

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ Й НАУКИ УКРАЇНИ  
Запорізький національний технічний університет

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до лабораторних робіт  
з дисципліни “Метрологія”  
для студентів спеціальності 6.050801  
"Мікроелектроніка і напівпровідникові прилади"  
денної й заочної форм навчання

2014

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Метрологія” для студентів спеціальності 6.050801 "Мікроелектроніка і напівпровідникові прилади" денної й заочної форм навчання /Укл.: А.В. Бабіч.- Запоріжжя: ЗНТУ.-2014.- 50 с.

Укладач: А.В. Бабіч, доц., канд.фіз.-мат.наук

Рецензент: Г.В.Сніжной, доц., канд.фіз.-мат.наук

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

**Затверджено**  
на засіданні кафедри  
“Мікро- і наноелектроніка ”  
Протокол №5  
від 03 грудня 2014 р.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 “ПЕРВИННА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК”</b> .....                      | <b>5</b>  |
| 1.1 Загальні відомості .....                                                                                             | 5         |
| 1.1.1 Класифікація похибок .....                                                                                         | 5         |
| 1.1.2 Основи теорії похибок .....                                                                                        | 6         |
| 1.1.3 Похибки непрямих вимірювань .....                                                                                  | 7         |
| 1.1.4 Сучасний метод оцінки погрішності прямих вимірювань .....                                                          | 9         |
| 1.2 Порядок виконання роботи.....                                                                                        | 9         |
| 1.3 Контрольні питання.....                                                                                              | 10        |
| <b>2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 “ПЕРВИННА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ”</b> ..... | <b>11</b> |
| 2.1 Загальні відомості .....                                                                                             | 11        |
| 2.1.1 Представлення результатів вимірювань .....                                                                         | 11        |
| 2.1.2 Підбір формул і лінеаризація графіків .....                                                                        | 13        |
| 2.2 Порядок виконання роботи.....                                                                                        | 15        |
| 2.3 Контрольні питання.....                                                                                              | 15        |
| <b>3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 “РОБОТА З ОСЦИЛОГРАФОМ”</b> .....                                                             | <b>16</b> |
| 3.1 Загальні відомості .....                                                                                             | 16        |
| 3.1.1 Принцип дії осцилографа.....                                                                                       | 17        |
| 3.1.2 Підключення осцилографа.....                                                                                       | 18        |
| 3.1.3 Управління осцилографом .....                                                                                      | 19        |
| 3.2 Вимірювання осцилографом.....                                                                                        | 24        |
| 3.2.1 Вимірювання напруги .....                                                                                          | 24        |
| 3.2.2 Вимірювання струму .....                                                                                           | 25        |
| 3.2.3 Вимірювання частоти .....                                                                                          | 26        |
| 3.2.4 Вимірювання зсуву фаз .....                                                                                        | 27        |
| 3.3 Завдання до роботи.....                                                                                              | 29        |
| 3.4 Контрольні питання.....                                                                                              | 29        |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 “ЗОНДОВІ МЕТОДИ<br>ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ<br>НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ” ..... | 30 |
| 4.1 Загальні відомості .....                                                                                      | 30 |
| 4.1.1 Двозондовий метод вимірювання питомої провідності<br>.....                                                  | 31 |
| 4.1.2 Чотиризондовий метод вимірювання питомої<br>провідності .....                                               | 32 |
| 4.1.3 Вимірювання провідності пластин довільної<br>геометричної форми .....                                       | 34 |
| 4.2 Порядок виконання роботи.....                                                                                 | 35 |
| 4.3 Контрольні питання.....                                                                                       | 36 |
| 5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 “ВИЗНАЧЕННЯ<br>ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ ЗА<br>ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАННЯ ЕРС ХОЛЛА” .....   | 37 |
| 5.1 Ефект Холла .....                                                                                             | 37 |
| 5.2 Методи вимірювання ЕРС Холла.....                                                                             | 39 |
| 5.2.1 Класичний метод .....                                                                                       | 39 |
| 5.2.2 Вимірювання ефекту Холла методом Ван-дер-Пау ...                                                            | 40 |
| 5.2.3 Чотиризондовий холлівський метод.....                                                                       | 42 |
| 5.3 Порядок виконання роботи.....                                                                                 | 43 |
| 5.4 Контрольні питання.....                                                                                       | 44 |
| 6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 “ВИМІРЮВАННЯ<br>ТОВЩИНИ ЕПІТАКСІАЛЬНИХ ШАРІВ І ТОНКИХ<br>ПЛІВОК” .....                    | 45 |
| 6.1 Методи вимірювання товщини епітаксіальних плівок ....                                                         | 45 |
| 6.1.1 Різницьові методи .....                                                                                     | 45 |
| 6.1.2 Визначення товщини по тетраедричних дефектах ...                                                            | 46 |
| 6.1.3 Метод фарбування шліфа (відколу).....                                                                       | 47 |
| 6.1.4 Інтерференційний метод .....                                                                                | 48 |
| 6.2 Порядок виконання роботи.....                                                                                 | 49 |
| 6.3 Контрольні питання.....                                                                                       | 50 |
| ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                                                                           | 50 |

## 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 “ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК”

**Мета роботи:** ознайомитися з теорією похибок; навчитися обробляти дані експерименту.

### 1.1 Загальні відомості

Внаслідок неточності вимірювальних приладів, неповноти наших знань, труднощів урахування всіх побічних явищ при вимірюванні, неминуче виникають похибки. Тому задача вимірювань полягає не в пошуку "істинного" значення вимірюваної величини, а у встановленні інтервалу значень, усередині якого знаходиться вимірювана величина. Теорія погрішностей показує, як варто вести вимірювання й їх обробку, щоб величина цього інтервалу була найменшою.

Вимірювання можуть бути прямими і непрямыми. **Прямі вимірювання** – це такі, при яких вимірювана величина порівнюється безпосередньо з деяким еталоном. **Непрямі вимірювання** характерні тим, що такого прямого порівняння вимірюваної величини з еталоном провести неможливо. Тому використовуються зв'язки вимірюваної величини з іншими, котрі можна вимірювати прямим шляхом.

#### 1.1.1 Класифікація похибок

Похибки можна розділити на *промахи, систематичні і випадкові похибки*.

**Промахи** – очевидно помилкові вимірювання: невірні узятий відлік, невірні записи результату, неправильне включення приладу і т.п.

**Систематичні похибки** – похибки, зумовлені однією і тією ж причиною, які залишаються постійними або закономірно змінюються під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Причиною появи таких погрішностей є: неправильне градування, наближена розрахункова формула чи метод, неправильне вимірювання і т.п. Їх можна врахувати, якщо не можна усунути.

**Випадковими** називають похибки, викликані дуже великим числом причин, врахувати які неможливо, тому що вони незалежно один від одного впливають на кожне вимірювання. Обмежена точність

і чутливість приладів, що контролюють умови вимірювання, недосконалість наших органів почуттів, зовнішні умови, що змінюються, і т.п. – усе це приводить до появи випадкових погрішностей. Їх можна звести до мінімуму, але їх неможливо позбутися. Випадкові похибки можна оцінити, використовуючи так звану теорію помилок, яка є одним з розділів теорії ймовірності.

Похибки можна виразити у вигляді *абсолютної величини* (абсолютна похибка) і *відносної величини*. Перша показує величину інтервалу значень, у якому може знаходитися вимірювана величина, і тому є розмірною величиною, друга – показує частку цього інтервалу щодо вимірюваної величини. Відносну похибку часто виражають у відсотках.

### 1.1.2 Основи теорії похибок

Якщо зроблено досить багато незалежних вимірювань деякої величини в умовах, що виключають промахи і систематичні похибки,  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m, \dots, a_i$ , то **“істинним” значенням** вимірюваної величини вважається найбільш часто повторюване значення, або, як говорять, найбільш імовірне значення  $a$ , воно дорівнює середньому арифметичному з багатьох вимірювань

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} a_i, \quad (1.1)$$

де  $N$  – число значень  $a_i$ , отриманих з вимірювань. **Абсолютні помилки** окремих вимірювань  $a - a_1 = \alpha_1, a - a_2 = \alpha_2, \dots, a - a_i = \alpha_i$  визначають абсолютну похибку величини  $a$ :

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i. \quad (1.2)$$

Остаточний результат вимірювання може бути записаний так:  $a \pm \alpha$ .

Абсолютна похибка має подвійний знак ( $\pm \alpha$ ) через те, що похибки рівної абсолютної величини і протилежних знаків рівноймовірнісні. Оскільки абсолютна похибка визначає інтервал, у якому знаходиться значення вимірюваної величини, то, як правило, воно містить одну значущу цифру, що, у свою чергу, визначає

останню значущу цифру найбільш імовірної величини  $\alpha$ . Наприклад,  $(22,4 \pm 0,5)$  см.

Погрішність прямих вимірювань обчислюється по формулі

$$\Delta x = \sqrt{\alpha^2 + A^2}, \quad (1.3)$$

де  $A$  — абсолютна погрішність засобу вимірювання (звичне це число рівне половині ціни розподілу вимірювального приладу або половині найменшого розряду індикатора).

У випадку, коли в результаті вимірювань отримано ряд однакових значень вимірюваної величини чи обчислена похибка менше тієї, що дасть прилад, то в якості середньої абсолютної похибки вибирається власна похибка приладу, зумовлена його класом точності чи рівна половині ціни найменшого поділку шкали приладу. Це ж правило стосується випадку, коли здійснюється тільки одне вимірювання.

### 1.1.3 Похибки непрямих вимірювань

Нижче наводяться теореми (без доказів), що дозволяють обчислити похибки побічно вимірюваних величин.

1 Абсолютна похибка суми дорівнює сумі абсолютних погрішностей доданків. Так, якщо  $X=a+b$ , де  $a$  і  $b$  — величини, які можна виміряти прямим методом з погрішністю  $\pm \Delta a$  і  $\pm \Delta b$ , то  $\Delta X = \Delta a + \Delta b$ , оскільки  $\Delta a$  і  $\Delta b$  мають подвійний знак, то при підсумовуванні  $\Delta a$  і  $\Delta b$  їхні знаки підбираються так, щоб  $\Delta X$  було максимальним.

2 Абсолютна похибка різниці дорівнює сумі абсолютних погрішностей зменшуваного і від'ємника.

Нехай  $X=a-b$ , тоді  $\Delta X = \Delta a + \Delta b$ . Правило вибору знаків  $\Delta a$  і  $\Delta b$  те ж, що й у випадку 1. Слід зазначити, що це правило застосовне до усіх випадків обчислення погрішностей побічно вимірюваних величин.

3 Знайдемо абсолютну похибку добутку  $X=ab$ . Нехай  $a \pm \Delta a$ ,  $b \pm \Delta b$ , тоді  $\Delta X = a\Delta b + b\Delta a$ .

Абсолютна похибка дробу  $X = \frac{a}{b}$  (при  $a \pm \Delta a$  і  $b \pm \Delta b$ ) дорівнює

$$\Delta X = \frac{b\Delta a + a\Delta b}{b^2}.$$

З цих часткових теорем можна зробити висновок, що середні абсолютні похибки побічно вимірюваних величин знаходяться за правилами диференціювання формул, що зв'язують ці величини з тими, котрі вимірюють прямим шляхом. Необхідно тільки знак замінити знаком  $\Delta$  і вибрати знаки абсолютних погрешностей прямим шляхом вимірюваних величин так, щоб похибка непрямого вимірювання була максимальною. Слід зазначити, що після диференціювання вихідних залежностей і одержання формул погрешностей варто відкинути члени, утримуючі величини другого і більше порядку малості (тобто члени, утримуючі добутки  $\Delta a \Delta b$ ).

Відносна похибка непрямих вимірювань дорівнює

$$E = \frac{\Delta X}{X}. \quad (1.4)$$

Однак, з іншого боку,

$$d(\ln X) = \frac{dX}{X} \quad \text{або} \quad \Delta(\ln X) = \frac{\Delta X}{X}. \quad (1.5)$$

Отже, відносну похибку можна знайти логарифмуванням вихідного виразу і його наступного диференціювання із заміною знака  $\alpha$  на знак  $\Delta$  і відповідним вибором знаків при абсолютних погрешностях прямих вимірювань.

По відносній похибці можна, надалі, знайти абсолютну похибку будь-якої складної залежності за допомогою простих формальних операцій. Наприклад, нехай

$$\begin{aligned} X &= \frac{a}{a+b}, \ln X = \ln a - \ln(a+b), \\ \frac{dX}{X} &= \frac{da}{a} + \frac{-da}{a+b} + \frac{-db}{a+b}, \\ \Delta X &= X \left( \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta a}{a+b} + \frac{\Delta b}{a+b} \right). \end{aligned}$$

Як бачимо, методом диференціального логарифма для знаходження абсолютних погрешностей користуватися зручніше і простіше, ніж методом простого диференціювання.

### 1.1.4 Сучасний метод оцінки погрішності прямих вимірювань

Зразковий порядок операцій для оцінки похибки прямих вимірювань.

1 Обчислюється середнє значення з  $n$  вимірювань:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i .$$

2 Знаходяться похибки окремих вимірювань:

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

3 Обчислюються квадрати погрішностей окремих вимірювань  $(\Delta X_i)^2$ .

4 Якщо є вимірювання, що відрізняються різко за своїм значенням від інших, перевірити чи не є вони промахами.

5 Знаходять середню квадратичну похибку серії вимірювань

$$\Delta S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta X_i)^2}{n(n-1)}} .$$

6 Задається коефіцієнт надійності  $\alpha$ .

7 Визначається коефіцієнт Стюдента  $t_{\alpha}(n)$  для даного  $n$  і  $\alpha$  за таблицею.

8 Знаходять межі довірчого інтервалу (похибка результату вимірювань)

$$\Delta X = t_{\alpha}(n) \cdot \Delta S_{\bar{X}} .$$

9 Записується остаточний результат:  $X = \bar{X} \pm \Delta X$ .

10 Визначається відносна похибка серії вимірювань – величина, що характеризує точність вимірювань

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% .$$

### 1.2 Порядок виконання роботи

1 Отримати від викладача 3 екземпляри резисторів.

2 Ознайомитися з роботою мультиметра у режимі вимірювання опору. Навести значення абсолютних похибок.

3 Провести вимірювання опорів  $R$  резисторів. Вимірювання повторити 10 разів.

4 Ознайомитися з процесом вимірювання лінійних розмірів за допомогою штангенциркуля і мікрометра. Навести значення абсолютних похибок цих приладів.

5 Провести вимірювання геометричних параметрів резисторів: довжини  $l$ , діаметру  $d$ . Вимірювання повторити 10 разів.

6 Визначити абсолютні і відносні похибки прямих вимірювань опору, довжини і діаметру резистора.

7 Навести формули для визначення похибки опосередкованих вимірювань наступних величин:  $\rho = 2\pi \frac{SU}{l}$ ,  $\rho = 4,53d \frac{U}{l}$ ,

$$U_x = R_{\text{ин}} I_x B_z \frac{1}{d}, \quad N = \frac{A}{e\mu_n \rho}, \quad L = \sqrt{D \cdot \tau}, \quad \frac{1}{\tau} = \text{tg}\alpha.$$

8 Визначити похибку вимірювання питомого опору  $\rho = \frac{RS}{l}$

***Звіт повинен містити:***

- короткі відомості з теорії похибок, визначення похибки прямих і опосередкованих вимірювань;
- таблицю проведених вимірювань величин  $R$ ,  $l$  і  $d$ ;
- обчислити похибки вимірювань, результати занести до таблиці;
- висновки.

### 1.3 Контрольні питання

1. В чому полягає причини наявності похибок вимірювання?
2. Що таке промахи, систематичні і випадкові похибки.
3. Як знайти абсолютну похибку окремих вимірювань за великої і малої серії вимірювань?
4. Чому дорівнює абсолютна погрішність вимірювальних приладів?
5. Чому дорівнює погрішність прямих вимірювань?
6. Як розрахувати погрішність опосередкованих вимірювань?

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 “МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ”

**Мета роботи:** навчитися представляти результати експерименту у вигляді таблиць і графіків; підбір математичних формул.

### 2.1 Загальні відомості

#### 2.1.1 Представлення результатів вимірювань

Безпосередні первинні результати вимірювань не завжди є достатньо наочними, компактними і зручними для сприйняття і подальшого використання.

Тому необхідно вибирати і використовувати найбільш відповідні методи їх обробки і форми уявлення.

Звичайно прийняті такі форми представлення результатів вимірювань: таблиці, графіки, діаграми, гістограми, номограми.

**Таблиці** – найпростіший спосіб представлення результатів вимірювань в дискретній цифровій формі запису інформації.

Достоїнства табличної форми: можливість збереження і витягання первинних даних, великий об'єм інформації, легкість перестроювання.

Таблиці можуть служити основою для виразу результатів вимірювань в інших формах. Графіки, діаграми, гістограми, номограми є похідними від таблиць і містять лише частину інформації, якою володіють таблиці.

Недоліки таблиць полягають в їх малій наочності, неможливості чітко виявити ті або інші закономірності, мінімуми і максимуми і т.д.

**Графік** – ілюстроване кількісне плоске представлення залежності однієї або декількох величин від значень інших величин.

Узагальнено, графік є поверхня в об'ємі багатовимірного простору, але навіть тривимірні графіки – це велика рідкість.

Частіше за все графіки будують в декартових координатах – прямокутна система, осі якої називають "абсциса" і "ордината". Іноді для більшої виразності (особливо для кутових величин) графіки будуються в полярних координатах.

Достоїнствами графіків є їх наочність, виявлення особливих точок і тенденцій, навіть в тих випадках, коли аналітичний зв'язок між досліджуваними величинами відсутній.

Недоліки графіків: можливість часткової втрати первинних числових даних, деяка неоднозначність при побудові, труднощі відображення залежності від декількох змінних.

**Діаграма** – один з видів графіків, коли структура явища або процесу для наочності виражається у вигляді відрізків, елементів площі або фігур умовно вибраних розмірів.

Діаграми бувають: лінійними (будуються як графіки в декартовій системі); стовпчиковими, секторіальними (циклічними).

Ефект виразності діаграм можна усилити їх штрихуванням або розфарбовуванням – тому вони дуже наочні.

Недоліки: труднощі витягання цифрової інформації (тому іноді діаграми містять і деякі цифри), невизначеність поведінки функції між вибраними інтервалами.

**Гістограма** – наочне представлення результатів вимірювань при використуванні статистичних методів їх обробки з метою опису частоти (вірогідність) знаходження якої-небудь величини в заданому інтервалі значень (криві розподілу).

**Номограма** – допоміжна графічна побудова, що служить для віддзеркалення спеціальної функціональної залежності і для проведення розрахунків. Іноді її називають калькулятором.

Типовий приклад номограми – логарифмічна лінійка.

Деякі рекомендації, які бажано дотримувати при побудові графіків і інших форм:

- масштаб шкали треба вибирати так, щоб крива на графіку займала все поле креслення;

- експериментальні крапки не повинні зливатися;

- графік повинен будуватися з урахуванням погрішності вимірювань. Якщо ж погрішність велика, від проведення від проведення ліній слід утриматися;

- бажано вибирати масштаб так, щоб основна частина графіка проходила під кутом, близьким до 45°;

- на експериментальних графіках обов'язково наносяться крапки;

- при невеликій кількості точок їх рекомендується сполучати суцільною лінією, особливо якщо чіткій закономірності не виявляється;

- при проведенні плавної (лекальної) лінії слід прагнути того, щоб вона мала по можливості менше особливих і екстремальних

точок. Приблизно половина точок повинна лежати вище, друга половина точок – нижче за плавну лінію.

Результат вимірювань, отриманий у вигляді безпосереднього відліку або обчислень, часто виражається у вигляді цілих чисел або десяткових дробів і, як правило, округляється.

### 2.1.2 Підбір формул і лінеаризація графіків

Часто в результаті дослідів зв'язок між деякими величинами виявляється у вигляді таблиці, у якій для кожного значення  $X$ , при якому проводилось вимірювання (умови дослідів), поставлене відповідне значення  $Y$ , знайдене шляхом вимірювань. Задані так функції можуть далі, наприклад, диференціюватися, інтегруватися, можуть знадобитися значення функції при проміжних, не вписаних у таблицю, значеннях незалежної змінної (задачі інтерполяції) чи при значеннях незалежної змінної, що знаходяться за межами таблиці (задача екстраполяції).

Для вирішення цих задач зручніше скористатися математичною залежністю між  $X$  і  $Y$ , заданою у вигляді формули. Формулу, підбрану за експериментальними даними, називають емпіричною формулою. Формула тим ліпша, чим більше теоретичних уявлень вкладено в неї. Спочатку задаються видом формули, потім, скориставшись результатами сталих величин, що входять у формулу.

Перед тим, як приступити до підбора формули, необхідно нанести дослідні дані на графік, після чого на око, від руки провести через отримані точки найбільш правдоподібну криву. При цьому відразу виявляються ті дані, в яких можна підозрювати великі помилки. Дуже важливо при проведенні кривої, крім експериментальних точок, використовувати загальні розуміння про те, як повинна поводитися крива при значеннях аргументу, близьких до нуля, при дуже великих значеннях аргументу, поблизу початку координат, біля координатних осей (чи торкається їх, чи перетинає їх і т.п.).

Коли попередня робота проведена й обрано вид формули, можна визначити сталі коефіцієнти. Це роблять за допомогою методу найменших квадратів [1-3], однак він приводить до досить громіздких обчислень, особливо коли шукані параметри входять не лінійно. Тому

в практичній роботі найчастіше більш ефективними виявляються графічні методи підбору формул.

Пряма лінія займає надзвичайний стан у графічному методі і надійно проводиться за даними точкам. Рівняння прямої лінії має вигляд:

$$Y = kX + b, \quad (2.1)$$

де числа  $k$  і  $b$  мають простий геометричний зміст:  $b$  – величина відрізка, що відтинається на осі  $Y$ ,  $k$  – тангенс кута нахилу прямої до осі  $X$ . Отже, побудувавши графік, ми визначимо  $b$  і  $k$ .

Велика перевага графічного методу зв'язана з його наочністю. Якщо експериментальні точки лягають на пряму, за винятком окремих точок, що випали, то ці точки наочно і можуть бути перевірені особливо ретельно. Якщо експериментальні точки не лежать на прямій, то це також видно з графіка. У цьому випадку залежність між  $X$  і  $Y$  більш складна, ніж  $Y = kX + b$ .

Як же підібрати константи, що входять у формулу, якщо вона має більш складний вид, ніж пряма?

Загальна ідея графічного методу полягає в тому, що треба ввести нові змінні так, щоб у цих змінних залежність, що нас цікавить, ставала лінійною. Тому метод іноді називають методом лінеаризації графіка чи просто методом вирівнювання.

Наприклад, часто зустрічається залежність виду  $Y = aX + bX^2$ .

Розділивши всі члени на  $X$ :

$$\frac{Y}{X} = a + bX,$$

і поклавши  $Z = \frac{Y}{X}$ , одержуємо лінійну залежність  $Z$  від  $X$ . Або нехай

$Y = aX^n$ . Логарифмуючи праву і ліву частини  $\lg Y = \lg a + n \lg X$ , і ввівши нові змінні  $Z = \lg$  і  $t = \lg$  одержимо  $Z = \lg a + nt$ . З графіка  $Z(t)$  легко знайдемо  $a$  і  $n$ .

Нехай  $Y = ae^{-\omega X}$ . Логарифмуючи, одержимо  $\ln Y = \ln a - \omega X$ , і вибираючи  $Z = \ln$ , одержимо в координатах  $Z$  і  $X$  пряму  $Z = \ln a - \omega X$ .

В усіх цих прикладах ми після вибору виду формули вводили змінні так, щоб залежність між цими новими змінними була лінійною. Однак, якщо в нових змінних експериментальні точки не лягають на

пряму, те це значить, що вид формули обраний невдало і для опису експериментальних даних треба підібрати формулу іншого виду.

Якщо немає теоретичних засад для підбора формули, звичайно вибирають функціональну залежність з числа найбільш простих, порівнюючи їхні графіки з графіками заданої функції. Через те, що подібність графіків визначена грубо, на око, потрібно, вибравши формулу, перш ніж визначати значення параметрів, перевірити можливість її застосування методом вирівнювання. Вказівки для вирівнювання найпростіших формул дані в [3].

Якщо емпіричну формулу відшукати не вдається, то часто бувають корисні операції безпосереднього графічного інтегрування, диференціювання, графічний розв'язок рівнянь та ін.

## 2.2 Порядок виконання роботи

- 1 Отримати у викладача вихідні дані.
- 2 Перенести дані у Excel.
- 3 Побудувати графіки залежності вказані викладачем.
- 4 Провести лінію тренда.
- 5 Лінеаризувати графік, знайти коефіцієнти  $a$  і  $b$ .

### ***Звіт повинен містити:***

- короткі відомості з теорії математичної обробки результатів експерименту;
- таблицю вхідних даних;
- графіки;
- рівняння лінеаризованої залежності;
- висновки.

## 2.3 Контрольні питання

- 1 У чому полягає суть математичної обробки результатів дослідів?
- 2 Які основні форми представлення результатів вимірювань існують?
- 3 Охарактеризуйте таблицю як форму представлення результатів вимірювань.
- 4 Що таке графік?
- 5 Що таке діаграма?
- 6 Що таке гістограма?
- 7 Що таке номограми?

- 8 Що таке інтерполяція і екстраполяція?
- 9 Який порядок підбора формул?
- 10 Що називається процесом лінеаризації графіка?
- 11 Як провести лінеаризацію?

### 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 “РОБОТА З ОСЦИЛОГРАФОМ”

**Мета роботи:** навчитися працювати з осцилографом, провести вимірювання параметрів сигналу.

#### 3.1 Загальні відомості

**Осцилограф** – прилад, який показує форму напруги в часі. Також він дозволяє вимірювати ряд параметрів сигналу, такі як напруга, струм, частота, кут зсуву фаз. Але головна користь від осцилографа – можливість спостереження форми сигналу. У багатьох випадках саме форма сигналу дозволяє визначити, що саме відбувається в ланцюзі. На рис. 3.1 показаний приклад подібної ситуації (використано інформацію з [10]).

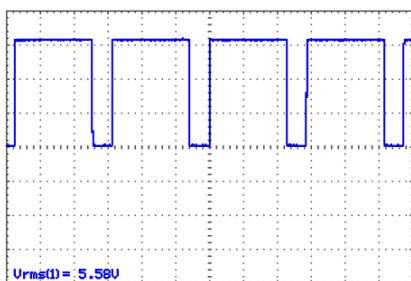


Рисунок 3.1 – Осцилограма складного сигналу

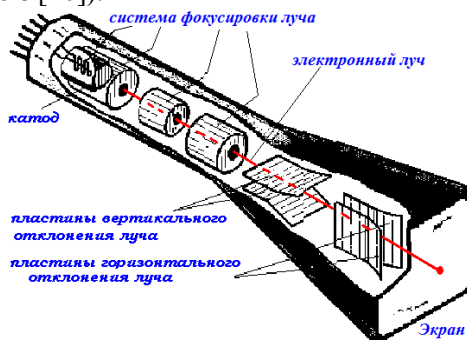


Рисунок 3.2 – Будова електронно-променевої трубки з електро-статичним керуванням

У цьому випадку напруга містить як постійну, так і змінну складові, причому форма змінної складової далека від синусоїдальної. На такому сигналі вольтметри дають велику похибку: стрілочний вольтметр змінного струму показав напругу 2,2 вольт, а цифровий –

взагалі 1,99 вольт. Вольтметр постійного струму показав 4,8 вольт. Правильне діюче значення напруги показав осцилограф – 5,58 вольт (цифрові осцилографи вимірюють напругу і дозволяють зберігати результати в комп'ютерному форматі). Крім того, осцилограма дозволяє побачити деякі властивості сигналу: сигнал має імпульсний характер; сигнал не приймає негативних значень (виміряно з відкритим входом осцилографа); сигнал дуже швидко змінюється від нуля до значення 6,4 вольт і назад до нуля (чутливість каналу вертикального відхилення 2 В/под); тривалість імпульсів більш ніж у три рази перевищує тривалість пауз.

### 3.1.1 Принцип дії осцилографа

«Серцем» приладу є електронно-променева трубка (ЕПТ), рис. 3.2. ЕПТ є електронною лампою, і, як і всі лампи, вона «заповнена» вакуумом. Катод випромінює електрони, а система фокусування формує з них тонкий промінь. Цей електронний промінь потрапляє на екран, покритий люмінофором, який під впливом електронного бомбардування світиться, і в центрі екрану виникає точка, яка світиться. Дві пари пластин ЕПТ відхиляють електронний промінь у двох взаємно перпендикулярних напрямках, які можна розглядати як координатні осі. Тому для спостереження на екрані ЕПТ досліджуваної напруги необхідно, щоб промінь відхилявся по горизонтальній осі пропорційно часу, а по вертикальній осі – пропорційно досліджуваній напрузі.

На пластини горизонтального відхилення променя (розташовані вертикально) подається напруга розгортки. Вона має пілкоподібну форму: поступово лінійно наростає і швидко спадає. Негативна напруга відхиляє промінь вліво, а позитивна – вправо (якщо дивитися з боку екрану). В результаті промінь рухається по екрану зліва направо з певною постійною швидкістю, після чого дуже швидко повертається до лівої межі екрану і повторює свій рух. Відстань, яку проходить промінь уздовж горизонтальної осі, пропорційна часу. Цей процес називають *розгорткою*, а горизонтальну лінію, яку промінь прокреслює по екрану, називають лінією розгортки (іноді при вимірюваннях її називають нульовою лінією). Вона відіграє роль осі часу  $t$  графіка. Частоту повторення пілкоподібних імпульсів називають частотою розгортки, але її для вимірювань не

використовують. Для вимірювань потрібно знати швидкість розгортки, про яку буде сказано нижче.

Якщо при цьому на пластини вертикального відхилення (розташовані горизонтально) подати досліджувану напругу, то промінь почне відхилятися і по вертикалі: при додатній напрузі вгору, а при від'ємній – униз. Рух по вертикалі і по горизонталі відбувається одночасно і в результаті досліджуваній сигнал «розгортається» в часі. Отримане зображення називають *осцилограмою*.

Для спостереження кількох сигналів одночасно випускають багатопроменеві і багатоканальні осцилографи. Звичайно кількість каналів дорівнює двом. ЕПТ двопроменевих осцилографів працює одночасно з двома променями на загальному екрані, які дозволяють спостерігати два сигнали абсолютно незалежно.

### 3.1.2 Підключення осцилографа

Оскільки напруга вимірюється між двома точками, то вхід осцилографа має дві клеми. Причому вони не рівнозначні. Одна клема, так звана «фаза», підключена до входу підсилювача вертикального відхилення променя. Друга клема – «земля» або «корпус». Вона називається так тому, що електрично з'єднана з корпусом приладу (це загальна точка всіх його електронних схем). **Осцилограф показує напругу фази по відношенню до землі.**

Дуже важливо знати, який з вхідних провідників є фазою. Для визначення який з провідників є фазою, а який корпусом, треба при нікуди не підключеному осцилографі взятися рукою за контакт одного з вхідних провідників, при цьому іншою рукою ні до чого не торкатися. Якщо цей провідник – корпус, то на екрані буде тільки лише горизонтальна лінія розгортки. Якщо цей провідник – фаза, то на екрані виникнуть досить значні завади, які представляють собою сильно спотворену синусоїду частотою 50 Гц.

Визначивши фазу і корпус вхідного кабелю, можна підключати осцилограф до досліджуваного ланцюга. Якщо в ньому немає чітко вираженого загального проводу, то корпус підключається до будь-якої з точок, напругу між якими потрібно дослідити. **Якщо в ланцюзі є загальний провід – точка, яку умовно приймають за нульовий потенціал, поєднана з корпусом пристрою або реально заземлена, то корпус осцилографа краще підключати до цієї точки.**

Невиконання цього правила може призвести до значних похибок вимірювань (іноді настільки великих, що вимірюванням і зовсім не можна довіряти).

Двоканальний (і двопроменевий) осцилограф може показувати осцилограми двох сигналів одночасно. Для цього у нього є два входи (канали), які зазвичай позначаються I і II. Слід пам'ятати, що одна з вхідних клем кожного каналу з'єднана з корпусом осцилографа, отже, **клеми «корпус» обох каналів з'єднані між собою**. Тому ці клеми повинні підключатися до однієї і тієї самої точки ланцюга, інакше в ланцюзі виникне замикання.

### 3.1.3 Управління осцилографом

Розглянемо передню панель двоканального осцилографа С1-83 (рис. 3.3). Добре видно, що екран осцилографа розбитий на клітини (рис. 3.4). Ці клітини називаються поділками, і використовуються при вимірюваннях: до них прив'язуються всі масштаби по вертикалі і горизонталі. Масштаб по вертикалі – вольти на поділку (В/под. або V/под.), масштаб по горизонталі секунди (мілі- та мікросекунди) на поділку. Зазвичай осцилограф має 6...10 поділок по горизонталі і 4...8 поділок по вертикалі. Центральні вертикальна і горизонтальна лінії мають додаткові риски, які ділять поділку на 5 або 10 частин (рис. 13, на рис. 12 теж видно). Риски служать для більш точних вимірювань, вони є частками поділки. Управління обома каналами однакове. Розглянемо його на прикладі каналу I (рис. 3.5).

**1. Перемикач режиму входу.** У верхньому положенні «» на вхід надходить і постійна і змінна напруги. Це називають «відкритий вхід» – тобто відкритий для постійного струму. У нижньому положенні «» на вхід проходить тільки змінна напруга, що дозволяє вимірювати маленьку змінну напругу на тлі великого постійного, наприклад в підсилювачах. Реалізується це дуже просто: вхід підсилювача підключається через конденсатор. Це називають «закритий вхід». Майте на увазі, що при закритому вході дуже низькі частоти (нижче 1...5 Гц) значно послаблюються, тому вимірювати їх можна тільки при відкритому вході. У середньому положенні перемикача 1 вхід підсилювача осцилографа відключається від

вхідного роз'єму і замикається на землю. Це дозволяє за допомогою ручки 7 виставити лінію розгортки в потрібне місце.



А – управління каналом I; Б – управління відображенням каналів;  
В – управління каналом II; Г – регулювання яскравості променя,  
фокусування і підсвічування екрану; Д – управління розгорткою; Е –  
управління синхронізацією

Рисунок 3.3 – Передня панель осцилографа С1-83

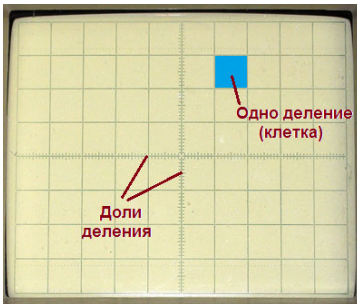


Рисунок 3.4 – Поділки екрану осцилографа

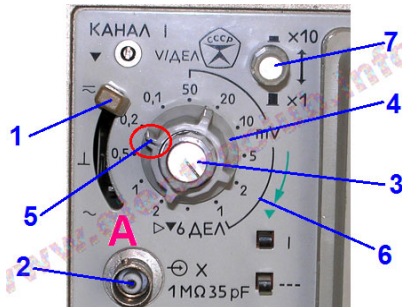


Рисунок 3.5 – Органи управління каналу I

## 2 Вхідний роз'єм каналу

3, 4, 5, 6 – регулятор чутливості каналу вертикального відхилення (масштабу по вертикалі). Перемикач 4 задає масштаб

східчасто. Значення, які він задає, нанесені поруч з ним. На вибране значення вказує риска 5 на перемикачі. На рисунку вона вказує на значення 0,2 вольт/поділку. Ручка 3, розміщена співвісно з перемикачем, дозволяє плавно зменшувати масштаб у 2...3 рази. У крайньому правому положенні (на рис. 14 ручка «плавно» знаходиться саме в ньому) ця ручка має фіксацію, тоді масштаб по вертикалі в точності дорівнює заданому перемикачем 4. Значення масштабів, виділені дужкою 6, вказані в мілівольтах на поділку – про це говорить напис «mV» всередині дужки.

Ручка 7 виконує дві функції. При обертанні вона переміщує графік каналу по вертикалі вгору або вниз  $\updownarrow$ . При «витягуванні» задає множник масштабу по вертикалі: витягнута ручка (рис. 3.6) задає множник  $\times 1$ , а втоплена – множник  $\times 10$ . Втоплене і витягнуте положення символічно показані над і під ручкою.

Канал II аналогічний каналу I. Але другий канал має додатковий перемикач 6, що дозволяє інвертувати його вхідний сигнал. У натиснутому положенні канал працює як звичайно, а у витягнутому – інвертується, тобто при негативному вхідному сигналі промінь рухається вгору, а при позитивному – вниз. Це необхідно при вимірюванні, наприклад, зсуву фаз.

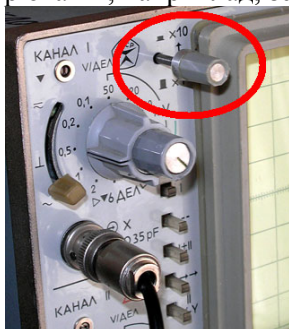


Рисунок 3.6 – Ручка множника масштабу по вертикалі, витягнута в положення « $\times 1$ »



Рисунок 3.7 – Управління відображенням каналів

На рис. 3.7 показано управління відображенням каналів, яке визначається натисканням на одну з кнопок.

1 – Працює тільки канал I, II канал відключений.

2 – Обидва канали відображаються одночасно (промінь дуже швидко переключається між каналами) і взаємне положення осцилограм обох каналів вірне. У цьому режимі можна вимірювати зсув фаз.

3 – Осцилограф показує суму або різницю сигналів в каналах (знак другого каналу визначається положенням ручки 6 на другому каналі).

4 – Відображаються сигнали обох каналів, але вони незалежні в часі, тому порівнювати сигнали відносно часу і зсуву фаз не можна.

5 – Працює тільки канал II, канал I відключений.



Рисунок 3.8 – Органи управління розгорткою



Рисунок 3.9 – Органи управління синхронізацією

Панель управління розгорткою (рис. 3.8) схожа на панель управління каналом вертикального відхилення променя. Вона містить ручку 4, яка дозволяє зсувати зображення вліво-вправо «↔» і комбінований регулятор (1 – східчасто, 3 – плавно) швидкості розгортки (масштабу по горизонталі). Риска 2 на перемикачі показує встановлене значення. Як і в каналах вертикального відхилення, перемикач швидкості розгортки має різні одиниці вимірювання: секунди *с*, мілісекунди *мс*, мікросекунди *мкс*. Витягнута/втоплена ручка 4 «↔» задає множник швидкості розгортки відповідно  $\times 0,2$  і  $\times 1$ . Зверніть увагу: на рис. 3.8 ручка 3 регулювання швидкості розгортки «плавно» встановлена не в крайнє праве положення. Отже, швидкість розгортки не дорівнює значенню, заданому перемикачем 1, а менше нього (швидкість руху променя менше, а значення час / поділка більше!).

На панелі управління синхронізацією (рис. 3.9) задається:

1 – джерело внутрішньої синхронізації: напругою якого каналу синхронізується рух променя. Ця синхронізація проводиться вхідним сигналом, тому називається внутрішньою. Такий режим використовується для більшості вимірювань. Варіанти тут такі: або синхронізація тільки сигналом каналу I, або спроба синхронізації від каналу I, а якщо не виходить, то синхронізація проводиться сигналом каналу II. Перший варіант іноді працює трохи краще, тому треба намагатися, щоб сигнал першого каналу був досить великий для стабільної синхронізації. У переважній більшості випадків для нормальної роботи слід вибирати саме цей режим синхронізації, включивши кнопку «I».

2 – зовнішня синхронізація. Рух променя синхронізується імпульсами, поданими зі спеціального зовнішнього джерела на вхід синхронізації осцилографа. Такий режим іноді потрібний для дослідження специфічних сигналів. Якщо зовнішнього джерела синхронізації немає, то отримати стійке зображення неможливо. Кнопки «0,5-5» і «5-50» задають діапазон вхідних напруг від зовнішнього джерела синхронізації. Кнопка «X-Y» спільно з кнопкою «II X-Y» управління відображенням каналів подає сигнал каналу II на пластини горизонтальної розгортки. У цьому режимі можна спостерігати фігури Ліссажу.

3 – ручка «Рівень синхронізації» – задає напругу синхронізації. У натиснутому положенні цієї ручки (як на рисунку) розгортка автоматична. При цьому промінь рухатиметься навіть якщо синхронізації не відбудеться. Промінь затримується на початку руху на деякий час до моменту синхронізації, але через деякий час все одно починає рух. Це «м'який» режим, більш зручний для роботи, оскільки промінь завжди залишається видимим. У витягнутому положенні ручки включається чекаюча розгортка. У цьому режимі промінь не почне руху до тих пір, поки не відбудеться синхронізації. Якщо синхронізації не відбувається, промінь не рухається. Такий режим добре підходить для спостереження неперіодичних сигналів. Вплив цієї ручки на зображення показаний на рис. 3.3 і 3.4.

4 – «полярність» синхронізації. Насправді знаки «+» і «-» означають дещо інше. У положенні «+» синхронізація відбувається по фронту, тобто в той момент, коли вхідна напруга досягає заданого (ручкою «Рівень синхронізації») значення при наростанні вхідної напруги (зміні від «-» до «+»). У положенні «-» синхронізація

відбувається по спаду – при убуванні вхідної напруги (зміні від «+» до «-»). В осцилографі в ланцюзі синхронізації використовують дві різні схеми: одна визначає чи дорівнює вхідна напруга заданій і якщо дорівнює – запускає рух променя. Ця напруга задається ручкою «Рівень синхронізації». Друга схема визначає, як при цьому змінюється вхідна напруга – зростає або убуває. І відповідно дозволяє першій схемі спрацювати.

5 – режим входу синхронізації. Відноситься як до зовнішньої, так і до внутрішньої синхронізації. У положенні «~» вхід закритий, і синхронізація відбувається тільки від змінної напруги. У положенні «» вхід відкритий, і на спрацьовування схеми синхронізації діє і змінна напруга, і постійна. Режим «НЧ» те ж саме, але сигнал потрапляє на ланцюг синхронізації через фільтр низьких частот, який обрізає високочастотні завади. Цей режим є не у всіх осцилографах.

6 – вхід для подачі сигналу зовнішньої синхронізації.

### 3.2 Вимірювання осцилографом

Вимірювання проводяться візуально і їх похибка виходить досить високою. Крім того, напруга розгортки має невисоку лінійність, тому похибка вимірювання частоти і зсуву фаз може досягати 5%. Для мінімізації похибки зображення повинне мати розмір 80...90% від розмірів екрану. **При вимірюванні напруги і частоти (часових інтервалів) необхідно ручки плавного регулювання підсилення вхідного сигналу і швидкості розгортки встановити в крайнє праве положення.**

#### 3.2.1 Вимірювання напруги

Для вимірювання напруги використовують відоме значення масштабу по вертикалі. Перед початком вимірювання необхідно замкнути накоротко вхідні клеми осцилографа (або встановити перемикач режиму входу в положення  $\perp$ ) і ручкою  $\updownarrow$  встановити лінію розгортки на горизонтальну лінію сітки екрану, щоб була можливість правильно визначити висоту осцилограми. Після цього на вхід подається досліджуваний сигнал (або перемикач режиму входу

встановлюється в одне з робочих положень). На екрані з'являється графік функції сигналу.

Для того щоб точніше виміряти висоту графіка, осцилограма зсувається ручкою  $\longleftrightarrow$  так, щоб точка, в якій вимірюється амплітуда, потрапила на центральну вертикальну лінію, яка має градуювання в частках поділки (рис. 3.10). Одержуємо: чутливість каналу вертикального відхилення дорівнює 1 В/ под., розмір осцилограми 2,6 поділки, отже амплітуда сигналу 2,6 вольт.

Продемонструємо вимірювання напруги на самому осцилографі. Максимум напруги має величину 3,4 поділки (рис. 3.10). Визначення масштабу по вертикалі показано на рис. 3.11. Ручка «плавно» встановлена в крайнє праве положення. Риска на перемикачі чутливості показує 0,5 вольт/поділку. Множник масштабу встановлений в положення  $\times 10$  (втоплений). Отже, вимірювана напруга дорівнює:

$$U_{\max} = 3,4 \cdot 0,5 \cdot 10 = 17 \text{ В.}$$

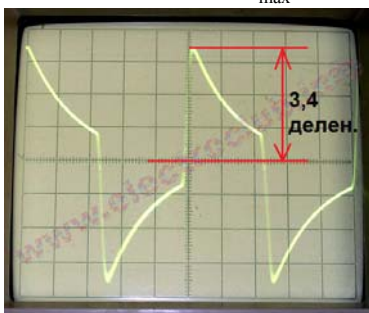


Рисунок 3.10 – Визначення амплітуди сигналу



Рисунок 3.11 – Визначення масштабу по вертикалі на осцилографі С1-83

### 3.2.2 Вимірювання струму

За своєю суттю осцилограф є вольтметром, який показує графік напруги. Проте з його допомогою можна спостерігати і форму струму. Для цього послідовно з досліджуваним ланцюгом включають резистор  $R_c$  (тут індекс «с» означає струмовий), рис. 3.12. Опір резистора  $R_c$  вибирають набагато меншим, ніж опір ланцюга, тоді резистор не впливає на його роботу і його включення не призводить до змін

режиму роботи ланцюга. На резисторі за законом Ома виникає напруга:

$$u(t) = i(t) \cdot R_c.$$

Цю напругу і вимірюють осцилографом. А знаючи величину  $R_c$ , можна перевести напругу, яку показує осцилограф, у струм.

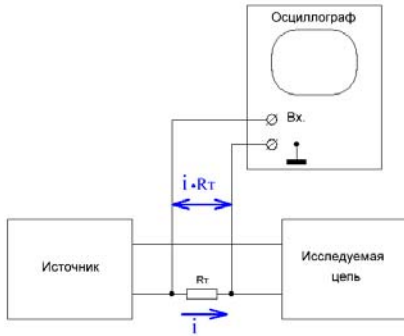


Рисунок 3.12 – Схема для вимірювання струму осцилографом



Рисунок 3.13 – Вимірювання періоду сигналу

### 3.2.3 Вимірювання частоти

Осцилограф дозволяє вимірювати часові інтервали, в тому числі і період сигналу. Частота сигналу обернено пропорційна його періоду. Період сигналу можна вимірювати в різних частинах осцилограми, але найбільш зручно і точно вимірювати його в точках перетину графіком осі часу. Тому перед вимірюванням лінію розгортки необхідно встановити на центральну горизонтальну лінію сітки екрану (рис. 3.13).

За допомогою ручки  $\longleftrightarrow$  початок періоду поєднується з вертикальною лінією сітки, рис. 3.13 (найкраще початок періоду поєднувати із самою лівою вертикальною лінією екрану, тоді точність буде максимальною). Період сигналу, показаного на рис. 25, дорівнює 6,8 поділок. Швидкість розгортки – 100 мкс/под. (оскільки грецька буква  $\mu$ , що означає «мікро», не завжди доступна для відображення, її часто замінюють латинською літерою *u*, подібною по зображенню). Тоді період сигналу

$$T = 6,8 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 680 \text{ мксек},$$

і його частота:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{680 \cdot 10^{-6}} \approx 1,47^3 = 1,47 \text{ кГц}.$$

### 3.2.4 Вимірювання зсуву фаз

Зсув фаз показує взаємне розташування двох коливальних процесів у часі. Але його вимірюють не в одиницях часу (які відкладаються по горизонтальній осі), а в частках періоду сигналу (тобто в одиницях кута). У цьому випадку однаковому взаємному розташуванню сигналів буде відповідати однаковий фазовий зсув, незалежно від періоду і частоти сигналів (тобто незалежно від реального масштабу графіків по осі часу). Тому найбільша точність вимірювань виходить, якщо розтягнути період сигналу на весь екран.

Оскільки в аналоговому осцилографі графіки сигналу обох каналів мають однаковий колір і однакову яскравість, то для того, щоб їх розрізнити між собою, рекомендується зробити їх різної амплітуди. При цьому напругу, яка вимірюється каналом I приладу, краще робити великою – в цьому випадку синхронізація буде краще «тримати» зображення. Підготовка до вимірювань проводиться так:

- 1 Ручками  $\updownarrow$  обох каналів їх лінії розгортки встановлюються на середню лінію сітки екрану (сигналів на входах немає) .
- 2 Ручками регулювання підсилення каналів вертикального відхилення (ступінчасто і плавно) сигнал 1-го каналу встановлюється більшої амплітуди , а 2-го каналу – меншої амплітуди.
- 3 Ручками регулювання швидкості розгортки встановлюється така її швидкість, щоб на екрані відображався приблизно один період сигналу.
- 4 Ручкою «Рівень синхронізації» домагаються того, щоб графік напруги починався з осі часу (з лінії розгортки) – точка А.
- 5 Ручкою  $\leftrightarrow$  домагаються того, щоб графік напруги починався з крайньої лівої вертикальної лінії сітки екрану – точка А.
- 6 Ручками «Швидкість розгортки» (ступінчасто і плавно) домагаються того, щоб період графіка напруги закінчувався на крайній правій вертикальній лінії сітки екрану.

7 Повторюють пункти 4...6 до тих пір, поки період графіка напруга не буде розтягнутий на весь екран, причому його початок і кінець повинні збігатися з лінією розгортки.

Перш, ніж вимірювати величину зсуву фаз, необхідно визначити, який із сигналів (напруга або струм) випереджає, а який відстає. Від цього залежить знак кута зсуву фаз  $\varphi$ . На рис. 3.14, а струм відстає від напруги – початок його періоду розташований в часі пізніше, ніж початок періоду напруги (початок періоду напруги в точці А, а періоду струму – в точці Б). Струм починається пізніше, отже, він відстає, а напруга випереджає. Цієї ситуації відповідають позитивні значення кута зсуву фаз. На рис. 3.14, б струм випереджає, а напруга відстає. Оскільки початок періоду струму на екрані не відображається, то порівнюються закінчення першого півперіоду: першим до нуля повернеться той графік, який почався раніше (точка Г настає раніше у часі, ніж точка В). Кут зсуву фаз при цьому від'ємний.

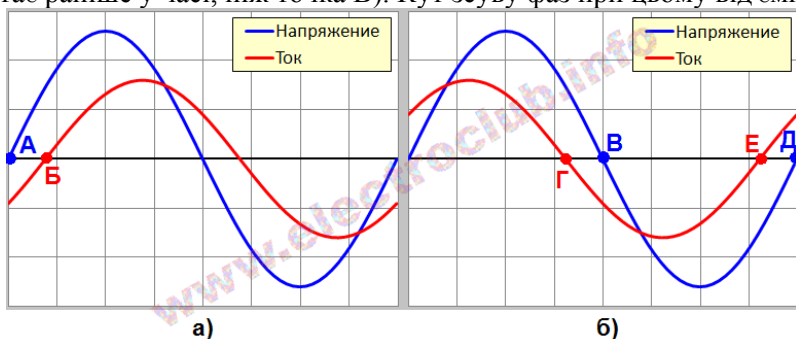


Рисунок 3.14 – Струм відстає від напруги,  $\varphi > 0$  (а); струм випереджає напругу,  $\varphi < 0$  (б)

Модуль кута зсуву фаз  $\varphi$  – це відстань між початками або між кінцями періоду (позитивного півперіоду) сигналів у поділках сітки екрану (рис. 3.14). Далі значення модуля  $\varphi$  визначаються із пропорції, враховуючи, що один повний період будь-якого колювання дорівнює 360 градусів:

$$|\varphi| = \frac{360 \cdot \alpha}{N},$$

де  $N$  – кількість поділок сітки, зайнятих одним періодом сигналу;  $\alpha$  – кількість поділок сітки між початками періодів (кінцями позитивного півперіоду).

### 3.3 Завдання до роботи

- 1 Ознайомитися з характеристиками і органами управління осцилографа.
- 2 Провести калібрування підсилювача "У".
- 3 Провести візуальне спостереження осцилограм синусоїдального електричного сигналу.
- 4 Визначити амплітудне і діюче значення гармонійної напруги.
- 5 Провести вимірювання частоти періодичного сигналу.
- 6 Провести вимірювання зсуву фази, виробленого фазозсуваючим ланцюгом.
- 7 Провести вимірювання амплітуди, середнього значення, тривалості імпульсу, періоду імпульсного сигналу, одержуваного від імпульсного генератора.
- 8\* Підключити зовнішній сигнал горизонтальної розгортки для:
  - а) побудови ВАХ;
  - б) знайти зсув фази (отримати фігуру Лісажу).

### 3.4 Контрольні питання

- 1 Що таке осцилограф і яке його призначення?
- 2 Який принцип роботи осцилографа?
- 3 Що таке розгортка?
- 4 Що називається осцилограмою?
- 5 Які умови отримання стійкої осцилограми?
- 6 Якими перевагами володіють ЕЛО при вимірюванні напруг?
- 7 Які основні правила підключення осцилографа?
- 8 Яка похибка осцилографічних вимірювань?
- 9 Як провести вимірювання напруги сигналу?
- 10 Як дослідити осцилографом форму струму?
- 11 Як провести вимірювання періоду і частоти сигналу?
- 12 Як провести вимірювання зсуву фаз двох сигналів?

## 4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 “ЗОНДОВІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ”

**Мета роботи:** ознайомлення з зондовими методами вимірювання питомої електричної провідності напівпровідникових матеріалів, у придбанні практичних навичок визначення  $\rho$  різними методами.

### 4.1 Загальні відомості

При дослідженні електричних властивостей напівпровідників і при виробництві напівпровідникових матеріалів і приладів виникає необхідність у визначенні питомої електричної провідності напівпровідникових матеріалів у вигляді злитків, пластин, дифузійних і епітаксialних шарів.

Методи вимірювання питомої електричної провідності напівпровідникових матеріалів базуються на вимірюванні падіння напруги на деякій ділянці зразка, через який пропускається електричний струм, для чого до напівпровідникового зразка прикладають струмові і потенційні металеві електроди (зонди). На контакті напівпровідникового матеріалу і металевого електрода при протіканні електричного струму може виникати ряд фізичних ефектів і явищ, що вносять суттєву похибку у результати вимірювань, а в деяких випадках навіть роблять неможливими такі вимірювання. Найбільш суттєвими з них є:

1. високий перехідний опір контакту, особливо коли контакт має випрямну характеристику і включений у зворотному напрямку;
2. інжекція неосновних носіїв заряду з контакту, що істотно впливає на величину провідності зразка;
3. ефект Пельтьє, що призводить до виникнення градієнту температури на зразку і відповідному цьому градієнту термо-ЕРС;
4. нагрів зразка електричним струмом.

Зазначені явища необхідно враховувати не тільки при вимірюванні питомої провідності, але і в усіх випадках, коли через вимірювальний зразок із металевими контактами протікає електричний струм.

#### 4.1.1 Двзондовий метод вимірювання питомої провідності

Застосовується для вимірювання питомого опору зразків, що мають правильну геометричну форму з відомим поперечним перетином.

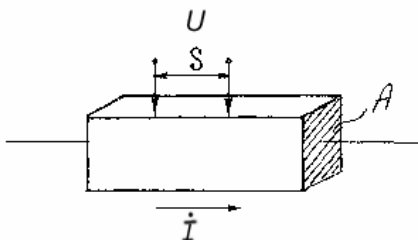


Рисунок 4.1 – Схема 2-зондового методу вимірювання

Через торцеві грані зразка (рис. 2.1) із нанесеними на них омичними контактами пропускається електричний струм  $I$ . На поверхні зразка уздовж лінії струму розташовуються два зонди на відстані  $S$  один від одного і вимірюється різниця потенціалів  $U$  між ними. Питомий опір зразка

обчислюється за формулою:

$$\rho = \frac{U \cdot A}{I \cdot S} \quad (4.1)$$

де  $A$  – поперечний перетин зразка.

Похибка методу визначається помилками у визначенні величин, що входять у розрахункову формулу. Щоб виключити вплив падіння напруги на контактних опорах потенційних зондів, різниця потенціалів вимірюється або потенціометром або вольтметром, вхідний опір якого приблизно в  $10^5$  разів більше опору зразка. На точність вимірювання також впливає фотопровідність і фото-ЕРС, тому рекомендується проводити вимірювання у затемненій камері. Зразок може нагріватися при проходженні через нього струму а через те, що температурний коефіцієнт опору напівпровідників високий, зміна температури в процесі вимірювання буде змінювати питомий опір зразка. Тому струм через зразок повинен бути мінімальним, але при цьому повинен забезпечити необхідну точність вимірювання напруги. Крім того, для усунення температурного градієнту, який може виникнути через нерівномірне виділення тепла на випрямляючих струмових контактах (ефект Пельтьє), вимірювання проводять при двох полярностях струму, і питомий опір визначають як середнє з двох отриманих значень:

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_+ + \rho_-). \quad (4.2)$$

Щоб забезпечити рівномірне проходження струму по перетину зразка в місці, де розташовані потенційні зонди, їх розташовують від найближчого струмового контакту на відстані, яка б перевищувала в три рази найбільшу сторону поперечного перетину зразка. Для даного методу необхідні протяжні зразки правильної форми і омичні контакти, що потребують спеціальної технології нанесення (сплавні або електролітично нанесені), з метою оперативного технологічного контролю двозондовий метод не застосовується.

#### 4.1.2 Чотиризондовий метод вимірювання питомої провідності

Чотиризондовий метод вимірювання питомої електричної провідності напівпровідників є найбільш поширеним, тому що не потребує створення омичних контактів до зразка і забезпечує проведення вимірювань на зразках найрізноманітнішої форми і розмірів.

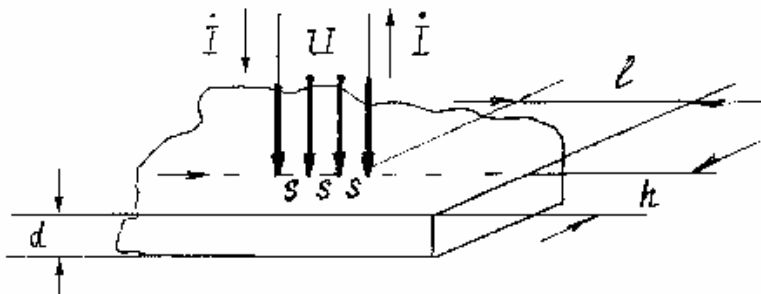


Рисунок 4.2 – Схема 4-зондового методу вимірювання

На вимірювальну поверхню зразка встановлюють чотири зонди (рис. 4.2), розташовані уздовж однієї лінії на рівній відстані  $S$  один від одного. Через крайні зонди 1, 4 пропускають електричний струм  $I$  (струмові зонди), а між двома внутрішніми зондами 2, 3 вимірюють різницю потенціалів  $U$  (потенційні зонди).

Для зразка, коли  $d, l, h \gg S$ , питомий опір обчислюється за формулою:

$$\rho = \frac{2\pi S U}{I} \quad (4.3)$$

Якщо необхідно вимірювати зразки обмежених розмірів, таких, що товщина  $d$  і відстані  $l$ ,  $h$  сумірні з  $S$ , необхідно враховувати вплив границь зразка на виміряне значення питомого опору. Це враховується введенням поправочного коефіцієнта  $F$  у формулу (4.3):

$$\rho = 2\pi S \frac{U}{I} F. \quad (4.4)$$

Функція  $F$  залежить від вибору граничних умов, при яких проводять вимірювання. На рис. 4.3 приведені поправочні функції для деяких граничних умов, які найбільш часто зустрічаються на практиці.

Похибка, як і для двозондового методу, визначається як помилками вимірювання величин, що входять у (4.3), так й іншими джерелами. Щоб уникнути помилок при вимірюваннях напруги, рекомендується використовувати вольтметр із входнім опором, який би в  $10^5$  разів перевищував опір зразка, а опір ізоляції забезпечувати на рівні  $10^8$  Ом.

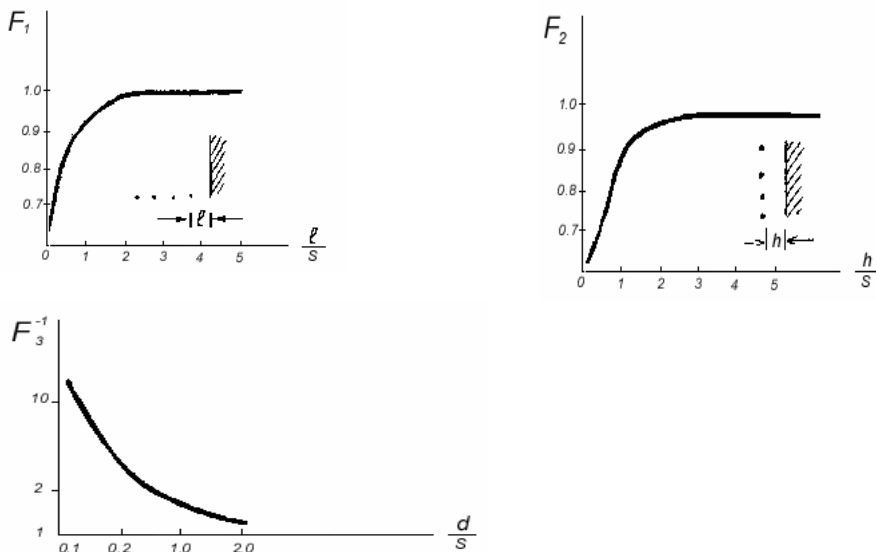


Рисунок 4.3 – Поправочні функції для деяких граничних умов

Формула (4.3) отримана в припущенні, що контакт зонда з

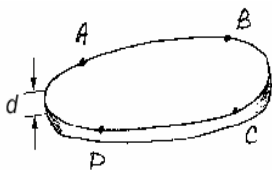
поверхнею зразка є точковим. Тому необхідно забезпечити сталість навантаження на кожному зонді ( $\sim 1,75$  Н), і виготовляти зонди з твердих сплавів (карбід вольфраму) із строгим контролюванням форми заточення зонда.

Джерелами випадкових похибок можуть служити фотопровідність і фото-ЕРС на контактних опорах. Тому вимірювання рекомендується проводити в затемненій камері. Для усунення ефекту нагрівання зразка при проходженні струму і впливу термо-ЕРС, що виникає на контактах, робочий струм вибирається мінімально можливим, а потенціал на зондах 2 і 3 вимірюють при двох полярностях струму. Отримані значення усереднюють.

Для зменшення інжекції неосновних носіїв через струмові зонди, що призводить у напівпровідниках із великим часом життя неосновних носіїв до зменшення значення  $\rho$ , поверхню зразка піддають механічній обробці абразивними порошками. Внаслідок такої обробки сильно зростає швидкість поверхневої рекомбінації і глибина модуляції провідності різко падає.

#### 4.1.3 Вимірювання провідності пластин довільної геометричної форми

Для контролю зразків у вигляді пластин довільної геометричної форми найбільш зручним є метод Ван-дер-Пау. У цьому методі уздовж периметра плоскої пластини розміщують чотири контакти А, В, С, D, і вимірюють два значення опору:



$$R_{ABCD} = \frac{U_{CD}}{I_{AB}} \text{ і } R_{BCDA} = \frac{U_{DA}}{I_{BC}}.$$

Значення питомого опору зразка розраховується за формулою:

Рисунок 4.4 – Довільна форма зразка

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{ABCD} + R_{BCDA}}{2} f\left(\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}\right), \quad (4.5)$$

де  $f\left(\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}\right)$  – поправочна функція.

Графік цієї функції приведено на рис. 4.5.

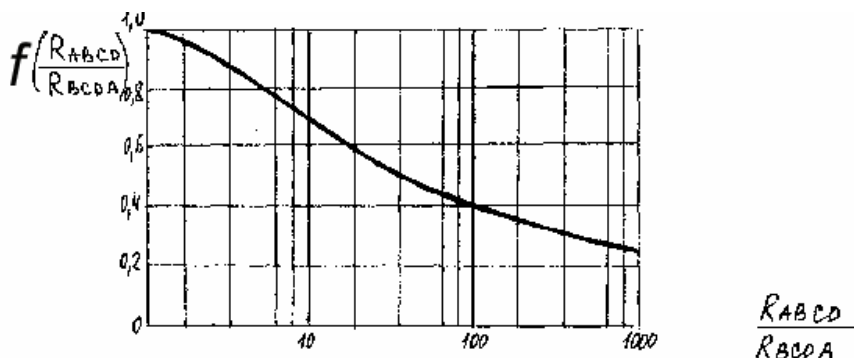


Рисунок 4.5 – Графік поправочної функції

При симетричному розташуванні вимірювальних зондів на периферії пластини у випадку її однорідності по електропровідності опори  $R_{ABCD}=R_{BCDA}$  і  $f=1$ , тоді:

$$\rho = 4,53dR = 4,53d \frac{U}{I} \quad (4.6)$$

При виводі (4.5) передбачалося, що контакти розташовуються точно по периферії і мають точкові розміри. У якості контактів зазвичай використовують пластинчасті контактні ножі, які притискають до бічної поверхні пластини. Загальна схема вимірювань не відрізняється від схеми чотиризондового методу.

## 4.2 Порядок виконання роботи

- 1 Ознайомитись з загальними положеннями і суттю зондових методів вимірювання питомої електричної провідності напівпровідникових матеріалів.
- 2 Одержати зразки і підготувати їх до проведення вимірювань.
- 3 Вимірювання провести на лабораторному стенді СФП-5. Для цього необхідно:

- А) під'єднати маніпулятор до відповідного роз'єму стенда;
- Б) до пари клем «V» стенда під'єднати мілівольтметр;
- В) перемикач стенда «П2 Род работы» встановити у

положення «23» для проведення вимірювань двозондовим методом і «43» – чотиризондовим методом; перемикач стенда «ПЗ» встановити у положення «Т1»;

Г) розмістити зразки над вимірювальною голівкою із зондами;

Д) показати вимірювальну схему для перевірки викладачу або лаборанту;

Е) змінюючи струм через зразок за допомогою регуляторів «Ток образца» «Грубо» і «Плавно» і перемикача «П1» від мінімального значення до максимально можливого, зняти показання з мілівольтметра.

4 Розрахувати питомий опір зразка двозондовим методом за формулою (4.1) і чотиризондовим методом – (4.3). В розрахунках прийняти  $S=0,67$  мм,  $A=25$  мм<sup>2</sup>.

5 Побудувати графіки залежності  $I = f(U)$ . З графіків за тангенсом кута нахилу прямолінійної ділянки знайти питомий опір.

6 Експериментально визначити функції поправок  $F_1\left(\frac{l}{S}\right)$  і  $F_2\left(\frac{h}{S}\right)$

за (4.4) на крайові ефекти для урахування границі зразка при розташуванні зондів перпендикулярно і паралельно межі зразка.

7 Побудувати графіки  $F_1\left(\frac{l}{S}\right)$  і  $F_2\left(\frac{h}{S}\right)$ .

***Звіт повинен містити:***

- короткий опис зондових методів вимірювання питомої електропровідності;

- схему установок, використаних для проведення вимірювань;

- таблиці експериментальних даних і графіки функцій  $I = f(U)$ ,

$F_1\left(\frac{l}{S}\right)$  і  $F_2\left(\frac{h}{S}\right)$ ;

- висновки.

### **4.3 Контрольні питання**

1 Особливості напівпровідників як об'єкта вимірювання зондовими методами.

- 2 Які ефекти сприяють появі похибок вимірювань електропровідності напівпровідників зондовими методами?
- 3 Як усувається вплив ефекту Пельтьє при вимірах електропровідності?
- 4 Як при вимірюваннях електропровідності усувається вплив перехідного опору контактів?
- 5 Назвіть основні методи вимірювання електропровідності напівпровідників, перерахуйте їх переваги і недоліки.

## 5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 “ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАННЯ ЕРС ХОЛЛА”

**Мета роботи:** ознайомитися з гальваномagnetним ефектом Холла як методом вимірювання ряду параметрів напівпровідникових матеріалів; ознайомитися з методами вимірювання ЕРС Холла.

### 5.1 Ефект Холла

При одночасному впливі на носії заряду електричного і магнітного полів виникають кінетичні ефекти, які називають гальваномagnetними ефектами. Ефект Холла є одним із гальваномagnetних ефектів. Крім ефекту Холла до гальваномagnetних явищ відносять ефект магнітного гістерезису, поперечний гальванотермомagnetний ефект (Етtingсхаузена) та подовжній гальванотермомagnetний ефект (ефект Нернста).

Фізична суть ефекту Холла полягає в наступному (рис.5.1).

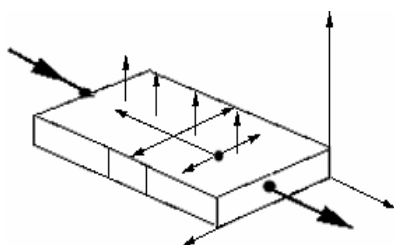


Рисунок 5.1 – Ефект Холла

Через зразок, що має форму паралелепіпеда, пропускають струм у напрямку осі  $X$ . Якщо уздовж осі  $Z$ , перпендикулярній осі  $X$ , створити магнітне поле  $B_z$ , то носії заряду, що рухаються уздовж осі  $X$  із швидкістю  $V_x$ , будуть відхилятися під дією сили Лоренца:

$$F = eV_x B_z \quad (5.1)$$

у напрямку осі  $Y$ . Отже, у напрямку  $Y$  з'являється поперечний струм  $I_y$ .

Зразок має кінцеві розміри в напрямку осі  $Y$ , тому на бічних гранях зразка накопичується заряд, внаслідок чого виникає поперечне електричне поле  $E_y$ , яке зростає до тих пір, поки не зкомпенсує силу Лоренца, і поперечний струм  $I_y$  не стане рівним нулю. Отже, у зразку виникає сумарне поле  $E = E_y + E_x$ , яке буде нахилено на деякий кут  $Q$  щодо  $E_x$ , пропорційно магнітній індукції  $B$ :

$$\operatorname{tg} Q = \frac{E_y}{E_x} = \mu_n B_z. \quad (5.2)$$

Як бачимо, розмірність коефіцієнта пропорційності  $\mu_n$  збігається з розмірністю рухливості і має назву холлівської рухливості.

Холл експериментально встановив, що поле  $E_y$  задовольняє емпіричному співвідношенню (для слабких магнітних полів):

$$E_y = R_n j_x B_z, \quad (5.3)$$

де  $j_x$  – густина струму;  $R_n$  – стала Холла, яка залежить від властивостей матеріалу. З (5.2) і (5.3) випливає:

$$\mu_n E_x B_z = R_n j_x B_z. \quad (5.4)$$

Використовуючи відомі вирази для густини струму й електричної провідності  $\delta$ :

$$j_x = \delta E_x, \quad (5.5)$$

$$\delta = en\mu_n, \quad (5.6)$$

де  $n$  – концентрація електронів;  $\mu_n$  – дрейфова рухливість, одержуємо:

$$R_n = \frac{\mu_{nx}}{\mu_n n e} = A \cdot \frac{1}{n e}. \quad (5.7)$$

Для діркового типу провідності аналогічно:

$$R_{np} = \frac{\mu_{np}}{\mu_p} \frac{1}{p e}, \quad (5.8)$$

де  $p$  – концентрація дірок.

При змішаній провідності, коли існує два типи носіїв заряду:

$$R_n = A \frac{1}{e} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad (5.9)$$

Відношення рухливостей  $A$  залежить від механізму розсіювання носіїв заряду в зразку і має назву холл-чинника. При розсіюванні на

іонах домішки  $A=1,9$ ; на теплових коливаннях атомної ґратки  $A=1,17$ ; на нейтральних центрах  $A=1$ . У сильних магнітних полях і вроджених напівпровідниках  $A=1$ .

Як виходить з наведених вище формул, вимірявши значення  $U_H$ ,  $B$ ,  $Y$ ,  $I$  і  $d$ , можна розрахувати стала Холла. Знаючи питому електропровідність зразка, можна визначити рухливість носіїв заряду і концентрацію. Знак сталої Холла визначається знаком носіїв заряду, рухливість яких превалює. З (2.9) видно, що у випадку, коли напівпровідник має два типи носіїв, окремо визначити їх концентрацію і рухливість за допомогою вимірювання лише ефекту Холла неможливо.

## 5.2 Методи вимірювання ЕРС Холла

### 5.2.1 Класичний метод

Для вимірювання ефекту Холла використовують різні методи: вимірювання при постійних магнітному полі і струмі, при змінному магнітному полі і постійному або змінному вимірювальному струмі, методом Ван-дер-Пау та ін.

У найпростішому випадку (постійні магнітне поле і вимірювальний струм) схема вимірювання показана на рис.5.2. Через зразок у формі прямокутного паралелепіпеда, який знаходиться у постійному магнітному полі  $B$ , протікає вимірювальний струм  $I$ , який визначається за падінням напруги на еталонному опорі  $R_{\text{ет}}$ . За допомогою зондів 1 і 2, розташованих на верхній грані зразка, вимірюють його провідність за описаним в лабораторній роботі №1 двозондовим методом. Зонд 2 і зустрічний йому зонд 3 призначені для вимірювання ЕРС Холла.

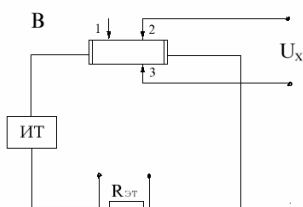


Рисунок 5.2 – Схема вимірювання ефекту Холла

Для напівпровідника  $n$ -типу ЕРС Холла:

$$U_x = R_{nn} I_x B_z \frac{1}{d}, \quad (5.10)$$

де  $d$  – товщина зразка в напрямку магнітного поля.

Звідси визначається стала Холла:

$$R_{nn} = \frac{dU_x}{I_x B_z} . \quad (5.11)$$

За виміряним значенням сталої Холла  $R_{nn}$  визначається концентрація електронів:

$$n = \frac{A}{eR_{nn}} \quad (5.12)$$

$$\text{і холлівська рухливість електронів: } \mu_{nn} = R_{nn} \delta . \quad (5.13)$$

Вимірювання ефекту Холла супроводжується деякими фізичними явищами, а напруга на холлівських електродах складається з п'яти компонентів:

- 1 ЕРС Холла,  $U_x$ ;
- 2 ЕРС, викликана ефектом Етінсхаузена,  $U_e$ ;
- 3 ЕРС, викликана ефектом Нернста,  $U_n$ ;
- 4 ЕРС, викликана ефектом Рігі-Ледука,  $U_p$ ;
- 5 напруга  $U_0$ , пов'язана з нееквіпотенціальним розташуванням холлівських електродів.

Для усунення сторонніх ефектів вимірювання проводять при різних сполученнях напрямків струмів і магнітного поля:

$$\text{При } +I, +V \quad U_1 = U_x + U_e + U_n + U_p + U_0,$$

$$\text{При } +I, -V \quad U_2 = -U_x - U_e - U_n - U_p + U_0,$$

$$\text{При } -I, +V \quad U_3 = -U_x - U_e + U_n + U_p - U_0,$$

$$\text{При } -I, -V \quad U_4 = U_x + U_e - U_n - U_p - U_0.$$

$$\text{Звідси: } U_x + U_e = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} . \quad (5.14)$$

Зміна напрямку магнітного поля і вимірювального струму однаково впливають на знак ЕРС Холла і ЕРС, пов'язаної з ефектом Етінсхаузена, тому так позбутися ефекту Етінсхаузена неможливо. Але термомагнітний ефект Етінсхаузена за своєю природою інерційний, тому його вплив можна обмежити при переході до вимірювань ефекту Холла при змінному струмі.

### 5.2.2 Вимірювання ефекту Холла методом Ван-дер-Пау

Для вимірювання ефекту Холла наведеним вище класичним методом необхідно, щоб зразок мав форму прямокутного паралелепіпеда, що ускладнює процедуру вимірювань.

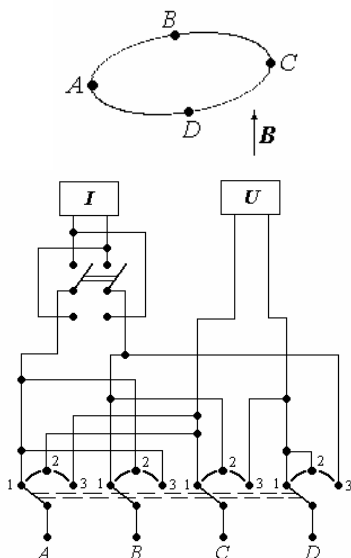


Рисунок 5.3 – Вимірювання за методом Ван-дер-Пау

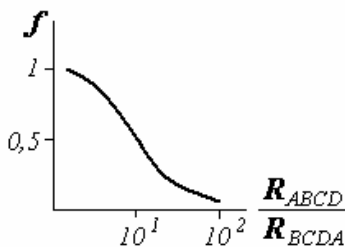


Рисунок 5.4 – Поправочна функція

Холлівська рухливість носіїв заряду визначається співвідношенням:

$$\mu_n = \frac{d}{B} \frac{\Delta R_{bdac}}{\rho}, \quad (5.18)$$

після чого можна визначити концентрацію вільних носіїв:

$$N = \frac{\mu_n}{\mu} \frac{1}{e \mu_n \rho} = \frac{A}{e \mu_n \rho}. \quad (5.19)$$

Для контролю зразків у вигляді пластин довільної форми Ван-дер-Пау запропонував зручний метод, який полягає в наступному. По периферії плоского зразка довільної форми підключають чотири контакти А, В, С, D (рис.5.4) і вимірюють два значення опору:

$$R_{abcd} = \frac{U_{cd}}{I_{ab}}; \quad R_{bcda} = \frac{U_{da}}{I_{bc}}. \quad (5.15)$$

Ван-дер-Пау довів, що питомий опір зразка товщиною  $d$  виражається співвідношенням:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{abcd} + R_{bcda}}{2} f\left(\frac{R_{abcd}}{R_{bcda}}\right), \quad (5.16)$$

де  $f\left(\frac{R_{abcd}}{R_{bcda}}\right)$  – поправочна функція.

Графік цієї функції зображено на рис.5.4.

Для визначення холлівської рухливості носіїв заряду вимірюють  $\Delta R_{bdac}$  – зміну опору ( $R_{bdac} = U_{ac}/I_{bd}$ ), викликану магнітним полем  $B$ :

$$\Delta R_{bdac} = R_{bdac} - R'_{bdac}, \quad (5.17)$$

де  $R'_{bdac}$  – опір зразка при накладенні магнітного поля  $B$ .

При виведенні співвідношень (5.18) і (5.19) передбачалося, що контакти розташовуються точно по периферії і мають точкові розміри. При відхиленні контактів від ідеальності в результат вимірювання вноситься певна похибка, яку можна врахувати коефіцієнтами або усунути, надавши зразку спеціальну форму «конюшиного листа».

### 5.2.3 Чотиризондовий холлівський метод

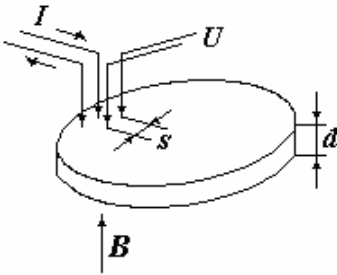


Рисунок 5.5 – Чотиризондовий холлівський метод

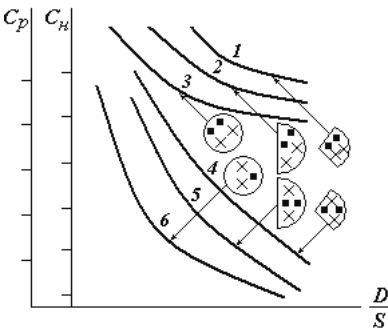


Рисунок 5.6 – Поправочні функції  $C_n$  і  $C_p$

Підготовча робота з виготовлення омичних контактів є досить трудомісткою, отже, використання холлівських методів на практиці є проблематичним. Тому для контролю не дуже високоомних пластин і епітаксійних шарів напівпровідникових матеріалів, коли вплив перехідних контактних опорів на похибку вимірювань незначний, запропоновано застосувати для оперативних вимірювань сталої Холла чотиризондовий метод із розташуванням зондів у вершинах квадрата (рис.5.5).

Можна показати, що різниця потенціалів на потенціальних зондах, розташованих на зразках із товщиною, набагато меншою відстані між зондами, підкоряється співвідношенню:

$$U = U_p + U_m + U_n = \frac{\rho I \ln 2}{\pi d} C_p + \frac{\rho I \ln 2}{\pi d} C_p b^2 + \frac{R_n I B}{d} C_n, \quad (5.20)$$

де  $C_p$  і  $C_n$  – поправочні коефіцієнти;  $b = \frac{R_n B}{\rho}$ .

Перший доданок  $U_p$  є робочою формулою чотиризондового методу з поправкою на крайові ефекти.

Другий доданок  $U_m$  відображає дію магнітного поля на холлівські струми, що виникають при замиканні ЕРС Холла периферійною областю зразка.

Третій доданок  $U_x$  – ЕРС Холла.

При слабких магнітних полях, коли виконується співвідношення  $\mu_x \ll 1$ , другим доданком  $U_m$  можна знехтувати. Вибором симетрії розташування і схеми вмикання зондів можна досягти того, що повна різниця потенціалів у (5.20) дорівнюватиме тільки одній з складових –  $U_p$  чи  $U_n$ .

Для зразків круглої і півкруглої форми окреме визначення  $U_p$  і  $U_n$  проводять, розташовуючи зонди у центрі зразка при орієнтуванні діагоналі зондового квадрата уздовж радіальної лінії симетрії. При вимірюванні  $U_n$  в якості потенціальних використовують зонди, що лежать по діагоналі, перпендикулярній радіальній лінії симетрії. Поправочні функції  $C_n$  показані на рис. 5.6 (криві 4,5,6). Схема вмикання зондів при вимірюванні  $U_p$  і поправочні функції  $C_p$  подані кривими 1, 2, 3.

Отже, вимірюючи незалежно  $U_n$  і  $U_p$ , можна обчислити питомий опір:

$$\rho = \frac{\pi d U_p}{C_p I \ln 2} \quad (5.21)$$

і сталу Холла:

$$R_n = \frac{d U_n}{C_n B I} . \quad (5.22)$$

### 5.3 Порядок виконання роботи

1 Ознайомитися з основними теоретичними положеннями і методами вимірювання ефекту Холла.

2 Одержати зразки і підготувати їх до проведення вимірювань.

3 Вимірювання провести на лабораторному стенді СФП-5. Для цього необхідно:

а) зразкотримач №1 із зразком під'єднати до роз'єму «Образец 1» стенда і розмістити між полюсними наконечниками електромагніту;

б) до пари клем «V» стенда під'єднати мілівольтметр;

в) перемикач стенда «П2 Род работы» встановити у положення «Выкл.», а перемикач «П3» – «Vхол»;

г) показати вимірювальну схему для перевірки викладачу або лаборанту;

д) змінюючи струм через зразок за допомогою регуляторів «Ток образца» «Грубо» і «Плавно» і перемикача «П1» від мінімального значення до максимально можливого, зняти показання з мілівольтметра паразитної ЕРС Холла за різних полярностей струму і напруги (тумблери «Полярность тока» і «Полярность напряжения»);

е) увімкнути електромагніт тумблером «Магнит». Встановити значення струму через магніт за допомогою регулятора «Ток магнита». Провести вимірювання за п. Д) додатково змінюючи напрям магнітного поля. Провести вимірювання для трьох-чотирьох значень струму через магніт.

4 Визначити ЕРС Холла за (5.14). Магнітну індукцію  $B$  визначити за калібрувальним графіком залежно від значень струму через електромагніт.

5 Розрахувати сталу Холла за (5.11). ( $d = 4$  мм).

6 Побудувати графіки залежності  $U_x = f(B_z)$  для різних значень  $I_x$ . З графіків за тангенсом кута нахилу прямолінійної ділянки знайти сталу Холла.

7 Визначити знак носіїв заряду та їх концентрацію за (5.12).

***Звіт повинен містити:***

- стислі теоретичні положення щодо ефекту Холла і методів його вимірювання;
- схему проведення вимірювань;
- таблицю експериментальних даних;
- результати розрахунку сталої Холла і концентрації носіїв заряду;
- висновки з проведеної роботи.

## **5.4 Контрольні питання**

- 1 Фізична суть ефекту Холла.
- 2 Супутні гальванотермомагнітні ефекти Еттінгсхаузена, Нернста, Рігі-Ледука.
- 3 Метод чотирьох вимірювань для усунення побічних ефектів при вимірюванні ефекту Холла.

- 4 Класичний метод вимірювання ефекту Холла.
- 5 Метод Ван-дер-Пау при вимірюванні ефекту Холла.
- 6 Чотиризондовий метод вимірювання ефекту Холла.
- 7 Зв'язок сталої Холла з концентрацією носіїв заряду.
- 8 Джерела похибок при вимірюванні ефекту Холла.

## **6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 “ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ЕПІТАКСІАЛЬНИХ ШАРІВ І ТОНКИХ ПЛІВОК”**

**Мета роботи:** ознайомитися з методами вимірювання товщини епітаксіальних шарів та тонких плівок напівпровідникових матеріалів; набути практичні навички в вимірюванні і розрахунку товщини тонких плівок та епітаксіальних шарів методом фарбування шліфа (відколу) та інтерференційним методом.

### **6.1 Методи вимірювання товщини епітаксіальних плівок**

З всього різноманіття методів вимірювання товщини епітаксіальних плівок зупинимося на тих, які отримали найбільше розповсюдження у виробництві напівпровідників, тобто реалізують функції метрологічного забезпечення технологічного процесу.

До цих методів пред'являють ряд вимог: вони повинні бути неруйнуючими, достатньо точними і в той же час продуктивними. Цим вимогам різні методи відповідають в різному ступені, і тому їх вибір здійснюється з урахуванням конкретно поставленої технологічної задачі.

Оскільки плівка і підкладка є монолітною композицією, основна проблема при вимірюваннях товщини плівки полягає у визначенні положення фізичної межі розділу між ними. Саме невизначеність у виявленні цієї межі служить основним джерелом погіршеності.

#### **6.1.1 Різницьові методи**

Найпростішим є метод вимірювання товщини нарощеного шару шляхом віднімання початкової товщини підкладки із загальної

товщини структури. Варіантом цього методу є зважування пластини до і після нарощування на нього епітаксiального шару. Виходячи з різниці у вазі і знаючи густину матеріалу, можна визначити  $d$ . Іноді в процесі нарощування частину підкладки екранують маскою з графіту, кварцу або іншого матеріалу, потім за допомогою звичайного вимірювального інструменту визначають висоту сходинки, що утворилася.

Точність цих методів невисока через невизначеність в положенні межі шар-підкладка, при газовому травленні підкладок перед нарощуванням, через взаємну дифузію матеріалу між підкладкою і шаром, нерівномірність шару по товщині.

Тому вказані методи, хоча і володіють високою експресністю і наочністю, застосовуються, як правило, тільки для настройки і відлагодження технологічного процесу.

### 6.1.2 Визначення товщини по тетраедричних дефектах

Тетраедричні дефекти утворюються в більшості випадків безпосередньо на межі підкладка-шар. Вони є двовимірними дефектами, утвореними при відхиленні від нормальної послідовності упаковки атомів в кристалі. Дефекти упаковки в результаті селективного травлення виявляються у вигляді рівносторонніх трикутників в площині (111), рівнобедрених трикутників в площині (110) і квадратів в площині (100).

Вимірюючи довжину сторони дефекту упаковки  $a$  на поверхні півки, обчислюють товщину півки  $d$  за формулами:

$$\text{для площини (111)} \quad d = a\sqrt{\frac{2}{3}} = 0,816a;$$

$$\text{для площини (100)} \quad d = a\sqrt{\frac{1}{3}} = 0,581a; \quad (6.1)$$

$$\text{для площини (110)} \quad d = a\sqrt{\frac{1}{2}} = 0,704a.$$

При всій своїй простоті і достатньо високій точності вказаний метод є руйнуючим, оскільки вимагає виявлення дефектів за допомогою витравлювача. Крім того, вдосконалення технології

нарощування підвищує вірогідність отримання бездефектних шарів. Тому даний метод також як і різницеві застосовується переважно в чисто технологічній меті.

### 6.1.3 Метод фарбування шліфа (відколу)

Цей метод, хоча він і є руйнуючим, найбільш точний і простий, а тому і займає провідне місце в технології напівпровідників. Як правило, для контролю партії структур, нарощуваних в єдиному процесі, в установку завантажується спеціальна пластина, на якій нарощується контрольна структура-супутник. Саме на цій структурі-супутнику і проводяться вимірювання основних паспортних параметрів, у тому числі і товщина, яка характеризує всю партію.

Суть методу полягає в тому, що на структурі спочатку створюється косий відкол або шліф (рис. 6.1). В промисловій практиці частіше користуються методом круглого (або кульового) шліфа.

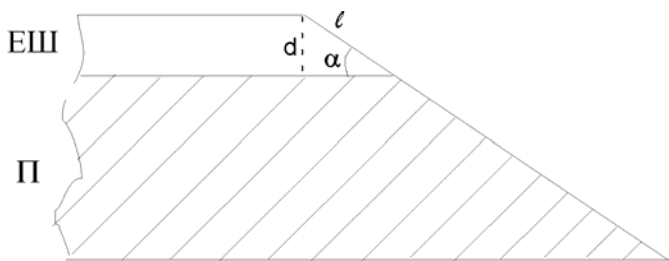


Рисунок 6.1 – Схема методу косого шліфа вимірювання товщини плівки. ЕШ – епітаксіальний шар; П – підкладка;  $d$  – товщина плівки;  $l$  – довжина шліфа;  $\alpha$  – кут косого шліфа

Шліфи піддають процесам електрохімічного осадження міді, труїть або анодного окислення, в результаті яких межа розділу шар-підкладка забарвлюється (декорується).

Це дає можливість виміряти не  $d$ , а більш доступну величину  $l$ . Чим більше  $l$  (або радіус кульового шліфа), тим з більшою точністю можна визначити  $d$ .

У разі косого шліфа, знаючи його кут  $\alpha$  і виміряючи під мікроскопом відстань  $l$  від краю шліфа до межі забарвленої області, можна обчислити товщину плівки:

$$d = l \sin \alpha \quad (6.2)$$

Цим методом можна виміряти товщину шарів більше 1 мкм з точністю  $\pm(5\div 10)\%$ . Перевагою методу є можливість вимірювання  $d$  в широкому діапазоні значень практично для структур будь-яких типів (n-n+, p-p+, n-p). Недоліком методу, крім руйнуючої дії, є його відносно низька продуктивність.

### 6.1.4 Інтерференційний метод

Спроби уникнути руйнування епітаксialних структур в процесі вимірювань викликали до життя широкий круг безконтактних методів. З цих методів найбільше застосування отримав оптичний метод, заснований на вивченні інтерференційної картини при віддзеркаленні випромінювання від межі розділу шар-плівка в інфрачервоній області за краєм поглинання.

На межі шар-підкладка, виникає різниця ходу, яка залежить від величини  $d$ . За допомогою спектрофотометра вивчається залежність коефіцієнта віддзеркалення від довжини хвилі  $\lambda$ . При цьому спостерігається чітка інтерференційна картина, що складається з чергуючих мінімумів і максимумів між променем, відображеним від поверхні структури, і променем, заломленим в епітаксialному шарі і відображеним від підкладки.

Необхідною умовою реалізації даного методу є відмінність оптичних констант плівки і підкладки, тобто або підкладка повинна бути сильно легованою відносно плівки, або плівка повинна бути сильно легованою відносно підкладки.

Вказана обставина звужує діапазон використання цього методу, він застосовний тільки до структур n-n+, p-p+, p-n+ і p+-n типів (знак + відноситься до підкладки, питомий електричний опір підкладки повинен бути не більше 0,01 Ом·см).

Вимірювання коефіцієнта віддзеркалення для германію здійснюються в діапазоні значень  $\lambda$  від 9 до 17 мкм, для кремнію – від 12 до 30 мкм.

Розрахунок величини  $d$  проводиться по формулі:

$$d = \frac{x\lambda_m\lambda_{m+x}}{2n \cos \psi (\lambda_m - \lambda_{m+x})} \quad (6.3)$$

де  $m$  і  $m+x$  – номери спостережуваних максимумів,  $x$  – число максимумів між  $\lambda_m$  і  $\lambda_{m+x}$ ,  $n$  – показник заломлення матеріалу плівки,  $\psi$  – кут заломлення в плівці.

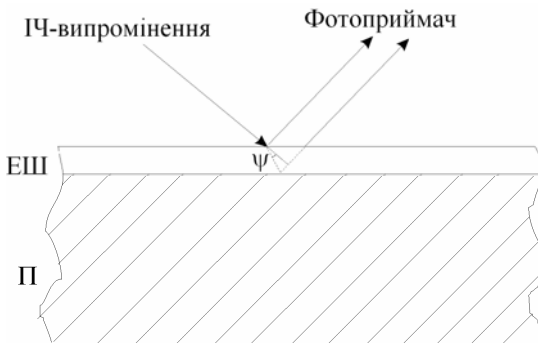


Рисунок 6.2 – Схема інтерференційного методу. ЕШ – епітаксіальний шар; П – підкладка;  $\psi$  – кут заломлення в плівці.

Для кремнію при куті падіння  $30^\circ$   $n=3,42$   $\psi=8,4^\circ$ ,  $\cos \psi=0,99$ . Метод не руйнує структуру і є достатньо точним при різкій межі розділу шар-підкладка. Діапазон значень  $d$ , що вимірюються, укладений в межах 1-30 мкм і вищий. Апаратурне оформлення методу достатньо складне і дороге, оскільки базовим засобом вимірювання є спектрофотометр (типу UKC, UR, "Спекорд" та їх аналогів.).

## 6.2 Порядок виконання роботи

- 1 Підготовка до роботи: ознайомитися з основними теоретичними положеннями до даної теми; ознайомитися з інструкціями до інтерференційного мікроскопу МІИ-4.
- 2 Отримати зразки епітаксіальних структур з косим та шаровим шліфами і виміряти товщину епітаксіального (напиленого) шару
  - а) методом косого та шарового шліфа;
  - б) інтерференційним методом.
- 3 Розрахувати товщину шарів та проаналізувати результати.

**Звіт повинен містити:**

– загальні відомості по методам вимірювання товщини епітаксіальних шарів;

- схему вимірювальних приладів та принцип їх дії;
- результати вимірювань і розрахунків;
- висновки.

### **6.3 Контрольні питання**

- 1 Руйнівні і неруйнівні методи визначення товщини епітаксіальних шарів.
- 2 Визначення товщини методом фарбування шліфа (а – косий шліф; б – кульовий шліф).
- 3 Оптичні методи визначення товщини.
- 4 Інтерференційні методи визначення товщини.
- 5 Спектральна залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі світла, що падає, для епітаксіальної структури.
- 6 Розрахунок товщини епітаксіального шару за інтерферограмою.
- 7 Вибір спектрального діапазону для проведення вимірювань.
- 8 Інтерферометр МІІІ-4. Оптична схема, порядок роботи.
- 9 Спектрофотометр СФ-16. Оптична схема, порядок роботи.
- 10 Техніка безпеки під час роботи з кислотами і лугами.

### **ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

- 1 Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология: учеб. для вузов. Ч. 1: Общая теория измерений. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
- 2 Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 2002. – 348 с.
- 3 Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология: учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2002. – 407 с.
- 4 Павлов. Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. - М.: Высш. школа, 1985, С. 4 - 35.
- 5 Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: Энергия, 1976.
- 6 Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых структур. - М.: Радио и связь, 1985, С. 62-76.
- 7 Работа с осциллографом [Електронний ресурс]/ Режим доступу: <http://www.electroclub.info/article/oscillograf.htm>