

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Фізика.

Модуль 4, 5, 6 «Електродинаміка. Постійний електричний струм. Електромагнетизм. Змінний електричний струм. Оптика»

методичні рекомендації
для виконання лабораторних робіт здобувачами першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Харчові технології»
спеціальності 181/G13 «Харчові технології»

Миколаїв
2025

УДК 536:539.1

Ф48

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 15.10.2025, протокол № 2.

Укладач

Вахоніна Лариса – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївського національного аграрного університету.

Рецензенти

Олексій Садовий - канд. тех. наук доцент, завідувач кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет.

Ставинський Андрій – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2025

ЗМІСТ

Вступ	4
Підготовка до виконання робіт.	4
Вказівки щодо допуску до виконання лабораторних робіт.....	5
Виконання лабораторних робіт та вимоги техніки безпеки.....	5
Відпрацювання лабораторних робіт.	6
Вимоги до оформлення графіків.	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «Розширення меж вимірювання електровимірювальних приладів».....	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «Визначення опору методом мостової схеми»	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 «Дослідження залежності опору металу від температури».....	20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 «Дослідження термоелектрорушійної сили термопари»	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 «Вивчення ефекта Холла».....	32
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 Визначення магнітного поля колового струму і визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі.	39
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 «Визначення питомого заряду методом магнетрона».....	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8 «Фізичні параметри біполярного транзистора».....	51
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9 «Внутрішній фотоефект у напівпровідниках».....	55
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10 «Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду».....	61
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11 «Дослідження залежності опору напівпровідників від температури».	67
ЛІТЕРАТУРА	78

Вступ

У процесі занять студенти вчаться застосовувати набуті теоретичні знання. Вивчення теорії на прикладах, взятих із життя і досягнень науки та техніки, чітка організація практичних знань, високі вимоги до студентів сприяють вихованню якостей, які повинен мати майбутній спеціаліст.

Студент має ґрунтовно опрацювати відповідний лекційний матеріал, визначати незрозумілі питання для з'ясування під час занять, виконувати лабораторні роботи та домашнє завдання.

Для засвоєння матеріалу, розширення та поглиблення знань, з'ясування функціональної залежності фізичних величин, встановлення зв'язку теорії з практикою, розвитку самостійного мислення і навичок самостійної роботи – виконання лабораторних робіт має першорядне значення. Отже, для виконання лабораторних робіт недостатньо формального знання фізичних законів. Для цього необхідне міркування, аналітично мислити, розуміти чому так, а не інакше.

Перед тим, як виконувати лабораторну роботу, студент повинен вивчити відповідний лекційний матеріал за літературою, рекомендованою викладачем, зрозуміти завдання до теми заняття, відповісти на запитання, поставлені до даної теми.

Підготовка до виконання робіт.

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен:

- опрацювати інструкцію до роботи, законспектувати її;
- знати мету виконання роботи та основні її завдання;
- усвідомити основні теоретичні положення і закони, на яких базується виконання роботи;
- якщо самостійне опрацювання матеріалу за літературою, вказаною в інструкції виявилось недостатнім для розуміння суті явищ чи процесів, слід звернутися за консультацією до викладача;
- ознайомитись з робочим місцем та обладнанням, яке використовується в процесі виконання роботи;
- якщо спосіб використання окремого обладнання студенту невідомий, то йому потрібно взяти у лаборанта технічну інструкцію до цього обладнання і опрацювати її;
- рівень роботи студента з обладнанням оцінює лаборант;
- чітко розмежувати величини, які слід виміряти в ході виконання роботи і величини, які будуть обчислені;
- знати порядок виконання роботи та послідовність операцій;

- підготувати таблиці для запису результатів вимірювань і обрахунків, а також папір для побудови графіків.

Вказівки щодо допуску до виконання лабораторних робіт

Допуск до виконання лабораторних робіт дає керівник занять. У співбесіді зі студентом (або бригадою) виявляється ступінь їх готовності до заняття. Якщо студент не може сформулювати основні положення теорії, на яких базується робота, описати послідовність виконання досліджень, не вміє працювати з обладнанням – то він до виконання роботи не допускається.

Після отримання допуску студенти одержують додатковий інструктаж на робочому місці стосовно конкретної роботи, уточнені завдання до роботи, беруть в лаборанта додаткове обладнання чи прилади. Допуск студентів до виконання робіт оцінюється і фіксується в лабораторному журналі.

Виконання лабораторних робіт та вимоги техніки безпеки.

При виконанні лабораторних робіт слід дотримуватись таких правил:

1. Дотримуватись розпорядку роботи в лабораторії і правил техніки безпеки, з якими студенти ознайомлені на вступному занятті та при допуску до виконання роботи.
2. Без перевірки викладачем або лаборантом готовності до дії установки і електричної схеми не можна починати вимірювання, щоб не зіпсувати прилади.
3. Не можна брати без дозволу прилади з інших робочих місць.
4. Якщо в процесі виконання роботи виникають неполадки в роботі приладів або обладнання, про це слід негайно повідомити керівника заняття і лаборанта. Самостійно налагоджувати роботу приладів не дозволяється.
5. Будьте обережні, в роботах використовується висока напруга.
6. Результати вимірювань занести до таблиці, заздалегідь продумавши їх форму, якщо вона не вказана в інструкції.
7. Вимірювання кожної величини проводити не менше трьох разів, щоб звести до мінімуму похибки.
8. Після закінчення експерименту, не розбираючи пристрою, слід обчислити кінцеві результати; якщо вони не задовільні, треба заново провести вимірювання.
9. Обговорити з керівником занять чи лаборантом отримані результати. Вони підписуються викладачем або лаборантом.
10. При захисті лабораторних робіт студент подає короткий письмовий звіт з результатами вимірювань, обчисленими величинами та побудованими

графіками, висновками. В процесі захисту він повинен відповісти на поставлені керівником заняття питання стосовно лабораторної роботи чи окремих її частин.

11.Рекомендується в кінці заняття звітувати за попередньо виконані лабораторні роботи.

12.Якщо студент не захистив більше трьох виконаних лабораторних робіт, він може бути не допущений до виконання наступних.

Відпрацювання лабораторних робіт.

- Якщо студент не був допущений до виконання робіт через свою невідповідність, або ж пропустив заняття по хворобі чи іншій причині, то відпрацювання пропущених робіт проводиться у дні та години, вказані у графіку роботи лабораторії.
- Студент повинен отримати допуск до заняття, виконати всі дослідження, обробити результати вимірювання і обговорити їх з викладачем чи лаборантом.
- В лабораторному журналі фіксується дата відпрацювання таких занять.

Вимоги до оформлення графіків.

При побудові графіків слід дотримуватись таких правил:

1. Графік повинен мати назву – залежність між якими величинами він показує.
2. Позначити осі координат і одиниці вимірювання величин.
3. Вибрати раціональний масштаб осей (прямий однаковий, прямий різний, обернений, логарифмічний, напівлогарифмічний, квадратичний тощо). Вибраний масштаб повинен на графіку зобразити залежність досліджуваних величин прямою лінією. Якщо в роботі вибір масштабу не вказано, зробіть це самі.
4. Вказати мічені (оцифровані) та глухі (неоцифровані) поділки шкал.
5. Графік повинен займати всю площу малюнка.
6. Лінія графіка повинна усереднювати визначені величини в межах похибок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

«Розширення меж вимірювання електровимірювальних приладів»

Мета: ознайомитись з принципом дії електровимірних приладів і методами розширення меж вимірювання цих приладів.

Електровимірні прилади безпосередньої оцінки засновані на використанні різних фізичних явищ, зв'язаних з проходженням електричного або утворенні електромагнітного поля. Такі фізичні явища, як, наприклад, взаємодія контурів, по яких проходить струм, з полем постійного магніту (магнітоелектричні прилади), взаємодія двох контурів з струмом (електромагнітні прилади), використовуються для перетворення вимірюваної величини в кутове або лінійне переміщення рухомої частини приладу.

Чутливістю електровимірного приладу називається відношення лінійного або кутового переміщення стрілки до зміни вимірюваної величини, що викликає це переміщення:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta x} = \frac{d\alpha}{dx},$$

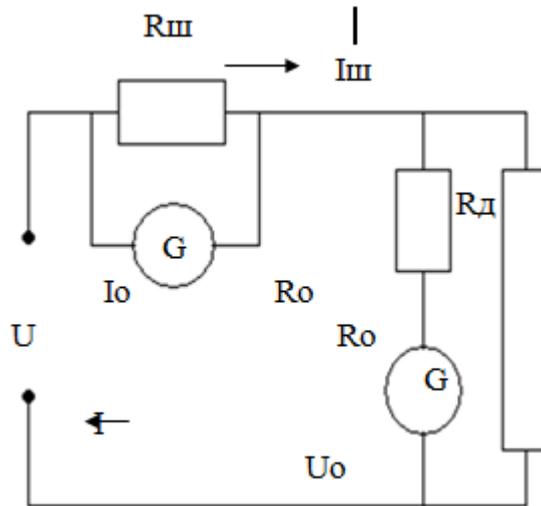
де: S – чутливість приладу, x – вимірювана величина, α – кутове або лінійне переміщення стрілки приладу.

Таке означення чутливості приладу не відноситься до інтегруючих приладів (лічильників), відлік яких не може повторюватись.

При рівномірній шкалі чутливість приладу постійна для будь-якої точки шкали. При нерівномірній шкалі чутливість приладу неоднакова, тобто, одній і тій же зміні вимірюваної величини в різних точках шкали відповідають різні лінійні або кутові переміщення стрілки. Чутливість приладу має розмірність, що залежить від характеру вимірюваної величини. Тому говорять: «чутливість до струму», «чутливість до напруги».

Іноді на приладах вказується величина, обернена до чутливості – це ціна однієї поділки – так звана *стала приладу*. Щоб визначити значення вимірюваної величини потрібно ціну поділки помножити на те число поділок, на яке показує стрілка приладу при вимірюванні.

Як відомо, амперметр застосовується для вимірювання струму і вмикається в коло послідовно з навантаженням, або з паралельним ввімкненням до нього шунта з опором $R_{ш}$, а вольтметр – паралельно до тих точок кола, між якими потрібно виміряти напругу, або в послідовному з'єднанні з додатковим опором R_d . На малюнку показано схематичне ввімкнення амперметра і вольтметра, де G – вимірний прилад з опором R_0 , який безпосередньо може виміряти силу струму до значення I_0 , і напругу до U_0 .



Так, як величина струму, що протікає через вимірний механізм, пропорційна напрузі, прикладений до затискачів приладу, то, очевидно, що принципової різниці у внутрішній будові амперметрів і вольтметрів може й не бути, тобто, будь-яким амперметром можна вимірювати напругу, а вольтметром – струм. Питання лише в тому, які будуть межі вимірювання приладом при такому його використанні і настільки змінюються параметри, а значить, і режим кола при ввімкненні в нього приладів, особливо якщо джерело, що живить це коло, має малу потужність. Щоб зміна режимів кола була незначною, опір амперметра повинен бути меншим, а опір вольтметра навпаки – більшим. З цієї точки зору важливим критерієм вольтметра є його внутрішній опір в Омх на 1 В шкали.

Кожний вимірний прилад базується на визначенні значення струму I_0 та напруги U_0 . Розширення меж вимірювання здійснюється або спеціальною конструкцією приладу або ввімкненням вимірного механізму через шунти у амперметрах або додаткові опори у вольтметрах.

А. Розширення меж вимірювання амперметра та вимірювання струму амперметром.

Амперметр – прилад, який застосовується для вимірювання величини струму. Він вмикається у коло послідовно зі споживачем. Будь-який електровимірних прилад при ввімкненні в коло не повинен вносити помітних змін в режим роботи кола. Отже амперметр повинен мати дуже малий внутрішній опір.

Для розширення меж вимірювання струму до приладу G приєднується паралельно провідник опору $R_{ш}$, що називається шунтом (рис. 1).

Опір шунта $R_{ш}$ розраховується таким чином. За першим законом Кіргофа маємо:

$$I = I_0 + I_{ш} \quad (1)$$

Де: I_0 – найбільший струм, який може виміряти прилад без шунта,

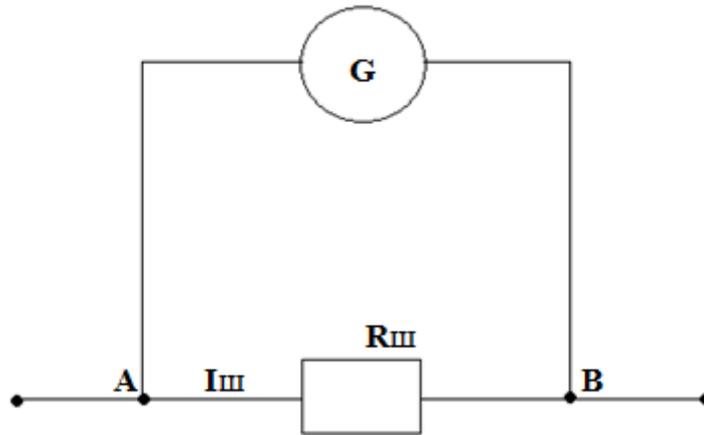


Рис. 1

I – найбільший струм, який буде вимірювати прилад з шунтом.

За другим законом Кіргофа для контура AR_0BR_mA маємо:

$$I_0 R_0 - I_{ш} R_{ш} = 0 \quad (2)$$

Підставляючи $I_{ш}$ з формули (1) в формулу (2), одержимо:

$I_0 R_0 = (I - I_0) R_{ш}$, звідки:

$$R_{ш} = \frac{I_0 R_0}{I - I_0} \quad (3)$$

Таким чином, для визначення опору шунта потрібно знати характеристики приладу R_0 , I_0 і те максимальне значення струму I , для якого розраховується шунт. Значення I_0 визначається з формули:

$$I_0 = K_i N \quad (4)$$

де: K_i – ціна поділки приладу по струму, N – число поділок на шкалі приладу.

Формулу (3) можна записати у такому вигляді:

$$R_{ш} = \frac{R_0}{n - I_0} \quad (5)$$

де:

$$n = \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

показує у скільки разів розширюється межа вимірювання амперметра.

Б. Розширення меж вимірювання вольтметра та вимірювання напруги вольтметром.

Вольтметр – прилад, яким вимірюється напруга. Він вмикається в коло паралельно і тому повинен мати великий внутрішній опір.

Для розширення меж вимірювання вольтметра послідовно з ним приєднується додатковий опір R_d (рис. 2), величина якого розраховується так. Нехай опір приладу R_o і він розрахований для вимірювання напруги до U_o . Необхідно розрахувати значення додаткового опору R_d , з яким прилад зможе вимірювати напругу до значення U . Очевидно, що:

$$U = U_d + U_o ; \quad (7)$$

$$I_o = \frac{U_o}{R_o} = \frac{U_d}{R_d} \quad (8)$$

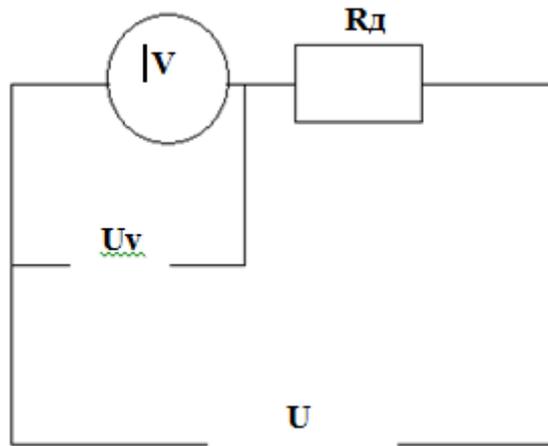


Рис. 2

Підставляючи U_d з (7) у (8), одержимо:

$$\frac{U_o}{R_o} = \frac{(U - U_o)}{R_d} \quad \text{звідки:}$$

$$R_d = \frac{R_o(U - U_o)}{U_o} = R_o(n - 1) \quad (9)$$

де: $n=U/U_o$ (10) показує, у скільки разів розширюється межа вимірювання вольтметра.

Таким чином, для визначення величини додаткового опору необхідно знати параметри (характеристики) приладу R_o , U , і те максимальне значення напруги U , для якого розраховується додатковий опір. Значення U_o для даного приладу можна визначити, знаючи ціну поділки за напругою K_o і кількість поділок N на шкалі приладу:

$$U_o = K_o N \quad (11)$$

Порядок виконання роботи

Зробити схему (рис. 3). Послідовно з навантаженням R_2 увімкнути досліджуваний прилад Р і зразковий РА.

Зняти залежність числа поділок шкали приладу Р від сили струму приладу РА; записати результати в таблицю. Побудувати графік залежності $n(I)$. визначити ціну поділок і чутливість приладу.

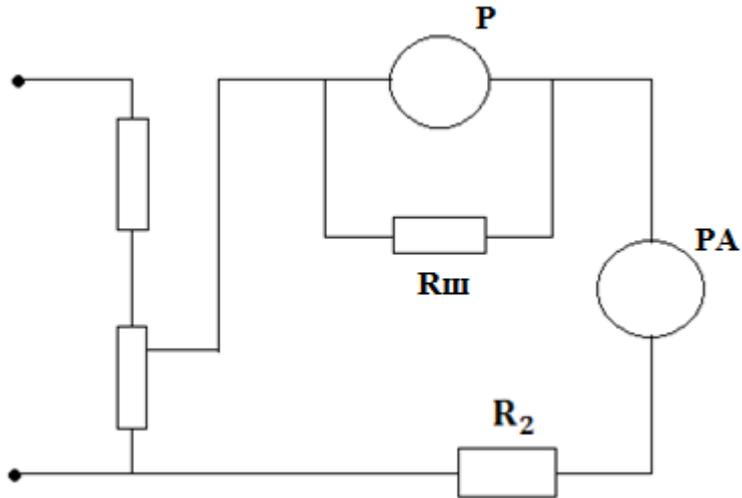


Рис. 3

Визначити коефіцієнт шунтування K і, знаючи опір шунта, визначити внутрішній опір амперметра R_A .

Таблиця 1.

№	N Число поділок	I mA
1		
2		
3		

2. Градування вольтметра по постійній напрузі. Як вольтметр використовується той же прилад, що і при виконанні попереднього завдання, до якого підключається додатковий резистор $R_n = R_2$.

Зібрати схему (рис. 4).

Зняти залежність числа поділок приладу n від напруги між точками А і В результати записати в таблицю 2.

Побудувати градуований графік $n(U)$.

Визначити ціну поділок і чутливість приладу.

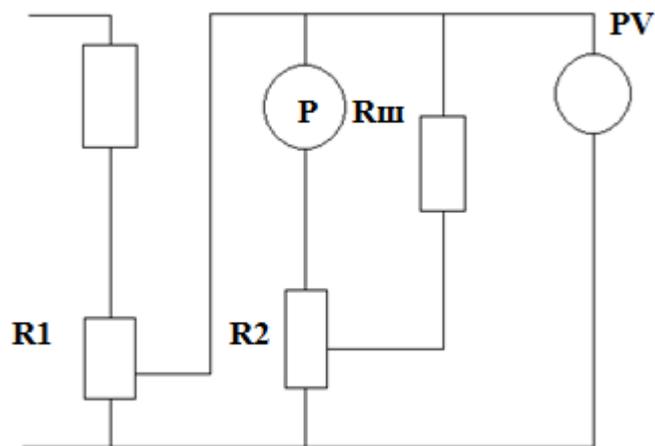


Рис. 4

Таблиця 2.

№	n число поділок	U mV
1		
2		
3		
Середнє		

Контрольні питання

1. Що називається шунтом і яке його призначення?
2. Виведіть формулу для визначення опору шунта, якщо задані характеристики приладу і найбільший струм, на який потрібно розрахувати прилад.
3. Що таке клас точності електровимірного приладу?
4. Поясніть принцип дії приладів магнітоелектричної системи.
5. Що називається додатковим опором і яке його призначення?
6. Як приєднуються до вимірного приладу шунт і додатковий опір? Обґрунтуйте відповідь.
7. Виведіть формулу для визначення величини додаткового опору, якщо задані характеристики приладу і найбільше значення напруги.
8. Що називається ціною поділки приладу?
9. Що називається чутливістю приладу?
10. Якщо прилад багатомезний, то як буде змінюватись його чутливість при переході з однієї межі вимірювань на іншу?
11. Яким основним вимогам повинні задовольняти амперметр і вольтметр?
12. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
13. Сформулюйте правила (закон) Кіргофа.

Додаткові теоретичні відомості

Клас точності — це задане у відсотках відношення допустимої основної абсолютної похибки вимірювального приладу в робочій частині шкали до верхньої межі діапазону вимірювань.

Основною похибкою називається похибка при нормальних умовах роботи приладу (певна температура, нормальне положення приладу, відсутність магнітних і електричних полів і т.д.). Причинами основної похибки є тертя в опорах рухомої частини приладу, неточність градуювання і нанесення шкали і т.д. Робочою частиною у випадку рівномірної шкали є вся шкала, для нерівномірної — від 25% до 100% від верхньої межі шкали.

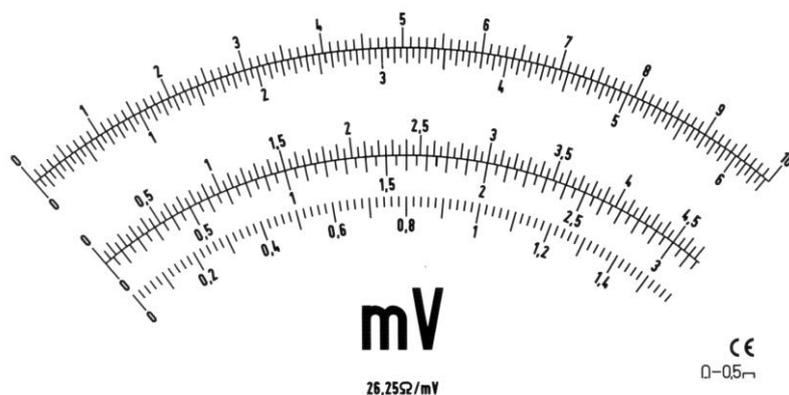
Додаткові похибки вимірювальних приладів, які залежать від зміни температури, частоти струму, положення приладу, впливу зовнішніх магнітних полів та ін., не повинні перевищувати значення класу точності.

Клас точності — це узагальнена характеристика засобу вимірювальної техніки, що визначається границями його допустимих основних і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентуються стандартами на окремі види засобів вимірювань.

Наприклад, якщо манометр на верхню межу вимірювання 500 кгс/см^2 має клас точності 2, то це означає, що максимально можлива похибка становить 2 відсотки від 500 кгс/см^2 , що відповідає абсолютній похибці в 10 кгс/см^2 .

Значення класу точності відповідно до стандарту, як правило є написано на шкалі приладів. Залежно від ступеня точності показів вимірювальні прилади поділяються на сім класів, що позначаються відповідно числами: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Клас точності приладу вказується на його шкалі числом, вміщеним всередині кола[2]. Промислові прилади, зазвичай мають наступні класи точності: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Класи точності цифрових вимірювальних приладів із вбудованими обчислювальними пристроями для додаткової обробки результатів вимірювань слід встановлювати без урахування режиму обробки.



Для встановлення похибок засобу вимірювання, він періодично повіряється зразковими засобами, які за класом точності на декілька класів вищі. Повірка проводиться спочатку при збільшенні вимірюваної величини (прямий хід), а потім при її зменшенні (зворотний хід). Якщо при повірці приладу встановлено, що найбільша приведена похибка не перевищує або дорівнює класу точності, то прилад визнається придатним для подальшої експлуатації.

Ціна поділки шкали (стала приладу) аналогового вимірювального приладу — різниця значень вимірюваної величини, що відповідає двом сусіднім позначкам шкали.

Приклад. Якщо наконечник індикатора годинникового типу перемістити на 0,01 мм, то стрілка зсунеться на одну поділку великої кругової шкали, отже, ціна поділки складає 0,01 мм (див. рисунок).

Ціна поділки залежить від верхньої і нижньої межі вимірювання приладу і від числа поділок шкали. Особливо це треба мати на увазі тоді, коли використовується при вимірюванні прилад, в якого верхня межа вимірювань має декілька значень.

Величина, обернена до сталої приладу, називається чутливістю приладу. Чутливість приладу визначається відношенням збільшення кутового або лінійного переміщення покажчика приладу в градусах, міліметрах або просто в поділках шкали до відповідного збільшення тієї величини, що вимірюється.

В цифрових вимірювальних приладах (приладах з цифровим табло) метрологічною характеристикою, за заміною ціну поділки шкали є крок дискретності.

Багатомежні прилади – це такі прилади, які дозволяють розширювати межі вимірювання за рахунок зміни ціни поділки. Сучасні багатомежні прилади також надають можливість вимірювання як, наприклад, напруги, так і сили струму, тощо. При переході з однієї межі у іншу, багатомежний прилад змінює свою чутливість за рахунок ціни поділки.

Слід пом'ятати, що амперметр потрібно під'єднувати послідовно зі споживачем; а вольтметр – паралельно.

Найпростіше електричне коло може складатися з джерела струму, споживача опору R , з'єднувальних провідників, амперметра і вольтметра. **Закон Ома для ділянки електричного кола:** на деякій ділянці кола сила струму I прямо пропорційна напрузі U і обернено пропорційна опору R ділянки:

$$I = \frac{U}{R}$$

Перший закон Кірхгофа (Закон струмів Кірхгофа) говорить, що алгебраїчна сума струмів, що збігаються у вузлі ланцюга дорівнює нулю (значення впливають струмів беруться зі зворотним знаком):

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0$$

Іншими словами, скільки струму втікає у вузол, стільки з нього і впливає. Даний закон впливає з закону збереження заряду. Якщо ланцюг містить p вузлів, то вона описується $p - 1$ рівняннями струмів. Цей закон може застосовуватися і для інших фізичних явищ (наприклад, водяні труби), де є закон збереження величини і потік цієї величини.

Другий закон Кірхгофа (Закон напруг Кірхгофа) говорить, що алгебраїчна сума падінь напружень по будь-якому замкнутому контуру кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють уздовж цього ж контура. Якщо в контурі немає ЕРС, то сумарне падіння напруги дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

«Визначення опору методом мостової схеми»

Мета роботи: Вивчити метод мостової схеми і визначити невідомі опори цим методом.

Прилади і приналежності: відомий опір ($R=470$ Ом), невідомі опори (R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}); реохорд і гальванометр (нуль-індикатор); джерело постійної напруги.

Теоретичні відомості. Одним з найбільших точних методів вимірювання опорів є метод моста Уїтстона. Схема моста Уїтстона зображена на малюнку. Між клемми А і В закріплено калібровий дріт-реохорд, що має рухомий контакт D; I – постійний струм від джерела постійного струму; R – відомий еталонний опір; R_x – невідомий опір; Г – гальванометр; l_1 і l_2 – плечі реохорда (довжина дроту).

Метод вимірювання опору при допомозі моста Уїтстона засновано на порівнянні невідомого опору з відомим опором. Нехай струм в плечах моста і в діагоналі CD спрямовані так, як показано на рис.1, тоді, згідно правилам Кірхгофа для розгалуженого кола, можна скласти такі 5 рівнянь з п'ятьма невідомими:

$$\text{Для вузла C: } I_x - I_x - I_x = 0 \quad (1)$$

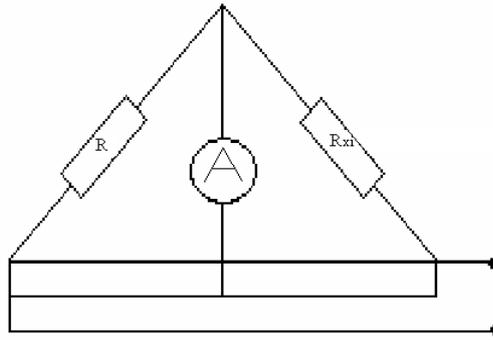
$$\text{Для вузла D: } I_1 - I_2 - I_r = 0 \quad (2)$$

$$\text{Для контура ACDA: } I_x R_x + I_r R_r = I_1 R_1 \quad (3)$$

$$\text{Для контура АВЕА: } I_1 R_1 + I_2 R_2 = U \quad (4)$$

$$\text{Для контура СВDC: } IR - I_2 R_2 - I_r R_r = 0 \quad (5)$$

Де R_r – опір гальванометра; R_2 і R_1 – опір «плечей» l_1 і l_2 – реохорда.



Змінюючи положення рухомого контакту D реохорда (і таким чином змінюючи співвідношення між l_1 і l_2), можливо домогтися того, щоб потенціал точки D дорівнював би потенціалу точки C ($\varphi_D = \varphi_C$)

В цьому випадку струм через гальванометр не іде (міст збалансовано). Враховуючи це ($I_r=0$), рівняння (1-5) можна спростити:

$$I_x = I_r \quad (6)$$

$$I_1 = I_2 \quad (7)$$

$$I_x R_x = I_x R_x \quad (8)$$

$$IR = I_2 R_2 \quad (9)$$

Поділивши два основні рівняння одне на одне отримаємо:

$$\frac{I_x R_x}{IR} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} \quad (10)$$

Враховуючи співвідношення (6) і (7) вираз (10) можна простити:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S} \quad (11) \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S} \quad (12)$$

де ρ - питомий опір дроту реохорда; S – площа поперечного перерізу дроту.

Підставляючи значення R_2 і R_1 в співвідношення (11), отримаємо формулу для визначення питомого опору:

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}$$

Таким чином, підібравши відповідну довжину «плечей» реохорда l_1 і l_2 і знаючи еталонний опір R, можна знайти R_x .

Виконання роботи

1. Скласти схему відповідно рис. 1 з резистором R_x .

2. Після перевірки схеми викладачем включити електроживлення. Переміщуючи повзунок (рухомий контакт) реохорда l_1 і l_2 , записати результати в таблицю вимірів.

3. По формулі $R_x = \frac{l_1}{l_2} R$ знайти невідомий опір. Результати занести у таблицю.

4. Роз'єднати R_{x1} і підключити замість нього R_{x2} , потім R_{x3} , повторити виміри і визначити R_{x2} і R_{x3} . Результати занести до таблиці.

5. Приєднати до клеми А і С три резистори з'єднані послідовно (R_{x1} , R_{x2} , R_{x3}) і виміряти їх загальний опір згідно пункту 2 і 3. Результати занести до таблиці.

6. Приєднати до клеми А і С три резистори R_{x1} , R_{x2} , R_{x3} з'єднаних паралельно і виміряти їх загальний опір згідно пункту 2 і 3. Результати занести до таблиці.

7. Знаючи величину опорів при R_{x1} , R_{x2} , R_{x3} вирахувати по теоретичним формулам опір при їх паралельному і послідовному з'єднанні. Записати результати до таблиці.

$$R_{заг.} = R_1 + R_2 + R_3 \quad \frac{1}{R_{заг.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

8. Знайти похибку метода вимірювання враховуючи, що

$$\frac{\Delta R}{R_{nth}} \times 100\% = 2\% ; \Delta R = R_{тер} - R_{досл.}$$

№	I1	I2	Rx1	Rx2	Rx3	Результати отримані дослідним шляхом		Теоретичні розрахунки	
						Rпосл	Rпар	Rпосл	Rпар

Контрольні питання.

1. Сформулювати і записати правило Кірхгофа.
2. Запишіть формулу опору довгого провідника.
3. Що таке питомий опір?
4. Як визначити повний опір при послідовному та паралельному з'єднанні провідників?

Додаткові теоретичні відомості

Закони Кірхгофа (або правила Кірхгофа) - співвідношення, які виконуються між струмами і напругами на ділянках будь електричного кола. Правила Кірхгофа дозволяють розраховувати будь-які електричні кола постійного та квазістаціонарного струму. Мають особливе значення в електротехніці через свою універсальність, так як придатні для вирішення багатьох завдань теорії електричних ланцюгів. Застосування правил Кірхгофа до лінійного ланцюга дозволяє отримати систему лінійних рівнянь щодо струмів, і відповідно, знайти значення струмів на всіх гілках ланцюга. Сформульовано Густавом Кірхгофа в 1845. Для формулювання законів Кірхгофа, в електричного кола виділяються вузли - точки з'єднання трьох і більше провідників і контури - замкнуті шляхи з провідників. При цьому кожен провідник може входити в кілька контурів.

Перший закон Кірхгофа (Закон струмів Кірхгофа) говорить, що алгебраїчна сума струмів, що збігаються у вузлі ланцюга дорівнює нулю (значення впливають струмів беруться зі зворотним знаком):

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0$$

Іншими словами, скільки струму втікає у вузол, стільки з нього і випливає. Даний закон випливає з закону збереження заряду. Якщо ланцюг містить p вузлів, то вона описується $p - 1$ рівняннями струмів. Цей закон може застосовуватися і для інших фізичних явищ (наприклад, водяні труби), де є закон збереження величини і потік цієї величини.

Другий закон Кірхгофа (Закон напруг Кірхгофа) говорить, що алгебраїчна сума падінь напружень по будь-якому замкнутому контуру кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють уздовж цього ж контура. Якщо в контурі немає ЕРС, то сумарне падіння напруги дорівнює нулю:

$$\text{для постійних напруг} \quad \sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k$$

$$\text{для змінних напруг} \quad \sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k i_k + \sum_{k=1}^m U_{lk} + \sum_{k=1}^m U_{ck}$$

Іншими словами, при обході ланцюга по контуру, потенціал, змінюючись, повертається до початкового значення.

Формула опору довгого провідника: $R = \rho \frac{l}{S}$, де ρ - питомий опір провідника, l - довжина провідника, S - поперечний переріз провідника. вимірюється в омах (1 Ом). Питомий опір – це опір конкретного матеріалу,

який приходить на одиницю довжини і одиницю поперечного перерізу.

Питомий опір є табличним значенням. Визначається за формулою: $\rho = \frac{R \cdot S}{l}$.

Провідники можуть бути сполучені послідовно один за одним ; у такому сполученні струм проходить через усі провідники не розгалужуючись.



Знайдемо загальний опір такого кола. На підставі дослідної програми встановлено:

при послідовному сполученні струм у всіх ділянках кола однаковий, $I = \text{const}$,

при послідовному сполученні напруга у всьому колі дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (*)$$

На підставі закону Ома можна записати $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$; $U = IR$.

Підставимо ці значення у формулу (*), дістанемо

$$IR = IR_1 = IR_2 = \dots = IR_n$$

Скоротивши на I , остаточно маємо:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \text{ або } R = \sum_{i=1}^n R_i,$$

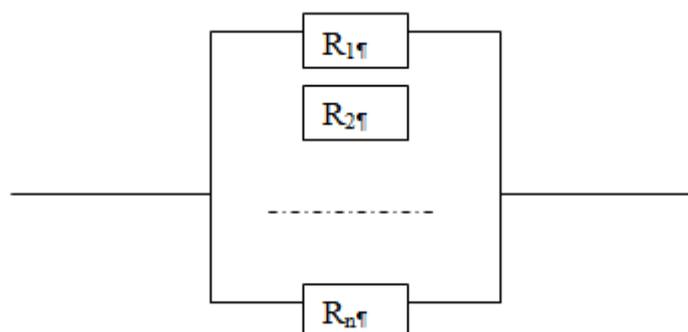
Отже, при послідовному сполученні загальний опір кола дорівнює сумі опорів окремих його провідників (споживачів).

Поділивши $U_1 = IR_1$ на $U_2 = IR_2$, дістанемо

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Тобто при послідовному сполученні напруги на окремих ділянках кола прямо пропорційні їх опорам.

При паралельному сполученні струм розгалужується на струми I_1, I_2, \dots, I_n



Дослід показує що при паралельному сполученні:

1) Струм на ділянці кола дорівнює сумі струмів в окремих витках цього кола: $I=I_1+I_2+\dots+I_n$

2) Напруги на кожній з виток однакові: $U=U_1=U_2=\dots=\text{const}$, або $I_1R_1=I_2R_2$, звідки дістанемо

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Отже, струми в окремих витках обернено пропорційні опорам виток. Враховуючи, що $I=I_1+I_2+\dots+I_n$, використавши закон Ома, дістанемо

$$I = \frac{U}{R}, I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, \dots, I_n = \frac{U}{R_n}$$

Або

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n},$$

Скоротивши на U , остаточно маємо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Таким чином, повний опір при послідовному з'єднанні провідників визначається за формулою: $R_{\text{заг}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$. Повний опір при паралельному з'єднанні провідників визначається за формулою:

$$\frac{1}{R_{\text{заг}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

«Дослідження залежності опору металу від температури».

Мета роботи: Дослідним шляхом встановити закон зміни опору провідника при його нагріванні

Прилади та матеріали: Експериментальна установка, яка має досліджуваний термоопір, термостат з нагрівачем і стабілізатор струму. Джерело постійної напруги ($U=16\text{В}$). Міліамперметр постійного струму ($I_{\text{max}}=200\text{мА}$). Цифровий вольтметр або мультиметр для вимірювання постійної напруги ($U_{\text{max}}=20\text{В}$).

Теоретичні відомості. Метали відносяться до провідників. В таблиці Менделєєва метали розташовані ближче до середини, що говорить про велику кількість електронів в атомах металів на електронних оболонках. Метали мають велику густину та сильні сили взаємодії між сусідніми атомами. Завдяки цій взаємодії електрони з останніх орбіт атомів легко відриваються і стають вільними (приймають участь в тепловому хаотичному русі), а атоми у вузлах

кристалічної ґрадки перетворюються на позитивні іони. Відповідно метали мають електронну провідність.

Причина опору в металах полягає:

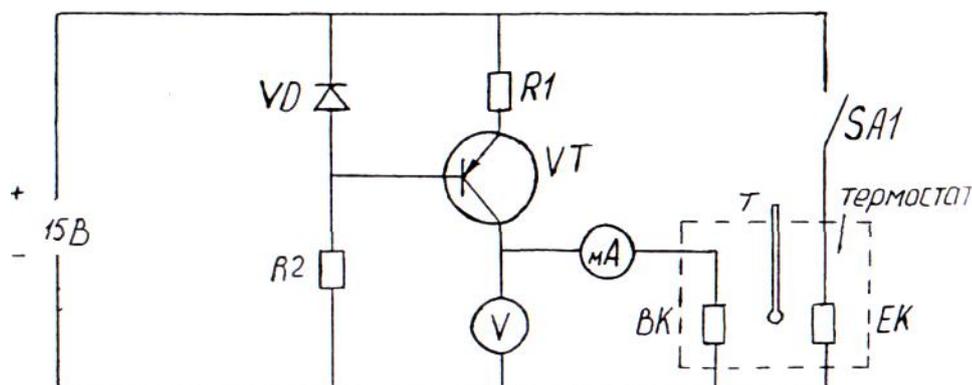
- в тепловому хаотичному русі заряджених частинок, який може припинитися тільки при температурі абсолютного нуля.

($T=0\text{K} \rightarrow t^0=-273\text{ }^{\circ}\text{C}$);

- Взаємодії з протилежними зарядженими частинками при протіканні електричного струму.

У провідників опір з підвищенням температури зростає.

$$R = R_0(1 + \alpha t^0)$$



Електрична принципова схема є видом електричної схеми виробу, що дає найповніше уявлення про склад і принцип його роботи. При виконанні схем цифрової обчислювальної техніки керуються ГОСТ 2.708-81. Цей вид кресленика не враховує габаритних розмірів і реального розташування деталей об'єкта. За рівнем абстракції принципові електричні схеми займають середню позицію між функціональними і монтажними схемами.

На принциповій електричній схемі зображуються всі складові частини виробу і зв'язки між ними, та елементи, якими закінчуються вхідні та вихідні ланки електричних кіл (роз'єми, затискачі і т.п.).

Порядок виконання роботи

1) Підключити до експериментальної установки цифровий вольтметр ($U_{\max}=20\text{V}$).

2) Увімкнути живлення тумблером SA1. Значення початкової температури і напруги на термометрі ВК занести до таб.1. Сила струму у колі постійна $I = 16\text{mA}$.

3) Визначити і записати до таб.1 значення падіння напруги U_1 і U_2 на термоопорі при зміні температури через кожні 5°C . Провести виміри U як при нагріванні термоопору (U_1), так і при його охолодженні (U_2).

Таблиця 1

t °C	25	30	35	40	45	50	55	60	65
I, mA	16 · 10 ⁻³								
U ₁ , В									
U ₂ , В									
U _{ср} , В									
R, Ом									

Обробка результатів;

1) По даним таб.1 визначити середнє значення падіння напруги на термоопорі і його опір для всіх значень температури. Результати занести до таб. 1.

$$U_{ср} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

$$R = \frac{U_{ср}}{I}$$

2) По даним таб.1 побудувати графік залежності: $R = f(t)$

Контрольні питання

1. Яка природа струму в металах?
2. В чому полягає причина опору в металах?
3. Яка залежність опору від температури в металах і чим пояснюється така залежність?
4. Поясніть призначення елементів схеми.
5. В чому полягає відмінність металів від діелектриків?

Додаткові теоретичні відомості

Метали відносяться до провідників. В таблиці Менделєєва метали розташовані ближче до середини, що говорить про велику кількість електронів в атомах металів на електронних оболонках. Метали мають велику густину та сильні сили взаємодії між сусідніми атомами. Завдяки цій взаємодії електрони з останніх орбіт атомів легко відриваються і стають вільними (приймають участь в тепловому хаотичному русі), а атоми у вузлах кристалічної ґратки перетворюються на позитивні іони. Відповідно метали мають електронну провідність.

Метали у твердому стані мають кристалічну будову. Частинки в кристалах розташовані в певному порядку, утворюючи просторову

(кристалічну) грати. Як вам вже відомо, в будь-якому металі частина валентних електронів покидає свої місця в атомі, в результаті чого атом перетворюється в позитивний іон. У вузлах кристалічної-вої решітки металу розташовані позитивні іони, а в просторі між ни-ми рухаються вільні електрони (електронний газ), тобто не пов'язані з ядрами своїх атомів.

Негативний заряд усіх вільних електронів за абсолютним значенням дорівнює позитивному заряду всіх іонів решітки. Тому в звичайних умовах метал електрично нейтральний.

Які ж електричні заряди рухаються під дією електричного поля в металевих провідниках? Ми можемо припустити, що під дією електричного поля рухаються вільні електрони. Але це наше припущення потребує доказів. У 1899 р. К. Рікке на трамвайній підстанції у Штуттгарті включив в головний провід, що живить трамвайні лінії, послідовно один одному торцями три тісно притиснутих циліндра; два крайніх були мідними, а середній - алюмінієвим. Через ці циліндри більше року проходив електричний струм. Провівши ретельний аналіз того місця, де циліндри контактували, К. Рікке не виявив в міді атомів алюмінію, а в алюмінії - атомів міді, тобто дифузія не відбулася. Таким чином, він експериментально довів, що при проходженні по провідникові електричного струму іони не переміщуються. Слідчий-но, переміщуються одні лише вільні електрони, а вони у всіх речовин однакові.

Існування електронів провідності в металах було доведено вченими і в іншому досвіді. Якщо привести в швидке обертання дротяну котушку, а потім її різко зупинити, то в такому колі електровимірювальні прилади покаже наявність короткочасного струму, хоча в ланцюзі немає джерела струму. Це продовжували рухатися електрони провідності. Отже, електричний струм у металевих провідниках є впорядкований рух вільних електронів, під дією електричного поля

Якщо в провіднику немає електричного поля, то електрони рухаються хаотично, аналогічно тому, як рухаються молекули газів або рідин. У кожний момент часу швидкості різних електронів відрізняються по модулях і за напрямками. Якщо ж у провіднику створено електричне поле, то електрони, зберігаючи своє хаотичний рух, починають зміщуватися у бік позитивного полюса джерела. Разом з безладним рухом електронів виникає і упорядкований їх перенесення - дрейф.

Швидкість упорядкованого руху електронів у провіднику під дією електричного поля невелика - кілька міліметрів в секунду, а іноді і ще менше. Але як тільки в провіднику виникає електричне поле, воно з величезною швидкістю, близькою до швидкості світла у вакуумі (300 000 км / с), поширюється по всій довжині провідника.

Одночасно з поширенням електричного поля всі електрони починають рухатися в одному напрямку по всій довжині провідника. Так, наприклад, при замиканні ланцюга електричної лампи в впорядкований рух приходять і електрони, наявні в спіралі лампи.

Зрозуміти це допоможе порівняння електричного струму з плином води у водопроводі, а поширення електричного поля - з поширенням тиску води. При підйомі води в водонапірну вежу дуже швидко по всій водопровідній системі поширюється тиск (напір) води. Коли ми відкриваємо кран, то вода вже знаходиться під тиском і починає текти. Але з крана тече та вода, яка була в ньому, а вода з башти дійде до крана багато пізніше, тому що рух води відбувається з меншою швидкістю, ніж поширеною-ня тиску.

Коли говорять про швидкість поширення електричного струму в провіднику, то мають на увазі швидкість розповсюдження по провіднику електричного поля.

Електричний сигнал, посланий, наприклад, по проводах з Москви до Владивостока ($s = 8000$ км), приходять туди приблизно через $0,03$ с.

Опір в металах – це причини, які заважають впорядкованому руху заряджених частинок і приводять до втрати електричної енергії. Причина опору в металах полягає: в тепловому хаотичному русі заряджених частинок, який може припинитися тільки при температурі абсолютного нуля ($T=0\text{K} \rightarrow t^0=-273$ °C); взаємодії з протилежними зарядженими частинками при протіканні електричного струму.

Із збільшенням температури у металах збільшується і опір, прямо пропорційно, оскільки, збільшується тепловий хаотичний рух.

Метали відносяться до провідників, які мають у своєму складі вільні носії електричного заряду, які можуть переносити електричну енергію від постачальника до споживача. А діелектрики – це речовини, які в своєму складі не мають вільних носіїв електричного заряду і не проводять електричний струм.

До провідників належать речовини, які мають заряджені частинки, що здатні рухатись впорядковано по всьому об'єму тіла під дією електричного поля. Заряди цих частинок називають вільними зарядами. Провідниками є всі метали, деякі хімічні сполуки, водні розчини солей, кислот, лугів, розплави солей, іонізовані гази. Розглянемо поведінку в електричному полі тільки твердих металевих провідників. У металах носіями вільних зарядів є вільні електрони. Їх називають електронами провідності.

Під час утворення металу з нейтральних атомів внаслідок взаємодії між ними електрони зовнішніх оболонок атомів повністю втрачають зв'язки зі своїми атомами і стають "власністю" всього провідника в цілому. У результаті позитивно заряджені іони оточені негативно зарядженим газом, що

утворюється колективізованими електронами. Вільні електрони беруть участь у тепловому русі і можуть переміщуватися по шматку металу в будь-якому напрямі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

«Дослідження термоелектрорушійної сили термопари»

Мета роботи: визначити залежність між термоелектрорушійною силою і різницею температур спаїв термопари. Побудувати градусовочну криву термопари.

Прилади і обладнання: термопара; чутливий гальванометр; два термометра (від 0° до 100° С); два термостати; електричне коло з живленням і нагрівачем.

Теоретичні відомості. При з'єднанні двох різних металів (наприклад мідь – залізо, хромель – константан і мідь і т. п.) між ними виникає так звана контактна різниця потенціалів, але її неможливо використати для збудження струму в замкнутому колі, якщо температура контактів, спаїв однакова

Але якщо підігрівати, чи охолоджувати лише один зі спаїв, то завдяки різниці температур спаїв в замкнутому колі виникає струм, який можливо виміряти чутливим приладом.

Величина термоелектрорушійної сили (ТЕРС) термопари залежить не тільки від температур спаїв, але і від природи металів, що створюють дану термопару, тобто від роботи виходу електронів і концентрації електронів у металі.

Робота виходу електронів визначається тою енергією, яку повинен мати електрон щоб вийти з поверхні металу в навколишній простір.

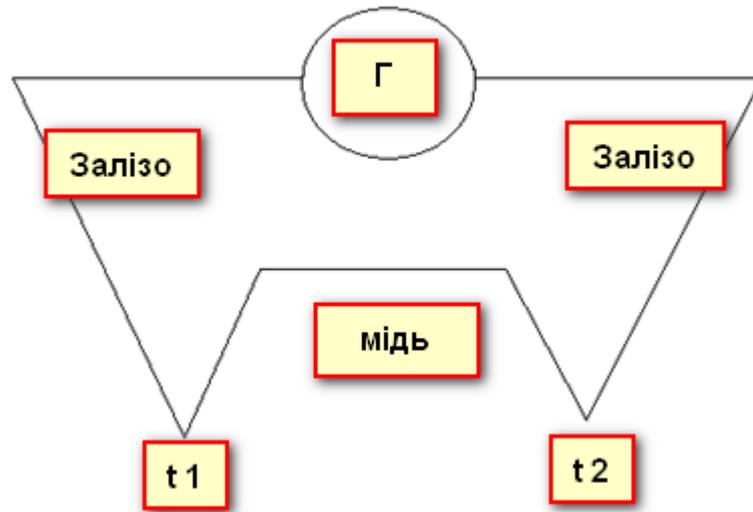
Концентрація електронів визначається кількістю електронів в 1 м³ цього металу.

На рис.1 зображена принципова схема термопари де використовується контактна різниця потенціалів двох спаїв, які мають різну температуру.

Якщо підігрівати чи охолоджувати один із спаїв, то внаслідок різниці температур спаїв кожен з них буде мати свою контактну різницю потенціалів $T_1=T_2$ і $U_1=U_2$, а потім у колі виникає так звана термоелектрорушійна сила, яка викличе термоелектричний струм.

Величина електрорушійної сили термопари залежить не тільки від різниці температури спаїв, але і природи металів, що створюють цю термопару (робота виходу електронів і їх концентрація).

Якщо різниця температур спаїв порядку 100 С, то термо – ЕРС термопари змінюється прямо пропорційно різниці температур спаїв. $E=k(t_1-t_2)$



Виконання роботи

1. Записати термопару Т холодного спаю.
2. Перемикачем К замкнути живлення нагрівального елемента і нагріти термостат (4) на $4^{\circ} - 5^{\circ}\text{C}$, після чого вимкнути живлення нагрівального елемента. Коли температура стабілізується, визначити по шкалі мілівольтметра величину ТЕРС. Температуру нагрітого спаю T_H і відповідну їй ТЕРС занести до таблиці вимірювання (таб.1).
3. Продовжити нагрівати до $60^{\circ} - 70^{\circ}\text{C}$ виконуючи вимірювання згідно пункту 2. Періодично контролювати температуру холодного спаю. Результати занести у таблицю 1.
4. Виключити нагрівний елемент і вимірювати ТЕРС при охолодженні спаю С, при тих же температурах, як і при нагріванні. Дані занести в таблицю.
5. Знайти середнє значення ТЕРС одержані при нагріванні спаю і при його охолодженні.
6. Відкласти на графіку на осі абсцис значення різниці температур, а на осі ординат Е в мікрровольтах і побудувати графік функції $E = f(T_H - T_X)$
7. По графіку $E = f(T_H - T_X)$ знайти величину К, як тангенс кута нахилу отриманої градуировочної лінії.

Таблиця 1

№	T_x	T_H	$E_{\text{нагр.}}$	$E_{\text{охол.}}$	$E_{\text{сер.}}$

Контрольні питання.

1. Що називається роботою виходу електрона з металу?
2. Чим обумовлена робота виходу електрона з металу?
3. Що називається термоелектрорушійною силою і від чого вона залежить?
4. Що називається диференціальною електрорушійною силою?
5. Намалюйте схему за якою будете градуювати термопару.
6. Чому при однаковій різниці температур різні термопари мають різні ЕРС?
7. Які різниці температур можна вимірювати термопарою, що застосовується в цій роботі?
8. Чи буде відрізнятися ЕРС термопари, кінці якої зварені, від величини ЕРС термопари кінці якої спаяні?
9. Де застосовуються термопари?

Додаткові теоретичні відомості

Електрони провідності металу здійснюють неупорядкований тепловий рух. Деякі електрони при цьому покидають метал і утворюють електронну хмарку поблизу поверхні металу порядку декількох міжатомних відстаней ($d_a \sim 10^{-10} - 10^{-9}$ м). На поверхні металу внаслідок цього залишається надлишок позитивних іонів. Ці заряди й електронна хмарка утворюють подвійний електричний шар, електричне поле якого перешкоджає вильоту електронів з металу. Тому при звичайних температурах вільні електрони практично не покидають метал. *Мінімальна робота, яка необхідна для видалення електрона з металу, називається **роботою виходу електрона з металу** $A_{вих}$:*

$$A_{вих} = e\Delta\phi,$$

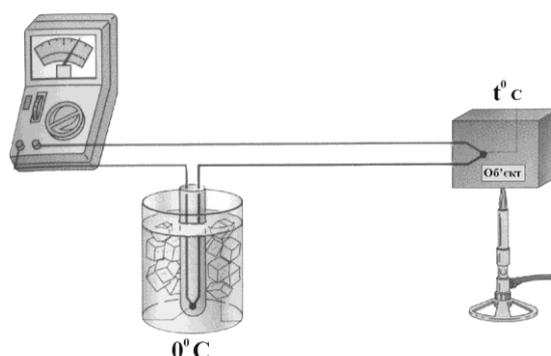
де e - заряд електрона, $\Delta\phi$ - поверхнева різниця потенціалів.

Робота виходу електрона з металу обумовлена від температури сплавів і від природи металу, що створюють дану температура. ***Терморушійна сила*** – це робота сторонніх сил по розподілу електронного заряду в джерелі струму і створення на його полюсах електронного поля. Вона залежить від температури і природи металів, що створюють на термопару.

Якщо різниця температур сплавів порядку 100°C , то термо ЕРС термопари змінюється прямо пропорційно різниці сплавів і $E = k(t_1 - t_2)$, де k – термоелектрична рушійна сила; t_1 – початкова температура; t_2 – кінцева температура. ЕРС спаяння і ЕРС зварення відрізняються одна від одної, тому що при зваренні з'являється новий вид металу і електриці потрібно переходити вже від одного металу до другого, а від другого до третього.

Використання термопари є одним з способів контролю температури в печі. Термопара являє собою металічний провід з особливих сплавів, дві жили якого спаяні між собою, і спай розміщений в контрольовану зону печі. Вільні

кінці проводу виведені за межі нагрівальної зони і з'єднані з прибором, показуючим перетворений сигнал поступаючий від спаю термопари. Термопара, яка знаходиться в печі, захована у вогнестійкий чохол, що захищає її від агресивного середовища печі.



Явище термоелектронної емісії

Провідність металів зумовлена наявністю вільних електронів, які рухаються подібно до частинок ідеального газу поміж іонами кристалічної ґратки металу. Внаслідок зіткнень вільних електронів між собою, а також з іонами ґратки встановлюється енергетично рівноважний розподіл електронів. Повна енергія електронів у ґратці - від'ємна. Це означає, що при вильоті електрону з металу на нього діє сила, яка намагається повернути його назад у метал. Для виведення електрона з металу в вакуум необхідно виконати роботу проти цих сил, яка називається роботою виходу.

Роботою виходу називається мінімальна робота, яку повинен здійснити електрон, щоб вирватись за межі даного металу в вакуум. Цю роботу можна

також характеризувати різницею потенціалів у металі та поза ним: $\phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{e}$, де $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Робота виходу A є різною для різних металів, і залежить від температури та від стану їх поверхні. При підвищенні температури деякі електрони внаслідок хаотичного руху набувають достатньо велику кінетичну енергію і можуть вилетіти за межі металу. Випускання електронів нагрітими провідниками називають термоелектронною емісією. Це явище використовується в електронних лампах та у багатьох інших електровакуумних приладах.

Отже, величина термо-е.р.с. ϵ прямопропорційно залежить від різниці температур спаїв ΔT , а також від природи металів контакту. На величину термоерс впливають також дифузійні переходи електронів з одного металу до іншого внаслідок градієнту температур вздовж провідника при нагріванні

одного з контактів. Зазначимо, що $\alpha = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta T}$, тобто коефіцієнт термоерс чисельно

дорівнює термоелектрорушійній силі, що виникає при різниці температур спаїв в 1К. Вимірюється коефіцієнт термоерс в В/К; мВ/К і мкВ/К.

Закон електромагнітної індукції в диференціальній формі для випадку незмінного контура.

Закон електромагнітної індукції в диференціальній формі задається другим рівнянням Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

де \mathbf{E} — напруженість електричного поля, \mathbf{B} — магнітна індукція, c — швидкість світла у вакуумі.

Електричне поле, яке виникає при зміні магнітного поля призводить до появи електрорушійної сили.

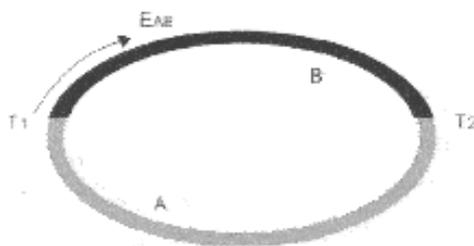
Для виготовлення термопар найчастіше використовують термоелектродний дріт діаметром $\sim 0,5$ мм, оскільки дріт меншого діаметра має більшу неоднорідність матеріалу. Робочий кінець термопари (гарячий спай) виготовляють зварюванням, спайкою чи скручуванням. Але найкраще виконувати зварювання, оскільки досягається надійний контакт. Перед зварюванням кінці електродів скручують. Зварювання проводять дуговим графітним електродом при напругах 15...20 В. Холодний спай термопари виготовляють паянням оловом (з каніфоллю). Перед градуванням термопару відпалюють повністю при температурі дещо більшій за робочу. Для ізоляції термоелектродів застосовують одно- чи двоканальні фарфорові або керамічні трубки (соломку). При градуванні термопар, як правило, температуру холодного спаю підтримують при 0°C . Такого типу термопара носить назву **диференціальної**. Але при вимірюваннях температури холодний спай не завжди може бути при 0°C , бути в умовах довільної температури t'_0 .

Термопари *застосовують* у електролітах, двигунах внутрішнього згорання, де великі температури. Термопара — чутливий елемент термоелектричного перетворювача у вигляді двох ізольованих провідників із різнорідних матеріалів, з'єднаних на одному кінці, принцип дії якого ґрунтується на використанні термоелектричного ефекту для вимірювання температури. Використовується у устаткуванні для вимірювання температури, а також для прямого перетворення енергії тепла в електричну енергію у тих випадках, коли доцільно уникнути рухомих деталей (наприклад, у космосі). Поглинання тепла при проходженні електричного струму через контакт використовується в холодильниках тощо.

Термопари широко застосовують для вимірювання температури різних об'єктів, а також в автоматизованих системах управління і контролю. Вимірювання температур за допомогою термопар набуло широкого поширення

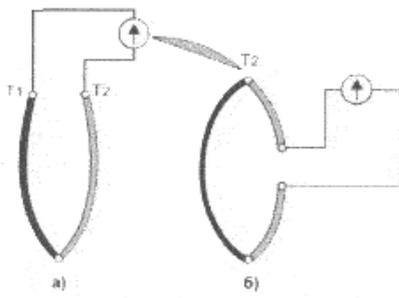
через надійної конструкції датчика, можливості працювати в широкому діапазоні температур і дешевизни. Широкому застосуванню термопари зобов'язані в першу чергу своїй простоті, зручності монтажу, можливості вимірювання локальної температури. Вони набагато більш лінійні, ніж багато інших датчики, а їх нелінійність на сьогоднішній день добре вивчена і описана в спеціальній літературі. До достоїнств термопар відносяться також мала інерційність, можливість вимірювання малих різниць температур. Термопари незамінні при вимірюванні високих температур (аж до 2200 ° С) в агресивних середовищах. Термопари можуть забезпечувати високу точність вимірювання температури на рівні $\pm 0,01$ °С. Вони виробляють на виході термоЕРС в діапазоні від мікрвольт до мілівольт, однак вимагають стабільного підсилення для подальшої обробки.

Термопари відносяться до класу термоелектричних перетворювачів, принцип дії яких заснований на явищі Зеєбека: якщо спаї двох різнометалевих металів, що утворюють замкнену електричний ланцюг, мають неоднакову температуру ($T_1 \neq T_2$), то в ланцюзі протікає електричний струм. Зміна знаку у різниці температур спаїв супроводжується зміною напрямку струму.



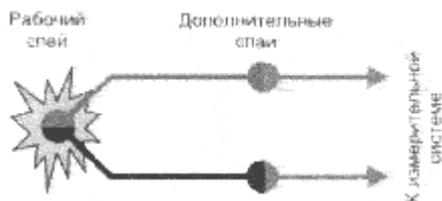
Явище Зеєбека

Під термоелектричним ефектом розуміється генерування термоелектрорушійної сили (термоЕРС), що виникає через різницю температур між двома з'єднаннями різних металів і сплавів. Таким чином, термопара може утворювати пристрій (або його частина), що використовує термоелектричний ефект для вимірювання температури. У поєднанні з електровимірювальним приладом термопара утворює термоелектричний термометр. Вимірювальний прилад або електронну вимірювальну систему підключають або до кінців термоелектродів а), або в розрив одного з них б).



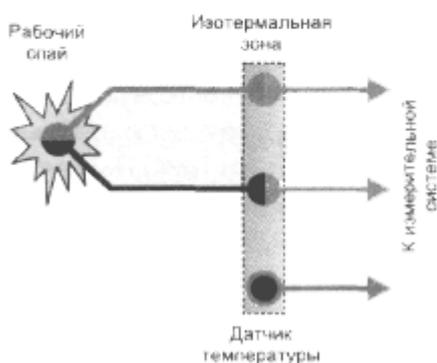
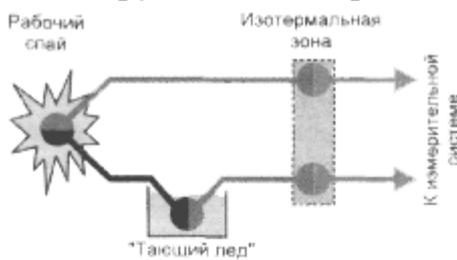
Підключення термопари до вимірювального приладу

У місцях підключення провідників термопари до вимірювальної системи виникають додаткові термоЕРС. В результаті їх дії на вхід вимірювальної системи фактично надходить сума сигналів від робочої термопари і від «термопар», що виникли в місцях підключення.



Принцип роботи термопари

Існують різні способи уникнути цього ефекту. Найбільш очевидним з них є підтримання температури холодного спаю постійною. На практиці при вимірюванні температур широко використовується техніка «компенсації холодного спаю»: температура холодного спаю вимірюється іншим датчиком температури, а потім величина термоЕРС холодного спаю програмно або апаратно віднімається з сигналу термопари. Місця підключення термопари до вимірювальної системи повинні мати однакову температуру, тобто перебувати в ізотермальній зоні. Крім того, у схемі з компенсацією холодного спаю в цій же зоні повинен знаходитись і датчик температури холодного спаю. Слід враховувати ці вимоги при конструюванні вимірювальної системи.



Техніка компенсації холодного спаю

В залежності від конструкції і призначення розрізняють термопари занурювані і поверхневі; із звичайної, вибухобезпечної, вологонепроникною чи іншої оболонкою (герметичній або негерметичній), а також без оболонки; звичайні, вібротряскоустойчиві і удароміцні; стаціонарні і переносні і т.д.. Зазначимо ЕРС термопари, кінці якої зварені, відрізняється від ЕРС термопари

кінці якої спаяні. При зварюванні утворюється третій метал, який є сплавом двох інших. Саме третій метал створює перешкоду проходження електронів через третій слой. Таким чином ЕРС термопари, кінці якої зварені, менша за ЕРС термопари кінці якої спаяні.

Основне застосування термопари - електронні термометри.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 «Вивчення ефекта Холла».

Мета роботи- вивчити залежність "холлівської" різниці потенціалів у напівпровідниковому зразку від величини магнітного поля, визначити концентрацію носіїв струму та їх рухливість.

Прилади та обладнання: Електромагніт, що має число витків $N = 4000$, проводу "ПЭВ" 3,0 з повітряним зазором між полюсами, рівними 3 мм; датчик Холла типу Х 200; резистори для регулювання струму в датчику та електромагніт, міліамперметри, мілівольтметр, тумблер для включення живлення електричного кола. Розміри датчика Холла - 0,7x0,7x0,2 мм.

Вхідний опір 2,9 Ом.

Теоретична частина. Нехай через однорідну пластину напівпровідника вздовж осі X тече струм I_x (рис. 1.). Якщо помістити пластину напівпровідника у магнітне поле, направлене по осі Y , то між гранями, перпендикулярними осі Z , з'явиться різниця потенціалів U_z . Виникнення поперечної різниці потенціалів пов'язано з дією сили Лоренца на рухливі заряди

$$\vec{F} = q \cdot [\vec{v} \times \vec{B}]$$

де q - величина заряду; v - його швидкість, B - індукція магнітного поля.

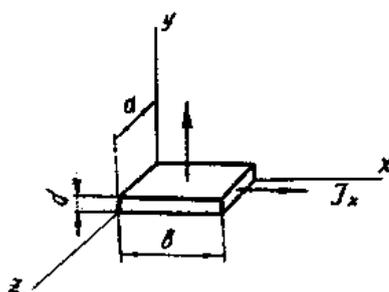


Рис.1.

Під дією цієї сили, направленої по осі Z ,

$$F = q \cdot V_x \cdot B_y$$

відбувається відхилення носіїв заряду в бік граней, які перпендикулярні осі Z . Одна з цих граней, до якої будуть відхилятися електрони, буде заряджатись

негативно , а протилежна їй - позитивно. Ці заряди і зумовлюють у пластині електричне поле (поле Холла).

Процес накопичення зарядів припиниться тоді, коли напруженість "холлівського" поля буде повністю компенсувати дію на заряди сили Лоренца. Умову рівності сил, діючих на електрон з боку електричних та магнітних полів, може бути записано у вигляді

$$q(V_x B_y) = qE_z$$

звідки може бути визначена напруженість "холлівського" поля

$$E_z = V_x B_y$$

Напруженість "холлівського" поля може бути виражена через "холлівську" різницю потенціалів

$$U_z = E_z a = V_x B_y a = Y_x B_y a.$$

Струм , що протікає через зразок, площа поперечного перерізу якого $S = a \cdot d$, повністю, зв'язаний з концентрацією і швидкістю носіїв заряду співвідношенням:

$$I_x = j_x \cdot S = n \cdot q \cdot V_x \cdot a \cdot d \quad (2)$$

Вирішуючи сумісно рівняння (1) та (2), отримаємо

$$U_z = \frac{1}{q \cdot n} \cdot \frac{B_y \cdot I_x}{d} = K \cdot \frac{B_y \cdot I_x}{d} \quad (3)$$

де $K = \frac{1}{q \cdot n} = \frac{1}{en}$ - постійна Холла ($d = 0,2$ мм).

Величина її залежить від матеріалу пластини, вмісту домішки в ній та температури.

Опис лабораторної установки.

Принципова електрична схема установки приведена на. рис.2

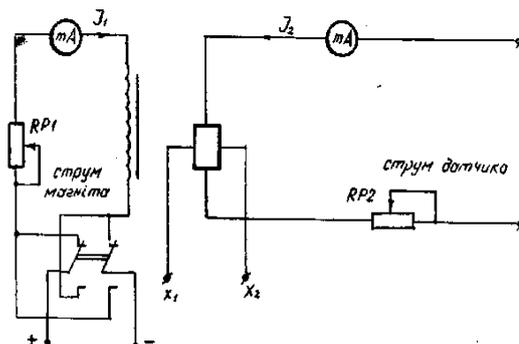


Рис 2

Джерела живлення електромагніту та датчика Холла змонтовані зі зворотнього боку панелі, мілівольтметр підключається до клем X_1 і X_2 . Регулювання струму в електромагніті та датчику Холла здійснюється за допомогою резисторів R_1 і R_2 , які виведені на панель-установки.

Виконання роботи.

а) До клем X_1 і X_2 підключити мілівольтметр , резистори RP_1 і RP_2 встановити в крайнє ліве положення, що забезпечить мінімальне значення струму в електромагніті та датчику Холла;

б) Ввімкнути тумблер живлення електричного кола, поворотом резистора RP_0 досягти струму через датчик Холла 80-100 мА;

в) Зняти залежність "холлівської" різниці потенціалів U_z від індукції магнітного поля B . Для цього резистором RP_1 змінюють струм в електромагніті через 20 мА. Для виключення впливу побічних ефектів та визначення дійсного значення "холлівської" різниці потенціалів вимірювання U_z проводяться з інверсією магнітного поля, тобто при зміні напрямку струму в електромагніті перемикачем.

$$U_z = \frac{(+U_1) + (-U_2)}{2}$$

Величина B лінійних частин кривої намагнічення позначається із співвідношення $B = \alpha \cdot I_1$ (4)

де $\alpha = 0,0155$ Тл /А; I_1 - струм через обмотку електромагніта,

г) Підрахувати B згідно формули (4)

I_1, A				
U_1, B				
U_2, B				
U_z, B				
B, T_l				
$K, Кл^{-1}$				

Результати занести до таблиці:

д) Побудувати графік залежності U (B)

є) Згідно формули (3)

$$U_z = K \frac{B_y I_x}{d} \text{ де } d = 3 \text{ мм, визначити постійну Холла } K.$$

ж) Визначити концентрацію носіїв струму згідно формули: $K = \frac{1}{en}$, де e - заряд електрона ($e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл), n – концентрація носіїв

к) По заданому значенню опору датчика та його геометричним розмірам визначити його питомий опір, а потім рухливість носіїв струму

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}; \mu = \frac{k}{\rho}.$$

Контрольні питання

1. В чому полягає ефект Холла?
2. Від чого залежить „холлівська” різниця потенціалів?
3. Чим визначається знак постійного Холла?
4. Як за допомогою ефекту Холла визначити знак носіїв заряду?

Додаткові теоретичні відомості

Ефектом Холла називається явище, що полягає в тому, що при пропусканні струму упродовж провідної пластинки, поміщеної перпендикулярно до ліній зовнішнього магнітного поля, виникає поперечна різниця потенціалів внаслідок взаємодії носіїв заряду з магнітним полем.

У найпростішому розгляді ефект Холла виглядає наступним чином. Нехай через металевий брусок у слабкому магнітному полі \mathbf{B} протікає електричний струм під дією напруженості \mathbf{E} . Магнітне поле буде відхиляти носії заряду (для визначеності електрони) від їхнього руху вздовж або проти електричного поля до однієї з граней бруса.

Таким чином, сила Лоренца призведе до накопичення від'ємного заряду біля однієї грані бруса та додатного – біля протилежної грані. Накопичення заряду продовжуватиметься доти, поки електричне поле зарядів \mathbf{E}_1 , яке виникло під дією магнітного поля, не врівноважить магнітну складову сили Лоренца: $eE = evB; E = vB$

Швидкість електронів v можна виразити через густину струму:

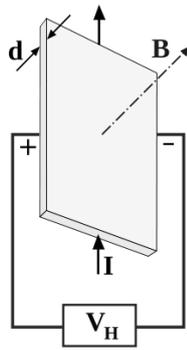
$$j = nev; v = \frac{j}{ne}$$

де n — концентрація носіїв заряду. Тоді

$$E_1 = \frac{1}{ne} jB$$

Коефіцієнт $R_H = \frac{1}{ne}$ пропорційності між E_1 та jB називається

коефіцієнтом Холла. У такому наближенні знак коефіцієнта Холла залежить від знака носіїв заряду, що дозволяє визначити їхній тип для великого числа металів. Для деяких металів (наприклад, таких як свинець, цинк, залізо, кобальт, вольфрам), у сильних полях спостерігається додатний знак R_H , що пояснюється в напівкласичній і квантовій теоріях твердого тіла.



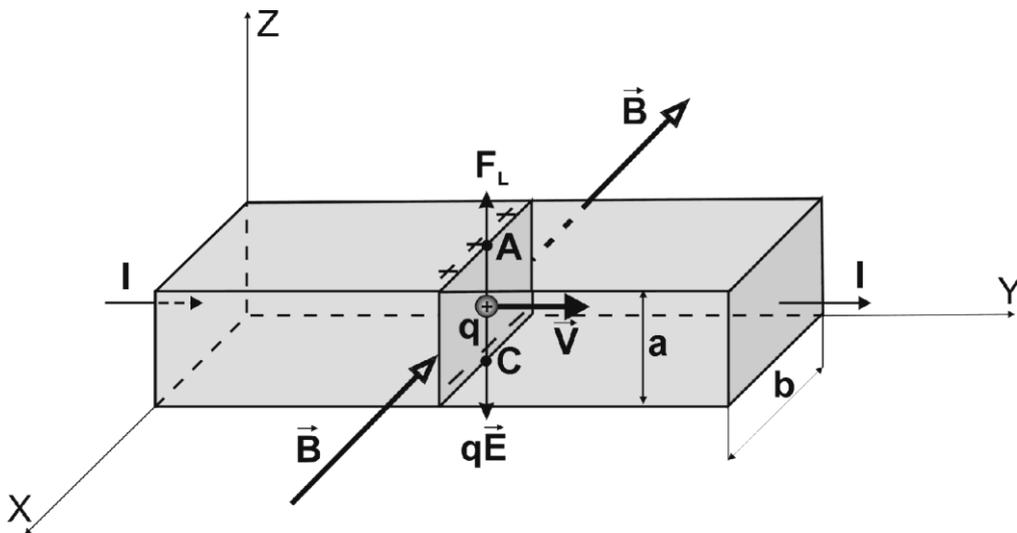
$U = k \frac{BI_x}{d}$ «холлівська» різниця потенціалів залежить від вектора магнітної індукції, струму та геометричних розмірів пластин.

Знак постійного Холла співпадає зі знаком носія струму. Знак постійного Холла для напівпровідника дозволяє судити про тип його провідності. У випадку $k < 0$ спостерігається електронна провідність, $k > 0$ – діркова провідність.

У напівпровідниках у електропровідності беруть участь електрони провідності і дірки, по знаку сталої Холла можна визначити знак носія заряду.

Ефект Холла - це явище виникнення поперечної різниці потенціалів в провіднику з струмом, при вміщенні його в магнітне поле, перпендикулярне до напрямку протікання струму.

Вперше це явище було відкрито американським фізиком Е. Холлом у 1879 р. Пропускаючи постійний струм через пластину у вигляді паралелепіпеда, виготовлену з золота, Холл вимірював різницю потенціалів $\Delta\varphi = U_H$ між протилежними точками А і С на верхній і нижній гранях. Оскільки ці точки лежать в одному і тому ж поперечному перерізі провідника, то при відсутності магнітного поля, виявилось, що $U_H = 0$. Коли пластину з струмом було вміщено в однорідне магнітне поле, перпендикулярне до її бічних граней, то потенціали точок А і С стали різними.



Це явище отримало назву ефекту Холла. Виявилося, що різниця потенціалів $\Delta\varphi$ між точками **A** і **C** прямо пропорційна силі струму **I**, індукції магнітного поля **B** і обернено пропорційна ширині пластини b , тобто

$$U_H = \varphi_A - \varphi_B = R_H \frac{IB}{b},$$

де R_H - константа Холла. Подальші дослідження показали, що явище Холла спостерігається у всіх провідниках і напівпровідниках незалежно від матеріалу. Зміна напрямку струму або напрямку магнітного поля на протилежний викликає зміну знаку різниці потенціалів U_H .

Ефект Холла пояснюється дією магнітного поля на рухомі заряджені частинки, що створюють струм. Нехай струм в пластині зумовлений впорядкованим рухом електричних зарядів **q**. Якщо число цих зарядів в одиниці об'єму пластини дорівнює n_0 , а середня швидкість їх впорядкованого руху **v**, то сила струму **I** дорівнює

$$I = qvn_0s = qvn_0ab,$$

де $s = ab$ - площа поперечного перерізу пластини. Якщо заряди **q** додатні, то їх швидкість **v** збігається з напрямком струму, Якщо ж заряди **q** від'ємні, то їх швидкість **v** протилежна до напрямку струму.

На заряд **q**, що рухається у магнітному полі з індукцією \vec{B} , діє магнітна складова сили Лоренца

$$\vec{F}_n = q[\vec{v}\vec{B}].$$

Під впливом цієї сили додатні заряди **q** відхиляються до верхньої грані пластини. Отже, поблизу верхньої грані пластини буде надлишок додатних зарядів **q**, а поблизу нижньої – нестача цих зарядів. Внаслідок цього в пластині виникне поперечне електричне поле з напруженістю \vec{E} , напрямлене зверху вниз. Сила $q\vec{E}$, яка діє з боку поперечного електричного поля на заряд **q**, напрямлена в бік, протилежний напрямку сили Лоренца \vec{F}_n . В стані динамічної рівноваги ці сили взаємно зрівноважуються, тобто

$$qE = qvB,$$

звідси числове значення напруженості електричного поля дорівнює

$$E = vB.$$

Якщо пластинка досить довга і широка, то поперечне поле в ній можна вважати однорідним. Тоді різниця потенціалів U_H між точками **A** і **C** буде рівною

$$U_H = Ea = vBa.$$

Замінивши v її виразом із формули, знайдемо

$$U_H = \frac{1}{qn_0} \frac{IB}{b}.$$

Отриманий результат збігається з експериментальною формулою. Константа Холла обернено пропорційна добутку заряду q на концентрацію n_0 носіїв струму

$$R_H = \frac{1}{qn_0}.$$

Більш точний розрахунок з врахуванням закону розподілу електронів за швидкостями і використанням при цьому класичної статистики приводить до виразу для сталої Холла

$$R_H = \frac{3\pi}{8nq}.$$

Ця формула справедлива для напівпровідників, в яких концентрація електронів менша ніж в металах, коли електронний газ є невідродженим і для його описання використовується класична статистика. Використання статистики Фермі-Дірака дає значення $R_H = \frac{1}{qn}$, яке збігається з виразом. З

формул і видно, що знак константи Холла збігається зі знаком заряду q носіїв струму. Тому на основі вимірювання константи Холла для напівпровідника можна робити висновок про природу його провідності. При електронній провідності $R_H < 0$, а при дірковій $R_H > 0$. За допомогою константи Холла можна також визначити концентрацію носіїв струму, якщо характер провідності і заряд q носіїв струму відомі, а саме:

$$n_0 = \frac{K}{R_H},$$

де K – коефіцієнт, значення, якого залежить від величини концентрації носіїв струму. У випадку, коли концентрація носіїв струму в напівпровідниках є значно нижчою ніж концентрація електронів у металах

$$K = \frac{3\pi}{8q} = \frac{3\pi}{8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 7,4 \cdot 10^{18} \text{ Кл}^{-1},$$

якщо ж концентрація носіїв є велика і електронний газ можна вважати виродженим, то $K = \frac{1}{q} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ Кл}^{-1}$.

Відомо, що питома електропровідність σ матеріалу провідника залежить від концентрації носіїв струму n_0 , а також від їх рухливості μ згідно з формулою

$$\sigma = qn_0\mu.$$

Якщо виміряти питомий опір ρ провідника і знайти його питому електропровідність $\sigma = \frac{1}{\rho}$ та константу Холла R_H , а за її значенням і концентрацію носіїв, то за формулою (5.18) можна обчислити їх рухливість. (Рухливість – це величина, яка чисельно дорівнює швидкості впорядкованого

руху носія струму при напруженості електричного поля, що дорівнює одиниці. Значення цього параметру залежить від внутрішньої будови напівпровідника і його температури). Проте, необхідно відмітити, що вказані формули справедливі тільки для напівпровідників з перевагою одного типу носіїв. Питомий опір напівпровідників можна визначити, якщо виміряти спад напруги U між зондами, які дотикаються до поверхні напівпровідника на деякій відстані ℓ вздовж зразка при проходженні через нього постійного струму I .

$$\rho = \frac{U \cdot s}{I \cdot \ell}, \quad (5.19)$$

де $s = a \cdot b$ – поперечний переріз зразка. Якщо підставити у формулу (5,18) електропровідність $\sigma = \frac{1}{\rho}$ і концентрацію $n_0 = \frac{7,4 \cdot 10^{18}}{R_H}$, то отримаємо вираз для обчислення рухливості носіїв $\mu = 0,85 \frac{R_H}{\rho}$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Визначення магнітного поля колового струму і визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі.

Мета роботи: Визначити залежність магнітного поля колового струму від сили струму, радіуса кільцевого провідника і числа витків, а також визначити горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі.

Прилади та обладнання: амперметр, тангенс-гальванометр, джерело регульованого постійного струму, перемикач напрямку струму, набір монтажних провідників.

Опис лабораторної установки.

Визначення горизонтальної складової H напруженості поля Землі, виконується при допомозі приладу, який називають тангенс-гальванометром. Цей прилад являє собою коловий провідник з n вертикальних витків, які достатньо близько прилягають один до одного. В центрі витків розміщений компас, стрілка якого повертаючись навколо вертикальної осі, встановлюється під дією магнітного поля Землі вздовж горизонтальної складової напруженості H . Це дозволяє розмістити витки тангенс-гальванометра в площині магнітного меридіану. Струм, який протікає по виткам тангенс-гальванометра створює магнітне поле, діюче на стрілку компаса. Стрілка встановлюється по напрямку рівнодіючої напруженості обох магнітних полів (рис.1).

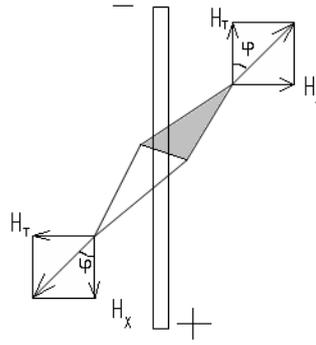


Рис.1

Так як вектор напруженості магнітних полів колового струму H , і вектор

H Землі взаємно перпендикулярні, то їх рівнодіюча є діагоналлю паралелограма зі сторонами H , і H_x . Тому,

$$H_x = \frac{H}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

де $H = \frac{n \cdot I}{2 \cdot r}$ – напруженість колового струму, n –кількість витків, I – величина струму, r –радіус витків.

Таким чином, для визначення напруженості H одержуємо формулу:

$$H_x = \frac{n \cdot I}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \varphi} \quad (2)$$

Для даної місцевості на Землі і для даного приладу величина

$$C = \frac{I}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{2 \cdot r \cdot H_x}{n}, \quad (3)$$

де C –величина стала і називається сталою тангенс-гальванометра. При відхиленні магнітної стрілки на $\varphi = 45^\circ$, вона чисельно дорівнює величині струму, який протікає по виткам, тобто коли $H_x = H$.

Порядок виконання роботи.

Частина 1.

1.В електричне поле, яке зібране на панелі, підключити тангенс-гальванометр згідно схеми на рис.2. Визначити кількість витків та їх радіус.

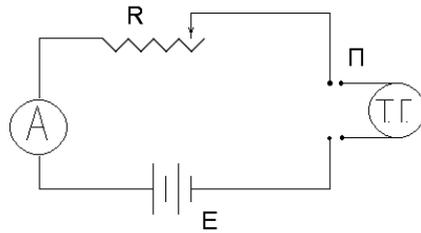


Рис.2

2. Повертаючи основу тангенс-гальванометра, встановити площину колового струму по напрямку магнітної стрілки, тобто в напрямку магнітного меридіана.

3. Ввімкнути тумблером електричний струм, визначити кут відхилення магнітної стрілки.

4. Перемкнувши тумблер на панелі змінити напрям колового струму і визначити кут відхилення.

5. Із одержаних значень знайти середню величину кута відхилення:

$$\varphi_{\text{ср.}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

Виміри провести для 5 різних значень струму.

6. Підрахувати значення магнітної складової Землі H_x для кожного значення струму згідно формули (2). Кінцевий результат представити у вигляді:

$$H_x = H_{x\text{ср}} \pm \Delta H_{x\text{ср}}$$

7. Визначити постійну тангенс-гальванометра C , згідно формули (3) і представити у вигляді:

$$C = C_{\text{ср.}} \pm \Delta C_{\text{ср.}}$$

Результати занести до таблиці:

Таблиця

№ пп	I (ma)	φ_1	φ_2	$\varphi_{\text{ср}}$	$\text{tg}\varphi$	H_{xi}	ΔH_{xi}	C	ΔC	B
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										

Частина 2.

1. До електричного поля на панелі підключити один виток тангенс-гальванометра.

2. Тумблером ввімкнути джерело струму, при цьому регулятором встановити мінімальну величину струму.

3. Змінюючи величину струму підрахувати значення B згідно формули:

$$B = \mu_0 \frac{n \cdot I}{2 \cdot r} \quad (4)$$

де $n=1$, r —радіус витка, μ_0 —магнітна сила.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н\м}$$

Результати занести до таблиці, побудувати графік залежності $B=f(I)$.

Контрольні питання.

1. Сформулювати закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Як встановлюється стрілка в магнітному полі?
3. Чому необхідно орієнтувати площину колового струму в напрямку магнітного меридіану?
4. Записати розмірність вектора магнітної індукції B .
5. Пояснити елементи земного магнетизму.

Додаткові теоретичні відомості

Закон Біо-Савара-Лапласа — закон, який визначає магнітну індукцію навколо провідника, в якому протікає електричний струм. Початково Жан-Батіст Біо і Фелікс Савар на підставі своїх експериментів сформулювали закон, що визначав напруженість магнітного поля навколо прямолінійного дуже довгого провідника зі струмом. Цей закон називають законом Біо-Савара. П'єр-Симон Лаплас узагальнив результати Біо та Савара, сформулювавши закон, який визначав напруженість магнітного поля в будь-якій точці навколо контура зі струмом довільної форми. Хоча історично закон був сформульований для напруженості магнітного поля, в сучасному формулюванні використовується магнітна індукція. Магнітне поле навколо прямолінійного провідника

У 1820 р. французькі вчені Ж. Біо і Ф. Савар дослідили магнітні поля, створені в повітрі прямолінійним струмом, коловим струмом, соленоїдом тощо. На основі багатьох дослідів вони дійшли таких висновків:

- а) в усіх випадках індукція B магнітного поля електричного струму пропорційна силі струму;
- б) магнітна індукція залежить від форми й розмірів провідника зі струмом;
- в) магнітна індукція B у довільній точці поля залежить від положення цієї точки щодо провідника зі струмом.

Закон Біо-Савара-Лапласа дав змогу визначити індукцію в кожній точці магнітного поля, утвореного електричним струмом, що проходить по провідниках довільної форми.

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Id \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

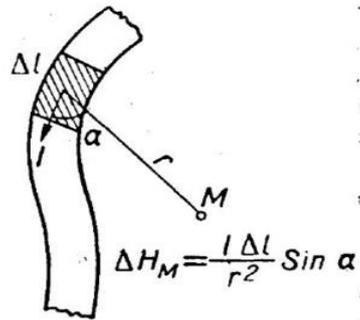
Вектор магнітної індукції визначається також формулою:

$$B = k \frac{2I}{r}, \text{ де } B \text{ — магнітна індукція в точці } M \text{ на відстані } r \text{ від}$$

прямолінійного провідника із струмом I , k — коефіцієнт пропорційності, величина і розмірність якого залежать від вибору системи одиниць, r — радіус-вектор.

У системі СІ $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$, де μ_0 — магнітна сила. У Гаусовій системі одиниць $k = \frac{1}{c}$, де c — швидкість світла.

Закон Біо-Савара експериментально відкрили 1820 Жан-Батіст Біо і Фелікс Савар. Цей закон є частковим випадком загальнішого закону Біо-Савара-Лапласа, сформульованого П'єром-Симоном Лапласом 1820 на підставі матеріалів з численних дослідів Біо і Савара. Мал. 2.



Магнітна стрілка, яка може вільно обертатися навкруги своєї осі, завжди встановлюється в одній ділянці магнітного поля орієнтується певним чином. Тому можна ввести поняття про напругу магнітного поля орієнтуючи дію магнітного поля на магнітну стрілку. Необхідно орієнтувати площину колового струму в напрямку магнітного меридіану тому, що в магнітному колі здійснюється взаємодія існуючих зарядів і саме тому, що струм рухомо по направленості є магнітний момент контура зі струмом векторне співпадає з напрямом позитивного направлення $\vec{p}m = IS\vec{n}$

Магнітна індукція-векторна фізична величина. Основна характеристика напрямку магнітного поля. Вектор магнітної індукції зазвичай позначається B . у системі СІ вимірюється в Теслах.(Тл)

Вектор індукції магнітного поля чисельно дорівнює відношенню великої сили діючої на заряджену частинку зі стороною магнітного поля до похідної модуля заряду швидкості частинок:

$$B = \frac{F}{I}$$

Напруженість магнітного поля Землі в кожній точці земної поверхні повністю визначається вектором T і його складовими за осями прямокутної

системи координат x , y и z . Якщо орієнтувати вісь x по географічному меридіану, а ось y - по паралелі, то проекція вектора T на площину $хоу$ дасть горизонтальну складову H . Горизонтальна складова H завжди спрямована на магнітний полюс Землі - північний або північно-західний в залежності від того, в якому півкулі (північному або південному) знаходиться спостерігач. Кут D між горизонтальною складовою H і напрямом на істинний (астрономічний) північ (в даному випадку цей напрямок задається віссю x) визначає західне чи східне відмінювання вектора магнітного поля H . Кут I між горизонтальною складовою H і вектором T називається нахилом. Вертикальна складова z , північна x і східна y , а також відмінювання D , нахил I і горизонтальна складова H називаються *елементами магнітного поля Землі*. Вони визначають положення вектора T в різних системах координат. Вектор T прийнято називати повним вектором земної магнітного поля. Значення вектора T інваріантної, тобто не залежить від вибору системи координат. Вирази для всіх елементів земного магнітного поля:

$$x = H \cos D; y = H \sin D; z = H \tan I;$$

$$T = (H^2 + z^2)^{1/2}; H = (x^2 + y^2)^{1/2}; \text{(VI.16)}$$

$$I = \arctg z/H; D = \arctg y/x.$$

Горизонтальні і вертикальні компоненти повного вектора магнітного поля T можна визначити також через кут I :

$$H = T \cos I; z = T \sin I.$$

Точки на земній поверхні, в яких спосіб $I = 90^\circ$, називаються північним і південним магнітними полюсами. Лінія на земній поверхні, де нахил $I = 0^\circ$, називається магнітним екватором. На північ від магнітного екватора вертикальна складова z вважається позитивною, на південь - негативною. Підставляючи значення I на екваторі й на полюсі в вираження (VI.17), отримуємо, що на магнітних полюсах горизонтальна складова H дорівнює нулю ($H_p = 0$), а вертикальна дорівнює повного вектора T ($z_p = T$). На екваторі, навпаки, горизонтальна складова H_e дорівнює повного вектора T ($H_e = T$), а вертикальна z_e дорівнює нулю ($z_e = 0$).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

«Визначення питомого заряду методом магнетрона».

Теоретична частина. В даній роботі відношення e/m для електрона визначається за допомогою методу, що одержав назву "метод магнетрона". Ця назва пов'язана з тим, що конфігурація електричного і магнітного полів, яка застосовується у цій роботі, нагадує конфігурацію полів в магнетронах-генераторах електромагнітних коливань у галузі надвисоких частот.

Рух електронів в цьому випадку відбувається у кільцевому просторі, який знаходиться між прямолінійним катодом і циліндричним анодом лампового діода. Нитка розжарення (катод) розташовується вздовж осі циліндричного аноду, так що електричне поле направлене по радіусу (рис. 1).

Лампа розташовується усередині соленоїда, що створює магнітне поле, паралельне катоду. З'ясуємо траєкторію електронів, що рухаються під дією комбінації електричного та магнітного полів.

Будемо вважати, що початкова (теплова) швидкість електрона, що вилетів з катода дорівнює нулю. Тоді при заданій орієнтації електричного та магнітного полів рух електрона буде відбуватись у площині, яка перпендикулярна магнітному полю. Skorистуємось полярною системою координат. В цьому випадку положення точки характеризується відстанню від осі циліндра r та полярним кутом.

Запишемо рівняння руху електрона в площині (r, φ) , скориставшись рівнянням моментів.

$$\frac{dl}{dt} [r \times qE] + [r \times q[v \times B]] \quad (1)$$

де $q = -e$ - заряд електрона; I - напруженість електричного поля між катодом і анодом.

Якщо розглядати електроди двохелектродної лампи як циліндричний конденсатор, то електричне поле буде змінюватись зі зміненням відстані r і визначається виразом

$$E = \frac{U}{\ln \frac{r_a}{r_k}} \times \frac{1}{r} \quad (2)$$

де r_a - радіус анода, r_k - радіус катода.

Момент сили qE , тобто $[\vec{r} \cdot q\vec{E}] = 0$, оскільки $[\vec{r} \parallel \vec{E}]$.

Спроекуємо рівняння (1) на вісь Z .

Для знаходження проекту і моменту сили Лоренца на вісь Z розглянемо переміщення електрона у полярній площині (\vec{r}, φ) на величину $d\vec{r}$ (рис. 2). На рис.3 представлені одиничні вектори, радіус-вектори та полярні кути φ \vec{e}_z та

\vec{e}_φ відповідно. Тоді вектор швидкості

$$\vec{V} = \frac{dr}{dt} \times \vec{e}_z + r \times \frac{d\varphi}{dt} \times \vec{e}_{z\varphi} = V_z \times \vec{e}_z + V_\varphi \times \vec{e}_{\varphi 2}$$

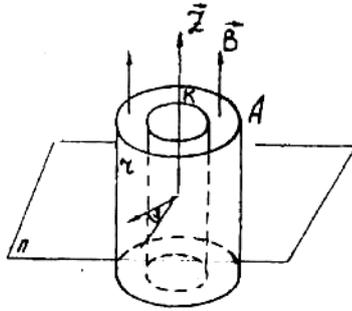


Рис. 1

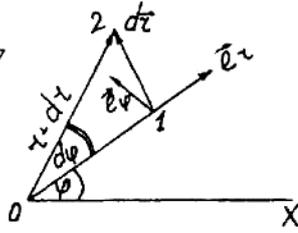


Рис. 2

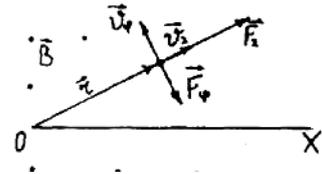


Рис. 3

Наявність двох складових швидкості V_z та V_φ приводить до двох складових сили Лоренца:

$$F_\varphi = -q \cdot V_z \cdot B = -q \cdot r \cdot B \quad (3)$$

$$F_z = q \cdot V_\varphi \cdot B = -q \cdot r \cdot \varphi \cdot B \quad (4)$$

Момент сили V_φ , відносно осі Z, $M_\varphi = r \cdot F_\varphi = q \cdot r^2 \cdot B, a[\bar{X} \cdot \bar{F}_\varphi] = 0$

Таким чином, рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{d(mr^2 \varphi)}{dt} = e \cdot r \cdot r \cdot B$$

Проінтегрувавши це рівняння за часом, отримаємо

$$m \cdot r^2 \cdot \varphi + c = \frac{1}{2} e r^2 B \quad (5)$$

де C - постійна інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Радіус катода r_k - величина мала, тому на початку руху електрона радіус $r = r_k$ теж малий. Права частина рівняння (5) та перший член його лівої частини тому теж дуже малий. Тоді постійну інтегрування C з визначеною точністю можна прирівняти до нуля: $C = 0$. Рівняння (5) набуде при цьому вигляду

Таким чином, кутова швидкість обертання електронів лінійно залежить від B і при даній індукції магнітного поля величиною постійною.

Перейдемо до вивчення руху електрона вздовж радіуса. Робота сил електричного поля, що звершується при переміщенні електрона від катода до точки з різницею потенціалів U .

$$A = eU \quad (7)$$

Магнітне поле роботи не здійснює. Тому робота, яка виражена співвідношенням (7), дорівнює кінетичній енергії електрона (за умови, що початкова швидкість електрона дорівнює нулю):

$$eU = \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot (V_r^2 + V_j^2) = \frac{m}{2} \cdot [r^2 (\dot{\varphi})^2] = \frac{m}{2} \cdot \left[\dot{x}^2 + \left(\frac{r \cdot e \cdot B}{2 \cdot m} \right)^2 \right]$$

Це рівняння визначає радіальний рух електрона.

Далі розглянемо траєкторію електронів, що вилетіли з катода при анодній напрузі U_a - U відсутності магнітного поля (рис. 4) траєкторія прямолінійна та

направлена вздовж радіуса При слабкому полі траєкторія трохи змінюється, але електрон все-таки досягає анода При збільшенні магнітного поля траєкторія змінюється настільки, що стає дотичною до аноду. Це поле називається критичним При нулі $B_{кр}$ електрон зовсім не попадає на анод і повертається до катоду. Знайдемо величину $B_{кр}$ із співвідношення (8), відмітивши, що у цьому випадку радіальна швидкість електрона r при $r = r_a$, перетворюється в нуль:

$$B_{кр} = O \cdot I_{кр}, \quad (8)$$

де коефіцієнт пропорційності: $O = 2,36 \cdot 10^{-2} \text{ Тл/м}^2$, $I_{кр} = 0,85 \cdot I_a$

$$U_a = \frac{e \cdot B_{кр}^2 \cdot r_a^2}{8m} \quad (9)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{B_{кр}^2 \cdot r_a^2}, \quad (10)$$

де $r_a = 4,5 \text{ мм}$ - радіус анода

Формула (10) дозволяє вирахувати e/m , якщо при заданому U_a знайдено так значення магнітного поля (або навпаки, при заданому $B_{кр}$ таке значення U_a), при якому електрони перестають попадати на анод.

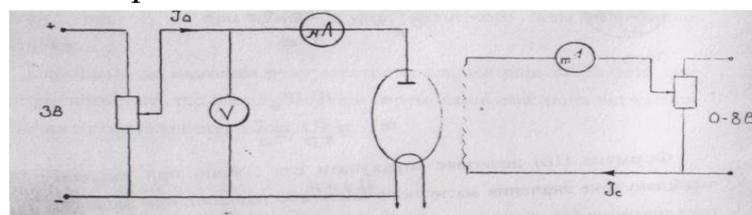
Досі можна було припустити, що всі електрони покидають катод з швидкістю, яка дорівнює нулю. Як виходить з (10), у цьому випадку при $B < B_{кр}$ всі електрони без винятку попадали би на анод, а при $B > B_{кр}$ всі вони повертались би на катод, не досягнувши анода Анодний струм I_a зі збільшенням магнітного поля змінювався б при цьому так, як це зображено на (рис. 5) пунктирною лінією.

В дійсності електрони, які вилітають з катоду, мають різні початкові швидкості. Тому критичні умови для різних електронів досягаються при різних значеннях B . Крива (B) набуває внаслідок цього вигляду суцільної лінії (5).

В даній роботі для визначення e/m використовується двохелектродна лампа з циліндричним немагнітним анодом. Радіус анода $r = 4,5 \text{ мм}$.

Опис лабораторної установки.

Принципова електрична схема:



Анодний струм I_a регулюється потенціометром (7). Струм I_c через котушку індуктивності (2) регулюється потенціометром (5). Анодна напруга на діоді вимірюється вольтметром (6). Живлення нитки розжарення катода підключено безпосередньо на панелі.

Хід роботи.

а) До клем (6) підключити вольтметр, резистори (5) і (7) встановити в крайнє ліве положення, що забезпечує мінімальне значення струму в діоді та соленоїді.

Ввімкнути живлення електричного кола тумблером розташованим з правого боку на панелі.

б) Повертаючи ручку резистора (7) праворуч, встановити анодний струм $I_a = 60$ мА. Змінюючи резистором (5) струм в котушці соленоїда, зняти залежність $I_a = f(I_c)$.

Дослід проробити для 3-х значень I_a . Результати вимірів занести до таблиці

$I_{a1}=60$ мА	I_a				U_{a1}
	I_c				
$I_{a2}=80$ мА	I_a				U_{a2}
	I_c				
$I_{a3}=100$ мА	I_a				U_{a3}
	I_c				

Побудувати графіки залежностей $I_a = f(I_c)$.

Контрольні питання

1. Дати визначення сили Лоренца.
2. Чи виконує роботу сила Лоренца.
3. Записати рівняння руху електрона в електричному і магнітному полях.
4. Записати закон повного струму.

Теоретичні відомості

На електричний заряд, що рухається в магнітному полі, діє сила, перпендикулярна як до швидкості заряду, так і до ліній магнітної індукції. **Сила Лоренца** – сила, з якою зовнішнє магнітне поле діє на рухому заряджену частинку.

$$\vec{F} \approx \vec{B}$$

$$\vec{F} \approx \vec{v}$$

$$\vec{F} \approx q$$

$$\vec{F}_l = \frac{\vec{F}_A}{N}$$

$$\vec{F}_l = \vec{B}q\vec{v} \sin \alpha \text{ - сила Лоренца}$$

Сила Лоренца - сила, з якою, в рамках класичної фізики, електромагнітне поле діє на точкову заряджену частинку. Іноді силою Лоренца називають силу, що діє на рухомий із швидкістю заряд лише з боку магнітного поля, нерідко ж повну силу - з боку електромагнітного поля взагалі, інакше кажучи, з боку електричного і магнітного полів. Виражається в СІ як:

$$F = q(E + [v \times B])$$

Сила Лоренца не виконує роботу, тому що вона перпендикулярна до швидкості руху зарядженої частинки, яка рухається в магнітному полі. Робота виконується у замкненому контурі.

Рівняння руху електрона в електричному і магнітному полях:

$$A = U_g; U_g = \frac{mV^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{U_g \cdot 2}{m}} \text{ (електричне поле)}$$

$$W_k = \frac{mV^2}{2}$$

$$F_g = \frac{mV^2}{R}; B_g V = \frac{mV^2}{R}; B_g = \frac{mV}{R} \Rightarrow U = \frac{B_g R}{m} \text{ (магнітне поле)}$$

Закон повного струму: Введення поняття про магнітну проникність речовини дає змогу всі формули, добуті раніше для магнітного поля у вакуумі, застосувати і для магнітного поля в речовині, замінивши в них магнітну сталу

μ_0 магнітною проникністю μ_a . Про таку можливість свідчить повна аналогія формул:

$$B_0 = \mu_0 H$$

$$B = \mu_a H$$

Ця обставина разом з поняттям про напруженість магнітного поля є основою для іншого формулювання закону повного струму.

У формулі:

$$\int_l B_l dl = \mu_0 \sum I$$

Замість μ_0 запишемо μ_a , а замість магнітної індукції підставимо рівнозначну величину:

$$B_l = H_l \mu_a, \text{ дістанемо:}$$

$$\boxed{\int H_l dl = \sum I} \quad (192)$$

Останнє рівняння виражає **закон повного струму**:

Циркуляція вектора напруженості магнітного поля по замкненому контуру дорівнює повному струмові, що пронизує поверхню, обмежену цим контуром.

У тих випадках, коли напруженість магнітного поля має однакове значення по всьому контуру, а вибраний контур збігається з лінією магнітної індукції рівняння (192) має простіший вигляд:

$$Hl = \sum I$$

а для котушок:

$$Hl = IN$$

Якщо контур містить кілька ділянок з різними значеннями напруженості поля (H_1, H_2, \dots, H_n), але в межах кожної ділянки напруженість не змінюється, то рівняння (194) можна записати так:

$$\sum_1^n H_n l_n = \sum_1^n I_n N_n \quad (195)$$

де n – номер ділянки контуру.

У такому виразі закон повного струму нагадує другий закон Кірхгофа і застосовується при розрахунку магнітних кіл.

Повний струм – це алгебраїчна сума струмів, які проникають в поверхню, обмежену замкнутим контуром. *За законом повного струму сила намагнічення (НС) F_m вздовж замкнутого контуру дорівнює повному струмові:*

1. Напруженість (А/м) магнітного поля в точці, яка розміщена на відстані R від прямолінійного прямокутника, $H = I / (2\pi R)$.

$$\text{Магнітна індукція } B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R}$$

2. Напруженість в середині провідника в точці, яка знаходиться від осі на відстані a $H = \frac{I}{2\pi R^2}$. Якщо $a = R$, то напруженість на поверхні такого провідника $H = I / (2 \pi R)$, Де R – радіус циліндричного провідника, м.

3. Напруженість магнітного поля в центрі кільцевого провідника

$H = I / (2R) = I / d$, Де R – радіус кільця, м.

4. Напруженість магнітного поля в середині кільцевої котушки

$H = I_w / (2\pi R_x)$, де R_x – радіус від центру кільцевої котушки до точки, яку

ми шукаємо. Магнітна індукція $B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \mu \frac{I_w}{2\pi R_x}$

5. Напруженість магнітного поля на середній магнітній лінії кільцевої (тороїдальної) котушки $H = I_w / l$, Де I – струм в обмотці котушки, A ; w – число витків котушки; l – довжина середньої магнітної лінії котушки. Магнітна

індукція $B = \mu_a H = \mu_a \frac{I_w}{l}$. Магнітний потік $\Phi = BS = \mu_a$. Де S – площа поперечного перерізу котушки.

6. Напруженість магнітного поля на вісі циліндричної котушки в будь –

якій її точці $H = \frac{I_w}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

«Фізичні параметри біполярного транзистора».

Мета роботи. Вивчити будову та принцип дії біполярного транзистора, зняти вхідні та вихідні статичні характеристики $p-n-p$ транзистора.

Прилади та обладнання. Два джерела живлення постійної напруги 0 - 15 В, що регулюються, вольтметром з межею 0,5 В, мікро амперметр з межами 50 та 250 мкА та міліамперметр на 10 та 50 мА, транзистор $p-n-p$ структури типу МП-20 А. дільник напруги.

Опис експериментальної установки. Схема для вимірювання вольт амперних характеристик транзистора представлена на рис.6. дивись методичні рекомендації

Порядок виконання роботи.

1. Зняти залежність $I_k (U_{ке})$ при $I_б = \text{const}$, $I_б$ встановити 20, 50, 100, 120 мкА.

2. Зняти залежність $U_{бе} (U_{ке})$ при $I_б = \text{const}$. Провести вимірювання при струмах бази, вказаних у п. 1.

3. На основі отриманих сімейств характеристик побудувати графіки $I_k (I_б)$ і $I_б (U_{бе})$.

4. Побудувати характеристичні криві у чотирьох квадрантах.

Контрольні питання

1. Що називається напівпровідниками ?
2. Особливості n та p провідності.
3. Будова транзистора та принцип роботи.
4. Для чого використовуються транзистори?

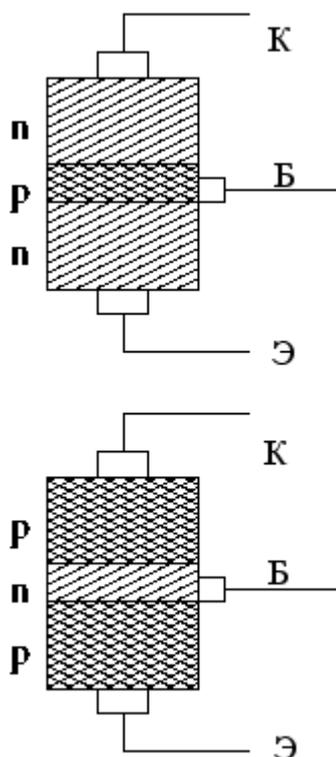
Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідник — матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Відрізняються від провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури і різних видів випромінювання. Основною властивістю цих матеріалів є збільшення електричної провідності з ростом температури. Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких складає порядку декількох електрон вольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

В **напівпровіднику p -типу** концентрація дірок набагато перевищує концентрацію електронів. В напівпровіднику n -типу концентрація електронів набагато перевищує концентрацію дірок. Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне дифузійний струм — носії заряду, хаотично рухаючись перетікатимуть із тієї області, де їх більше у ту область, де їх менше. При такій дифузії електрони та дірки переносять із собою заряд. Як наслідок, область на границі стане зарядженою. Та область у напівпровіднику p -типу, яка примикає до границі розділу, отримає додатковий негативний заряд, принесений електронами, а погранична область в напівпровіднику n -типу отримає позитивний заряд, принесений дірками. Таким чином, границя розділу буде оточена двома областями просторового заряду протилежного знаку. Електричне поле, яке виникає внаслідок утворення областей просторового заряду, спричиняє дрейфовий струм у напрямку протилежному дифузійному струму. Врешті-решт, між дифузійним і дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага і перетікання зарядів припиняється. Якщо прикласти зовнішню напругу таким чином, щоб створене нею електричне поле було направленим в протилежному напрямку до напрямку електричного поля між областями просторового заряду, то динамічна рівновага порушується, і дифузійний струм переважатиме дрейфовий струм, швидко наростаючи з підвищенням напруги. Таке під'єднання напруги до p - n переходу називається прямим зміщенням.

Якщо ж зовнішня напруга прикладена так, що створене нею поле є такого ж напрямку що і поле між областями просторового заряду, то це призводить лише до збільшення областей просторового заряду, й струм через р-п перехід не проходитиме. Таке під'єднання напруги до р-п переходу називається зворотним зміщенням. На властивостях р-п переходів ґрунтується робота численних напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, сонячних елементів, світлодіодів тощо.

Транзистор — напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги.



Транзистори є основними елементами сучасної електроніки. Зазвичай вони застосовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах. У мікросхемах в єдиний функціональний блок об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів. За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні транзистори й польові транзистори. До кожного з цих класів входять численні типи транзисторів, що відрізняються за будовою і характеристиками. В біполярному транзисторі носії заряду рухаються від емітера через тонку базу до колектора. База відділена від емітера й колектора р-п переходами. Струм протікає через транзистор лише тоді, коли носії заряду інжектуються з емітера в базу через р-п перехід. В базі вони є неосновними носіями заряду й легко проникають через інший р-п перехід між базою й колектором, прискорюючись при цьому. В самій базі

носії заряду рухаються за рахунок дифузійного механізму, тож база повинна бути досить тонкою. Управління струмом між емітером і колектором здійснюється зміною напруги між базою і емітером, від якої залежать умови інжекції носіїв заряду в базу. В польовому транзисторі струм протікає від витoku до стоку через канал під затвором. Канал існує в легovanому напівпровіднику в проміжку між затвором і нелегованою підкладкою, в якій немає носіїв заряду, й вона не може проводити струм. Безпосередньо під затвором існує область збіднення, в якій теж немає носіїв заряду завдяки утворенню між легovanим напівпровідником і металевим затвором контакту Шотткі. Таким чином ширина каналу обмежена простором між підкладкою та областю збіднення. Прикладена до затвору напруга збільшує чи зменшує ширину області збіднення, а тим самим ширину каналу, контролюючи струм.

Корпуси транзисторів виготовляються з металу, кераміки або пластику. Для транзисторів великої потужності необхідно додаткове охолодження.

Транзистори монтуються на друкованих платах за технологією «через отвір», або за технологією поверхневого монтажу. При технології «через отвір», виводи транзисторів вставляються в попередньо просвердлені в платі отвори. Корпуси транзисторів стандартизовані, але послідовність виводів ні, вона залежить від виробника. Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювачі у якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, що називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів.

Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювача і у якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, що називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

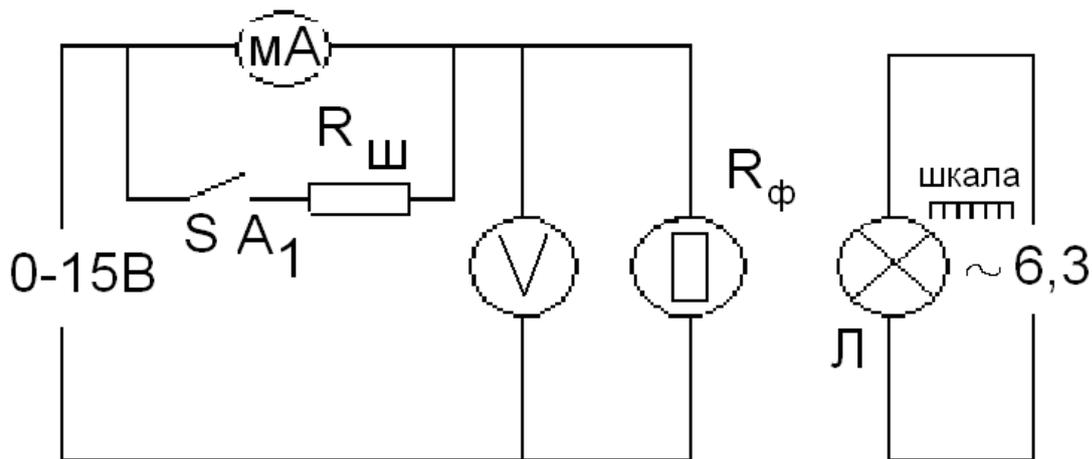
«Внутрішній фотоефект у напівпровідниках».

Мета роботи: експериментально встановити залежність опору напівпровідника від величини падаючого на нього потоку електромагнітного випромінювання та визначити чутливість фото резистора.

Прилади та обладнання: напівпровідниковий фото резистор ФСД-Г2, джерело світла (лампа), мікроамперметр та вольтметр постійного струму, джерело, що регулюється, постійної напруги (0-15В) , джерело напруги (6,3В).

Методика експерименту.

Схема лабораторної установки показана на рис.1.



Світло від лампочки накаливання Л падає на фото резистор, змінюючи його опір. За допомогою вольтметра вимірюється напруга на фото резисторі, яка може змінюватись від 0 до 15В. Мікроамперметр вимірює силу струму, що проходить через фото резистор. При збільшенні падаючого світлового потоку опір шунта $R_{ш}$ підключається тумблером SA1 і максимальний струм, що вимірюється становить $I_{max}=5$ мА. При відключенні $I_{max}=I$ мА. Падаючий світловий потік Φ_p можна зменшувати, збільшуючи відстань від лампи до фото резистора. Його величина розраховується

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r} \cos \alpha,$$

де I - сила світла лампи, $S=28$ mm² - площа світлочутливого шару фото резистору, $\alpha=0$ - кут між напрямком світлового потоку та нормальною до світлочутливої поверхні, r - відстань між лампами до фото резистора визначається по шкалі.

Можна визначити величину падаючого світлового потоку

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{0,43 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{r} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{r^2}$$

Отже, падаючий світловий потік змінюється обернено пропорційно квадрату відстані k від фото резистора до лампи накаливання.

Порядок виконання роботи.

1. Встановити вимірювання сили струму $I_{max}=5$ мА. Включити живлення фото резистора та лампи, встановити напругу 10 В. Визначити силу струму при мінімальній відстані r . Збільшуючи r через 1 см зняти залежність I (Φ_p) (при $U = \text{const}$) та побудувати графіки залежності $I=f(\Phi_p)$.

Таблиця 1

№	r(m)	I(A)	U(B)	R _ф	Φ _п
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

2. Обчислити опір фото резистора R_ф ($R_{\text{ф}}=U/I_{\text{ф}}$). для всіх значень сили струму та побудувати графік залежності $R_{\text{ф}}=f(\Phi_{\text{п}})$

3. установити лампу біля фото резистора (r=1 см). Змінюючи вхідну напругу через I В, зняти залежність I(U) при $\Phi = \text{const}$ (табл.. 2). та побудувати графік залежності $I=f(U)$

Таблиця 2

№	r(m)	U(B)	I(A)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Контрольні питання.

1. Що називається фотоефектом?
2. Рівняння Планка та Енштейна
3. Як залежить опір від світлового потоку?
4. Від чого залежить сила струму фото резистора?
5. Де застосовуються фоторезистори?

Додаткові теоретичні відомості

Фотоефект - явище, «звільнення» електронів твердого тіла від зв'язків усередині атома під дією електромагнітного випромінювання.

Електрони, що вилітають із речовини при зовнішньому фотоефекті, називаються "фотоелектронами", а електричний струм, який утворюється ними при упорядкованому русі у зовнішньому електричному полі, називається "фотострумом".

Види фотоефекту:

1) **зовнішній фотоефект** (фотоелектронна емісія) - випромінювання електронів з поверхні твердого тела під дією світла, гамма - випромінювання і т. і. (відкритий Г. Герцем у 1887, пояснений Ейнштейном);

2) **внутрішній фотоефект** – перерозподіл електронів за енергетичними станами в твердих та рідких напівпровідниках та діелектриках, який спричиняється світлом. Він проявляється у зміні концентрації носіїв струму у середовищі і призводить до виникнення фотопровідності;

3) **вентильний фотоефект** - збудження світлом ЕРС на межі поділу метал - напівпровідник або між різнорідними напівпровідниками. При вентильному фотоефекті фотоелектрони виходять через поверхню поділу з одного тіла в інше.

Теоретичне пояснення явища фотоефекта дав Альберт Ейнштейн, за що отримав Нобелівську премію. Ейнштейн використав гіпотезу Макса Планка про те, що світло випромінюється порціями (квантами) із енергією, пропорційною частоті. Припустивши, що світло і поглинається такими ж порціями, він зміг пояснити залежність швидкості вибитих електронів від довжини хвилі опромінення.

Квантова природа світла визначає світловий потік фотонів (квантів). Кожен фотон має масу, імпульс і дискретну енергію тільки при швидкості світла.

Енергія фотона по Планку визначається так званою формулою Планка:

Рівняння Планка має вигляд: $E_{\phi} = h\nu$

h - стала Планка

ν - частота світла

Енергію фотона речовина повністю поглинає або повністю випромінюють.

Ця величина неділима. **Енергія фотона по Ейнштейну:**

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2$$

$$h\nu = m_{\phi}c^2$$

m_{ϕ} – це маса фотона, що визначається формулою: $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$

$$\lambda = \frac{1}{T}$$

$$\lambda = cT = c \frac{1}{\nu}$$

ν – частота світла, визначається за формулою: $\nu = \frac{c}{\lambda}$

Імпульс фотона можна визначити:

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c^2}c = \frac{h\nu}{c}$$

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} - \text{імпульс фотона.}$$

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A,$$

де ν — частота світла, h — стала Планка, m — маса електрона, v — його швидкість, A — робота виходу.

Це рівняння називається **рівнянням Ейнштейна**. Робота Ейнштейна мала велике значення для розвитку ідей квантової механіки взагалі та квантової оптики зокрема.

Для виконання повного фотоефекту енергій фотона $h\nu$ поглинаються електроном, що дає йому можливість виконати роботу виходу за межі речовини та надати йому енергії необхідної для проходження від катода до анода.

Червона границя фотоефекту. Мінімальна умова при якій може відбутися фотоефект: $h\nu = A_{\text{вих}}$

$\nu_2 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$ умова, при якій енергії фотона достатньо, щоб виконати роботу виходу.

Причина фотопровідності - збільшення концентрації носіїв заряду - електронів у зоні провідності і дірок у валентній зоні. Світлочутливий шар напівпровідникового матеріалу в таких опорах поміщений між двома струмопровідними електродами. Під впливом світлового потоку електричний опір шару змінюється. У залежності від застосовуваного шару напівпровідникового матеріалу фотоопору підрозділяються на сірко свинцеве, сірко кадмієве, сірковістмутове і полікристалічні селено-кадмієві. При певному освітленні опір фотоелемента зменшується, а, отже, сила струму в колі зростає, досягаючи значення, достатнього для роботи якого-небудь пристрою (схематично показано у вигляді деякого опору навантаження).

Завдяки простоті і надійності, високій чутливості і малим розмірам фоторезистори знаходять широке застосування в приладобудуванні і технології виробництва. Їх використовують як фотоелектричні перетворювачі вимірювальних пристроїв, фотоелектричні реле, регуляторів і т.п. Фотоелектричні реле на основі фоторезисторів використовуються для захисту

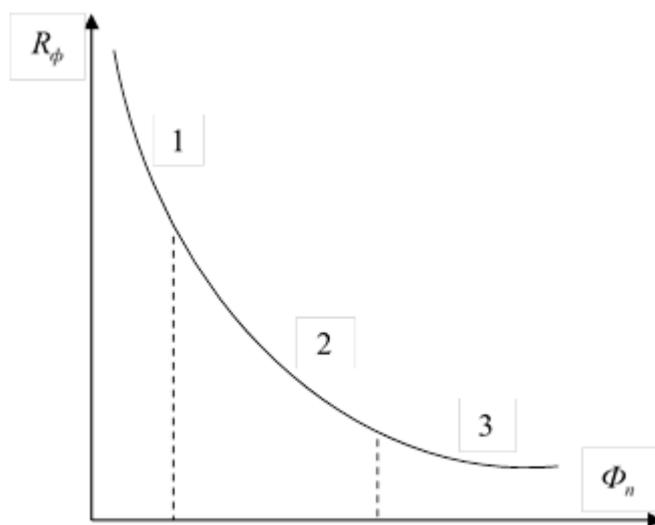
від травмування рук робітників, обслуговуючих штампувальні преси з електропневматичним управлінням, в охоронних пристроях для захисту ділянок території від проникнення сторонніх осіб, для контролю розмірів, кольору і якості поверхні різних виробів, для лічби деталей на конвеєрі і т.п.

Оскільки експериментально квантовий вихід визначити складно, інтегральну чутливість визначають як відношення величини відносної зміни опору фоторезистора до приросту потоку енергії випромінювання, що викликав цю зміну:

$$\eta = \frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi} \cdot \Delta \Phi_n}$$

де R_{ϕ} - опір чутливого шару фоторезистора під час опромінювання його потоком Φ_n (визначається для середнього значення потоку в проміжку $\Delta \Phi_n$).

На малюнку показано залежність $R_{\phi}(\Phi_n)$:



Оскільки залежність R_{ϕ} від Φ_n нелінійна, то інтегральну чутливість η фоторезистора, як правило, визначають на різних ділянках залежності, наприклад, на ділянках 1, 2, 3.

Фоторезисторами називають напівпровідникові прилади, провідність яких змінюється під дією світла. Основним елементом фоторезистора є у першому випадку монокристал, а в другому - тонка плівка напівпровідникового матеріалу.

Якщо фоторезистор включений послідовно з джерелом напруги і не освітлений, то в його колі буде протікати темноваї струм

$I_m = E / (R_m + R_n)$, де E - е.р.с. джерела живлення; R_m - величина електричного опору фоторезистора в темряві, звана темного опору; R_n - опір навантаження.

При висвітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на переклад електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар зростає, опір фоторезистора падає і через нього тече світловий струм:

$$I_c = E / (R_c + R_n).$$

Різниця між світловим і темнова струмом дає значення струму I_ϕ , що отримав назву первинного фотоструму провідності

$$I_\phi = I_c - I_T.$$

Коли променистий потік малий, первинний фотострум провідності практично безінерційна і змінюється прямо пропорційно величині променистого потоку, що падає на фоторезистор. У міру зростання величини променистого потоку збільшується число електронів провідності. Рухаючись всередині речовини, електрони зіштовхуються з атомами, іонізують їх і створюють додатковий потік електричних зарядів, що отримав назву вторинного фотоструму провідності. Збільшення числа іонізованих атомів гальмує рух електронів провідності. У результаті цієї зміни фотоструму запізнюються у часі щодо змін світлового потоку, що визначає деяку інерційність фоторезистора.

Завдяки простоті і надійності, високій чутливості і малим розмірам фоторезистори знаходять широке застосування в приладобудуванні і технології виробництва. Їх використовують як фотоелектричні перетворювачі вимірювальних пристроїв, фотоелектричні реле, регуляторів і т.п.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

«Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду»

Мета роботи: вивчення напівпровідників та їх властивостей; застосування напівпровідникових діодів.

Теоретична частина. Усі речовини за їх електропровідними властивостями поділяються на три групи: провідники, напівпровідники та ізолятори.

Провідники - це метали та їх сплави.

Ізолятори (діелектрики) - це мінерали, неорганічні аморфні тіла, синтетичні сполуки, полімери тощо.

Напівпровідники - це деякі хімічні елементи, окиси металів, хімічні сполуки.

В напівпровідниках можливі два механізми (типи) електропровідності: *електронний*, що здійснюється рухом електронів, звільнених з хімічних зв'язків і *дірковий*, обумовлений рухом дірок (вакансій хімічних зв'язків).

Напівпровідники, провідність яких зумовлена надлишковими електронами, називаються *електронними* або *напівпровідниками n-типу*.

Напівпровідники, провідність яких викликана наявністю дірок, називаються *дірковими* або *напівпровідниками p-типу*.

Розглянемо напівпровідник, що складається з двох частин, одна з яких має провідність **n** - типу, а друга **p**-типу (рис. 1). У **p**-області основними носіями є дірки, а в **n**-області - електрони. І **n** -, і **p**-області до утворення контакту між ними були, в цілому, електронейтральними. При утворенні контакту внаслідок дифузії та взаємного електричного притягання певна кількість вільних електронів **n**-області перейде в **p**-область, де є незайняті валентні рівні (дірки). Електрони займуть частину цих рівнів поблизу контакту. Дірки, в свою чергу, дифундуватимуть з **p**-області в **n**-область, де будуть рекомбінувати з вільними електронами. Завдяки цим процесам концентрація вільних електронів і дірок поблизу контакту значно зменшиться.

Поряд з цим, **n**-область поблизу контакту зарядиться позитивно, бо: по-перше, вона, втратила частину своїх вільних електронів; а по-друге, до неї перейшла частина дірок з **p**-області. Аналогічно, **p**-область поблизу контакту зарядиться негативно. Електричне поле, що виникне при цьому, перешкоджатиме подальшій дифузії носіїв заряду. В області контакту встановиться динамічна рівновага.

Таким чином, на межі контакту **n** - і **p**- напівпровідників виникає **p-n**-перехід (рис.2), який має великий опір, бо він збіднений на носії заряду. Шар, що перешкоджає дифузії носіїв заряду, називається запираючим- шаром. Його товщина залежить від концентрації носіїв заряду в областях напівпровідника.

Якщо до **p-n**-переходу прикласти різницю потенціалів у такому напрямі, як показано на рис. 3, тобто до **p**-області подати позитивний потенціал, а до **n**-області негативний, то під дією зовнішнього поля вільні носії заряду рухатимуться до **p-n**-переходу; концентрація їх на переході зросте і через напівпровідник піде значний струм.

Якщо ж різницю потенціалів прикласти в протилежному напрямі (рис. 4), то ширина **p-n**-переходу зросте, бо носії заряду будуть відходити від контактної області. У цьому випадку опір переходу буде великим, а струм у колі - незначним.

Напрямом, в якому **p-n**-перехід пропускає струм, називається прямим або напрямом провідності.

Протилежний напрям називають зворотнім або запірним.

Таким чином, прилади, в яких створено **p-n**-перехід, пропускають струм лише у прямому напрямі. У зворотному напрямі струм дуже малий. Такі прилади називають діодами і вони використовуються для випрямлення струмів в електро- і радіотехніці. Промисловість випускає, в основному, кременеві і германієві точкові та площинні діоди.

Для діодів введені позначення, які складаються з букв і цифр (наприклад Д7Ж): Д - означає тип приладу - діод; 7 - вказує тип приладу та його застосування, Ж – різновидність приладу.

Найважливіші параметри діодів такі:

1. Найбільше значення зворотної напруги $U_{зв}$, яка може бути прикладена до діода у зворотному напрямі.

2. Прямий струм $I_{пр}$ – величина максимального струму через діод при прямому ввімкненні.

3. Найбільше значення зворотного струму $I_{зв.макс}$ величина струму через діод у зворотному напрямі (коли до нього прикладено зворотну напругу).

4. Пробивна напруга $U_{проб.}$ - напруга на діоді, при якій відношення зміни напруги до зміни струму дорівнює нулю. Перевищення цього значення приводить до різкого збільшення зворотного струму і руйнування діода.

5. Найбільша амплітуда струму при перехідних процесах $I_{перех.макс.}$ - найбільше значення амплітуди струму через діод, яка не спричиняє його пошкодження протягом секунди.

6. Найбільша амплітуда випрямленого струму $I_{випр.макс.}$ – найбільше значення амплітуди струму через діод.

7. Прохідна ємність $C_{пр}$ - статична ємність між електродами діода. Основною характеристикою діода є вольт-амперна характеристика, яка показує залежність величини струму, що проходить через діод від величини прикладеної напруги.

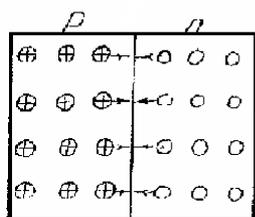


рис. 1

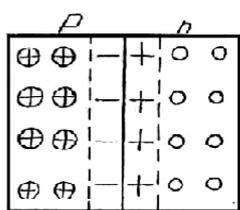


рис. 2

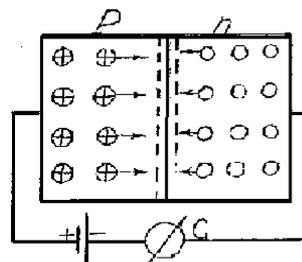


рис. 3

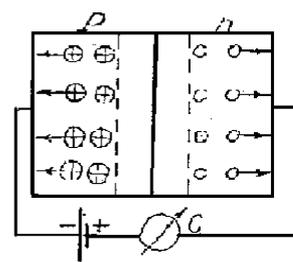
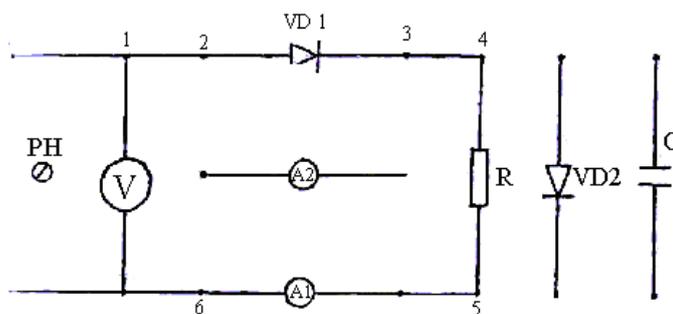


рис. 4



Опис лабораторної установки і методика дослідження

Схема установки для дослідження *p-n* переходу зображена на рис.5

Постійна напруга змінюється регулятором напруги РН від 0 до 8 В, а вимірюється вольтметром ($U_{ном}=10$ В). Міліамперметр A_1 ($I_{ном}=50$ мА) використовується в завданні 1 для вимірювання прямого струму *p-n* переходу, а мікроамперметр A_2 ($I_{ном}=100$ мкА) - в завданні 2 для вимірювання зворотного струму діода. У роботі досліджується *p-n* переходи світло діода VD1 і германієвого діода VD2. При проходженні прямого струму світло діод випромінює світло. У завданнях

1 і 2 досліджується його вольт-амперна характеристика при прямому і зворотному вмиканнях.

Виконання роботи

Завдання 1. Дослідження *p-n* переходу при прямому вмиканні діода.

1. Зібрати схему (рис.5) . Під'єднати до клем (5) і (6) міліамперметр A_1 і з'єднати з клемами (1) і (2), а також (3) і (4). Регулятор напруги РН встановити в крайнє положення, обертаючи проти годинникової стрілки.

2. Включити живлення. Змінюючи напруги через 1 В (від 0 до 8 В) вимірювати силу струму в ланцюгу.

3. Результати вимірювань занести в таблицю №1. Відключити електроживлення.

4. Використовуючи отримані данні вирахувати напругу U_d на *p-n* переході за формулою: ,де U - вхідна напруга; $U_k = I_0 R$ - напруга на резисторі.

Результат занести до таблиці №1

Знайти прямий опір *p-n* переходу R_{np} для всіх значень вхідної напруги за формулою: $R_{np} = \frac{U_d}{I_0}$

Результати занести до таблиці 1

№п	U	I_0	R	U_k	U_d	R_{np}
.п.						
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						

5. За отриманими даними побудувати графік залежності $I_0 = f(U_d)$, $R_{np} = f(U_d)$.

Завдання 2. Дослідження *p-n* переходу при зворотному включенні діода.

1. В схемі (рис.5) під'єднати до клем (5) і(6) мікроамперметр A_2 ізмінівши напрям струму в *p-n* переході, для чого з'єднати провідниками клем (1) і(3); (2) і(4). РН встановити в нульовому положенні. Ввімкнути живлення, збільшуючи вхідну напругу через 1 В (від 0 до 8 В) вимірювати силу зворотного струму $I_{зв}$. Результати занести до таблиці №2. Вимкнути живлення. Розібрали схему.

1. Використовуючи отримані данні , знайти значення зворотного опору $p-n$ переходу $R_{зв}$. для всіх значень вхідної напруги ізанести до таблиці №2. Так як $R_{зв} \gg R$, то $R_{зв} \approx U / I_{зв}$ Таблиця 2

№ п.п.	U	$I_{зв}$	$R_{зв}$
1.			
2.			
3.			
4.			

3. Побудувати графік залежності $I_{зв} = f(U)$, $R_{зв} = f(U)$.

Контрольні питання

1. Поясніть механізм електронної провідності напівпровідника?
2. Поясніть механізм діркової провідності напівпровідника.
3. Що таке вольт-амперна характеристика діода?
4. Які конструктивні особливості точкових і площинних діодів?

Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідники характеризуються як властивостями провідників, так і діелектриків. У напівпровідникових кристалах атоми встановлюють ковалентні зв'язки (тобто, один електрон в кристалі кремнію, як і алмазу, пов'язаний двома атомами), електронам необхідний рівень внутрішньої енергії для вивільнення з атома ($1,76 \cdot 10^{-19}$ Дж проти $11,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, чим і характеризується відмінність між напівпровідниками і діелектриками). Ця енергія з'являється в них при підвищенні температури (наприклад, при кімнатній температурі рівень енергії теплового руху атомів дорівнює $0,4 \cdot 10^{-19}$ Дж), і окремі атоми отримують енергію для відриву електрона від атома. Із зростанням температури число вільних електронів і дірок збільшується, тому в напівпровіднику, не містить домішок, питомий опір зменшується. Умовно прийнято вважати напівпровідниками елементи з енергією зв'язку електронів менший ніж 1,5-2 еВ. Електронно-дірковий механізм провідності проявляється у власних (тобто без домішок) напівпровідників. Він називається власною електричною провідністю напівпровідників.

Під час розриву зв'язку між електроном і ядром з'являється вільне місце в електронній оболонці атома. Це обумовлює перехід електрона з іншого атома на атом з вільним місцем. На атом, звідки перейшов електрон, входить інший електрон з іншого атома і т. д. Це обумовлюється ковалентними зв'язками атомів. Таким чином, відбувається переміщення позитивного заряду без переміщення самого атома. Цей умовний позитивний заряд називають діркою. Зазвичай рухливість дірок у напівпровіднику нижче рухливості електронів. **Вольт-амперною**

характеристикою, скорочено ВАХ матеріалу чи пристрою називається залежність струму в ньому від прикладеної напруги.

Вольт-амперну характеристику можна визначити також, як залежність падіння напруги на пристрої від струму, що в ньому протікає.

Вольт-амперна характеристика зображується зазвичай у вигляді графіка, в якому напруга відкладається вздовж осі абсцис, а струм вздовж осі ординат. Для матеріалів вольт-амперна характеристика часто приводиться у вигляді залежності густини струму від напруженості прикладеного поля.

Діод являє собою двохелектродний напівпровідниковий прилад, який має один p - n -перехід. Один вивід (анод) підключений до області напівпровідника p -типу, а другий (катод) до області провідністю n -типу. При підключенні напруги додатної полярності до аноду, а від'ємної до катода перехід зміщується в прямому напрямку і діод відкривається. Через нього починає протікати електричний струм. При зміні полярності діод закривається і струм через нього не проходить.

Діоди поділяють на точкові і площинні. Точкові діоди мають p - n -перехід з малою товщиною і площиною, тому розраховані на малі струми і невеликі напруги, але завдяки малим розмірам переходу вони мають малу власну ємність, що дозволяє використовувати їх в широкому діапазоні частот. Плоскі діоди мають дуже велику площину і товщину p - n -переходу, що дозволяє їх застосовувати для кіл низьких частот при наявності значного струму і великої напруги.

Для багатьох матеріалів, зокрема для провідників і напівпровідників, вольт-амперна характеристика має лінійну ділянку при малих напругах. В цьому діапазоні прикладеної напруги справедливий закон Ома, який стверджує, що струм пропорційний напрузі. При виконанні закону Ома струм у пристрої протікає однаково в обидва боки, в залежності від полярності прикладеної напруги.

Проте така поведінка не має універсального характеру. Наприклад, струм у вакуумному діоді суттєво нелінійний навіть при дуже малих напругах між анодом і катодом. Це явище зумовлене тим, що випромінені нагрітим катодом електрони створюють у просторі між анодом і катодом негативно-заряджену хмару, яка перешкоджає новим електронам покидати катод. У таких випадках говорять про виникнення області просторового заряду, і залежність струму від напруги описується законом Чайлда. Аналогічні області просторового заряду виникають також у діелектриках, провідність яких у дуже сильних електричних полях зумовлена інжектованими електронами.

Здебільшого струм зростає при зростанні прикладеної напруги. Але й це не є універсальним законом. Наприклад, пристрій, який називається резонансним тунельним діодом, пропускає лише електрони з

певною визначеною енергією. Таких електронів мало й при малих напругах, і при великих напругах. Тому при збільшенні напруги струм через резонансний тунельний діод спочатку зростає, а потім, коли електрони мають надто велику енергію, падає. Ділянки ВАХ, на яких струм спадає із підвищенням напруги, називаються областями негативної диференційної провідності. Вони дуже цікаві для практичного використання, бо на них можна побудувати, наприклад, генератори автоколивань. Негативну диференційну провідність при високих напругах мають також деякі напівпровідники.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

«Дослідження залежності опору напівпровідників від температури».

Мета роботи: Дослідним шляхом встановити закон зміни опору напівпровідника при його нагріванні визначити ширину забороненої зони і концентрацію зарядів у напівпровіднику при різній температурі.

Прилади та матеріали: Експериментальна установка, яка має досліджуваний термоопір, термостат з нагрівачем і стабілізатор струму. Джерело постійної напруги ($U=16\text{В}$). Міліамперметр постійного струму ($I_{\text{max}}=200\text{мА}$). Цифровий вольтметр або мультиметр для вимірювання постійної напруги ($U_{\text{max}}=20\text{В}$).

Короткі теоретичні відомості: *Напівпровідники* - це речовини, які за своєю електропровідністю, мають проміжне місце між провідниками першого роду і діелектриками. Навідміну від металів вони мають від'ємний температурний коефіцієнт опору (в певних температурних інтервалах).

Основною відмінністю напівпровідників від металів є значна залежність їх провідності (опору) від зовнішніх факторів (освітленість, механічні деформації, опромінення рентгенівськими та радіоактивними променями, дія магнітного поля тощо). На величину електропровідності напівпровідників суттєво впливає наявність домішок. Величина питомого опору напівпровідників лежить в межах від 10^{-5} до $10^{-8}\text{Ом}\cdot\text{м}$.

До напівпровідників належать деякі хімічні елементи (кремній, германій, селен, бор, телур), а також окиси (CuO), сульфіди (CdS , PbS , ZnS), телуриди (HgTe , CdTe), фосфіди (GaP , InP , ZnP_2) тощо.

Існують напівпровідники із електронною та дірковою провідністю. У напівпровідниковій техніці використовуються напівпровідники, в яких носіями заряду є електрони хімічного зв'язку (вірніше їх відсутність вони мають р-тип провідності і електрони провідності n-типу).

Приклади, дія яких ґрунтується на значній залежності опору напівпровідників від температури, називаються *термісторами* або *термооперами*.

Термістори - об'ємні опори, що виготовляють з напівпровідникових матеріалів. Вони мають від'ємний коефіцієнт опору, який у багато разів перевищує температурний коефіцієнт опору металів. Термістори можуть бути найрізноманітніших розмірів і форми, а також мають різні термічні та електричні властивості, високу механічну міцність.

Залежність опору напівпровідників від температури у значних інтервалах описується виразом:

$$R = Ae^{\Delta E / 2kT} \quad (1)$$

де А - константа, К - стала Больцмана, Е - енергія активації (висота енергетичного бар'єру).

Під *енергією активації* розуміють енергію, яку необхідно затратити, щоб перевести електрон із зв'язаного стану у вільний.

Зменшення опору з ростом температури пояснюється тим, що при збільшенні температури збільшується число носіїв заряду, тобто збільшується концентрація вільних електронів. Графік залежності опору напівпровідників від температури в координатах $\ln R = f(1/T)$ являє собою пряму лінію, тангенс нахилу якої до осі $1/T$ (вісь Ох) дорівнює:

$$\operatorname{tg}\varphi = \Delta E / 2k \quad (2)$$

Звідси *енергія активації* визначається як

$$E = 2k\operatorname{tg}\varphi \quad (3)$$

Концентрація електронів в зоні провідності напівпровідника змінюється від температури по експотенціальному закону

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (4)$$

де n-концентрація електронів провідності при температурі Т,

n_0 -концентрація електронів провідності при $T \rightarrow \infty$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К- постійна Больцмана, ΔE -ширина забороненої зони

Так як електропровідність пропорційна концентрації електронів провідності, то залежність питомої електропровідності γ_0 напівпровідників від температури виражається формулою

$$\gamma = \gamma_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5)$$

де γ_0 - питома електропровідність при $T \rightarrow \infty$

Опір напівпровідника з підвищенням температури зменшується по закону

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (6)$$

де R_0 -опір при $T \rightarrow \infty$

Цю залежність можна використовувати для визначення ширини забороненої зони напівпровідника ΔE .

Прологарифмувати цей вираз по основі е, отримаємо

$$\ln R = \ln R_0 + E/2kT \quad (7)$$

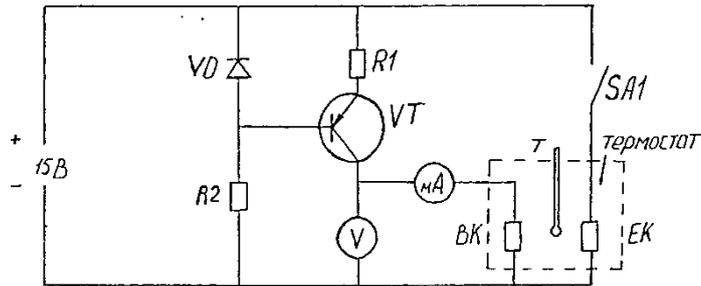
Виразимо k в електрон-вольтах ($1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж) $k=0,86 \cdot 10^{-4}\text{eV/K}$

Знайдемо значення $1/2k$; $1/2k=5,8 \cdot 10^{-3}\text{K/eV}$ і підставимо його в (4);

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{\Delta E} \Delta E \quad (8)$$

Якщо побудувати графік залежності $\ln R = f(5,8 \cdot 10^{-3} / T)$, то він буде представляти собою пряму лінію. Тангенс кута нахилу якої до вісі абсцис рівний ширині зображеної зони ΔE , вираженою в електрон-вольтах:

Схема експериментальної установки



Германієвий напівпровідник ВК поміщений в термостат з нагрівачем ЕК, який підключається до джерела живлення вимикачем SA1.

Величина струму в колі ВК підтримується незмінним стабілізатором при зміні опору ВК, визваним його нагріванням, стабілізатор струму складається із стабілізатора VD), транзистора VT, транзисторів R₁ і R₂.

Для підключення цифрового вольтметра є клема.

Порядок виконання роботи

1). Підключити до експериментальної установки (рис.1) цифровий вольтметр ($U_{\text{max}}=20\text{В}$).

2) Увімкнути живлення тумблером SA1: Значення початкової температури і напруги на термоопорі ВК занести до таб.1.

Сила струму у колі постійна $I = 16 \text{ мА}$.

Таблиця №1

t, °C	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
I, мА	16									
U ₁ , В										
U ₂ , В										
U _{ср.} В										
R, Ом										

3) Визначити і занести до таб.1 значення падіння напруги U₁ і U₂ на термоопорі при зміні температури через кожні 5 °C. Провести виміри U як при нагріванні термоопору (U₁), так і при його охолодженні (U₂).

Обробка результатів:

1. По даним таб.1 визначити середнє значення падіння напруги $U_{\text{cp}} = (U_1 + U_2)/2$ на термопарі і його опір $R = U_{\text{cp}} / I$ для всіх значень температури.

Результати занести до таб. 1.

3. Визначити значення $5,8 \cdot 10^{-3} / T \ln R$ для всіх температур. Результати занести до табл. 2.

Таблиця № 2

T, K									
$\frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{T}, K^{-1}$									
LnR									

По даним табл.2 побудувати графік залежності $\ln R = f(5,8 \cdot 10^{-3} / T)$

Контрольні питання

1. Які речовини належать до напівпровідників ?
2. Пояснити власну провідність напівпровідників.
3. Які типи провідності є у напівпровідниках ?
4. Пояснити домішкову провідність напівпровідників (донорна, акцепторна).
5. Як виникає діркова та електрона домішкова провідність напівпровідників?
6. Що називається енергією, активації?
7. Як залежить опір напівпровідників від температури і освітлення?
8. Що таке терморезистори і яке їх застосування ?

Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідники, як це й виходить з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце міжпровідниками і діелектриками. Якщо значення питомого електричного опору провідників становить приблизно 10^8 Ом м, а діелектриків — від 10^{12} до 10^{20} Омм, то напівпровідників — від 10^1 до 10^7 Ом м. З точки зору мікроструктури речовини це означає, що концентрація вільних заряджених частинок у напівпровідниках набагато менша, ніж у провідниках, і набагато більша, ніж у діелектриках. Наприклад, дуже поширений у техніці напівпровідник германій при кімнатній температурі має приблизно 10^{20} вільних заряджених частинок у 1 м^3 речовини. Здавалося б, велика кількість? Але це в 10 млрд разів менше, ніж у металах.

У процесі вивчення фізичних властивостей напівпровідників, зокрема провідності, виявилось, що в напівпровідників залежність провідності від зовнішніх чинників значно відрізняється від тієї, що спостерігається в металів.

По-перше, якщо опір металів із підвищенням температури збільшується, то опір напівпровідників, навпаки, зменшується. По-друге, опір напівпровідників падає зі збільшенням освітленості, тоді як опір металів від освітленості практично не залежить. По-третє, якщо за наявності домішок метали гірше проводять струм, то введення домішок у напівпровідники, навпаки, різко зменшує опір останніх. Існують і інші, не менш важливі й цікаві відмінності, але про них ви дізнаєтеся пізніше.

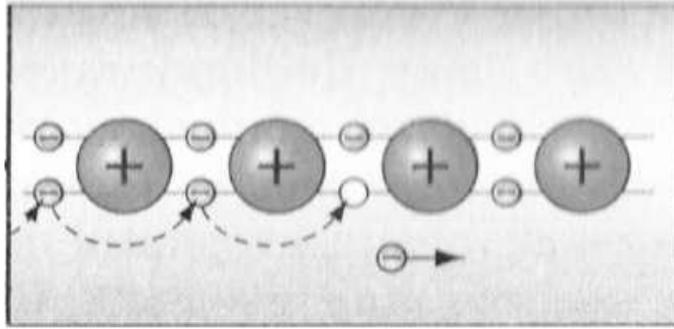
Механізм власної провідності напівпровідників. У напівпровідниковому кристалі серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких настільки велика, що вони можуть залишити зв'язок і стати вільними.

Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм. Зі збільшенням температури середня кінетична енергія електронів збільшується, у результаті дедалі більше електронів стають вільними. Тому, незважаючи на те що йони внаслідок коливального руху ще більше заважають рухові вільних електронів, опір напівпровідника зменшується. Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають електронною провідністю, а вільні електрони — електронами провідності.

Коли електрон залишає ковалентний зв'язок одного з атомів, точніше — однієї пари атомів, то цей зв'язок у парі лишається незайнятим — вільним. Цей вільний зв'язок прийнято називати діркою. Природно, що дірці приписують позитивний заряд.

На вакантне місце може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку, і там, у свою чергу, утвориться дірка.

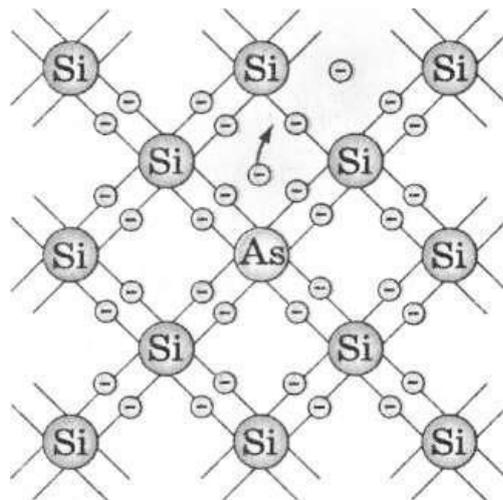
У результаті послідовності таких «стрибків» дірка ніби переміщується по кристалу. (Насправді ж, як ви бачите на рис. 23.3, переміщуються — у зворотному напрямку! — зв'язані валентні електрони.) Провідність напівпровідників, зумовлену «переміщенням» дірок, називають дірковою провідністю.



Діркова провідність

Вивчаємо домішкову провідність напівпровідників. До цього було розглянуто електричний струм у чистих напівпровідниках. У таких напівпровідниках кількість вільних електронів і дірок є однаковою.

Проте якщо в чистий напівпровідник додати невелику кількість домішки, то картина дещо зміниться. Наприклад, якщо в чистий розплавлений силіцій додати трохи арсену, то після кристалізації утвориться звичайна кристалічна ґрат-ка силіцію, однак у деяких її вузлах замість атомів Силіцію перебуватимуть атоми Арсену (рис. 23.4).



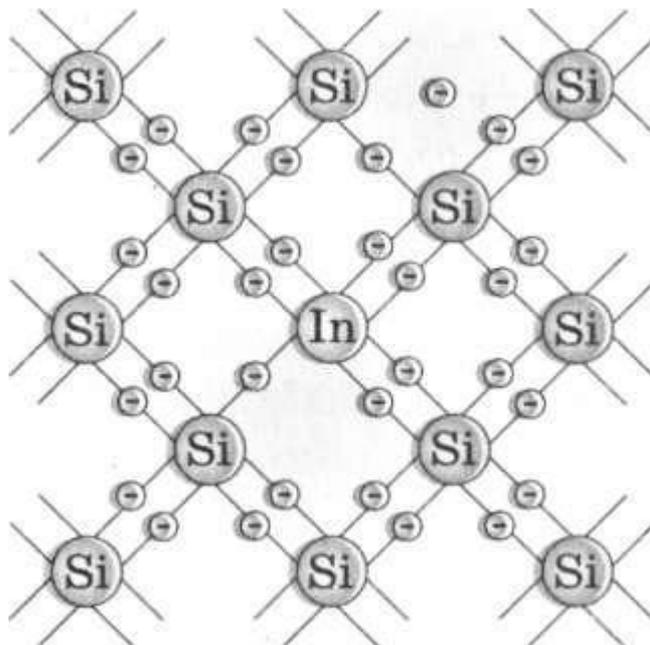
Додавання арсену до чистого розплавленого силіцію.

Арсен, як відомо,— п'ятивалентний елемент. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію. П'ятому ж валентному електрону зв'язку не вистачить, при цьому він буде так слабо пов'язаний з атомом Арсену, що легко стане вільним. У результаті кожний атом домішки дасть один вільний електрон, а вакантне місце (дірка) при цьому не утвориться. Домішки, атоми яких легко віддають електрони, називаються донорними домішками (від латин. *sīnāpāgē* — дарувати, жертвувати).

Нагадаємо, що крім вільних електронів, які надаються домішками, у напівпровідниках є електрони й дірки, наявність яких спричинена власною

провідністю напівпровідників. Отже, у напівпровідниках з донорними домішками кількість вільних електронів значно більша, ніж кількість дірок. Таким чином, основними носіями зарядів у таких напівпровідниках є негативні частинки. Тому напівпровідники з донорними домішками називають напівпровідниками n-типу (від латин. *negativus* — негативний).

Якщо в силіцій додати невелику кількість тривалентного елемента, наприклад Індію, то характер провідності напівпровідника зміниться. Оскільки атом Індію має три валентні електрони, то він може встановити ковалентний зв'язок тільки з трьома сусідніми атомами Силіцію.

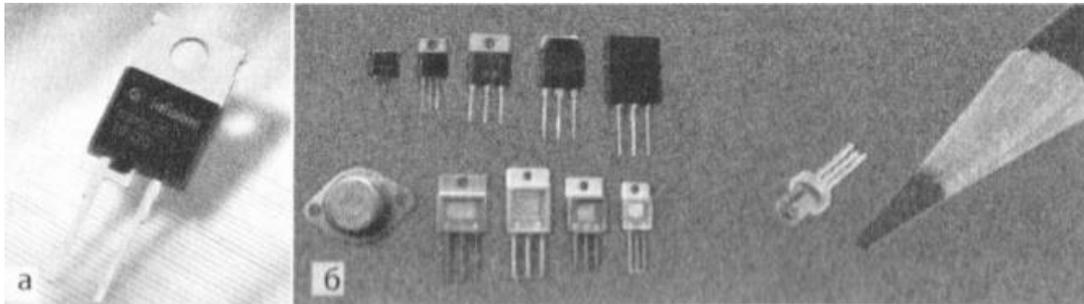


Ковалентний зв'язок.

Для встановлення зв'язку з четвертим атомом електрона не вистачить, і цей відсутній електрон Індій «запозичить» у сусідніх атомів Силіцію. У результаті кожен атом Індію створить одну дірку. Домішки такого роду називаються акцепторними домішками (від латин. *accipere* — той, що приймає). У напівпровідниках з акцепторними домішками основними носіями заряду є дірки. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками p-типу (від латин. *positivus* — позитивний). Оскільки при наявності домішок кількість вільних заряджених частинок збільшується (кожен атом домішки дає вільний електрон або дірку), то провідність напівпровідників з домішками набагато краща, ніж провідність чистих напівпровідників.

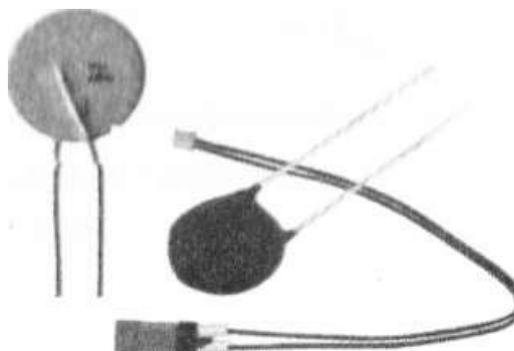
Застосування напівпровідників. Широке застосування напівпровідників зумовлене кількома чинниками. По-перше, властивостями p-переходу — місця контакту двох напівпровідників — p і n-типу. Саме тут спостерігається ряд цікавих явищ. Наприклад, через такий контакт електричний струм добре

проходить в одному напрямку і практично не проходить у протилежному. Це явище отримало назву одnobічної провідності. Властивості р-п переходу використовують для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, без яких не обходиться жодний сучасний електронний пристрій, а також у сонячних батареях — приладах для безпосереднього перетворення енергії випромінювання Сонця на електричну енергію.



Напівпровідникові діоди і транзистори.

Слід додати, що застосування напівпровідників у техніці майже на 99 % зумовлене саме властивостями р-«переходу і що докладніше з цими властивостями ви познайомитеся під час подальшого вивчення фізики. По-друге, опір напівпровідників зменшується зі збільшенням температури, і навпаки. Цю залежність використовують у спеціальних термометрах, які застосовують для вимірювання температури, підтримання сталої температури на автоматичних пристроях.



Автоматичні прилади зі спеціальними термометрами.

По-третє, напівпровідники мають властивість змінювати свій опір залежно від освітленості. Ця властивість використовується у напівпровідникових приладах, які називають фоторезисторами і застосовують для вимірювання освітленості, контролю якості поверхні та ін.



Фоторезистор.

Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних електронів (електронна провідність) і рухом дірок (діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників. За наявності домішок провідність напівпровідників різко збільшується. У разі введення в напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Такі напівпровідники називають напівпровідниками *n*-типу. У випадку введення в напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p*-типу. Напівпровідники широко використовують у техніці, наприклад для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, фотоелементів, термісторів, фоторезисторів тощо.

Напівпровідник — матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких складає порядку декількох електронвольт (eВ). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

При накладанні на кристал електричного поля електрони у напівпровідниках переміщуються проти поля і створюють електричний струм. Таким чином, зона внаслідок часткового укомплектування електронами стає зоною провідності.

Провідність власних напівпровідників, зумовлена електронами, називається електронною провідністю, або провідністю *n*-типу. Провідність власних напівпровідників, зумовлена квазічастинками-дірками, називається дірковою провідністю, або провідністю *p*-типу. Провідність напівпровідників завжди є збудженою, тобто появляється лише під дією зовнішніх факторів (температури, опромінювання, сильних електричних полів і т.д.). У напівпровідників спостерігається два механізми провідності – електронна і діркова. Кількість електронів в зоні провідності дорівнює кількості дірок у валентній зоні, тобто $N_e = N_p$.

У напівпровідниках, що містять домішку, електропровідність складається із власної й домішкової. Провідність, викликана присутністю в кристалі напівпровідника домішок з атомів з іншою валентністю називається домішковою. Домішки, що викликають у напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються донорними, а викликаючи збільшення дірок -

акцепторними. Різна дія домішкових атомів пояснюється в такий спосіб. Припустимо, що в кристал германія (Ge44) атоми якого мають 4 валентних електрона, уведено п'ятивалентний миш'як As5+. У цьому випадку атоми миш'яку своїми 4-я з п'яти валентних електронів вступають у зв'язок. 5-й валентний електрон миш'яку виявиться не зв'язаним, тобто стає вільним електроном. Напівпровідник, електропровідність яких підвищилася завдяки утвору надлишку вільних електронів при введенні домішки, називаються напівпровідниками з електронною провідністю (напівпровідник n-типу), а домішка донорною, (що віддає електрон). Уведення в 4-х валентний напівпровідник 3-х валентного елемента, наприклад (In3+) індію приводить, навпаки, до надлишку дірок над вільними електронами. У цьому випадку ковалентні зв'язки не будуть повністю завершені дірки, що утворюються, можуть переміщатися по кристалу, створюючи діркову провідність. Напівпровідники, електропровідність яких обумовлена в основному рухом дірок, називається напівпровідниками з дірковою провідністю або напівпровідниками р-типу, а домішка - акцепторною (захоплюючи електрон з ковалентного зв'язку або з валентної зони). Енергетичні рівні цих домішок називаються акцепторними рівнями - розташовані над валентною зоною. Енергетичні рівні донорних домішок називаються донорними рівнями - розташовані під нижнім рівнем зони провідності. У домішкових напівпровідниках носії заряду бувають основними (електрони в провіднику n-типу) і не основними (дірки в напівпровіднику р-типу, електрони в напівпровіднику n-типу)..

Енергія активації - характерний параметр процесів, зокрема хімічних реакцій, кінетика яких описується рівнянням Арреніуса. $k = Ae^{-E_a/RT}$, де E_a - енергія активації, R - газова стала, T - температура, A - певний передекспоненційний множник, який слабо залежить від температури. Енергія активації описує потенціальний бар'єр, який повинні подолати частинки для того, щоб реакція відбулася. При підвищенні температури, доля частинок із кінетичною енергією, достатньою для подолання бар'єру збільшується.

Енергія активації вимірюється зазвичай у кДж/моль або ккал/моль.

В фізиці закон Арреніуса частіше записують у вигляді $k = Ae^{-E_a/k_B T}$, де k_B - стала Больцмана. При такому записі енергія активації записується в розрахунку на одну частинку і має розмірність енергії. Найчастіше її значення приводиться в електронвольтах.

Характерна риса напівпровідників — зростання електропровідності зі зростанням температури; при низьких температурах електропровідність мала. При температурі близькій до абсолютного нуля напівпровідники мають властивості ізоляторів. Кремній, наприклад, при низькій температурі погано

проводить електричний струм, але під впливом світла, тепла чи напруги електропровідність зростає.

Терморезистор, термістор — напівпровідниковий резистор, активний електричний опір якого залежить від температури; терморезистори випускаються у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб і бусинок; розміри варіюються від декількох мкм до декількох см; на їх основі розроблені системи і пристрої дистанційного та централізованого вимірювання і регулювання температури, протипожежної сигналізації та теплового контролю, температурної компенсації різних елементів електричного кола, вимірювання вакууму та швидкості руху рідин і газів та ін. Терморезисторами також називають термометри, в яких температура визначається за зміною електричного опору. Терморезистори діють системи дистанційного і централізованого вимірювання, і регулювання температури, системи теплового контролю машин та правових механізмів, схеми температурної компенсації, схеми виміру потужності ВЧ. Терморезистори знаходять використання у промислової електроніці і побутової апаратурі: рефрижераторах, автомобілях, електронагрівальних приладах, телевізорах, системах центрального опалення й ін. У телевізорах часто використовуються терморезистори з позитивним ТКС для розмагнічування кінескопа. Вперше, де застосовувалися терморезистори – це датчики для виміру чи регулювання температури. Терморезистори широко використовують у різних пристроях у ролі датчиків температури. Після відповідної модифікації їх можна використовувати в електронних пристроях зволікання з досить широким інтервалом часів затримки, як конденсаторів чи котушок індуктивності в низькочастотних генераторах, захисту від викидів напруги в ємкостях, індуктивних чи резистивних схемах, як обмежувачів струму, напруги, для вимірювань тиску газу чи теплопровідності. Отже, терморезистори знаходять застосування в багатьох областях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика. Оптика : оглядові лекції / уклад. В. М. Кадченко. Кривий Ріг: КДПУ, 2020. 70 с. URL: http://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/4159/1/ДЕК_ОГЛЯДОВІ%20ЛЕКЦІЇ_2.pdf
2. Коваленко В. Ф. Загальна фізика в прикладах, запитаннях і відповідях. Механіка : навчальний посібник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. 223 с. URL: http://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2017/10/Kovalenko_Mechanics.pdf
3. Конспект з фізики для студентів скороченої форми навчання / уклад. О. Крамар. Тернопіль : Центр оперативної поліграфії, 2018. 128 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/27376/1/metod_AT_preprint.pdf
4. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика (вибрані питання) : курс лекцій. Івано-Франківськ : ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", 2021. 309 с. URL: <http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/9429/1/Фізика%20вибрані%20питання%29.pdf>
5. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика : курс лекцій. Івано-Франківськ : ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", 2020. 310 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/6649/1/Курс%20лекцій_фізика.pdf
6. Лекції з курсу загальної фізики . Розділ І. Механіка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 55 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7495/1/MV_Pravda.pdf
7. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ ІV. Хвильова оптика / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 20 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7498/1/MV_Pravda.pdf
8. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ ІІ. Молекулярна фізика та термодинаміка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 36 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7496/1/MV_Pravda.pdf
9. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ ІІІ. Електрика та магнетизм / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 56 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7497/1/MV_Pravda.pdf
10. Огородніков В. А., Федотов В. О., Перлов В. Є. Теоретична механіка. Кінематика : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2015. 69 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18337/TM_kin_kl.PDF?sequence=1
11. Огородніков В. А., Федотов В. О., Кириця І. Ю. Теоретична механіка. Динаміка : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2016. 84 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18336/Конспект_лекцій_Динаміка_Кириця.PDF?sequence=1&isAllowed=y
12. Павло В. Фізика. Основи і механічний рух : підручник. Одеса : Book Chef, 2020. 384 с.
13. Прокопів В. В. Конспекти лекцій з молекулярної фізики. Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2017. 76 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/3745/1/Konspekt-FF_Knyga.pdf
14. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с. URL:

https://r.donnu.edu.ua/bitstream/123456789/113/1/84_%20Русаков%20В.Ф.%20Механіка.pdf

15. Янг Г., Фрідман Р., Сендін Т., Форд Л. Фізика для університетів з розділами сучасної фізики. Львів : Наутілус, 2009. 1600 с.

16. Calculation of Optimal Geometric Parameters Electrical Apparatus for Controlling the Irrigation System / O. Sadovoy et al. 2023 *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402456>

17. Comparison of Active Power Losses of Single-Phase Electromagnetic Static Devices by Radial Electromagnetic System / O. Sadovoy et al. 2022 *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005760>

18. Technological Parameters Of The Magnetic Circuit Of The Compact Transformer For Aggregate Electric Drive / E. Avdieieva et al. 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240779>.

19. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. 2022 *XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093>.

Навчальне видання

ФІЗИКА

**Модуль 4, 5, 6 «Електродинаміка. Постійний електричний струм.
Електромагнетизм. Змінний електричний струм. Оптика»**

Методичні рекомендації

Укладач: **Вахоніна** Лариса Володимирівна

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 5.
Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.10.2013р.