

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет  
М.Є. Жуковського  
“Харківський авіаційний інститут”

С.М.Куліш,  
В.П.Олійник,  
В.Є.Овчаренко

**МАТЕРІАЛИ В КОНСТРУКЦІЯХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ  
АПАРАТУРИ**

Навчальний посібник по лабораторному практикуму

Харків “ХАІ” 2004

**УДК 621.396:678/07/**

**Матеріали в конструкціях радіоелектронної апаратури/  
С.М.Куліш, В.П. Олійник, В.Є.Овчаренко. – Навчальний посібник  
з лабораторного практикуму. – Харків: Нац. Аерокосмічний ун-т  
“Харк. Авіац ін-т”, 2004. – 33с.**

Наведені структура та класифікація матеріалів, що використовуються в конструюванні радіо та електронних апаратів. Розглянуто: специфіка використання матеріалів для конструювання інтегральних схем, контактні явища та термоелектрорушійна сила, властивості тонких плівок.

Для студентів, що навчаються за фахом “електронні апарати” (спеціальності 7.091001-4), а також спеціалістів, що вивчають, експлуатують та розробляють електронні засоби.

Іл. 13. Табл. 4. Бібліогр.: 6 назв.

Рецензенти: А.Н. Ситечко, Н.А. Кісельов

© Національний аерокосмічний університет ім.  
М.Є.Жуковського  
“Харківський авіаційний інститут”, 2004р.

## ВСТУП

Для виготовлення елементів радіоелектронних апаратів (РЕА) використовують різні матеріали, як хімічно чисті, так і на базі хімічних сполук. Широке використання знаходять композиційні матеріали, різні пластичні маси. Дія РЕА заснована на використанні електричних явищ, тобто на управлінні струмами, напругами, зарядами, статичними полями, полями випромінювання. Тому основними являються матеріали з протилежними електричними властивостями: метали та діелектрики, що значно відрізняються питомою провідністю. Метали (платина, срібло, мідь, золото, алюміній та інші) мають високу провідність, тобто малу питому опору:  $10^{16} \dots 10^{22}$  Ом\*м.

З винаходом транзистора та відкриттям практичних можливостей його широкого використання в РЕА велике значення здобули напівпровідники (германій, кремній, арсенід галія, тощо). По питомій опорі (порядку  $10^{-5} \dots 10^8$ ) вони займають проміжне положення між металами та діелектриками. Особливістю їх використання є необхідність хімічної чистоти та кількості легуючих домішок, що строго контролюються для отримання необхідних властивостей.

Важливу групу радіо металів складають матеріали з сильно виразними магнітними властивостями – феромагнетики. Деякі з матеріалів, використовуються при виготовленні РЕА (кварц, рубін, германій, кремній та навіть деякі рідини) мають властивості кристалів. Для таких матеріалів висувається необхідність правильності кристалічної решітки та точності зрізу кристала.

Електричні властивості матеріалів (питома опір, діелектрична та магнітна проникність і т.д.) мають бути стабільними та витримувати несприятливі зовнішні фактори (температуру, вологість, тиск та ін.). В деяких випадках матеріали, що являють собою хімічні сполуки або композиції (наприклад, пластмаси), внаслідок не контролюючих внутрішніх фізико-хімічних процесів можуть змінювати свої первинні властивості. Кажуть, що такі матеріали “старіють”. Старіння матеріалу – безповоротне явище, воно призводить до зміни електричних та інших властивостей матеріалів, і як наслідок, до порушення дієздатності РЕА. Конструктор нового виробу повинен брати до уваги ці явища.

## Лабораторна робота №1

### ВИВЧЕННЯ МАТЕРІАЛІВ В КОНСТРУКЦІЯХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ І ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

#### 1. Мета роботи:

Вивчити конструктивні особливості напівпровідникових і гібридних інтегральних мікросхем (ГІМС).

Скласти перелік матеріалів, потрібних для виготовлення окремих елементів.

#### 2. Загальні відомості

Інтегральні мікросхеми є основою елементної бази, що використовуються для розробки сучасних виробів мікроелектроніки. Саме вони визначають рівень розвитку мікроелектроніки.

Розробка надійних мікросхем з високим ступенем інтеграції та швидкодії стала можливою завдяки використанню нових матеріалів і розвитку якісно нових технологій.

Для виготовлення ІМС застосовують різноманітні провідникові, напівпровідникові, діелектричні та магнітні матеріали.

За конструктивно-технологічними ознаками ІМС розподіляються на тонкоплівкові, напівпровідникові, гібридні та товстоплівкові.

В тонкоплівкових ІМС усі елементи (контактні площадки, резистори, конденсатори) з'єднання між ними виконуються на основі тонких плівок з різних матеріалів, які послідовно наносять на пасивну діелектричну підложку зі скла, ситалу або кераміки.

Контактні площадки, міжз'єднання, резистори, обкладки конденсаторів виготовляють з тонких плівок металів і сплавів. Для ізоляції та діелектричних шарів конденсаторів використовують плівки з оксидів  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TaO}_5$ , а також вуглецеві сполучення (полістерол, поліаміди, тощо).

Суміщення різних матеріалів один з одним при формуванні плівок визначається з фазових діаграм стану для цих матеріалів.

Значним недоліком плівкового методу є неможливість виконувати активні елементи мікросхеми (діоди, транзистори) в єдиному технологічному циклі.

У напівпровідникових мікросхемах, як підложки, використовують монокристали напівпровідникових матеріалів (Ge, Si, GaAs тощо). Активні елементи створюють шляхом локальної дифузії домішок *n*- або *p*- типу в поверхню підложки. Пасивні елементи ІМС (контактні площадки, резистори, міжз'єднання) наносять у вигляді тонких плівок металів і сплавів.

Найчастіше підложкою напівпровідникової ІМС є пластинка з кремнію, бо на його поверхні легко утворюється плівка оксиду  $\text{SiO}_2$ . Ця плівка має

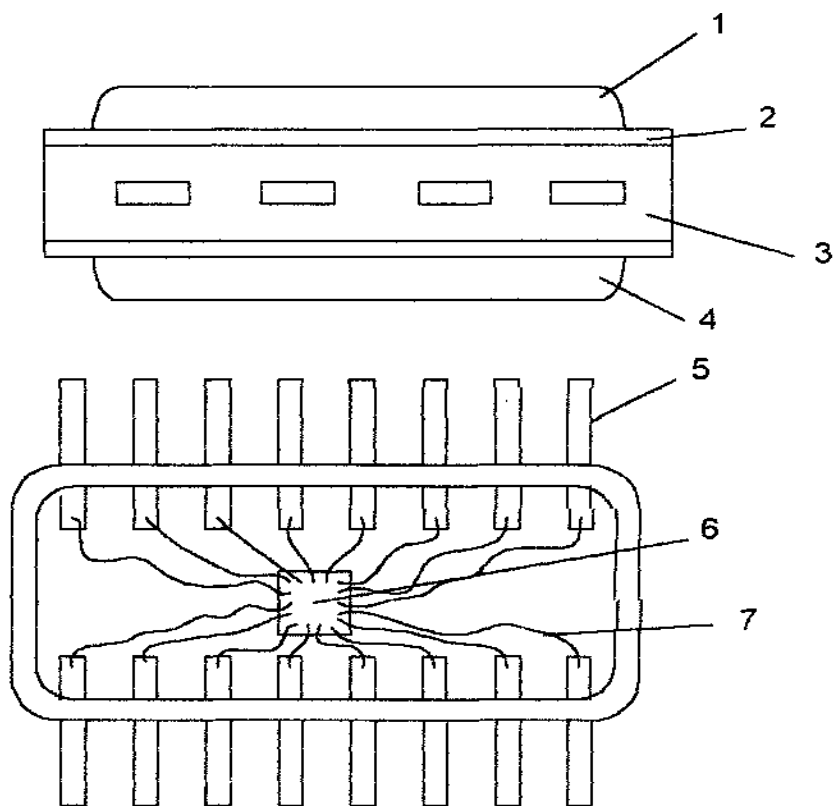
властивості хорошого діелектрика, а також добре захищає поверхню напівпровідника від проникнення небажаних домішок, тобто має маскувальні властивості.

У гібридних ІМС поєднуються тонкоплівкова та напівпровідникова технології. Це означає, що пасивні елементи схеми виконуються на діелектричній підложці методами тонкоплівкової технології: активні елементи виготовляються окремо за напівпровідниковою технологією та навішуються на підложку, де вже є тонкі плівки.

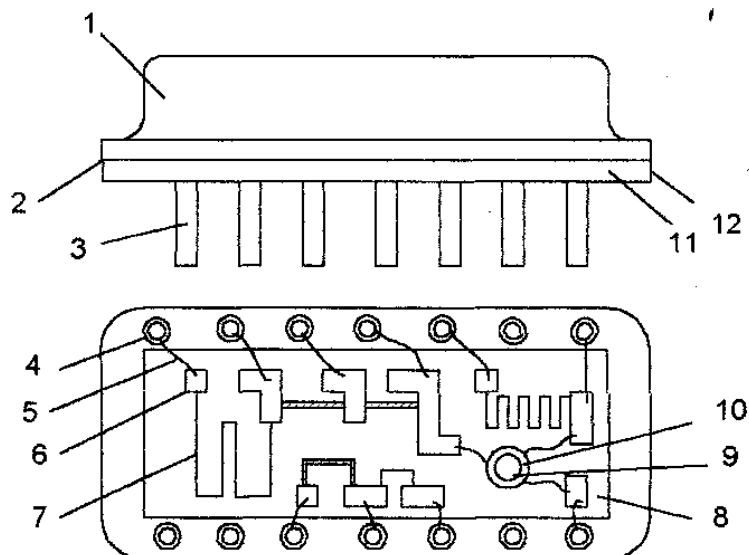
У товстоплівкових ІМС використовується підложка з кераміки, а контактні площадки, резистори, між'єднання одержують шляхом опалювання спеціальних паст, які наносять на поверхню підложки через трафарети. Після впікання на поверхні підложки утворюються товсті шари з провідникових матеріалів.

Усі мікросхеми маркують спеціальними позначками з чотирьох елементів: перший – цифра, що визначає конструкторсько-технологічну ознаку (1,5,7 – напівпровідникова; 2,4,6,8 – гібридна, 3 – інші ІМС); другий – дві-три цифри, що надають цій серії ІМС; третій – дві букви, що вказують на функціональне призначення ІМС; четвертий – порядковий номер розробки. Наприклад, 140УД11 означає: 1 - напівпровідниковий, 40 - номер серії, УД – операційний підсилювач, 11 - номер розробки.

На мал.1.1, 1.2 показані приклади конструктивного виконання напівпровідникової та гібридної мікросхем.



Мал. 1.1. Конструкція напівпровідникової мікросхеми: 1,4 - кришка, 2 - припій, 3 - корпус (кераміка), 5 - вивід, 6 - підложка (кремній), 7 - дріт.



Мал.1.2. Конструкція гібридної мікросхеми: 1 - кришка; 2 - корпус; 3 - виводи; 4 - прохідний ізолятор; 5 - дріт; 6 - контактна площадка; 7 - резистор; 8 - підложка; 9 - клей; 10 - транзистор; 11 - епоксидний герметик; 12 - припій.

### 3. Порядок виконання роботи

Виконуючи лабораторну роботу, треба використовувати мікроскоп МБС-9 і планшети з ІМС різного функціонального призначення, довідкову літературу, а також додержувати такого порядку:

1. Ознайомитися з принципом дії та пристроєм мікроскопу МБС-9 (опис МБС-9 знаходиться на робочому місці).
2. Розташувати мікросхему, що вивчається, на предметний стіл мікроскопу, ввімкнути освітлення та досягти чіткого зображення мікросхеми, вибравши необхідне збільшення.
3. Підрахувати кількість елементів і компонентів на підложці, відзначити їх конструктивні особливості, виміряти площу піложки.
4. Накреслити розташування елементів, компонентів і з'єднань між ними однієї з мікросхем (за вказівкою викладача).
5. Зняти мікросхему з предметного стола та вимкнути освітлення мікроскопа.
6. Скласти перелік матеріалів, з яких виготовлено елементи мікросхеми: підложка, контактні площадки, тонкоплівкові резистори, корпус, виводи, тощо.

### 4. Обробка результатів

1. Визначити функціональне призначення досліджуваних мікросхем, використовуючи маркірування на корпусі та літературу.
2. Підрахувати ступінь інтеграції та інтегральну щільність

мікросхем. Ступень інтеграції мікросхеми **K** з показником функціональної складності ІМС. Він визначається за формулою  $K=lg N$ , де **N** – кількість елементів і компонентів у складі ІМС. Розрізняють ІМС за значенням **K**: 1-го ступеня інтеграції (до 10 елементів), 2-го (до 100 елементів), 3-го (до 1000 елементів) і т. д..

3. Якщо до складу гібридної ІМС окрім діодів та транзисторів входять напівпровідникові ІМС, то функції такої мікросхеми поширюються, і саме такі мікросхеми називають великими ГІМС. Інтегральна щільність мікросхеми **W** визначається кількістю елементів **N**, що знаходяться на одиниці площі ГІМС:  $W=N/S$ , де **S** – площа підкладки ІМС. Цей показник оцінює рівень розвитку технології виробництва мікросхем

4. Накреслити топологію ГІМС – ескіз розташування елементів мікросхеми на підложці та комунікацію між ними.

5. Скласти перелік матеріалів (таб. 1.1.), з яких виготовлені елементи мікросхеми.

Таблиця 1.1

Найменування і елементів мікросхеми	Клас матеріалу (Д,Пр,ППр)	Найменування матеріалу	Хімічний склад	Структура	Функціональне призначення
Кришка					
Підложка					
Корпус					
Виводи					
Прохідні ізолятори					
Між'єднання					
Контактні площадки					
Комутаційні провідники					
Резистори					
Активні елементи					
Герметизуючі матеріали (склади)					
Антикорозійні покриття					

Найменування і елементів мікросхеми	Клас матеріалу (Д,Пр,ППр)	Найменування матеріалу	Хімічний склад	Структура	Функціональне призначення
Припої					
Лаки					
Клеї					

## 5. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Розшифровування назви ІМС.
3. Принципова схема та ескіз топології ІМС.
4. Розрахунки ступеня інтеграції та інтегральної щільності.
5. Перелік матеріалів, використаних для виробництва окремих елементів мікросхем (див.табл.1.1).
6. Висновки.

## 6. Контрольні запитання

1. Які матеріали використовуються для виготовлення резисторів, конденсаторів, діелектриків, ІМС.
2. Якими матеріалами ізолюються елементи ІМС?
3. З яких матеріалів виробляють підложки гібридних і напівпровідникових ІМС?
4. Назвіть матеріали, з яких утворюють контактні площадки.
5. У чому різниця між напівпровідниковими та гібридними мікросхемами?



## Лабораторна робота № 2

### ВИПРОМІНЮВАННЯ КОНТАКТНИХ ЯВИЩ І ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

#### 1. Мета роботи:

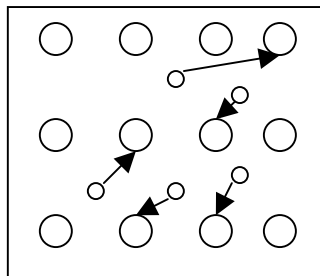
1. Вивчити сучасні теорії металів.
2. Вивчити процеси походження при контактних явищах у металах.
3. Вивчити явище термоерс у металах.
4. Провести дослідження залежності термоерс різних металів від температури.

#### 2. Загальні відомості з електронної теорії металів

У розчинах електrolітів знаходяться вільні іони, і проходження електричного струму пов'язано з одночасним переходом речовини до електродів.

Відомо, що протікання електричного струму в металах не зв'язано з переносом самої речовини металу. Носії електричного струму не зв'язані з атомами й однакові у всіх металах. У металевий провідник, по якому йде постійний струм, з одного кінця входить така ж кількість цих носіїв струму, яке виходить з іншого його кінця, і заряд провідника при цьому не змінюється. Таким чином, було встановлено, що носіями електричного струму в металах є вільні електрони.

Унаслідок сильної взаємодії між атомами металу при з'єднанні останніх у кристалічне тверде тіло, самі зовнішні їхні електрони перестають бути зв'язаними з окремими атомами і легко переходять з одного атома до сусіднього і навіть через усю кристалічну решітку. У вузлах кристалічної решітки розташовуються позитивні іони металу, а між ними хаотично рухаються вільні електрони, утворюючи своєрідний електронний газ (Рис. 1).



Мал. 1.

Вважаючи, що кожен атом одновалентного металу віддає по одному електрону, а двовалентного – по два, можна визначити

концентрацію вільних електронів у металах. По порядку величини вона дорівнює  $10^{28} \div 10^{29}$  електрон/м<sup>3</sup>.

Таким чином електронна теорія пояснює механізм електропровідності металів.

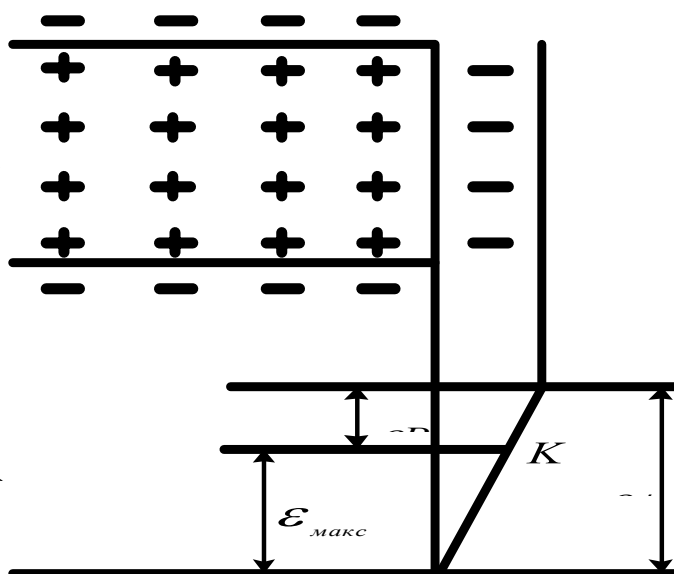
Електронна теорія дозволяє зрозуміти механізм виділення тепла електричним струмом. Електричне поле робить роботу і прискорює електрони в металах. Накопичена ними енергія при зіткненнях з іонами передається решіткам і нагріває метал.

Висока концентрація електронного газу і велика рухливість вільних електронів обумовлюють легку передачу заряду – високу електропровідність металів і інтенсивний перенос енергії – високу теплопровідність.

### 3. Контактні явища і термоерс у металах

Електрони в металі вільно переміщуються через весь кристал, але не залишають його. Як тільки електрон виходить назовні, весь шматок металу заряджається позитивно і втягує цей електрон назад. Тим часом, володіючи кінетичною енергією, електрони беззупинно «вискакують» з металу на відстані, не перевищуючих атомних розмірів, і втягуються назад. У результаті решітка з позитивних іонів буде зовні обволікатися тонким шаром негативних електронів, і на всій поверхні металу утвориться *подвійний електричний шар*, як показано на мал. 2, а. Цей подвійний шар є своєрідним конденсатором, який перешкоджає новим електронам виходити зсередини металу назовні.

Позначимо різницю потенціалів на обкладках цього конденсатора через  $\phi$ . Робота, необхідна для виривання з металу нерухомого, тобто того, який не володіє кінетичною енергією, електрона, дорівнює  $e\phi$ . На величину потенційна енергія електрона, що вийшов з металу, буде перевищувати його потенційну енергію



Мал. 2.

усередині металу (мал. 2, б).

Але в металі нерухомих електронів немає, і більша їхня частина володіє великою кінетичною енергією. Позначимо через  $\epsilon_{\text{макс}}$  найбільшу кінетичну енергію електрона в металі і відкладемо цю величину на графіку мал. 2, б. Для виходу з металу електронів з кінетичною енергією  $e_{\text{макс}}$  повинна бути зроблена робота

$$A = e\phi - \epsilon_{\text{макс}}, \quad (1)$$

де  $A$  – найменша робота, необхідна для виходу електрона з металу, — називається роботою виходу електрона. Величина  $A$  менше  $e\phi$ , тому що найбільш швидкі електрони за рахунок своєї кінетичної енергії можуть частково проникати в подвійний шар і для їхнього виходу з металу досить перебороти лише частину загальної різниці потенціалів (від крапки  $K$  на мал. 2, б до крапок, що знаходяться зовні металу), рівну  $P$ .

Величина  $P$  визначається зі співвідношення

$$A = eP, \text{ або } P = A/e \quad (2)$$

і зветься контактним потенціалом даного металу. Для різних металів контактний потенціал міняється в межах від 1 до 10 вольтів. Для практичних цілей досить важливо мати на увазі, що контактний потенціал і робота виходу істотно залежать від чистоти металу й обробки його поверхні.

Приведемо в зіткнення два різних метали. До їхнього контакту потенціал у повітрі між металами буде однаковий, як це показано на мал. 3, а. При цьому повна енергія електронів верхнього заповненого рівня в першому металі:

$$e\phi_1 - \epsilon_{1\text{макс}} = eP_1,$$

відрізняється від повної енергії відповідних електронів у другому металі:

$$e\phi_2 - \epsilon_{2\text{макс}} = eP_2.$$

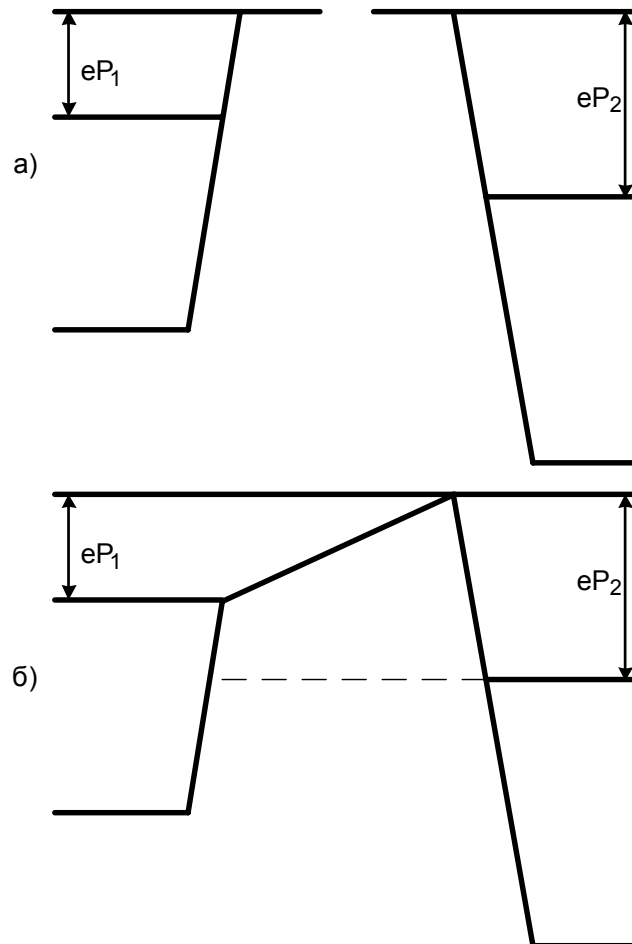
При зіткненні металів електрони одержать можливість переходити з одного металу в інший. Негайно почнеться перехід електронів з того металу, де енергія верхнього заповненого рівня більш висока, у другий метал. Цей перехід буде продовжуватися доти, доки верхні рівні в обох металах не зрівняються. При цьому установиться динамічна, рухлива рівновага.

У випадку мал. 3, а видно, що частина електронів з першого металу перейде в другий ( $eP_1 < eP_2$ ). У результаті втрати частини електронів перший метал зарядиться позитивно, виходить, потенційна енергія електронів у ньому зменшиться. Навпаки, другий метал, що одержав ці електрони, зарядиться негативно, і потенційна енергія його електронів зросте. Додаткова різниця потенціалів, яка виникла в результаті контакту металів позначена через  $P_{1,2}$ , а додаткова різниця енергій — через  $eP_{1,2}$ ; з мал. 3, б видно, що

a same

$$eP_1 + eP_{1,2} = eP_2$$

$$P_{1,2} = P_2 - P_1. \quad (3)$$



Мал. 3

Різниця потенціалів, що виникає між двома частинами металу при їхньому зіткненні,  $P_{1,2}$ , зветься *контактною різницею потенціалів*, що, як випливає з (3), дорівнює різниці контактних потенціалів цих металів.

*Контактна різниця потенціалів не створює електричного струму*, тому що потенціали електронів, здатних змінювати свій стан (електронів верхньої зайнятої зони, поруч з яким є вільні зони), у точності рівні. Як показано на мал. 4, величина  $P$  це різниця потенціалів між поверхнями обох металів у навколишньому їхньому просторі, у якому при цьому створюється електричне поле. Поле це може бути досить значним, оскільки величина  $P_{1,2}$  може досягати декількох вольтів. Цю обставину необхідно завжди враховувати при створенні електровимірних приладів, електронних приладів і т.п.

Якщо з'єднані послідовно три метали (мал. 5), то контактна різниця потенціалів між кінцями кола знаходиться за правилом

$$P_{1,3} = P_{1,2} + P_{2,3} = P_2 - P_1 + P_3 - P_2 = P_3 - P_1, \quad (4)$$

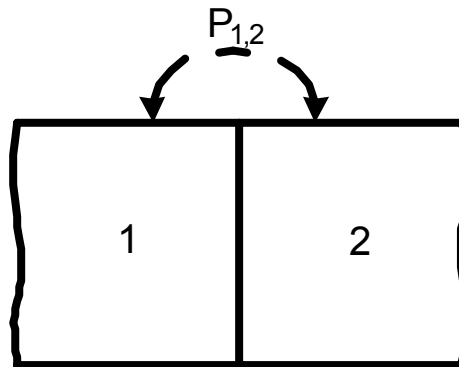
а саме, дорівнює різниці контактних потенціалів крайніх металів і не залежить від інших металів, що знаходяться між ними.

Якщо скласти з декількох металів замкнуте коло, як показано на мал. 5, то

$$\sum P_i = P_1 - P_1 = 0, \quad (5)$$

а саме, контактна різниця потенціалів у замкнутому колі дорівнює нулю і не викликає струму.

Строго кажучи, проста картина розподілу потенціалів і енергій електронів у металах, зображена на мал. 2. і мал. 3. є точною лише при абсолютному нулі температури.



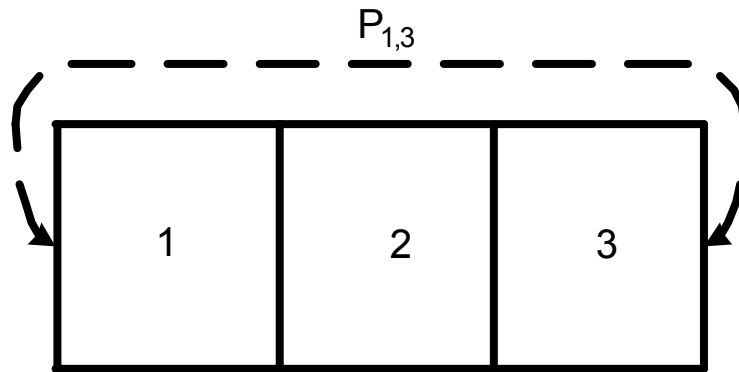
Мал. 4

При підвищенні температури в металі з'являється невелика кількість електронів,

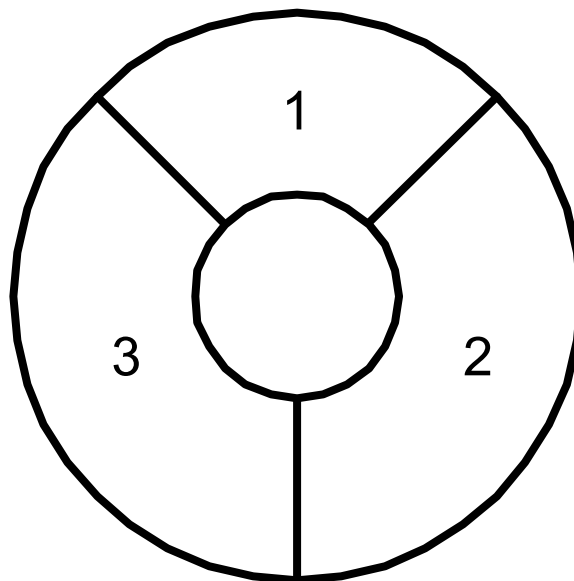
$$n' \sim T,$$

з енергіями, що трохи перевищують величину  $e_{\text{макс}}$ . Це приводить до невеликого зменшення роботи виходу електрона  $eP_1$  і контактного потенціалу  $P_1$  металу. Унаслідок різної структури електронних рівнів зазначені величини в різних металах змінюються по-різному, а це означає, що контактна різниця потенціалів  $P_{12} = P_1 - P_2$  буде також трохи мінятися з температурою.

При  $T > 0^\circ\text{K}$  стає можливим цілий ряд інших так званих термоелектричних явищ у металах. Зупинимося тут на тих, які мають важливе практичне значення явищі Пельтьє і термоелектрорушійній силі (термоерс).



Мал. 5

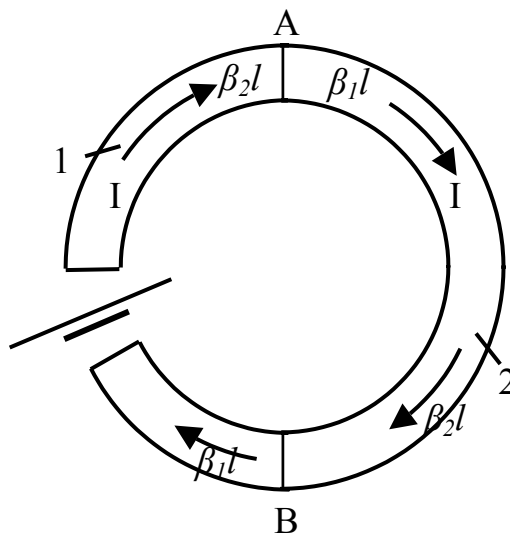


Мал. 6

Електронний газ у металі багато в чому схожий з ідеальним газом, хоча і відрізняється від нього закономірностями руху складових його часток (хвильові властивості електрона, принцип Паулі). Зокрема, висока рухливість часток повинна обумовлювати існування в електронному газі різних кінетичних процесів переносу, викликаних наявністю градієнтів концентрації, температури або електричного потенціалу. Одним з таких процесів є розглянута вище електропровідність металів, тобто перенос заряду електронами, що рухаються під дією електричного поля  $E = -d\phi/dx$ , прикладеного до металу.

При наявності електричного струму в металі потік направлених електронів, що рухаються, переносить із собою визначену енергію, тобто електричний струм супроводжується пропорційним йому потоком енергії. Якщо скласти замкнуте коло із двох металів 1 і 2, спаяних у перетинах  $A$  і  $B$ , і будемо пропускати через цей ланцюг постійний струм  $I$  від зовнішнього джерела (мал. 7).

Тоді при рівності струмів у кожному з металів потоки енергії в обох металах будуть трохи різними. Точна теорія показує, що це розходження обумовлене різним співвідношенням між енергією і швидкістю у електронів, перекинутих тепловим рухом на більш високі рівні ( $n'_1$  електронів у першому металі і  $n'_2$  у другому).



Мал. 7.

Якщо за час  $t$  через спай  $A$  пройде кількість електрики  $q = It$ , то за той же час до спаю  $A$  з першого металу підійде потік енергії  $\beta_1 q$  і піде в другий метал  $\beta_2 q$ , де  $\beta_1$  і  $\beta_2$  — відповідні коефіцієнти пропорційності між струмом і енергією в обох металах. Якщо  $\beta_1 > \beta_2$ , то різниця цих потоків

$$Q_{1,2} = (\beta_1 - \beta_2) \cdot q = \Pi_{1,2} q = \Pi_{1,2} It \quad (6)$$

залишиться в місці спаю і виділиться у виді тепла.

У спаї  $B$  буде мати місце протилежна ситуація: прихожий із другого металу потік енергії буде менше потоку, що іде в перший метал, і в цьому спаї буде поглинатися така ж кількість тепла, тобто

$$Q_{2,1} = - Q_{1,2} \quad (7)$$

Що спостерігається, таким чином, при проходженні струму в колі, складеному з різнорідних металів, охолодження одних спаїв і нагрівання інших зветься явищем Пельтьє. Коефіцієнт пропорційності  $\Pi_{1,2}$ , що характеризує кількість тепла, виділяємо чи поглинаємо при проходженні через спай одиниці заряду ( $q=1$ ), називається коефіцієнтом Пельтьє для даної пари металів.

Крім тепла Пельтьє, у колі виділяється і тепло за законом Джоуля-Ленца, що залежить від опору ділянок кола. У результаті на ділянці, що містить спай  $A$ , буде виділятися потужність

$$Q_A/t = R_A I^2 + Q_{1,2}/t = R_A I^2 + \Pi_{1,2} I, \quad (8)$$

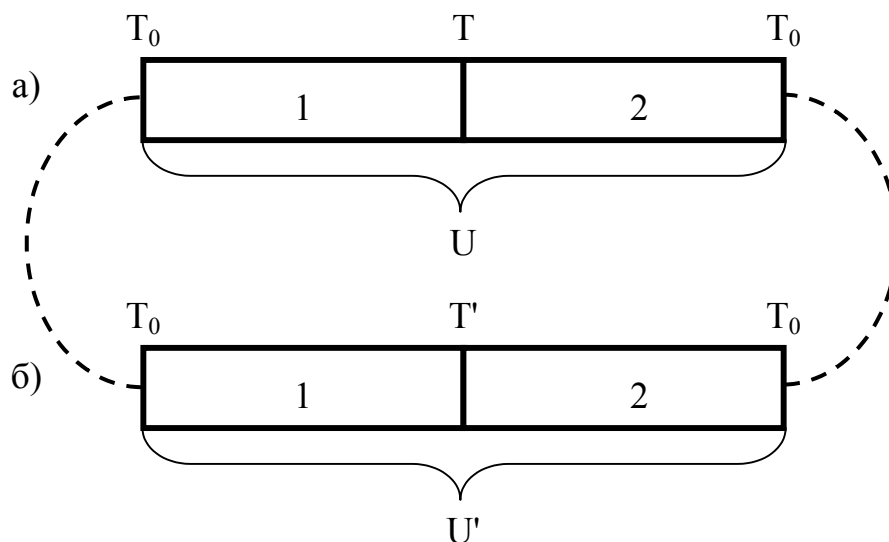
а на ділянці, що містить спай  $B$ , – потужність

$$Q_B/t = R_B I^2 + Q_{2,1}/t = R_B I^2 - \Pi_{1,2} I. \quad (8')$$

Тепло, виділене в одиницю часу у всьому контурі з повним опором  $R = R_A + R_B$ , буде дорівнювати

$$\begin{aligned} Q/t &= Q_A + Q_B/t = \\ &= R_A I^2 + \Pi_{1,2} I + R_B I^2 - \Pi_{1,2} I = (R_A + R_B) I^2 = R I^2 \end{aligned} \quad (9)$$

і підкоряється законові Джоуля-Ленца. Однак, поперх того, відбувається додатковий перенос тепла  $Q_{1,2}$  від одного зі спаїв контуру до іншого, причому при зміні напрямку струму на зворотне тепло буде виділятися в спай  $B$  и поглинатися в спай  $A$ . Це явище



Мал. 8

знайшло собі різні технічні застосування.

Так, як електричний нагрівач вигідніше використовувати замість звичайного омичного опору контур, схематично зображений на мал. 7; виносячи спай, що проохолоджується, у зовнішнє середовище. При цьому обсяг, що нагрівається, одержить не тільки кількість тепла за законом Джоуля-Ленца, але і додаткове тепло Пельтьє, що буде віднято від зовнішнього середовища зовнішнім спаєм, який проохолоджується, і виділиться на другому спайі усередині об'єму. Помітимо, однак, що такий додатковий потік тепла не означає можливості «отоплення приміщення тільки за рахунок подальшого охолодження зовнішнього морозного повітря», як про це іноді писали. У згоді з другим початком термодинаміки в даному випадку процес переносу тепла від більш холодного тіла до більш



гарячого можливий лише за рахунок необоротного перетворення електричної енергії струму (упорядкованого руху електронів) у теплову на омичному опорі. Охолодження відповідних спаїв при проходженні через них струму застосовується для створення зручних електроохолодильних пристроїв, що не містять елементів, що рухаються (мотор, компресор). Ця ідея вже реалізована, але при заміні металів напівпровідниками.

Ефект Пельтьє можна звернути. Якщо проходження струму в замкнутому ланцюзі викликає нагрівання одних і охолодження інших спаїв, то, навпаки, нагрівання одних і охолодження інших контактів приводить до появи струму в електричному колі (ефект Зеєбека, або термоелектричний ефект) під час відсутності зовнішнього джерела.

Нехай температура  $T_0$  у всіх крапках однорідного металевого стержня (мал. 8) однакова; виходить, всюди однакові концентрації, середні енергії і швидкості вільних електронів. При цьому через будь-який перетин 1-1 стержня за одиницю часу проходить однаковий потік електронів зліва направо і справа наліво.

Нагріємо один кінець стержня і будемо його підтримувати при постійній температурі  $T > T_0$ . Протилежний же кінець будемо беззупинно прохолоджувати так, щоб його температура  $T_0$  залишалася незмінною. Тоді в стержні установиться градієнт температури, і через нього буде йти постійний потік тепла. Перенос тепла в металах здійснюється в основному рухом вільних електронів.

При цьому електрони, що проходять через перетин 1-1 з області з більш високою температурою, переносять із собою більше енергії, ніж електрони, що проходять через той же перетин у протилежному напрямку. Унаслідок розходження швидкостей електронів, що знаходяться в областях з різними температурами, виявиться різним і число електронів, що проходять через перетин 1-1 у протилежних напрямках, і на кінцях стержня почнуть накопичуватися заряди протилежного знака. Усередині стержня виникає електричне поле, що перешкоджає подальшому поділові зарядів і вирівнює потоків електронів у протилежних напрямках. Таким чином, у рівноважному стані наявність градієнта температури уздовж стержня створює постійну різницю потенціалів на його кінцях, величина якої пропорційна градієнтові температури.

Якщо спаяти в одному місці два різнорідних метали 1 і 2 і нагріти спай до деякої температури  $T$ , що перевищує температуру обох кінців  $T_0$  (мал. 9,а), то через різне падіння потенціалу уздовж обох металів і їхніх електронних концентрацій потенціали вільних кінців будуть різні, і між металами виникне постійна різниця потенціалів  $\mathcal{P}$ . Якщо нагріти такий спай до іншої температури  $T'$  (рис. 9, б), то між вільними кінцями установиться інше значення різниці потенціалів  $U'$ . З'єднуючи вільні кінці однакових металів (як

показано на мал. 9 пунктиром), ми бачимо, що в замкнутому колі з двох різнорідних металів виникає електрорушійна сила

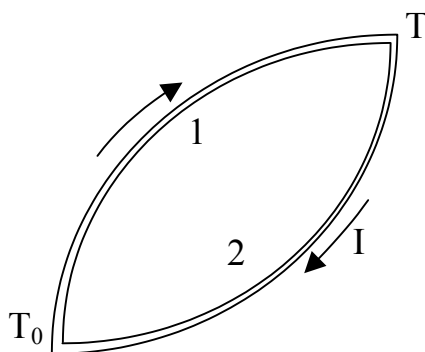
$$\xi_{1,2} = U - U' \quad (10)$$

якщо між спаями підтримується постійний перепад температур  $\Delta T = T - T'$ . Ця величина називається *термоелектрорушійною силою* (термоерс) і створює в замкнутому колі (мал. 9) постійний електричний струм.

Виробнича

$$e_{1,2} = d\xi_{1,2}/d \quad (11)$$

характеризує зростання термоерс для даної пари металів при нагріванні одного зі спаїв на  $1^\circ$  і звичайно



Мал. 9

досить мала. Для пар залізо-мідь, залізо-константан, широко застосовуваних у техніку при вимірах температур,  $e_{1,2}$  має порядок 50 мкВ/град. Для високотемпературної пари платина-платинородієвий сплав цей коефіцієнт приблизно в 10 разів менше.

Термодинамічний розрахунок приводить до досить простого співвідношення між коефіцієнтами Пельтьє і термоерс :

$$P_{1,2} = T e_{1,2} = T d\xi_{1,2}/d \quad (12)$$

З (12) випливає, що на даній ділянці коефіцієнт Пельтьє прямо пропорційний абсолютній температурі. При абсолютному нулі термоерс і коефіцієнт Пельтьє звертаються в нуль.

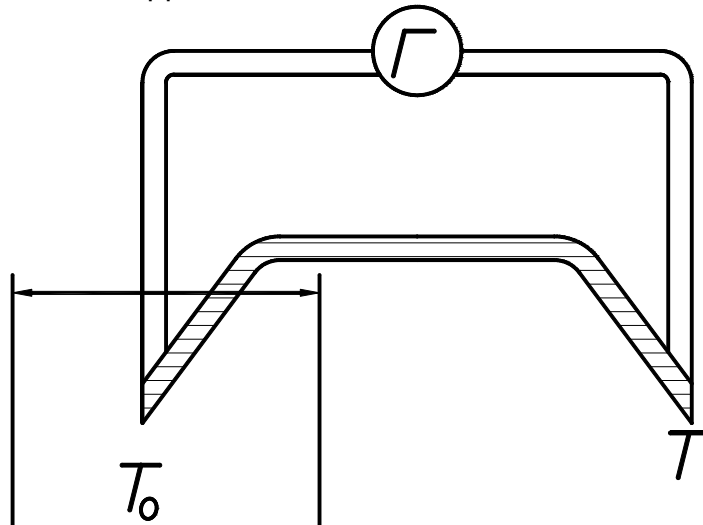
Вимірюючи величину термоерс, можна визначити різницю температур між спаями, поміщеними в різні *резервуари*. Для таких практичних застосувань підбирають термопари, у яких коефіцієнт  $e_{12}$  у широкому інтервалі температур залишається практично постійним. У цьому випадку ерс прямо пропорційна різниці температур гарячок і холодного спаїв:

$$e_{1,2} = \text{const} \text{ і } \xi_{1,2} = e_{1,2} (T - T_0) \quad (13)$$

Необхідно підкреслити принципову різницю між контактною різницею потенціалів і термоелектричними явищами. Контактні потенціали мають порівняно велику величину (порядку декількох вольтів і характеризують електричне поле поза провідниками, між зовнішніми поверхнями останніх. Контактна різниця потенціалів є статичним ефектом, що не зникає і при абсолютному нулі температури. На противагу цьому термоелектричні явища являють собою чисто кінетичні ефекти, що спостерігаються при наявності потоків тепла або заряду (тобто струму). Виникаючі при цьому різниці потенціалів по абсолютній величині малі (частки мілівольта). При абсолютному нулі кількість електронів  $n'$ , що обумовлюють ці ефекти, дорівнює нулеві і всі термоелектричні явища зникають.

Сталість  $e_{1,2}$  і лінійна залежність (13) дотримуються далеко не завжди і не у всьому інтервалі температур. Для ряду систем з підвищенням температури гарячого спаю термоерс змінюється не монотонно, спочатку зростає, а потім убыває і навіть переходить через нуль (крапка інверсії). Крім того, величина термоерс (і коефіцієнта Пельтьє) чутлива до зовнішніх механічних впливів, що спотворюють структуру металу й енергетичні рівні електронів. Тому застосовувані в техніці і для наукових досліджень термопари завжди мають потребу в ретельноиу індивідуальному градууванні.

В електричних схемах і приладах завжди є спаї або контакти різних по своєму складу й обробці провідників. При коливаннях температури навколишнього середовища в цих місцях контактів виникають неконтрольовані блукаючі термоерс. Унаслідок малості цих термоерс вони звичайно не позначаються на роботі приладів, але при дуже точних і тонких вимірах необхідно враховувати і запобігати можливість подібних впливів.

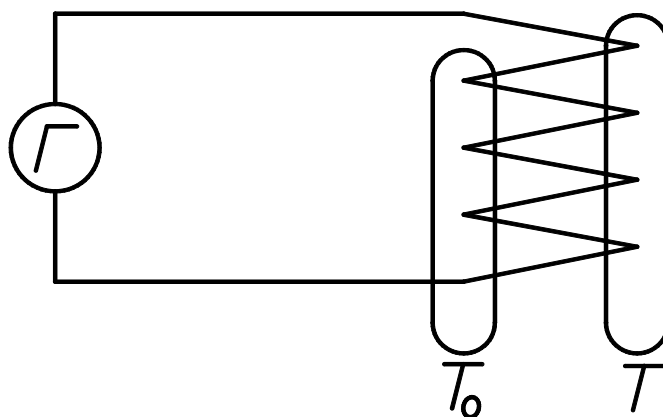


Мал. 10

З іншого боку, термоерс має широке корисне практичне застосування, як простий електричний метод виміру температур. При подібних вимірах за допомогою термопар або термоелементів один зі спаїв підтримується при цілком визначеній постійній температурі  $T_0$  (наприклад, поміщається в лід, що тане,) і вимірюється протікаючий у замкнутому колі термоток.

$$I = \xi_{1,2}/R = e_{1,2}/R(T - T_0) \quad (14)$$

За допомогою гальванометра, як показано на мал. 10. Для підвищення чутливості термоелементів їх з'єднують у термобатарейку (мал. 12).



Мал. 11

#### 4. Завдання:

1. Провести виміру залежності струму від температури для термопар: хромель – копель, хромель – алюмель.
2. Визначити термоерс досліджуваних спаїв.
3. Порівняти дані експерименту з даними градуйованих таблиць для відповідних термопар. (Додаток 1)

#### 5. Зміст звіту:

1. Ціль роботи.
2. Теоретичні передумови
3. Блок схеми досвідченої установки.
4. Результати вимірів у виді таблиць.
5. Графіки залежності величини струму від температури для різних шарів.
6.  $I = f(T^{\circ}C)$
7. Загальні зведення про досліджувані матеріали.
8. Висновки по роботі.

## 6. Контрольні питання:

1. Яку роботу називають роботою виходу електрона?
2. Що називають контактним потенціалом? В чому полягає зв'язок між контактним потенціалом та контактною різницею потенціалів?
3. Які фізичні властивості зумовлюють появу термоелектричних явищ в металах?
4. Назвіть причини, які зумовлюють явище Пельтьє.
5. Дайте характеристику властивостям ефекту Пельтьє.
6. Яку величину називають термоелектрорушійною силою?
7. У чому полягає різниця між контактною різницею потенціалів та та термоелектричними явищами?

**Додаток 1**  
Таблиця 1

°C	m	°C	M	°C	m	°C	m	°C	mV
10	-0.66	210	14.19	410	31.07	610	48.57	810	
20	0	220	15.03	420	31.93	620	49.45	820	
30	0.66	230	15.88 -3	430	32.78 -7	630	50.33 -1.1	830	
40	1.34	240	16.72	440	33.64	640	51.20	840	
50	2.03	250	17.57	450	34.50	650	52.08	850	
60	2.72	260	18.41	460	35.36	660	52.95	860	
70	3.42	270	19.26	470	36.23	670	53.82	870	
80	4.14	280	21.10	480	37.10 -8	680	54.70 -1.2	880	
90	4.86	290	20.95	490	37.97	690	55.57	890	
100	5.59	300	21.79	500	38.84	700	56.44	900	
110	6.33	310	22.64	510	39.71	710	57.31	910	
120	7.08	320	23.48	520	40.59	720	58.18	920	
130	7.83	330	24.32 -5	530	41.47 -9	730	59.04 -1.3	930	
140	8.60	340	25.16	540	42.35	740	59.91	940	
150	9.37	350	26.00	550	43.23	750	60.78	950	
160	10.15	360	26.85	560	44.22	760	61.64	960	
170	10.94	370	27.69	570	45.01	770	62.50	970	
180	11.73 -2	380	28.54 -6	580	45.90 -1	780	63.37 -1.4	980	
190	12.52	390	29.38	590	46.79	790	64.23	990	

Таблиця 2

Номінальна статична характеристика перетворення перетворювача ХА <sub>68</sub> (Т=-50...1300С)										
Т° робочог о кінця, °С	Термоерс , мв, для температури, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мінус 50	-1.889									
Мінус 40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853
Мінус 30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490
Мінус 20	-0.777	-0.815	-0.853	-0.891	-0.929	-0.967	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118
Мінус 10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739
0	-0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981
50	2.022	2.064	2.105	2.146	1.888	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.132	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639
90	3.681	3.722	3.761	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054
100	4.095	4.137	4.173	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.150	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693

## Лабораторна робота №3

# ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 1. Мета і задачі роботи

Основна мета даної роботи - вивчення технічних факторів, що впливають на точність виготовлення плівкових елементів.

Задачі роботи наступні:

- вивчення структури робочої програми автоматизованої системи двухкоординатного приладу ДИП-1;
- ознайомлення з комплексом периферійних пристроїв приладу ДИП-1;
- вивчення математичного апарата, використовуваного для обробки статистичних даних вимірів на приладі ДИП-1;
- аналіз точності геометричних параметрів плівкових елементів у залежності від технічного методу їх одержання.

Студенти повинні:

- знати структуру робочої програми;
- вводити програму в ЕОМ і керувати роботою приладу ДИП-1 з пульта оператора;
- знати математичний апарат для аналізу характеристик точності методу обробки
- результатів вимірів;
- уміти проаналізувати причини розкиду геометричних розмірів плівкових елементів.

### 2.3міст роботи

У ході виконання роботи студенти вивчають структурну схему робочої програми, склад комплексу периферійних пристроїв приладу ДИП-1 і порядок підготовки мікроскопа і периферійних пристроїв до роботи.

Потім виконуються виміри й обробка геометричних розмірів групи тонкопленочних елементів, отриманих різними технічними методами, а також вимір геометричних розмірів елементів маски і фотошаблону.

Для аналізу характеристик точності технічного методу і технічних факторів, що впливають на геометрію елементів, визначаються показники розсіювання розмірів.



В кінці оформляється звіт про зроблену роботу.

### 3. Теоретична частина

#### 3.1. Структура робочої програми

Робоча програма складається з підпрограм:

- Перевірка на “Сбой X” “Сбой Y”;
- Опитування вимірників переміщення візира мікроскопа по осях абсцис і ординат;
- Вибір вимірюваного параметра;
- Розрахунок і індикація довжини.
- Занесення результату в пам'ять ЕОМ.
- Індикація номера виміру.

Робоча програма *TEST\_DIP.EXE* надає можливість введення в пам'ять ЕОМ параметрів вимірюваного елемента, таких як:

- довжина елемента  $d$ ;
- довжина елемента по осі абсцис  $d_x$ ;
- довжина елемента по осі ординат  $d_y$ ;

Після запуску програми ЕОМ може знаходитися в одному з трьох станів: опитування, чекання вибору вимірюваного типорозміру, чекання введення результату в пам'ять. У стані опитування ЕОМ робить перевірку на “Сбой X” і “Сбой Y”, зчитує цифри по каналу X і Y, а потім перетворює лічені значення в 7-ми розрядні числа з комою після 3-його розряду, У стані чекання вибору вимірюваного типорозміру ЕОМ фіксує обмірювані координати і чекає введення номера відповідного пункту виміру, після чого відбувається розрахунок обраного параметра протягом усього циклу виміру. У стані чекання введення результату в пам'ять, ЕОМ чекає підтвердження для занесення отриманого значення у файл *DATA.TXT*, після чого переходить у стан опитування.

У процесі виміру на дисплеї відображається номер проведеного виміру.

#### 3.2. Програма статистичної обробки результатів виміру

Для статистичної обробки результатів вимірів використовується програма *STATIC.EXE*. У таблиці 1 перераховані комбінації клавіш, використовувані при роботі з програмою.

При натисканні на комбінацію клавіш Ctrl + D результати вимірів заносяться в програму статистичної обробки. Дані, що

утримуються у файлі *DATA.TXT* переносяться у файл *DATA.XLS* і потім копіюються в робочу програму.

Для коректної роботи програми необхідно установити наступні параметри (лист “Вхідні параметри”):

1. Задана імовірність  $P$ .
2. Границя невиключеної систематичної похибки  $\Delta$ ;
3. Кількість інтервалів розбиття  $N$  (не більш 15);
4. Коефіцієнт  $K$  – вибирається по таблицях у залежності від заданої імовірності  $P$  и кількості використовуваних для виміру приладів  $m$  ( $m=1$ ). Використовується для визначення довірчої границі невиключеної систематичної складової похибки результату виміру.
5. Коефіцієнт  $\beta$  – вибирається по таблицях у залежності від заданої імовірності  $P$  і розміру вибірки  $n$ . Використовується для визначення аномальних значень вибірки.

Таблиця 1.

Комбінації клавiш.	Дія, викликувана при натисканні,	Примітка
Ctrl + D	Уведення результатів виміру в програму <i>STATIC.XLS</i>	
Ctrl + A	Видалення аномальних значень з оброблюваної вибірки.	
Ctrl + E	Скидання результатів попередніх дій.	
Ctrl + Q	Очищення. Видалення оброблюваної вибірки значень.	
Ctrl + H	Автоширина стовпця.	Використовується при роботі з аркушами “Аномальні значення” і “Оброблювана вибірка”
Ctrl + U	Установка стандартної ширини стовпця.	_____“”_____
Ctrl + P	Захист поточного листа	
Ctrl + O	Зняття захисту поточного листа	

### 3.3. Математичний апарат, використовуваний для відпрацювання статичних величин

При роботі на приладі не потрібно попередньої установки деталей із прив'язкою до координатних осей, і тому початок відліку може бути обраний в будь-якій точці вимірювального діапазону. У зв'язку з цим при вимірах геометричних розмірів (відстаней між крапками і кутами) дійсне значення вимірюваної величини виходить у результаті наступних обчислень:

а) Вимір відстаней. При вимірі використовується координатний метод розрахунку (мал. 15). Дійсний розмір відрізка дорівнює АВ, обмірюваний – більше дійсного на деяку величину, що визначається кутом між осями координат вимірюваного об'єкта і робочого столу мікроскопа, тобто

$$AB = AC \cdot \cos \alpha$$

Тому що відрізок АС рівнобіжний осі ординат робочого столу мікроскопа, то його розмір визначається як різниця координат по осі ординат крапок В та А.

б) Вимір кута виробляється по двох крапках А і Д. Тому що в прямокутному трикутнику АЕД, утвореному осями координат об'єкта і робочого столу мікроскопа, розмір АЕ визначається переміщенням візира по осі абсцис, а розмір ДЕ – по осі ординат, то кут може бути визначений зі співвідношення

$$\arctg \alpha = \frac{ДЕ}{АС}$$

Для аналізу точних характеристик методу одержання тонкоплівкових елементів проводять обробку геометричних розмірів і визначають показники розсіювання розмірів.

За найбільш ймовірне значення розміру звичайно приймають середнє-арифметичне значення

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i,$$

де  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – вибірка обсягом  $n$ .

Відхилення кожного окремого результату виміру  $X_i$  від середнє-арифметичного значення  $\bar{X}$  є похибкою окремого розміру

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X}.$$

Оцінкою збіжності результатів обробки (ступеня їхньої концентрації щодо середнього арифметичного) є дисперсія

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}).$$

З цього вираження можна одержати два інших, котрими зручно користуватися в більшості практичних випадків:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right]$$

або

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n X_i^2 - n \cdot \bar{X}^2 \right]$$

Оцінкою для середнього квадратичного відхилення є вибіркове середнє квадратичне відхилення

$$\sigma = +\sqrt{S^2}$$

Оцінка збіжності  $\hat{S}$  для середнього квадратичного відхилення визначається по формулі

$$\hat{\sigma} = M(v) \cdot S$$

де  $M(v)$ - коефіцієнт, що залежить від обсягу вибірки  $n$  і змінюється в межах від 1 до 1.253.

Зі збільшенням середнього квадратичного відхилення збільшується розкид розмірів. Величина  $\sigma$  – основний параметр, що визначає вид кривої розподілу випадкових похибок.

Дослідження кривих розподілу для різних операцій обробки деталей та логічні доводи привели до такого висновку: якщо серед складову сумарну погрішність немає домінуючих, то розподіл розмірів підкоряється законові нормального розподілу (законові Гауса).

Рівняння кривої закону нормального розподілу має вигляд

$$y = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(X_i - \bar{X})^2}{2 \cdot S^2}},$$

де  $y$  – щільність імовірності;

$X_i$  – відхилення кожного окремого результату виміру;

$\bar{X}$  – середнє квадратичне значення з усіх величин;

$\sigma$  – середнє квадратичне відхилення.

Таким чином, якщо зв'язати величину допуску на даний розмір  $\delta$  та величину середнього квадратичного відхилення  $\sigma$ , то при дотриманні співвідношення  $\delta > 6\sigma$  браку буде не більше 0.27%.

Розглянутий метод широко використовується для аналізу технічного процесу. Бажаючи установити ступінь впливу якого-небудь фактора на точність обробки, порівнюють розподілу, побудовані в результаті виміру двох партій деталей, виготовлених в умовах, при яких дії цікавлячого нас фактора в обох випадках були різні, а інші фактори залишалися по можливості постійними.

#### 4. Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути живлення, для чого послідовно установити на пульті тумблери «СЕТЬ», «МИКРОСКОП», «ПРИСПОСОБЛЕНИЯ», в положення «ВКЛ.»
2. Включити ЕОМ.
3. Установити на блоці цифрової індикації тумблер «СЕТЬ» у положення «ВКЛ.» При включеному живленні повинне світитися індикаційне табло X, Y на лицьових панелях блоків індикації і табло X, Y на лицьовій панелі обчислювального пристрою.
4. Установити зразок на предметний столик мікроскопа.
5. Обертанням мікрометричного винта на вертикальному стовпчику мікроскопа домогтися різкого зображення рельєфу зразка.
6. Запустити програму *TEST\_DIP.EXE*.
7. Вибрати на поверхні зразка елемент, що має максимальну довжину.
8. Переміщенням кареток мікроскопа увести вимірюваний елемент зразка в поле зору об'єктива.
9. Сполучити 1-ю контрольну точку елемента з перехрестям на екрані мікроскопа.
10. Натиснути на клавішу «Сброс» на пульті оператора.
11. Сполучити 2-у контрольну точку елемента з перехрестям на екрані мікроскопа.
12. Внести результат виміру в пам'ять ЕОМ.
13. Зробити не менш 50 повторень пп 9 - 12.
14. Вийти з програми *TEST\_DIP.EXE*. Запустити програму *STATIC.XLS*.
15. Зробити статистичну обробку результатів вимірів.
16. Повторити пп. 6-15.

## **5. Зміст звіту**

1. Структура робочої програми.
2. Математичний апарат для обробки статистичних даних.
3. Ескізи вимірюваних деталей.
4. Результати вимірів і графіки.
5. Аналіз причин розкиду геометричних розмірів.
6. Висновки по роботі.

## **6. Питання для самоконтролю**

1. Яка структура робочої програми?
2. Який порядок підготовки периферійних пристроїв приладу і роботи?
3. Які Ви знаєте методи виготовлення тонкоплівкових елементів?
4. Проаналізувати точність технічних процесів виготовлення плівкових елементів.
5. Що таке похибка та які погрішності виникають при виготовленні деталей?
6. Пояснити сутність статистичного методу оцінки похибок.
7. Що називається дисперсією?

## **7. Список використаної літератури**

1. Прилад вимірювальний двухкоординатний ДИП-1. Технічний опис. Єрмолаев Ю.П, Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкції і технологія мікросхем. М., 1980.
2. Парфенов О.Д Технологія мікросхем. М., 1986.
3. Шенк Х. Теорія інженерного експерименту. М. 1972.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ермолаєв Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технологии микросхем. М., 1980.
2. Лысаченко И.А. Электро-радиоматериалы. М., «Связь», 1967.
3. Парфенов О.Д. Технология микросхем. М., 1986
4. Прибор измерительный двухкоординатный ДИП-1. Техническое описание.
5. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые-приемноусилительные устройства. Справочник радиолюбителя. К., «Наукова думка», 1981.
6. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М., 1972.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
Лабораторна робота №1 “Вивчення матеріалів в конструкціях напівпровідникових і гібридних інтегральних мікросхем”.....	4
Лабораторна робота №2 “Випромінювання контактних явищ і термоелектрорушійної сили” .....	9
Лабораторна робота №3 Оцінка точності технічних процесів одержання тонко плівкових елементів.....	24
Бібліографічний список.....	3



Куліш Сергій Миколайович  
Олійник Володимир Петрович  
Овчаренко Віталій Євгенович

## **Матеріали в конструкціях радіоелектронної апаратури**

Редактор

Зв. план, 2004  
Підписано до друку  
Формат 60x84 1/16. Папір. офс. № 2. Офс. друк.  
Умов. дрку. арк. 2. Навч.- видав. л. . Т. 200 екз. Заказ .  
Ціна свободна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
Видавничий центр «ХАІ»  
<http://www.khai.edu>  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)