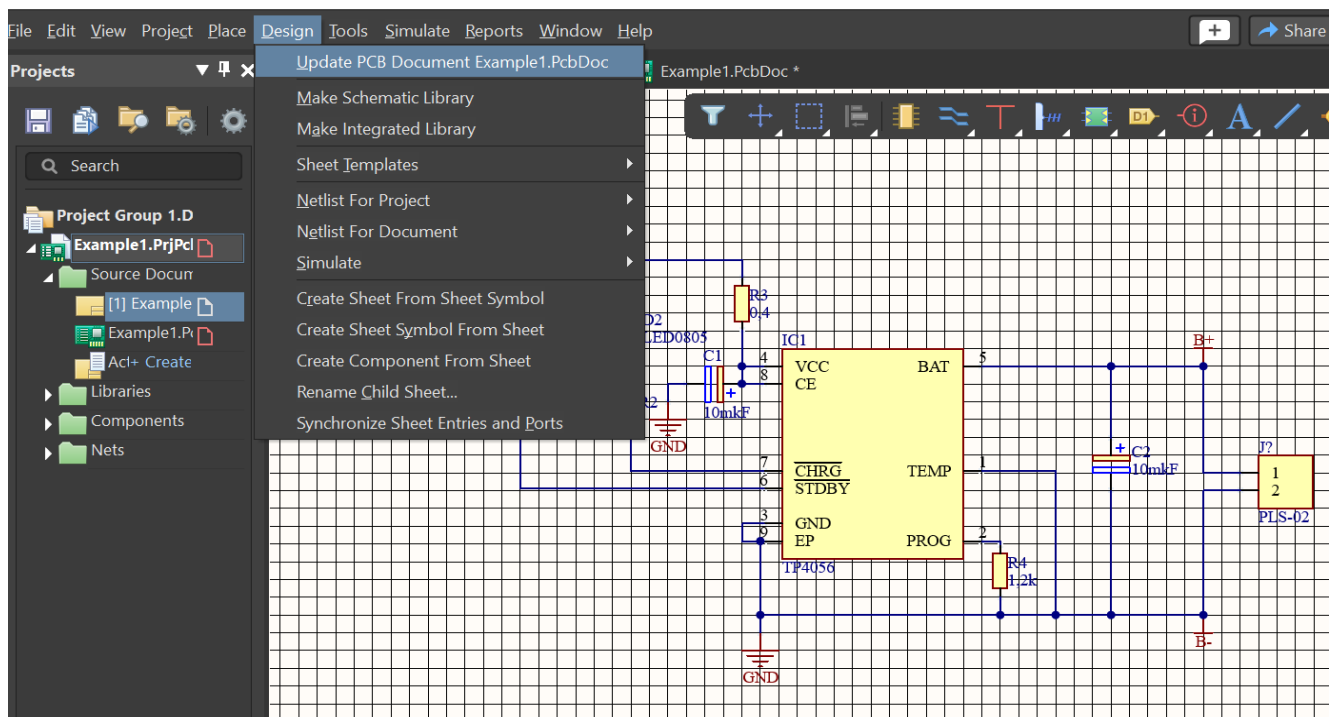


Рисунок 9.11 – Зображення екрану №6

Зміст звіту

1. Мета роботи. Вхідні данні до проекту та їх аналіз.
2. Опис виконання завдання.
3. Схематичне зображення розробленого пристрою.

4. Топологія друкованої плати.
5. Аналіз результатів роботи.
6. Висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Порядок створення нового проекту;
2. Порядок налаштування сітки;
3. Порядок налаштування типу шрифту;
4. Що таке базові елементи схеми, та які вони існують?

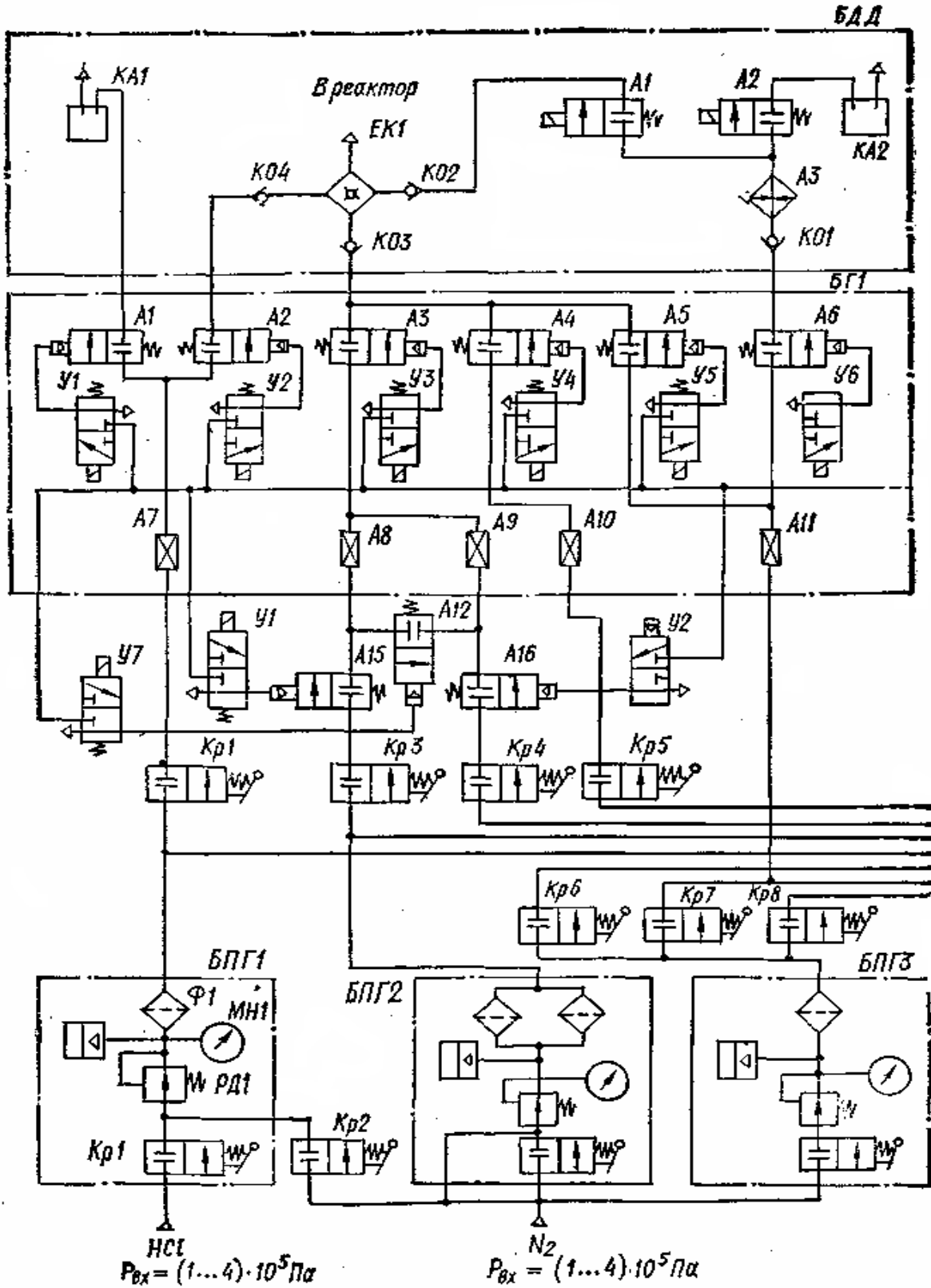
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вербицький В. Г. Дослідження електрофізичних параметрів МДН структур в технології мікроелектроніки / В. Г. Вербицький. О. В. Мачулянський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2014. – 33 с.
2. Готра З.Ю. Фізичні основи електронної техніки: Навчальний посібник Т.2 / З. Ю. Готра. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 884 с.
3. Кузьмичев А. І. Технологічні основи електроніки: Кн. 1 : Технологія виробництва мікросхем / А. І. Кузьмичев, Л. Д. Писаренко, Л. Ю. Цибульський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 127 с.
4. Bazu M. A practical guide for manufacturers of electronic components and systems / M. Bazu, T. Bajenescu, A. Failure. – John Wiley & Sons Inc, 2011. – 340 p.
5. Belyaev A.E. Physico- technological aspects of degradation of silicon microwave diodes / A.E. Belyaev, N.S. Boltovets, E.F. Venger. – Kyiv: Akadempriodyka, 2011. – 181 p.
6. Basanets V. V. Investigation of contact resistivity for Au—Ti—Pd—n-Si ohmic contacts for impatt diodes / V. V. Basanets, V. S. Slepokurov, V. V. Shinkarenko, R. Ya. Kudrik // Technology and design in electronic equipment. – 2015, – No. 1. – PP. 33 – 37.
7. Вербицький В. Г. Технологія формування окисних та легованих шарів в напівпровідникових пластинах термічними методами / В. Г. Вербицький. О. В. Мачулянський. – Київ : «АВЕРС», 2014. – 39 с.
8. Дрозденко О.І. Основи конструювання в електроніці: лабораторний практикум: навч. посіб. / О.І. Дрозденко, Д.Ю. Діденко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 97 с.

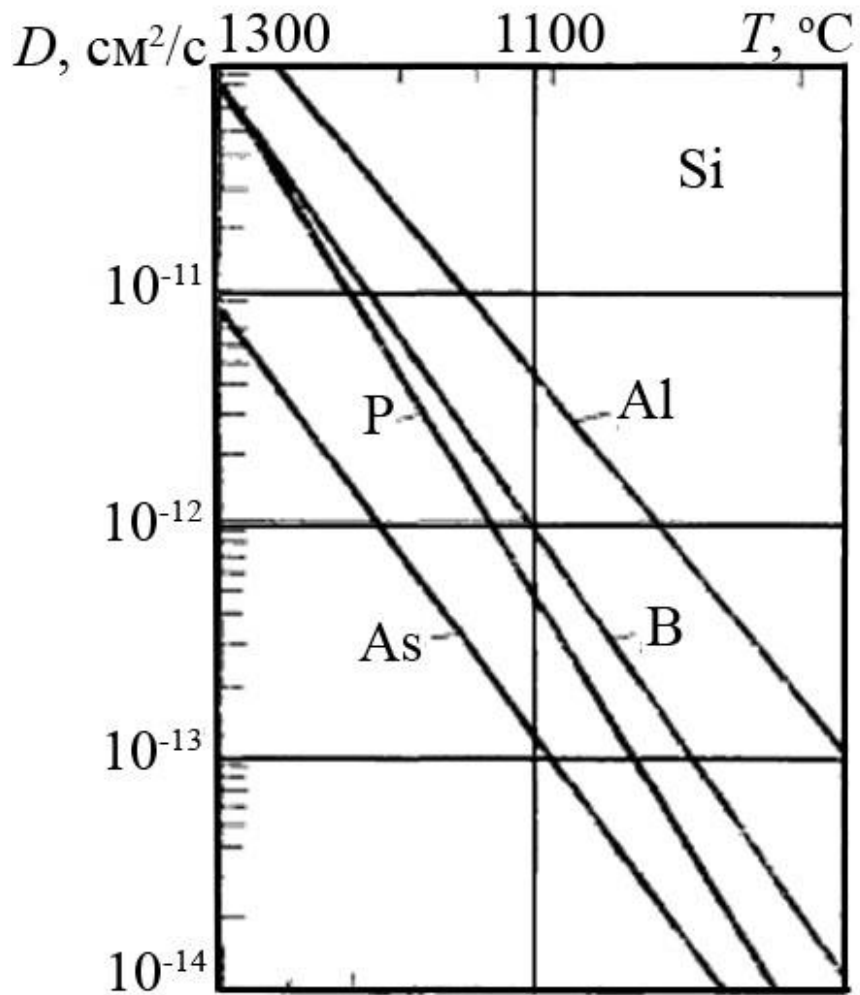
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

9. Бурик І. П. Технологічні основи виготовлення елементів напівпровідникових інтегральних мікросхем: навчальний посібник / І. П. Бурик. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 65 с.
10. Зайцев Р.В. Технологічні основи електроніки : Ч.1 / Р.В. Зайцев, А.М. Дроздов, Л.В. Зайцева, Г.С., Хрипунов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 64 с.
11. Опанасюк Н.М. Технологічні основи електроніки: навчальний посібник / Н.М. Опанасюк, Л.В. Однодворець, А. О. Степаненко , С.І. Проценко. – Суми: Сумський державний університет, 2013.– 105 с.
12. Стребежев В.М. Основи субмікронної та нанотехнології: навчальний посібник Ч.1 В.М. Стребежев, І.М. Юрійчук. – Чернівці: Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, 2021. – 120с.
13. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки: Навчальний посібник Т.1 / З. Ю. Готра. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 888 с.
14. Орлецький І.Г. Конструювання та технологія виготовлення сонячних елементів: навчальний посібник / – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2017. – 183 с.
15. Майструк Е.В. Фізико-хімічні основи напівпровідникового матеріалознавства: навчальний посібник / Е.В. Майструк, І.П. Козярський, Д.П. Козярський , П.Д. Мар'янчук. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2020. -120 с.

ДОДАТОК А. СТРУКТУРНА СХЕМА ПРИСТРОЮ ГАЗОРОЗПОДІЛУ



ДОДАТОК Б. ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТІВ ДИФУЗІЇ АТОМІВ
ДОМІШОК ВІД ТЕМПЕРАТУРИ В КРЕМНІЙ



**ДОДАТОК В. КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ
ВИРОБНИЦТВА ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ФІРМИ ISOLA**

Найменування матеріалу	Характеристики	Сфера застосування
1	2	3
Supra-Carta-E-Cu Quality 303 GL(CEM 1)	Зміцнений (композиційний), пробиваємий і штампуючий, теплова та розмірна стабільність	Побутова електроніка, автомобіле-будування
Duravel-E-Cu Quality 104 (FR-4) – жорсткий, тонкий, препрег	Стандартний, не пропускає УФ, $T_g > 130$ °C, постійна робоча температура 120 °C	ДДП, МДП з малою і середньою кількістю шарів
Duravel-E-Cu Quality 104KF (FR-4) – жорсткий	СТІ 400, $T_g > 130$ °C, постійна робоча температура 120 °C	ДДП
Duravel-E-Cu Quality 104TS (FR-4) – жорсткий, тонкий, препрег	Не пропускає УФ, «Т260-тест» > 60 хв, немає міграції Cu, $T_g > 130$ °C, постійна робоча температура 120 °C	Багато-функціональний
Duravel-E-Cu Quality 114 (FR-4) – тонкий, препрег	Не пропускає УФ, $T_g > 150$ °C, постійна робоча температура 130 °C, при динамічній напрузі 120 °C	Складні МПП – автомобіле-будування, засоби зв'язку
Duravel-E-Cu Quality 104KF (FR-4) – жорсткий	СТІ 400, $T_g > 130$ °C, постійна робоча температура 120 °C	ДДП
Duravel-E-Cu Quality 104TS (FR-4) – жорсткий, тонкий, препрег	Не пропускає УФ, «Т260-тест» > 60 хв, немає міграції Cu, $T_g > 130$ °C, постійна робоча температура 120 °C	Багато-функціональний
Duravel-E-Cu Quality 114 (FR-4) – тонкий, препрег	Не пропускає УФ, $T_g > 150$ °C, постійна робоча температура 130 °C, при динамічній напрузі 120 °C	Складні МПП – автомобіле-будування, засоби зв'язку
Duravel-E-Cu Quality 114TS (FR-4) – жорсткий, тонкий, препрег	Не пропускає УФ, термостабільний, «Т260-тест» > 60 хв, $T_g > 150$ °C, постійна робоча температура 130 °C	Багато-функціональний, у тому числі автомобіле-будування
Duravel-E-Cu Quality 117 (FR-4) – жорсткий, тонкий, препрег	Не пропускає УФ, $T_g > 165$ °C, незначне розширення по осі z, постійна робоча температура 145 °C	МДП високої щільності
IS 410 – тонкий,	Відмінні теплові, механічні та	Плати для комп'ютерної

препрег	електричні властивості, $T_g=180\text{ }^\circ\text{C}$	та автомобільної промисловості
FR 408 – жорсткий, тонкий, препрег	Низький коефіцієнт діелектричних втрат, низький коефіцієнт теплового розширення, $T_g\geq 180\text{ }^\circ\text{C}$	Плати для електроніки з передачею високочастотних сигналів
Duravel-BT-Cu – тонкий, препрег	Низький коефіцієнт діелектричних втрат в широкому частотному діапазоні, незначне розширення по осі z, $T_g > 180\text{ }^\circ\text{C}$, постійна робоча температура $155\text{ }^\circ\text{C}$	МДП з великою кількістю шарів (термостабільна підкладка)
Givager 210 – тонкий, препрег (смола APPE)	Низький коефіцієнт діелектричних втрат в широкому температурному і частотному діапазоні, $T_g > 180\text{ }^\circ\text{C}$, гарна теплова стабільність і стійкість до хімікатів	Військово-космічне застосування
P 97+P 27 – жорсткий, тонкий, препрег (P 27) (на основі полііміда)	Хімія без діанілового метилену, композиція V-0, $T_g = 260\text{ }^\circ\text{C}$, постійна робоча температура $200\text{ }^\circ\text{C}$	Військово-космічне застосування
Duravel-E-Cu Quality 156 – жорсткий, тонкий, препрег	Не пропускає УФ, $T_g > 150\text{ }^\circ\text{C}$, система небромованої смоли, займистість класу V-0	Плати зі зниженою горючістю
Duramid-E-Cu Quality 115 (FR-5) - тонкий, препреги (смола, зміцнена арамідом)	Хороша термостабільність, відмінна хімічна стійкість, низька шорсткість поверхні, добре свердлиться за допомогою лазера	МДП з Micro-via
Isofoil 160i - мідна фольга з шаром смоли	$T_g=150\text{ }^\circ\text{C}$	Зовнішні шари МДП
Esofoil - мідна фольга з шаром смоли, що не містить галогенів	$T_g=150\text{ }^\circ\text{C}$	Зовнішні шари МДП