

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет
будівництва і архітектури

Ф І З И К А

Практичний посібник
до виконання лабораторних робіт із застосуванням
пакета Excel для студентів усіх спеціальностей
з галузі знань «Інформаційні технології»

Київ 2018

УДК: 53(075)

ББК 22.3я7

Ф50

Укладачі: В.І. Клапченко, канд. техн. наук, доцент;
І.О. Азнаурян, доцент;
Г.Ю. Краснянський, канд. фіз.-мат. наук, доцент;
О.В. Панова, канд. техн. наук, доцент;
В.А. Глива, д-р техн. наук, професор;
І.О. Кузнецова, асистент

Рецензент О.Є. Кружилко, д-р техн. наук, старш. наук.
співробітник ДУ «ННДПБіОП»

Відповідальний за випуск В.І. Клапченко, канд. техн. наук,
доцент

*Затверджено на засіданні кафедри фізики, протокол № 9
від 20 лютого 2017 року.*

Видається в авторській редакції.

Фізика: практичний посібник до виконання лабораторних
Ф50 робіт із застосуванням пакета Excel/ уклад.: В.І. Клапченко
та ін. – К.: КНУБА, 2018. – 100 с.

Містить матеріали для підготовки, виконання, оформлення
та захисту лабораторних робіт базового лабораторного
практикуму із застосуванням пакета Excel.

Призначено для студентів усіх спеціальностей з галузі
знань «Інформаційні технології».

© КНУБА, 2018

ЗМІСТ

Загальні положення.....	4
1. Короткі відомості про етапи виконання лабораторних робіт	5
2. Лабораторні роботи.....	9
Лабораторна робота № 14.	
Визначення абсолютної та відносної вологості повітря	9
Лабораторна робота № 2.2.	
Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом регулярного режиму	19
Лабораторна робота № 4.1.	
Визначення параметрів згасання коливань фізичного маятника	24
Лабораторна робота № 4.2.	
Дослідження резонансних характеристик коливального контуру	31
Лабораторна робота № 4.3.	
Визначення швидкості звуку в повітрі методом стоячих хвиль	39
Лабораторна робота № 5.2.	
Визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційних ґрат	44
Лабораторна робота № 5.3.	
Дослідження поляризованого світла	51
Лабораторна робота № 5.6. Визначення роботи виходу електрона з металів методом гальмування фотоелектронів в електричному полі	55
Лабораторна робота № 6.1.	
Визначення енергетичної ширини забороненої зони напівпровідника	61
Лабораторна робота № 6.2.	
Вимірювання вольт-амперної характеристики напівпровідникового випрямляча	69
Лабораторна робота № 6.3.	
Вимірювання світлової характеристики вентильного фотоелемента	76
Лабораторна робота № 7.1.	
Визначення активності радіоактивного препарату.....	81
Лабораторна робота № 7.2.	
Визначення коефіцієнта поглинання радіоактивного випромінювання різними матеріалами	89
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	95
ДОДАТОК	96

Загальні положення

Лабораторний практикум є важливою складовою навчального процесу, найефективнішою формою пізнавальної діяльності студентів, оскільки він дає можливість особисто відтворювати і спостерігати більшість явищ, які вивчають у фізиці, самостійно перевіряти на досліді фізичні закономірності та наслідки з них, а також знайомитися з принципом дії та будовою вимірювальних приладів і найважливішими методами фізичного експерименту. Лабораторний практикум формує у студентів навички самостійної дослідницької роботи і технічно грамотного вимірювання фізичних величин, а також унаочнює, поглиблює, розширює і обґрунтовує теоретичний курс фізики. Внаслідок цього здійснюється один із важливих етапів навчання – поєднання теорії з практикою.

Під час виконання лабораторних робіт студенти багато часу витрачають на обробку результатів вимірювань і їх оформлення (заповнення таблиць і побудова графіків). Часу на аналіз отриманих результатів залишається мало або взагалі не вистачає. Рутинну роботу з розрахунків і оформлення результатів можна мінімізувати, використовуючи програмний продукт MS Excel.

У процесі проведення лабораторних робіт з фізики часто потрібно розраховувати одні й ті ж фізичні величини для кількох дослідів. Цю проблему можна вирішити, якщо всі експериментальні значення надавати у вигляді електронної таблиці, а це дає можливість не тільки відобразити, але й обробляти їх. Для описання зв'язку між значеннями різних комірок таблиці застосовуються формули. Розрахунок за заданими формулами виконується автоматично. Зміна вмісту якої-небудь комірки призводить до перерахунку значень усіх комірок, які з нею пов'язані формульними співвідношеннями, і, тим самим, до оновлення всієї таблиці відповідно до змінених даних. Застосування електронних таблиць спрощує роботу з даними і дає можливість отримувати результати без проведення розрахунків вручну або спеціального програмування.

У процесі виконання лабораторної роботи часто доводиться будувати графіки залежностей величин на основі таблиць. За допомогою Майстра діаграм і багатой бібліотеки діаграм Excel можна скласти графіки та діаграми різних видів. Результати дослідів, які представлено в графічному вигляді, сприяють детальнішому аналізу явищ, забезпечують кращу наочність, а застосування електронних таблиць не тільки дає можливість значно заощадити час на занятті, але і забезпечує міжпредметний зв'язок з інформатикою.

Примітка. У рекомендованому виданні нумерацію лабораторних робіт збережено відповідно до [8].

1. Короткі відомості про етапи виконання лабораторних робіт

На виконання кожної лабораторної роботи передбачено окремі **етапи**:

1. Самостійну домашню підготовку до лабораторної роботи.
2. Отримання дозволу на виконання роботи.
3. Виконання роботи та фіксування результатів вимірювання.
4. Оформлення звіту.
5. Захист лабораторної роботи.

Розглянемо кожний етап детальніше.

1. Що включає самостійна домашня підготовка?

Студент, який знає номер своєї бригади, визначає за графіком номер та назву тієї лабораторної роботи, яка буде виконуватись на даному лабораторному занятті. Скориставшись рекомендованим методичним вказівками вдома або у читальному залі, готується до виконання лабораторної роботи. В ході підготовки студент може проконсультуватись у викладача. Результатом підготовки має бути:

- конспект у лабораторному зошиті методичних вказівок до виконання даної лабораторної роботи;

- володіння в достатньому обсязі теоретичним матеріалом за темою роботи. (Для цього можна скористатись наведеними вказівками до виконання лабораторної роботи, контрольними запитаннями до лабораторної роботи або підручником);
- вміння чітко формулювати назву, мету та завдання даної лабораторної роботи;
- знання методики виконання лабораторної роботи та необхідного обладнання, яким користуються в даній роботі.

2. Як отримати дозвіл на виконання роботи?

Для того, щоб одержати дозвіл на виконання даної лабораторної роботи необхідно:

▶ мати в лабораторному зошиті студента скорочений (або повний) запис методичних матеріалів, необхідних як для виконання самої роботи, так і для оформлення звіту та захисту лабораторної роботи. Теоретичні відомості з рекомендованої літератури можуть бути подані в скороченій формі;

- ▶ знати, яка мета роботи та яке конкретне завдання ставиться перед студентом;
- ▶ знати, які вимірювання, яким чином і в якій послідовності слід здійснювати;
- ▶ знати, які матеріали, прилади, установки необхідні для виконання роботи;
- ▶ мати макет таблиць для занесення даних вимірювань, розрахунків та побудови графіків в програмі Excel

Надаючи допуск викладач попереджує (іноді застерігає) про те, чого не можна робити взагалі чи не можна робити без нагляду викладача або лаборанта.

3. Виконання роботи та фіксування результатів вимірювання

Студент виконує лабораторну роботу під наглядом викладача. Електричні схеми включаються у коло тільки після перевірки

викладачем або лаборантом. Виконання лабораторної роботи фіксується в лабораторному журналі при наявності в студентських лабораторних зошитах результатів вимірювань.

4. Як правильно оформити звіт?

Розрахунок результатів вимірювання, побудова графіків та оформлення звіту проводиться на лабораторних заняттях під контролем викладача або самостійно поза заняттями. Звіт подається викладачу у друкованому вигляді на аркушах формату А-4 та складається з титульної сторінки та сторінками з результатами розрахунків.

5. Як захистити роботу?

Загальні положення про захист лабораторної роботи такі:

- до захисту роботи допускають студентів, які виконали роботу та здали правильно оформлений звіт;
- захистом роботи є підтвердження студентом в бесіді з викладачем розуміння теоретичних положень, фізичних термінів, понять на тему роботи в обсязі, окресленому набором контрольних запитань, які приведені в кінці кожної роботи;
- додаткові запитання можуть бути задані студентові для виставлення оцінки «добре» чи «відмінно» та призначені для більш глибокого розуміння студентом фізичної суті явищ;
- результати опитування заносяться до лабораторного журналу з відповідною оцінкою.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кафедра фізики

ЗВІТ

Про виконання лабораторної роботи №...

(назва роботи)

Студентом _____
(прізвище, ініціали)

(група)

(факультет)

Дата виконання роботи: _____

Дата подання звіту: _____

(відмітка про прийняття роботи) (прізвище викладача та підпис)

2. Лабораторні роботи

Лабораторна робота № 14. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Мета роботи: вивчити особливості вологого повітря; визначити абсолютну та відносну вологість повітря.

Вказівки до виконання лабораторної роботи

Для виконання лабораторної роботи необхідно засвоїти такий теоретичний матеріал: реальні гази, насичена та ненасичена пара; особливості розподілу вологи в повітрі; характеристики вологого повітря.

Література: [1, т.1, §§ 21.1 – 21.6; 2, §§ 42, 60 – 62; 4, т.1, §§ 120 – 123, 126]

Відомо, що атмосферне повітря – це суміш газів, яка містить 78% азоту, 21% кисню і невелику кількість CO₂, водяної пари та інших газів. Вміст водяної пари в атмосфері характеризують вологістю. На практиці важливо вміти визначати кількість водяної пари в повітрі за певної температури. Вимірювання вологості й підтримання певного її рівня потрібні на багатьох підприємствах (промислових, ткацьких, кондитерських), у різних сховищах (бібліотеках, музеях, архівах), лікарнях та житлових приміщеннях. Метеорологи за зміною вологості визначають зміни погоди. Узагалі, вологість повітря істотно впливає на розвиток флори й фауни на Землі, на життя людини і визначає комфортність приміщень.

Для практичних цілей розглядають вологе повітря при атмосферному або близькому до атмосферного тиску в інтервалі температур, обмеженому знизу не занадто низькими температурами (не нижчими за мінус 50°C). За таких параметрів сухе повітря може знаходитись тільки в газоподібному стані, тоді як вода може знаходитись в паровій, рідкій або твердій фазі в залежності від

температури суміші. Звідси випливає, що вологе повітря являє собою таку суміш газів, один з компонентів якої – водяна пара – при зниженні температури може переходити в іншу фазу (рідку або тверду) і внаслідок цього випадати із суміші. Тому кількість водяної пари в розглядуваній суміші не може бути довільною. В залежності від температури і повного тиску суміші кількість водяної пари у вологому повітрі не може перевищувати певної величини. Цим вологе повітря принципово відрізняється від звичайних газових сумішей.

У відповідності із законом Дальтона повний атмосферний тиск складається з парціальних тисків окремих компонент. Тиск водяної пари є парціальним, тобто однією зі складових повного атмосферного тиску. Зазвичай парціальний тиск водяної пари в атмосфері коливається в межах $(0,005 \div 0,05) \cdot 10^5$ Па. Величина максимального парціального тиску водяної пари у вологому повітрі визначається лише температурою суміші і не залежить від тиску суміші.

Кількісно вологість повітря оцінюється абсолютною та відносною вологістю. *Абсолютна вологість* – фізична величина, яка дорівнює масі водяної пари, що міститься в 1 м^3 повітря за даної температури. Інакше кажучи, абсолютна вологість дорівнює густині водяної пари за даної температури. Маса 1 м^3 сухого повітря за нормальних умов дорівнює 1293 г. На основі рівняння Клапейрона маса 1 м^3 повітря за температури $t^\circ\text{C}$ і тиску p , мм рт. ст. буде дорівнювати

$$\frac{1293}{1 + \alpha t^\circ} \cdot \frac{p}{760}, \text{ Г},$$

де $\alpha = \frac{1}{273}$ град $^{-1}$ – коефіцієнт лінійного розширення повітря.

Густина водяної пари по відношенню до густини повітря за однакового тиску і температури дорівнює 0,622. Рівняння Клапейрона (справедливе лише для пари води, далекої від насичення) дає для маси 1 м^3 водяної пари m вираз :

$$b = m = \frac{1293 \cdot 0,622}{760} \cdot \frac{p}{1 + \alpha t^\circ} = 1,06 \frac{p}{1 + \alpha t^\circ}. \quad (14.1)$$

Цей вираз дозволяє визначити абсолютну вологість, якщо відомий парціальний тиск водяної пари p за даної температури.

Із формули (14.1) видно, що за малих значень температури t величина абсолютної вологості повітря b фактично пропорційна тиску водяної пари p . Тому абсолютну вологість, виражену через парціальний тиск, інколи називають *пружністю водяної пари* та вимірюють в одиницях тиску – мм рт. ст.

Однак абсолютна вологість не завжди дає можливість оцінити ступінь насиченості повітря водяною парою. Тому на практиці використовують відносну характеристику – відносну вологість, що визначається як відносна насиченість повітря водяною парою.

Відносна вологість (B) – це відношення парціального тиску водяної пари за даної температури p до тиску насиченої пари за тієї самої температури p_H :

$$B = \frac{p(t \text{ } ^\circ\text{C})}{p_H(t \text{ } ^\circ\text{C})} 100\%. \quad (14.2)$$

Отже, для того щоб знайти відносну вологість повітря, треба знати парціальний тиск пари за даної температури та тиск насиченої пари за цієї ж самої температури. Парціальний тиск водяної пари за даної температури можна знайти, знаючи точку роси. *Точка роси* – це температура, за якої водяна пара у повітрі стає насиченою. Якщо водяну пару охолоджують нижче від точки роси, вона починає конденсуватися на твердих поверхнях (виступає роса).

Відносна вологість повітря може бути визначена також через густину водяної пари.

Найпоширенішим приладом для вимірювання вологості є *психрометр* (від грецького psychros – мокрий і metreo – вимірюю), що складається з двох однакових термометрів, нижній кінець (резервуар) одного з яких обмотаний вологою легкою тканиною («вологий» термометр).

Якщо водяна пара в повітрі ненасичена ($B < 100\%$), то вода з тканини буде випаровуватися. При цьому покази «вологого» термометра нижчі аніж сухого за рахунок випаровування. Що

менше пари у повітрі, то інтенсивніше відбувається випаровування і нижчі показання «вологого» термометра. Різниця між температурою «сухого» термометра t_c і температурою «вологого» термометра t_b пропорційна вологості повітря: чим більш сухим є повітря, тим більша ця різниця; якщо ж повітря насичене паром, то $t_c = t_b$, оскільки парціальний тиск водяної пари в повітрі дорівнює тиску насичення водяної пари за температури t_c . За різницею показань цих термометрів та за психрометричною таблицею (табл. 14.3) знаходять значення вологості.

Крім психрометра для вимірювання вологості використовують ще *гігрометри*. Наприклад, принцип дії волосяного гігрометра (від грецького *hygros* – вологий) ґрунтується на тому, що у вологому повітрі довжина натягненого людського волосся зростає, а в сухому – скорочується. Вимірюючи видовження волосини, роблять висновки про значення вологості повітря.

У даній лабораторній роботі використовується аспіраційний психрометр (рис.14.1), принцип дії якого полягає у тому, що два однакових термометри обдуваються однаковими потоками повітря. Резервуар одного з термометрів обгорнуто змоченим водою батистом. Завдяки випаровуванню води показники термометрів різні. «Вологий» термометр порівняно із «сухим» термометром має нижчу температуру.

Випаровування води вільною поверхнею в одиницю часу пропорційне різниці температур води та повітря (закономірність, встановлена Ньютоном):

$$Q_1 = a \cdot \Delta t \cdot S_1, \quad (14.3)$$

де Q_1 – теплота випаровування; a – коефіцієнт пропорційності; Δt – різниця показів «сухого» та «вологого» термометрів; S_1 – величина поверхні випаровування.

Випаровування рідини в одиницю часу визначається за формулою:

$$m = \frac{c \cdot S_2 (p_H - p)}{p}, \quad (14.4)$$

де m – маса води, що випаровується; c – коефіцієнт пропорційності; S_2 – площа поверхні, що випаровує; p_H – пружність насиченої водяної пари; p – пружність водяної пари в повітрі; P – атмосферний тиск повітря за даних умов.

Кількість теплоти Q_2 , необхідної для випаровування води масою m , дорівнює:

$$Q = m \cdot r = \frac{c \cdot S_2 (p_H - p)}{P} \cdot r, \quad (14.5)$$

де r – питома теплота випаровування.

При $Q_1 = Q_2$ з (14.3) та (14.5) маємо:

$$a \cdot \Delta t \cdot S_1 = \frac{c \cdot S_2 (p_H - p)}{P} \cdot r, \quad (14.6)$$

але, за умови $S_1 = S_2$, маємо:

$$p = p_H - A \cdot \Delta t \cdot P, \quad (14.7)$$

де A – стала для даного приладувеличина (стала психрометра), яка визначається швидкістю потоку повітря і знаходиться дослідним шляхом:

$$A = \frac{a}{c \cdot r} = \text{const}.$$

Остаточно формула для розрахунку абсолютної вологості повітря має вигляд:

$$b = p = p_H - 0,002(t_c - t_B) \cdot P, \quad (14.8)$$

де p_H – тиск насиченої пари за температури волого термометра t_B ; p_c – температура сухого термометра; P – атмосферний тиск повітря визначений у мм рт.ст.

Величину p_H беруть з таблиці «Залежність тиску насичених парів води від температури» (табл. 14.4). Атмосферний тиск визначають за допомогою барометра.

Будова приладу

Будову стандартного аспіраційного термометра показано на рис. 14.1.

Він складається з двох однакових термометрів **Т**, балончик одного з термометрів покрито батистом **Б**. Аспіратор має пружинний вентилятор, який заводиться ключем **К**.

Швидкість повітряного потоку близька до 2,5 м/с. Для запобігання нагріву приладу ззовні його металеві частини мають дзеркальне покриття. Батист змочують водою за допомогою гумової груші з піпеткою. Грушу заповнюють дистильованою водою. Невеликим стисканням груші через піпетку змочують батист. Необхідно уникати попадання води на другий термометр. Ключем **К** заводять вентилятор на 5-6 обертів і спостерігають за показниками термометрів.

На сьогодні на практиці для визначення відносної вологості повітря використовують електронні психрометри (рис. 14.2).

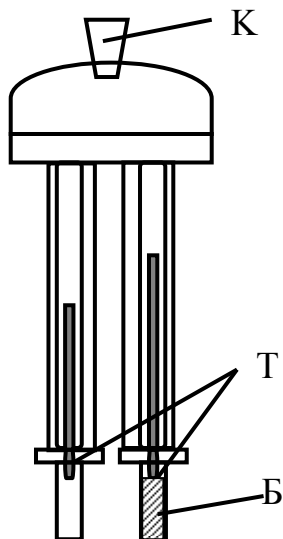


Рис.14.1



Рис.14.2

Хід роботи

Спосіб I

1. За допомогою груші змочити батист, який намотаний на резервуар одного з термометрів (Б) психрометра.
2. Завести механічний пристрій вентилятора (К) на 5-6 повних обертів.

- Через 4-5 хвилин зняти покази «сухого» t_c та «вологого» t_B термометрів.
- Знайти різницю температур $\Delta t = t_c - t_B$ та визначити значення відносної вологості повітря B за допомогою психрометричної таблиці (табл. 14.3).
- Всі дані вимірювання та розрахунків занести до табл. 14.1.

Спосіб II

- За допомогою барометра визначити атмосферний тиск P .
- За табл. 14.2 знайти значення тиску насичених парів P_H за температури, яка відповідає показам «волого» термометра t_B .
- Застосувати формулу (14.8) та розрахувати абсолютну вологість повітря b у програмі Excel.
- За табл. 14.2 знайти значення тиску насичених парів P_H за температури, яка відповідає показам «сухого» термометра t_c .
- За формулою (14.2) розрахувати відносну вологість повітря B у програмі Excel.
- Всі дані вимірювань занести до табл. 14.2. та виконати розрахунки у програмі Excel.
- Подати звіт у вигляді таблиць у програмі Excel.

Таблиця 14.1

$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$B, \%$

Таблиця 14.2

$P_H(t_B),$ мм рт.ст.	$P_H(t_B),$ Па	$P,$ мм рт.ст.	$P,$ Па	$P_H(t_c),$ мм рт.ст.	$P_H(t_c),$ Па	$b,$ мм рт.ст.	$b,$ Па	$B, \%$

Контрольні запитання

1. Що таке насичена та ненасичена пара?
2. Що називається абсолютною вологістю повітря?
3. Що називається відносною вологістю повітря?
4. Які ви знаєте методи вимірювання вологості повітря?
5. За рахунок якої енергії відбувається випаровування рідини?
6. Що називають точкою роси?
7. Як побудований психрометр, гігрометр?
8. На якому явищі ґрунтується психрометричний спосіб вимірювання вологості повітря?
9. З якою метою потрібно контролювати вологість повітря?
10. Наведіть орієнтовний склад атмосфери.

Психрометрична таблиця

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухогота вологого термометрів, °C											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Відносна вологість, %											
0	100	81	63	45	28	11						
1	100	83	65	48	32	16						
2	100	84	68	51	35	20						
3	100	84	69	54	39	24	10					
4	100	85	70	56	42	28	14					
5	100	86	72	58	45	32	19	6				
6	100	86	73	60	47	35	23	10				
7	100	87	74	61	49	37	26	14				
8	100	87	75	63	51	40	29	18	7			
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11			
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5		
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8		
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11		
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	8
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	10
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	13
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	29
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36	30
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	32
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38	33
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	34

Таблиця 14.3

Залежність тиску насиченої водяної пари від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н}},$ мм рт. ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н}},$ мм рт. ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н}},$ мм рт. ст.
-30	0,28	-3	3,57	24	22,38
-29	0,31	-2	3,88	25	23,76
-28	0,35	-1	4,22	26	25,21
-27	0,38	0	4,58	27	26,74
-26	0,43	1	4,93	28	28,35
-25	0,47	2	5,29	29	30,04
-24	0,52	3	5,69	30	31,82
-23	0,58	4	6,10	31	33,70
-22	0,64	5	6,54	32	35,66
-21	0,70	6	7,01	33	37,73
-20	0,77	7	7,51	34	39,90
-19	0,85	8	8,05	35	42,18
-18	0,94	9	8,61	36	44,56
-17	1,03	10	9,21	37	47,07
-16	1,13	11	9,84	38	49,69
-15	1,24	12	10,52	39	52,44
-14	1,36	13	11,23	40	55,32
-13	1,49	14	11,99	45	71,88
-12	1,63	15	12,79	50	92,50
-11	1,78	16	13,63	55	118,00
-10	1,95	17	14,53	60	149,40
-9	2,13	18	15,48	65	187,50
-8	2,32	19	16,48	70	233,70
-7	2,53	20	17,54	75	289,10
-6	2,76	21	18,65	80	355,10
-5	3,01	22	19,83	90	525,80
-4	3,28	23	21,07	100	760,00

Лабораторна робота № 2.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМУ

Мета роботи: дослідити явища переносу; виміряти коефіцієнт теплопровідності ебоніту.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: явища переносу; теплопровідність.

Література: [1, т.1 §§ 15.3; 2, §§ 48; 3, вступ до розд.5, §§ 5.8–5.10; 4, т.1 §§ 112, 113; 6, §§ 4.11, 5.3.1, 5.3.3; 7, § 2.8]

У термодинамічних нерівноважних системах виникають *необоротні процеси*, що називаються явищами переносу та внаслідок яких відбувається просторовий перенос енергії (теплопровідність), маси (дифузія) і кількості руху (внутрішнє тертя, або в'язкість). Для цих процесів характерним є те, що перенос енергії, маси та кількості руху завжди відбувається в напрямку, оберненому градієнту їхнього просторового розподілу, тобто система наближається до термодинамічної рівноваги.

Щоб експериментально визначити коефіцієнт теплопровідності λ , можна використати процес переносу теплоти в твердому тілі, оскільки закономірності такого процесу завжди пов'язані з коефіцієнтом теплопровідності.

Коефіцієнт теплопровідності можна знайти з основного рівняння, яке описує процес теплопровідності – *рівняння Фур'є*:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Delta S \Delta \tau,$$

де ΔQ – кількість теплоти, що переноситься вздовж осі x крізь елемент площі ΔS за час $\Delta \tau$ при градієнті температури $\frac{\partial T}{\partial x}$.

З рівняння Фур'є можна отримати:

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\frac{\partial T}{\partial x} \Delta S \Delta \tau}.$$

Отже, коефіцієнт теплопровідності чисельно дорівнює кількості теплоти, що переноситься через одиницю площі поперечного перерізу тіла за одиницю часу за градієнта температури, який дорівнює одиниці.

Практичне вимірювання величин, які входять в наведене рівняння Фур'є, пов'язане з певними труднощами, тому краще розглядати процеси, в яких можна легко і точно виміряти всі величини, що входять до розрахункової формули для визначення λ . Один з таких процесів – *регулярний режим нагрівання*.

Нехай нагріте до деякої температури T тіло внесено в середовище, яке добре проводить тепло (наприклад, вода). Температура цього середовища підтримується сталою і дорівнює T_0 . Унаслідок теплопровідності різниця температур тіла та середовища $T - T_0 = \Delta T$ постійно зменшуватиметься і в момент встановлення рівноваги дорівнюватиме нулю. Закон цього зменшення, тобто функція $\Delta T = f(\tau)$, залежить від розмірів та форми тіла, його теплофізичних властивостей, а також від того, як було нагріте тіло (рівномірно чи ні) перед початком досліду. У початковій стадії теплообміну цей закон є досить складним.

Поступово настає так званий регулярний режим нагріву (чи охолодження), за якого різниця температур між будь-якою точкою зразка та навколишнім середовищем залежить від часу за законом:

$$\Delta T(x, \tau) = A(x)e^{-a\tau}. \quad (2.2.1)$$

Величина a у формулі (2.2.1) називається темпом нагрівання (чи охолодження) і пов'язана з властивостями тіла:

$$a = \frac{\lambda}{k_{\text{ср}}}, \quad (2.2.2)$$

де k – коефіцієнт форми, що залежить від форми та розмірів тіла; c – питома теплоємність речовини; ρ – густина речовини. Для циліндра:

$$k = \frac{1}{\frac{5,78}{R^2} + \frac{9,87}{h^2}}, \quad (2.2.3)$$

де R , h – відповідно радіус і висота циліндра.

Таким чином, визначення коефіцієнта теплопровідності λ циліндричного зразка з відомими густиною речовини ρ та питомою теплоємністю c зводиться до визначення темпу нагрівання a . З цією метою вимірюють різницю температур між зразком і зовнішнім середовищем у різні моменти часу.

Згідно з рівнянням (2.2.1):

$$\ln \Delta T = \ln A - a\tau. \quad (2.2.4)$$

Залежність $\ln \Delta T = f(\tau)$ після настання регулярного режиму на графіку має вигляд прямої з кутовим коефіцієнтом a .

Після визначення темпу нагрівання можна знайти коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = k \cdot a \cdot c \cdot \rho. \quad (2.2.5)$$

За середовище, в якому нагрівається зразок, доцільно взяти воду, яка кипить, оскільки, по-перше, в такому випадку забезпечується достатній теплообмін поверхні зразка з водою внаслідок перемішування, по-друге, температура води, що кипить, відома та не змінюється, коли зразок нагрівається.

Температуру вимірюють за допомогою або звичайного термометра, або диференціальної термопари та потенціометра постійного струму та самозаписувача.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою. Увімкнути нагрівник та довести воду у посудині до кипіння. Підтримувати температуру води протягом усього дослідження.

2. Занурити циліндр у воду та увімкнути самозаписувач. Протягом 15-20 хв. отримати діаграму залежності температури зразка t °С від часу τ (рис. 2.2.1).

3. Для визначення темпу нагрівання опрацювати діаграмну стрічку. Для цього:

а) нанести на діаграму шкалу температур (мінімальна температура зразка – кімнатна, а максимальна – 100 °С);

б) знаючи швидкість руху діаграмної стрічки, нанести на діаграму шкалу часу;

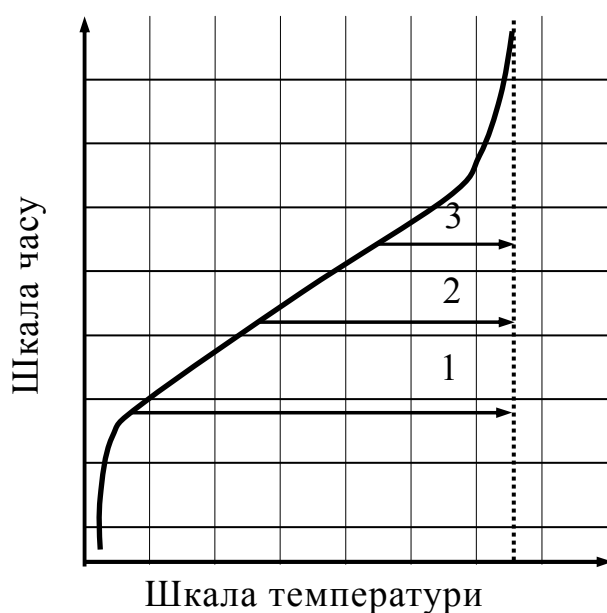


Рис. 2.2.1

в) через кожні 120 с визначити значення температури зразка t °С. Значення температури та часу записати в табл. 2.2.1.

4. Розрахувати різницю між температурою зразка та температурою киплячої води ($T_0 = 100$ °С) $\Delta T = T_0 - T$, прологарифмувати ці дані і занести їх до табл. 2.2.1.

5. Побудувати графік залежності $\ln \Delta T = f(\tau)$ в програмі Excel (приклад 2.1).

6. Вибрати на графіку прямолінійну ділянку (проміжок регулярного режиму), побудувати на цій ділянці лінію тренда, показати рівняння цієї лінії та визначити темп нагрівання a .

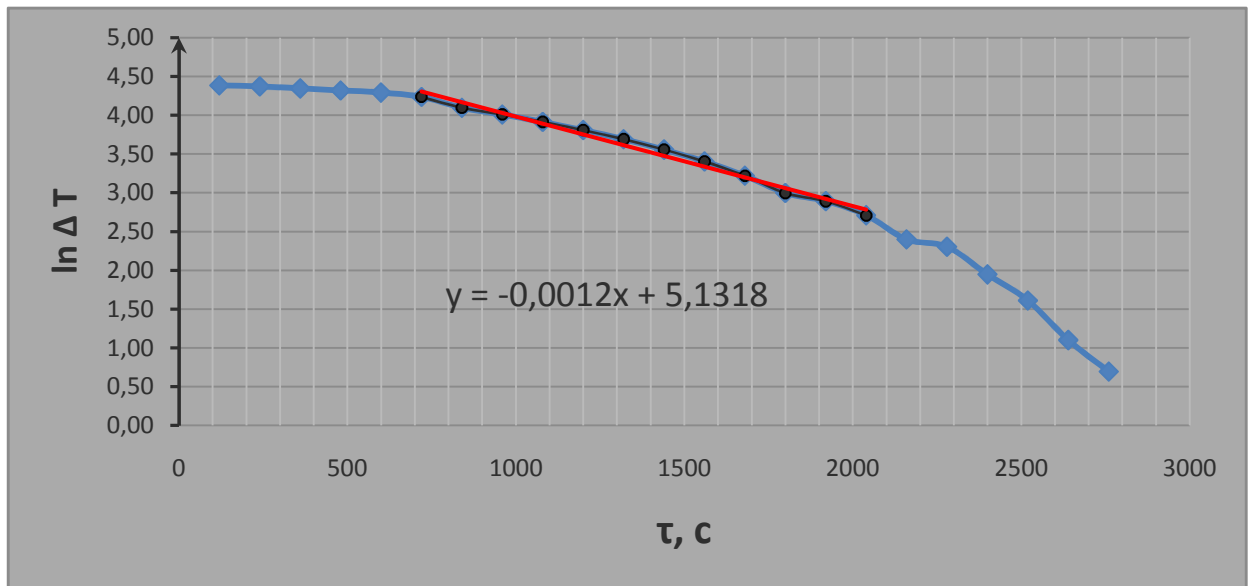
7. Виміряти діаметр D та висоту h циліндра. Обчислити радіус R та розрахувати у програмі Excel коефіцієнт форми k за формулою (2.2.3). Значення записати в табл. 2.2.1

8. Записати до таблиці 2.2.1 питому теплоємність c та густину ебоніту ρ .

9. Застосувати формулу (2.2.5) та розрахувати коефіцієнт теплопровідності ебоніту λ в програмі Excel.

10. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

Приклад графіка 2.1



Таблиця 2.2.1

$\tau,$ с	$t^{\circ}\text{C}$	$\Delta T,$ K	$\ln \Delta T$	$a,$ $1/\text{с}$	$D,$ м	$R,$ м	$h,$ м	$k,$ м^2	$c,$ $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$\lambda,$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$
-----------------------	---------------------	---------------------------	----------------	----------------------	--------------------	--------------------	--------------------	----------------------	--	-----------------------------------	---

Контрольні запитання

1. Які явища переносу вам відомі?
2. Дайте означення явища теплопровідності.
3. Запишіть закон Фур'є для явища теплопровідності.
4. Що називається коефіцієнтом теплопровідності? Поясніть його фізичний зміст.
5. Від чого залежить теплопровідність твердих тіл?
6. Дайте означення градієнта температури.
7. Поясніть фізичний зміст знака «мінус» в законі Фур'є.
8. Що таке регулярний режим нагрівання? Запишіть закон зміни температури залежно від часу при регулярному режимі.
9. Поясніть практичне значення коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів.

Лабораторна робота № 4.1. Визначення параметрів згасання коливань фізичного маятника

Мета роботи: вивчення основних закономірностей згасаючих коливань, визначення коефіцієнту згасання та логарифмічного декременту згасання коливань фізичного маятника.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: коливальні процеси та системи; фізичний маятник; згасаючі коливання; характеристики згасання.

Література: [1, т.1 §§ 10.1, 10.2, 10.4, 10.5, 10.8; 2, §§ 140–142, 146; 3, §§ 2.17, 2.18; 4, т.1 §§ 49, 50, 53, 54, 58]

Коліванням називають усякий регулярний або майже регулярний процес, в якому будь-яка величина набуває однакових значень через рівні або майже рівні проміжки часу.

Фізичний маятник – це будь-яке тверде тіло, здатне здійснювати під дією сили тяжіння коливання навколо нерухомої горизонтальної осі, яка не проходить через центр мас тіла (рис. 4.1.1).

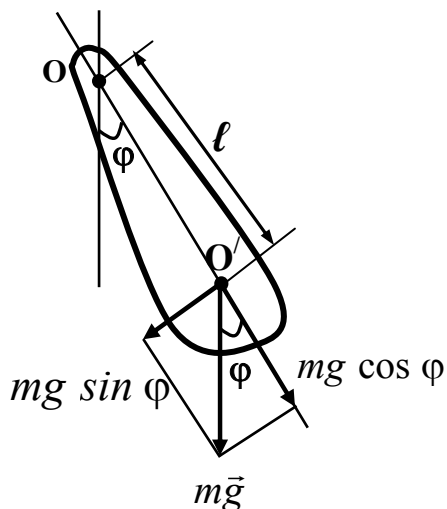


Рис.4.1.1

Унаслідок відхилення фізичного маятника на деякий кут φ від положення рівноваги виникає, зумовлений силою тяжіння, обертальний момент $M_{\text{тяж}}$, який прагне повернути маятник у положення рівноваги

$$M_{\text{тяж}} = mgl \cdot \sin \alpha \quad (4.1.1)$$

де m – маса тіла; l – відстань від осі обертання до центра мас маятника.

Якщо маятник відпустити з такого положення, то він почне здійснювати коливальний рух. Коливальному руху маятника перешкоджають опір повітря і тертя в осі маятника. Відомо, що в разі невеликої швидкості руху сумарний момент сил опору $M_{\text{оп}}$ буде пропорційний кутовій швидкості руху маятника:

$$M_{\text{оп}} = -r \cdot \omega = -r \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4.1.2.)$$

де r – коефіцієнт опору навколишнього середовища; $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ – кутова швидкість. Знак “мінус” свідчить про те, що вектори $\vec{M}_{\text{оп}}$ та $\vec{\omega}$ мають протилежний напрям.

За основним законом динаміки обертального руху

$$\vec{\beta} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i / J.$$

Оскільки фізичний маятник здійснює обертальний рух під дією двох моментів сил $M_{\text{тяж}}$ і $M_{\text{оп}}$, рівняння його руху після підстановок значень моментів сил і перетворень матиме вигляд:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + r \frac{d\varphi}{dt} + \ell mg \sin \varphi = 0, \quad (4.1.3)$$

де J – момент інерції маятника відносно осі обертання; $\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \beta$ – кутове прискорення маятника.

Зважаючи на те, що за малих коливань (коливань з малими кутами відхилення, для яких можна вважати, що $\sin \alpha \approx \alpha$), а також вводячи позначення $\frac{r}{J} = 2\delta$ та $\frac{\ell mg}{J} = \omega_0^2$, диференціальне рівняння вільних згасаючих коливань фізичного маятника можна записати у вигляді:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\delta \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (4.1.4)$$

Розв’язком цього рівняння є функція залежності кута обертання маятника від часу:

$$\varphi = Ae^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (4.1.5)$$

Рух маятника можна розглядати як коливання з частотою $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ та амплітудою, яка змінюється з часом за законом:

$$A = A_0 e^{-\delta t}. \quad (4.1.6)$$

Період згасаючих коливань дорівнює:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (4.1.7)$$

Якщо коефіцієнт опору середовища невеликий, тобто можна вважати його рівним нулю ($r=0$), то і коефіцієнт згасання $\delta=0$. Тоді формулу періоду коливань можна записати у вигляді:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}}. \quad (4.1.8)$$

Швидкість згасаючих коливань характеризується коефіцієнтом згасання δ . Для визначення коефіцієнта згасання користуються залежністю амплітуди від часу (4.1.6), яка подається у вигляді логарифмічної функції:

$$\ln A = \ln A_0 - \delta t. \quad (4.1.9)$$

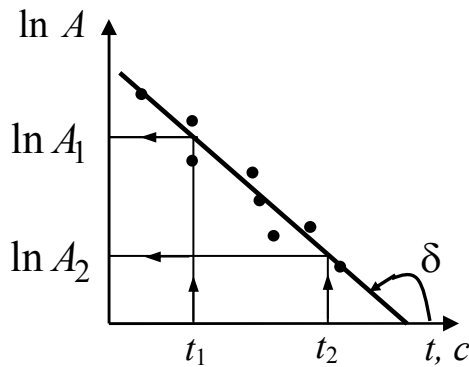


Рис. 4.1.2

У координатах $(\ln A; t)$ рівняння (4.1.9) є прямою лінією. Величина δ визначає кутовий коефіцієнт нахилу цієї прямої до осі часу t (рис. 4.1.2):

$$\delta = -\frac{d(\ln A)}{dt} \text{ або } \delta = -\frac{\ln\left(\frac{A_0}{A}\right)}{\Delta t}. \quad (4.1.10)$$

Якщо $\frac{A_0}{A} = e \approx 2,71828\dots$, то

$$\delta = \frac{1}{t_e}.$$

Отже, коефіцієнт згасання δ – це величина, обернена до проміжку часу t_e , упродовж якого амплітуда коливань зменшується в

$e \approx 2,71$ разів. Співвідношення (4.1.9) можна використовувати для експериментального визначення δ .

Окрім коефіцієнта згасання для характеристики згасання застосовують також *логарифмічний декремент згасання* χ , який визначають логарифмом відношення амплітуд, що відповідають моментам часу, які відрізняються на період:

$$\chi = \ln \frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} = \ln e^{\delta T} = \delta T. \quad (4.1.11)$$

Період коливань маятника розраховують за формулою:

$$T = \frac{\tau}{N}, \quad (4.1.12)$$

де τ – час протягом якого здійснюється N повних коливань.

Фізичний маятник виготовлено у вигляді металевого стержня l (рис. 4.1.3), до верхнього кінця якого прикріплено дві призми, що спираються своїми ребрами на раму.

Для зміни періоду коливань на стрижень надітий масивний вантаж 2, положення якого можна регулювати гвинтами.

Відлік амплітуди коливань у градусах виконують за шкалою 3.

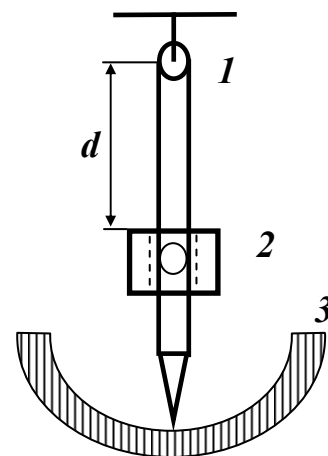


Рис. 4.1.3

Порядок виконання роботи

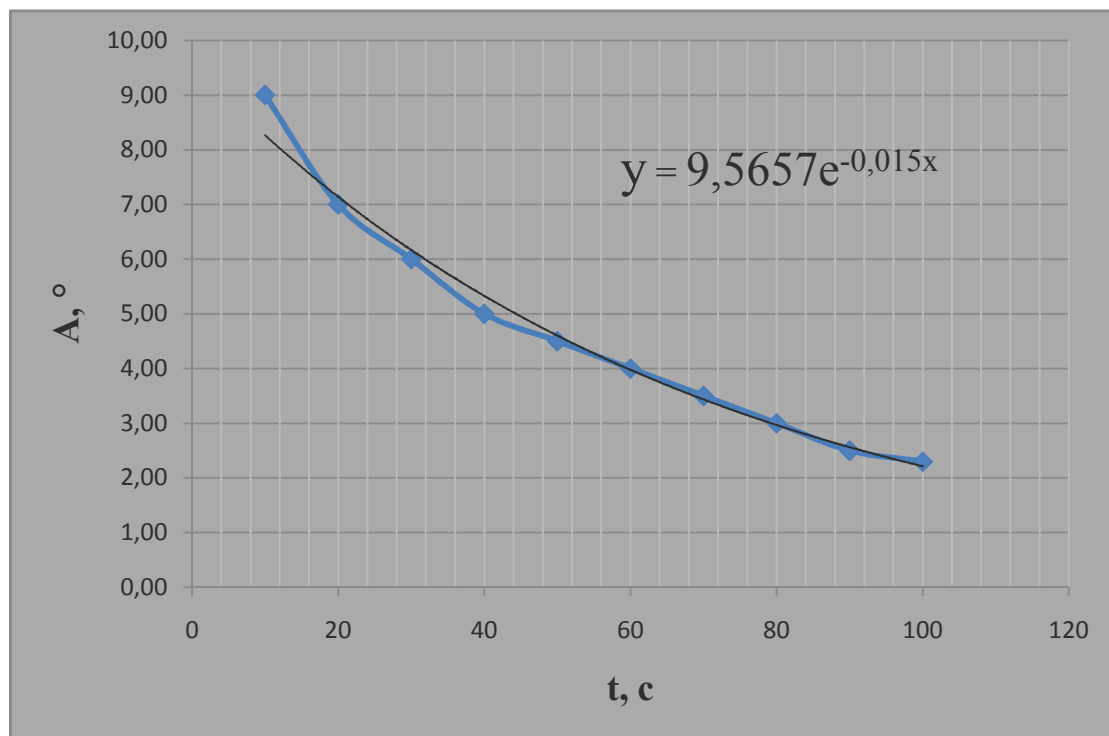
I. Експеримент

1. Встановити вантаж на стержні у крайнє нижнє положення.
2. Відхилити маятник на кут 8° – 10° від положення рівноваги і відпустити. Виміряти час τ за N повних коливань.
3. Ще раз відхилити маятник на кут 8° – 10° і відпустити його. Кожні 10–15 секунд за шкалою 3 визначати амплітуду коливань A доти, доки вона не зменшиться до 1° – 2° .
4. Результати вимірювань записати до табл. 4.1.1, створеної у програмі Excel.
5. Пересунути вантаж у положення, яке визначить викладач, та виконати пункти 2-9 для другого положення маятника.

II. Обробка результатів

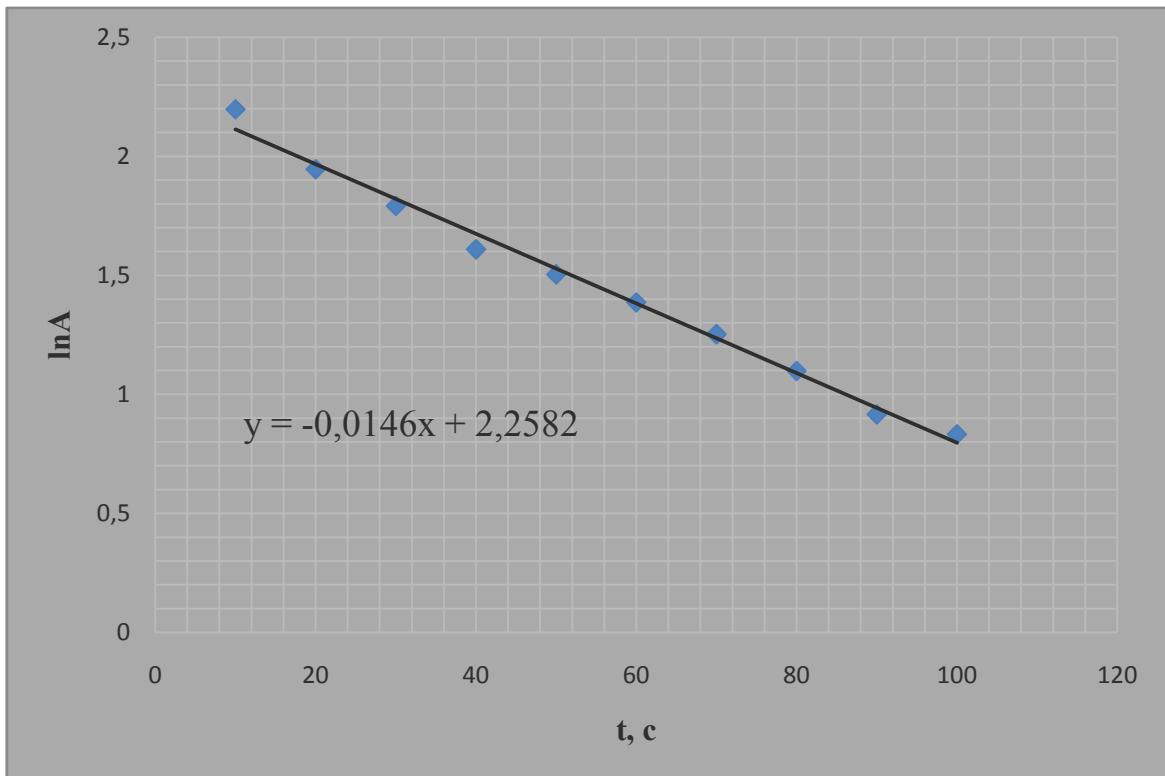
6. Розрахувати період коливань маятника за формулою (4.1.12).
7. Побудувати графік залежності амплітуди коливань A від часу t в програмі Excel (приклад 4.1) . Показати на графіку лінію тренда та її рівняння, яке буде відповідати рівнянню (4.1.6).
8. Визначити з отриманого рівняння коефіцієнт згасання $\delta(1)$ та занести його значення до табл. 4.1.1.

Приклад графіка 4.1



9. Розрахувати в програмі Excel значення $\ln A$.
10. Побудувати графік залежності $\ln A = f(t)$ (приклад 4.2). Показати на графіку лінію тренда та її рівняння, яке буде відповідати рівнянню (4.1.9).

Приклад графіка 4.2



11. Визначити з отриманого рівняння коефіцієнт згасання $\delta(2)$ та занести його значення до табл. 4.1.1.
12. Розрахувати середнє значення коефіцієнта згасання $\delta(\text{сер})$ та занести його значення до табл. 4.1.1.
13. Розрахувати логарифмічний декремент згасання χ за формулою (4.1.11), застосувавши середнє значення коефіцієнта згасання $\delta(\text{сер})$.
14. Повторити обробку результатів для другого положення маятника.
15. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

Таблиця 4.1.1

τ, c	N	T, c	t, c	A, °	$\delta(1), 1/c$	$\ln(A)$	$\delta(2), 1/c$	$\delta(\text{сер}), 1/c$	χ
-----------	---	------	------	------	------------------	----------	------------------	---------------------------	--------

Контрольні запитання

1. Що таке коливання? Які коливання належать до малих?
2. Які коливання називають вільними?
3. Які коливання називають незгасаючими? згасаючими? Зобразіть їх графічно.
4. Які коливання називають вимушеними?
5. Які коливання називають гармонійними? Напишіть їхнє рівняння.
6. Дайте означення амплітуди, фази, початкової фази, періоду, лінійної та циклічної частоти коливань.
7. Що таке фізичний маятник? Назвіть інші механічні коливальні системи, дайте їхнє означення.
8. Виведіть диференціальні рівняння згасаючих коливань фізичного, пружинного та математичного маятників. Запишіть їхній розв'язок.
9. Що таке коефіцієнт згасання? логарифмічний декремент згасання? У чому полягає їхній фізичний зміст?
10. Від чого залежить період коливань фізичного, пружинного і математичного маятників?

Лабораторна робота № 4.2. Дослідження резонансних характеристик коливального контуру

Мета роботи: вивчити явище резонансу в електричному коливальному контурі, побудувати резонансні криві, визначити резонансні характеристики контуру.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: вільні згасаючі коливання; вимушені коливання; резонанс; вимушені електромагнітні коливання в електричному коливальному контурі; автоколивальні системи.

Література: [1, т.2, §§ 12.1–12.4; 2, §§ 143, 146, 148; 4, т.2, §§ 89–91]

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до робіт № 3.8, № 4.1.

Електричний коливальний контур складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю C , котушки індуктивністю L та омичного опору R (опору підвідних провідників). Після підзарядки конденсатора в такому контурі виникають *згасаючі електромагнітні коливання*, тобто відбувається періодична зміна заряду та напруги на конденсаторі і, відповідно, сили струму в контурі. Втрати енергії в такому процесі відбуваються внаслідок виділення теплоти на омичному опорі та електромагнітного випромінювання. Щоб викликати і підтримувати незгасаючі коливання, до контуру слід неперервно підводити енергію від зовнішнього джерела з метою компенсації втрат енергії. Для цього можна застосувати триод – електронну лампу з трьома електродами (катодом, анодом та сіткою).

На рис. 4.2.1 показано схему лампового генератора зі зворотним зв'язком. В анодне коло триода ввімкнено послідовно коливальний контур і батарею U_a , у коло сітки – котушку L_a , індуктивно пов'язану з котушкою L коливального контуру.

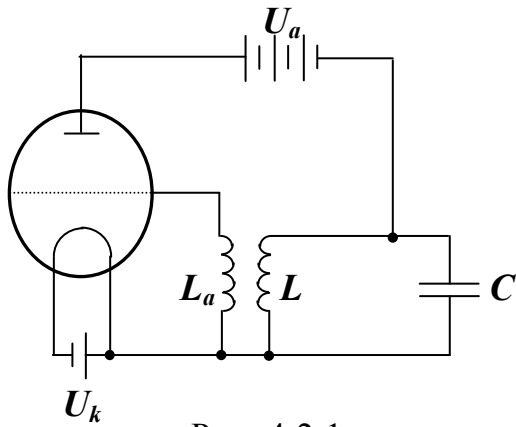


Рис. 4.2.1

Коли на катод подано напругу U_k , його нитка розжарюється, створюється анодний струм та вмикається батарея U_a . Це призводить до виникнення короткочасного струму в колі, який заряджає конденсатор: нижня обкладка отримує позитивний заряд, верхня

– негативний. Далі конденсатор розряджається через котушку індуктивності L і в контурі виникають синусоїдальні електричні коливання.

Однак згасаючий синусоїдальний струм, проходячи через котушку L контуру, збуджуватиме в котушці L_a електрорушійну силу (ЕРС) індукції, і між сіткою та катодом лампового тріода утворюється змінна напруга. Ця напруга регулює енергію, що підводиться від джерела до коливального контуру.

У негативний півперіод (коли на сітці негативний потенціал, на катоді – позитивний) лампу «заперто» і джерело струму не працює. Навпаки, у позитивний півперіод (коли на сітці позитивний потенціал, на катоді – негативний) джерело U_a створює анодний струм, поповнюючи енергію коливального контуру. Завдяки цьому в контурі існуватимуть незгасаючі коливання. Одержані таким чином незгасаючі коливання не є строго гармонійними, але їхня відмінність від гармонійних настільки мала, що нею можна знехтувати.

Така система, яка сама регулює введення енергії в контур, називається автоколивальною, а збуджені в ній коливання – автоколиваннями. В автоколивальних системах відбуваються коливання з постійною частотою й амплітудою, значення яких не залежать від зовнішнього впливу і визначаються властивостями самої системи.

Крім генераторів на електронних лампах, широко використовують напівпровідникові генератори електричних коливань – на

транзисторах. За структурою вони аналогічні, але мають істотні переваги: у них немає нагрівних катодів, які споживають потужність і потребують час на розжарення; працюють за нижчої напруги; мають значно менші розміри тощо.

В автоколивальних системах (і не тільки в електромагнітних) за деяких умов може виникати резонанс. *Явище резонансу у коливальному контурі* полягає у різкому зростанні амплітуди вимушених коливань струму у контурі або напруги на обкладинках конденсатора за наближення частоти ω зовнішньої ЕРС до частоти власних коливань у контурі ω_0 .

Найпростіше такі коливання можна збудити завдяки індуктивному зв'язку котушки індуктивності контуру L із зовнішньою котушкою L_a , по якій протікає змінний струм. Якщо індукована у контурі ЕРС змінюється за законом $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$, то диференціальне рівняння вимушених коливань матиме вигляд:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (4.2.1)$$

де L – індуктивність контуру, C – ємність, R – активний (омічний) опір.

Зважаючи на те, що частота власних (незгасаючих) коливань у контурі $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, а коефіцієнт згасання $\delta = \frac{R}{2L}$, запишемо рівняння (4.2.1) у вигляді:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (4.2.2)$$

Розв'язки цього рівняння для амплітуд напруги U_m на конденсаторі та сили струму I_m у контурі мають вигляд:

$$U_{C_m} = \frac{\varepsilon_0}{\frac{\omega}{\omega_0^2} \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4\delta^2}} \quad (4.2.3) \quad \text{та} \quad I_m = \frac{\varepsilon_0}{L \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4\delta^2}}. \quad (4.2.4)$$

Графіки відповідних функцій $U_{Cm} = f(\omega)$ і $I_m = f(\omega)$ зображені на рис. 4.2.2 і 4.2.3.

Як видно з рисунків, амплітуди напруги і сили струму різко зростають у разі наближення частоти зовнішньої ЕРС ω до значення частоти власних коливань ω_0 . Слід наголосити, що *резонансна частота* ω_p (частота, за якої амплітуди напруги та струму є максимальними) для сили струму I_m збігається з частотою власних коливань ω_0 , якщо немає згасання, а для напруги U_m резонансна частота залежить від:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (4.2.5)$$

тобто спадає у разі збільшення коефіцієнта згасання.

Особливістю обох графіків є те, що внаслідок збільшення величини згасання ширина резонансної кривої зростає, а її висота спадає. Кількісною характеристикою форми резонансної кривої є добротність Q – величина, яка характеризує втрати енергії в контурі і за означенням дорівнює π/χ , де χ – логарифмічний декремент згасання вільних коливань в контурі. *Добротність* відображає, у скільки разів амплітуда напруги на конденсаторі при резонансі перевищує амплітуду зовнішньої ЕРС.

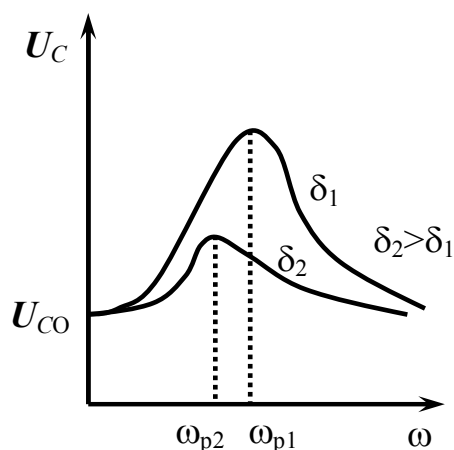


Рис. 4.2.2

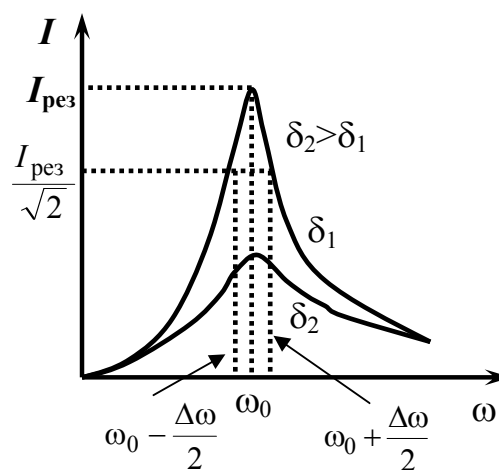


Рис. 4.2.3

Крім того, добротність контуру характеризує пік резонансних кривих. Це видно на рис. 4.2.3, на якому показано ширину $\Delta\omega$

резонансної кривої для сили струму на половині максимальної потужності. Із закону Джоуля – Ленца випливає, що потужність у колі пропорційна квадрату сили струму.

Це означає, що коли сила струму у контурі зменшується у $\sqrt{2}$ разів відносно максимального значення, потужність зменшується удвічі. За умов малого згасання можна показати, що це відбувається, коли частота ω зовнішньої ЕРС відхиляється від ω_0 на величину коефіцієнта згасання β .

Ширина резонансної кривої або смуга пропускання коливального контуру $\Delta\omega = 2\delta$ пов'язана з добротністю виразом:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}. \quad (4.1.6)$$

Схему установки зображено на рис. 4.2.4. У цій роботі використано ламповий генератор, який має індуктивний зв'язок з досліджуванним коливальним контуром і регулюється повзунком P_1 . Частота коливань генератора за допомогою перемикача P_2 регулюється у діапазоні 0,7...1,4 МГц, значення ємності конденсатора коливального контуру – перемикачем P_3 . Якщо встановити на конденсаторі деяке значення ємності C , то, обертаючи перемикач частоти генератора P_2 , можна добитися резонансу, що буде підтверджено спалахом лампи L , а показники P_2 – резонансній частоті.

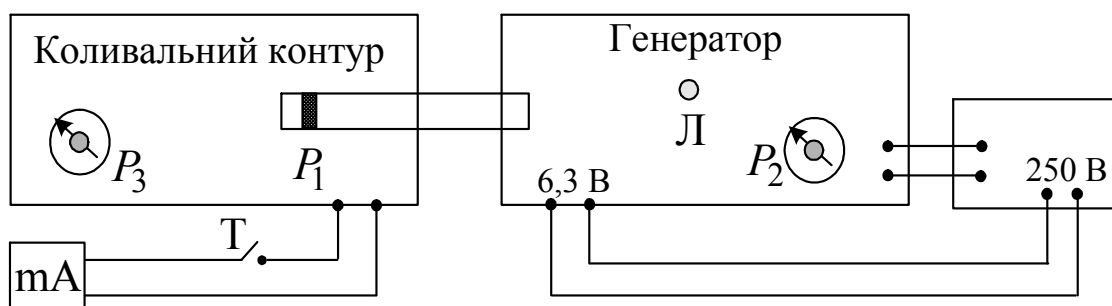


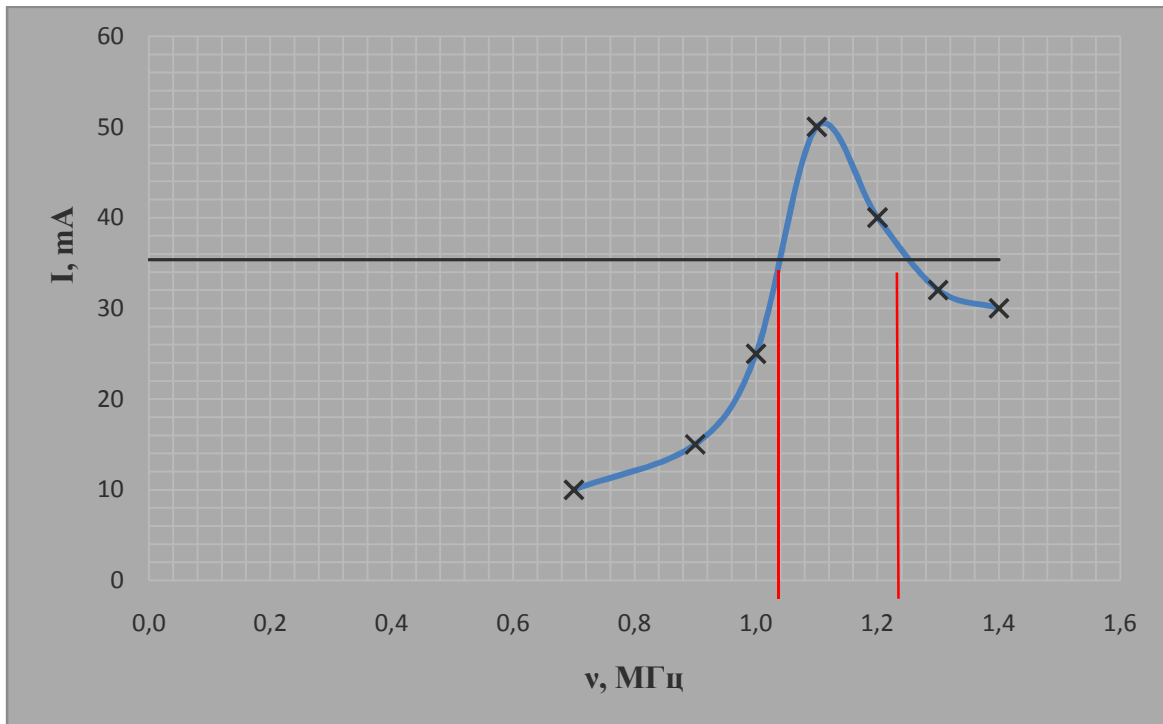
Рис. 4.2.4

Порядок виконання роботи

1. Перед вмиканням приладу слід пересвідчитись, що індуктивний зв'язок генератора з контуром є мінімальним, тобто повзунк

P_1 перебуває у крайньому лівому положенні, а тумблер T , який вмикає міліамперметр, – у положенні «Увімкнено».

2. Перемикач ємності P_3 коливального контуру встановити в середнє положення, а перемикач частоти P_2 генератора – у крайнє лівє положення. Увімкнути прилад і зачекати 2 хвилини, поки нагріється катод лампи. Свідченням готовності приладу до роботи є те, що гальванометр почне показувати струм.
3. Вимкнути міліамперметр, встановити на конденсаторі перемикачем P_3 перше значення ємності C_1 (задається викладачем). Встановити між коливальним контуром та генератором індуктивний зв'язок, тобто перевести повзунок P_1 у крайнє праве положення.
4. Поворотом перемикача частоти P_2 добитись загоряння лампи L та записати значення резонансної частоти $\nu_{рез1}$ для ємності C_1 .
5. Перевести повзунок P_1 у крайнє лівє положення (індуктивний зв'язок генератора з контуром є мінімальним) та ввімкнути міліамперметр. Змінюючи значення частоти генератора ν , записати відповідні їм значення сили струму I . Дані вимірювань записати в табл. 4.2.1.
6. Повторити пункти 4–6 для двох наступних значень ємності конденсатора (задаються викладачем). Усі дані вимірювань для кожного значення C записати в Excel табл. 4.2.1.
7. Користуючись отриманими даними, побудувати резонансні криві $I = f(\nu)$ в програмі Excel (приклад 4.2).
8. Визначити смуги пропускання коливального контуру. Для цього на кожному графіку $I = f(\nu)$ провести пряму, паралельну осі частот на рівні $I_{рез}/\sqrt{2}$, точки перетину спроектувати на вісь частот. Визначити відповідні частоти $\nu(1)$ та $\nu(2)$.
Розрахувати ширину резонансних кривих $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$.
9. Обчислити добротність коливального контуру для кожного значення ємності за формулою (4.1.6), де $\omega_0 = 2\pi\nu_{рез}$.
10. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.



Таблиця 4.2.1

C , пФ	$\nu(\text{рез})$, МГц	ν , МГц	I , мА	$\nu(1)$, МГц	$\nu(2)$, МГц	$\Delta\omega$, рад/с	Q

Контрольні запитання

1. З чого складається електричний коливальний контур?
2. Поясніть виникнення електромагнітних коливань у електромагнітному коливальному контурі.
3. Поясніть роботу лампового генератора незгасаючих коливань.
4. Яка система називається автоколивальною?
5. Опишіть перетворення енергії в електромагнітному коливальному контурі.
6. У чому полягає явище резонансу?
7. Виведіть диференціальне рівняння вимушених коливань в електричному коливальному контурі.

8. Як залежить напруга на конденсаторі коливального контуру і сила струму в ньому від частоти зовнішньої ЕРС?
9. Чому дорівнює резонансна частота для сили струму в контурі і напруги на конденсаторі?
10. Що таке добротність коливального контуру?
11. Як залежить смуга пропускання коливального контуру від величини його опору?
12. Наведіть блок-схему електричної автоколивальної системи та поясність її принцип дії.

Лабораторна робота № 4.3. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ

Мета роботи: вивчити процеси поширення коливань у суцільному середовищі, умови виникнення стоячих хвиль; визначити швидкість звуку в повітрі.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: частота і період коливань; поперечні і поздовжні хвилі; швидкість пружних хвиль; стоячі хвилі; коливання струни; швидкість звуку в газах.

Література: [1, т.1 §§ 11.1, 11.2, 11.6, 12.1–12.3; 2, §§ 153, 154, 157, 158; 4, т.1 §§ 93–97, 99, 101, 102]

Перед виконанням ознайомитися з вказівками до роботи № 4.1.

Хвилею (хвильовим процесом) називають процес поширення коливань у просторі. Процес поширення у просторі коливань частинок суцільного пружного середовища, неперервно розподіленого у просторі, називають *механічною (пружною) хвилею*. Деформація, що виникає у деякому місці, спричинює початкове відхилення частинок середовища від положення рівноваги, а наявність між частинками середовища сил пружності зумовлює процес передачі коливального стану від одних частинок до інших. При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а лише коливаються навколо своїх положень рівноваги. Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передається лише стан коливального руху і його енергія. *Основною властивістю* усіх хвиль є перенесення енергії без перенесення речовини.

Розрізняють поздовжні та поперечні механічні хвилі. У *поздовжніх хвилях* частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, вони виникають внаслідок деформацій стиску і розтягу, тобто у твердих тілах, рідинах і газах. У *поперечних*

хвилях частинки середовища коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, утворюються такі хвилі внаслідок деформації зсуву, що можливо лише у твердих тілах.

Звуком називають пружні хвилі малої амплітуди, частоти яких лежать у межах від 16 до 20000 Гц. Хвилі з частотою, меншою за 16 Гц, називають *інфразвуком*, з частотою, більшою за 20000 Гц – *ультразвуком*.

Хвилі, що переносять у просторі енергію, називають *біжучими*. Рівняння плоскої біжучої пружної хвилі (прямої) має вигляд:

$$\xi_1 = A \cos(\omega t - kx),$$

де ξ_1 – зміщення, A – амплітуда хвилі, $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, x – відстань від джерела звуку.

Рівняння хвилі, що відбивається від деякої перешкоди та розповсюджується назустріч (відбитої), має вигляд:

$$\xi_2 = A \cos(\omega t + kx).$$

Унаслідок суперпозиції (накладання) прямої та відбитої хвилі виникає *стояча хвиля*, рівняння якої має вигляд:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t,$$

де $2A \cos kx$ – амплітуда стоячої хвилі, яка залежить від координати x .

З останнього виразу видно, що в деяких точках простору амплітуда коливань дорівнює нулю. Ці точки називають *вузлами стоячої хвилі*. Точки, в яких амплітуда стоячої хвилі досягає максимального значення, називають *пучностями*. З виразу для амплітуди стоячої хвилі можна отримати координати вузлів та пучностей стоячої хвилі:

$$x_{\text{в}} = (2m + 1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{та} \quad x_{\text{п}} = m\frac{\lambda}{2},$$

де $m = 0, 1, 2, \dots$

Як видно з цих формул, відстань між сусідніми вузлами або пучностями становить (рис. 4.3.1, б):

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}. \quad (4.3.1)$$

Відмінність між стоячою хвилею та біжучою хвилею полягає в тому, що в стоячій хвилі зовсім *немає перенесення енергії*.

Картину стоячої хвилі у повітряному стовпі труби різної довжини зображено на рис. 4.3.1. Як видно з рисунка, в усіх випадках, коли утворюється стояча хвиля, біля поршня П знаходиться вузол, а біля відкритого кінця – пучність (рис. 4.3.1, *a*). Слід зауважити, що внаслідок накладання прямої та відбитої хвилі не завжди утворюється стояча хвиля. Для труби, закритої з одного боку, повинна виконуватись умова: відстань між поршнем та джерелом звуку (рис. 4.3.1, *a*) має бути кратною $\lambda/4$.

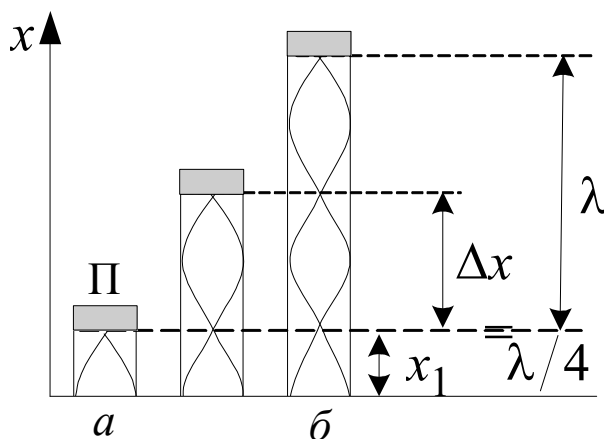


Рис. 4.3.1

Для всіх біжучих хвиль справедливим є співвідношення:

$$v = \lambda \nu, \quad (4.3.2)$$

де v – швидкість поширення хвилі, λ – довжина хвилі, ν – частота коливань.

Отже, визначення швидкості звуку зводиться до визначення довжини хвилі λ . Як видно з формули (4.3.1) та рис. 4.3.1, довжина хвилі дорівнює подвоєній відстані між сусідніми пучностями хвилі:

$$\lambda = 2\Delta x. \quad (4.3.3)$$

Швидкість поширення звуку залежить від температури середовища. Для повітря:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (4.3.4)$$

де $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ – показник адіабати, для повітря $\gamma = 1,4$;

$\mu = 0,029$ кг/моль – молярна маса повітря. За температури $t = 0$ °С

згідно з формулою (4.3.4), швидкість повітря $v = 330$ м/с, а за кімнатної температури $t = 17$ °С – $v = 340$ м/с.

Лабораторна установка (рис. 4.3.2) складається з циліндричної трубки T , закритої з одного боку поршнем Π , з'єднаним з рухомим блоком B . Знизу біля відкритого кінця трубки знаходиться джерело звуку Γ – мембрана генератора звукових коливань (значення частоти ν вказано на установці). Координати точок пучностей x_1 вимірюються за допомогою лінійки L .

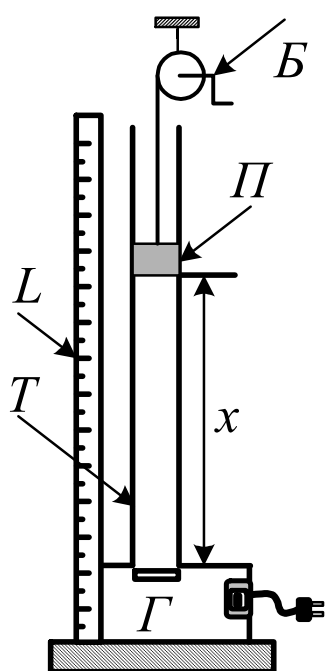


Рис. 4.3.2

звуку Γ – мембрана генератора звукових коливань (значення частоти ν вказано на установці). Координати точок пучностей x_1 вимірюються за допомогою лінійки L .

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з установкою. Ввімкнути живлення генератора звукових коливань Γ .
2. Обертаючи ручку блока B повільно піднімати поршень, при цьому гучність звуку буде періодично змінюватись.
3. Виміряти декілька положень поршня x_i , коли гучність досягає максимального значення.
4. Результати вимірювань записати до табл. 4.3.1 в програмі Excel.
5. Розрахувати відстань $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ між двома сусідніми положеннями поршня, у яких гучність досягає максимального значення.
6. Розрахувати середнє значення $\Delta x_{\text{сер}}$.
7. За формулою (4.3.3) знайти довжину звукової хвилі λ .
8. За формулою (4.3.2) знайти швидкість звуку в повітрі $v_{\text{експ}}$.
9. Розрахувати температуру в приміщенні в момент проведення досліду за формулою (4.3.4).

10. Визначити дійсну температуру в приміщенні в момент проведення досліду та розрахувати $v_{\text{теор}}$ за формулою (4.3.4).
11. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 4.3.1.

Таблиця 4.3.1

x_i ,	Δx	$\Delta x_{\text{сер}}$,	λ ,	v ,	$v_{\text{екс}}$,	γ	R ,	μ ,	$T_{\text{екс}}$,	$t_{\text{екс}}$,	t ,	T ,	$v_{\text{теор}}$,
м	м	м	м	Гц	м/с		Дж/(кг·К)	кг/моль	К	°С	°С	К	м/с

Контрольні запитання

1. Дайте означення хвильового процесу.
2. Які хвилі називають пружними?
3. Дайте означення поздовжніх і поперечних хвиль.
4. Виведіть рівняння плоскої монохроматичної синусоїдальної біжучої хвилі.
5. Що називають довжиною хвилі? Запишіть формулу зв'язку між довжиною і частотою хвилі.
6. Від яких параметрів залежить швидкість звуку в газах?
7. Що таке стояча хвиля? Запишіть її рівняння.
8. Що таке вузол та пучність стоячої хвилі? Визначте їхнє взаємне розміщення.
9. Що таке звук, інфра- та ультразвук? Наведіть приклади застосування ультразвуку.

Лабораторна робота № 5.2. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ

Мета роботи: вивчити явище дифракції; визначити за допомогою дифракційних ґрат довжину світлової хвилі; визначити товщину людської волосини за дифракційною картиною.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: дифракція хвиль; дифракція в паралельних променях; дифракційні ґрати та їхні характеристики.

Література: [1, т.3 §§ 4.1–4.5; 2, §§ 176–181; 3, §§ 12.4–12.6; 4, т.2 §§ 125–130]

Дифракцією називають явища, пов'язані з огинанням хвилями перешкод, які трапляються на їхньому шляху, або, в більш широкому розумінні, явища, пов'язані з будь-яким відхиленням від законів геометричної оптики в процесі поширення світла. Для пояснення явища дифракції Гюйгенс сформулював принцип, згідно з яким кожна точка простору, до якої доходить хвильовий фронт, стає центром вторинних когерентних хвиль, а огинаюча цих хвиль дає положення хвильового фронту в наступний момент часу.

Френель доповнив принцип Гюйгенса ідеєю інтерференції вторинних хвиль. Він запропонував поділити сферичний хвильовий фронт на зони таким чином, щоб

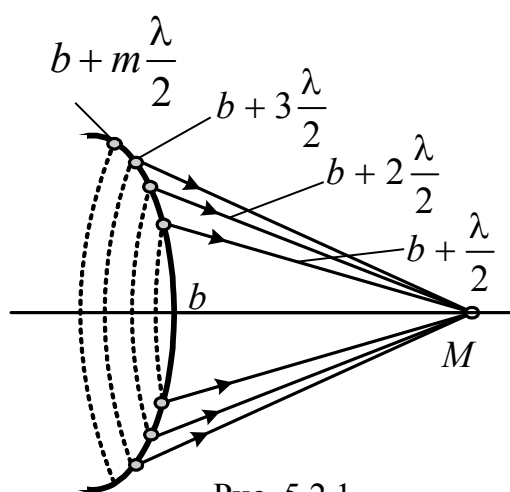


Рис. 5.2.1

відстань від країв зон (когерентних джерел хвиль) до точки спостереження M (рис. 5.2.1) відрізнялась на $\lambda/2$. Тоді залежно від кількості зон m в точці M може спостерігатись посилення або послаблення інтенсивності хвиль в разі їхнього накладання.

Якщо ширина перешкоди (наприклад, щілина) дорівнює b , відстань від неї до точки спостереження – l , а довжина хвилі – λ , то параметр $b^2 / (l \cdot \lambda)$ визначає число зон Френеля m , які відкриває ця перешкода. Отже, дифракцію можна спостерігати лише тоді, коли $m \ll 1$ (дифракція Фраунгофера), або за $m \sim 1$ (дифракція Френеля). Якщо $m \gg 1$, то справджуються закони геометричної оптики.

Найбільше практичне значення має дифракція, яку спостерігають в паралельних променях (дифракція Фраунгофера) під час проходження світла через одномірні дифракційні ґрати (рис. 5.2.2).

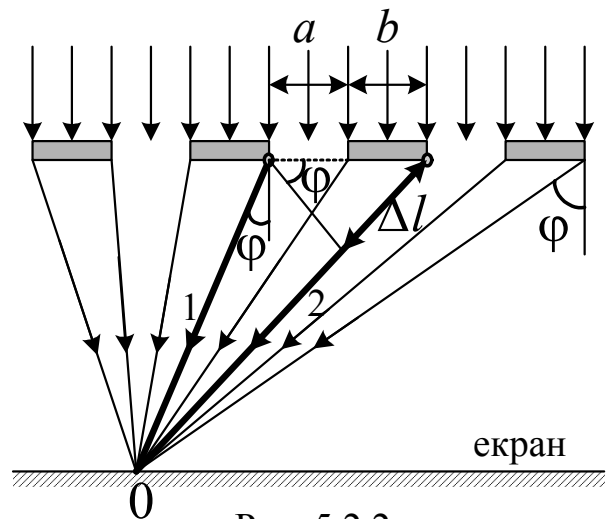


Рис. 5.2.2

Дифракційні ґрати – це система паралельних щілин однакової ширини, які лежать в одній площині і розділені однаковими за шириною непрозорими проміжками. Якщо a – ширина непрозорої частини, а b – ширина прозорої щілини, то сума $d = b + a$ має назву сталої (періоду) дифракційних ґрат.

Якщо кількість прозорих щілин ґрат на одиниці довжини l буде N (число штрихів), то сталу дифракційних ґрат знаходять за співвідношенням:

$$d = \frac{l}{N}. \quad (5.2.1)$$

Нехай на дифракційні ґрати падає плоска світлова хвиля (рис. 5.2.1). Згідно з принципом Гюйгенса – Френеля кожна точка цього фронту є джерелом вторинних сферичних когерентних хвиль. Внаслідок цього усі точки кожної щілини випромінюють сферичні хвилі. Візьмемо, наприклад, точки, що лежать біля країв усіх щілин і розглянемо промені, які виходять під кутом ϕ до напрямку поширення плоскої хвилі (кути дифракції ϕ будемо вважати малими). Освітленість у точці **0** на екрані буде результатом

інтерференції усіх променів. З рис. 5.2.1 видно, що між променями 1 та 2 виникає різниця ходу:

$$\Delta l = (a + b) \cdot \sin \varphi = d \cdot \sin \varphi.$$

Якщо на цій різниці ходу вкладається ціле число довжини хвиль, виникає інтерференційний максимум. Таким чином, умовою основних дифракційних максимумів є:

$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda, \quad (5.2.2)$$

де d – стала ґрат; φ – кут дифракції; m – порядок дифракційного максимуму; λ – довжина світлової хвилі.

Частина 1

Якщо кути дифракції малі (рис. 5.2.3), то $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$, тобто

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \frac{l_m}{L}. \quad (5.2.3)$$

З виразів (5.2.2) та (5.2.3) випливає, що довжина хвилі

$$\lambda = \frac{d \cdot l_m}{m \cdot L}, \quad (5.2.4)$$

де l_m – відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму m -го порядку; L – відстань від ґрат до екрана.

У цій лабораторній роботі джерелом світла є оптичний квантовий генератор ОКГ (лазер). Схему лабораторної установки зображено на рис. 5.2.3. Випромінювання лазера (ОКГ) проходить крізь дифракційні ґрати ДГ і створює на екрані E картину дифракції.

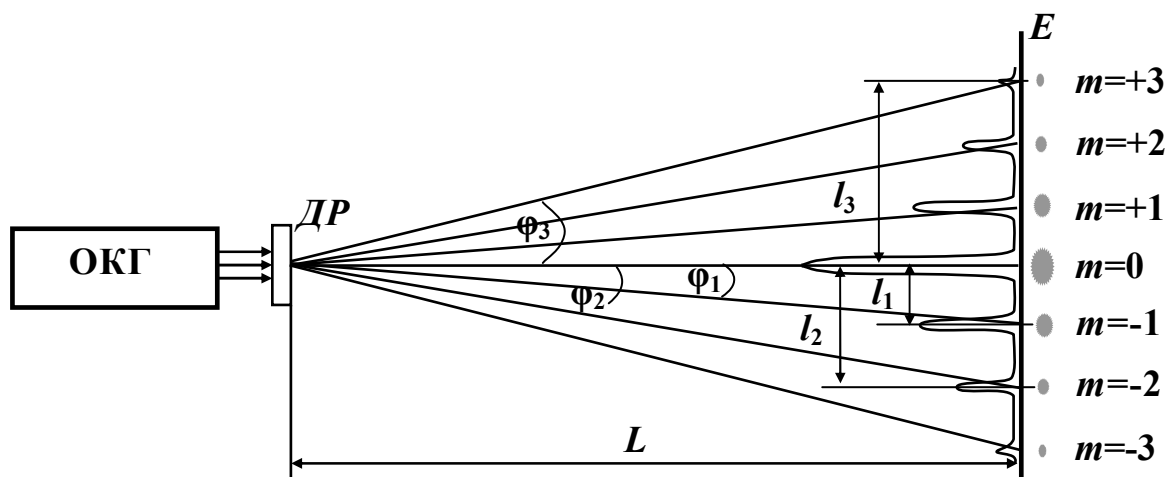


Рис.5.2.3

Порядок виконання роботи

1. Згідно з інструкцією ввімкнути лазер.
2. Встановити на шляху лазерного променя дифракційні ґрати з відомою кількістю штрихів N .
3. Визначити кількість штрихів N на одиницю довжини для кожних дифракційних ґрат та розрахувати сталу d дифракційних ґрат за формулою (5.2.1).
4. Спостерігаючи на екрані картину дифракції, виміряти відстані l_1 , l_2 , l_3 від центрального максимуму ($m = 0$) до максимумів першого, другого і третього порядку ($m = 1, 2, 3$).
5. Визначити відстань від ґратки до екрана L .
6. Результати вимірювань записати до табл. 5.2.1 в програмі Excel.
7. Виконати операції пп. 2–3 для різних дифракційних ґрат (задається викладачем).
8. Обчислити довжину світлової хвилі за формулою (5.2.4) для кожного вимірювання l_m для всіх типів ґрат.
9. Обчислити середнє значення довжини хвилі $\lambda_{\text{сер}}$ для всіх типів ґрат.
10. Обчислити середнє значення довжини хвилі $\lambda_{\text{сер}}$.
11. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 5.2.1.

Таблиця 5.2.1

Тип ґратки		Відстань до максимумів			$L, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}1}, \text{ МКМ}$	$\lambda_{\text{сер}}, \text{ МКМ}$
N_1	$d_1, \text{ м}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$				
N_2	$d_2, \text{ м}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$		$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}2}, \text{ МКМ}$	
N_3	$D_3, \text{ м}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$		$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}3}, \text{ МКМ}$	

Частина 2

В основу другої частини лабораторної роботи покладено явище дифракції, яке виникає внаслідок внесення в паралельний

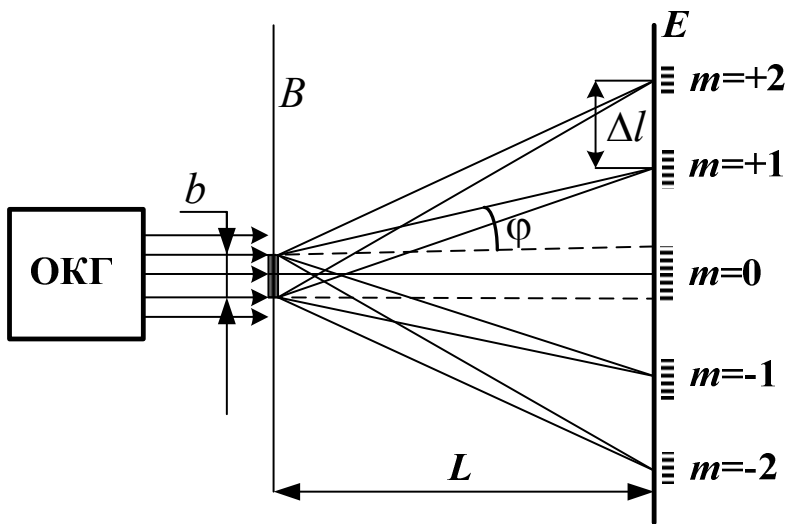


Рис.5.2.3

пучок лазерних променів тонкої перешкоди (наприклад, волосини людини) завтовшки b . Хід променів у цьому випадку показаний на рис. 5.2.3.

Випромінювання лазера проходить крізь волосину B й утворює на екрані E картину дифракції. Формула (5.2.2) для випадку дифракції на одній перешкоді завширшки b (товщина волосини) матиме вигляд:

$$b \sin \varphi = m \lambda . \quad (5.2.5)$$

З виразів (5.2.2) і (5.2.3) випливає, що

$$b \cdot \frac{l_m}{L} = m\lambda, \quad (5.2.6)$$

де l_m – відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму m -го порядку.

Записавши вираз (5.2.6) для двох сусідніх максимумів та віднявши одне рівняння від іншого, отримуємо формулу для обчислення товщини волосини:

$$b = \frac{\lambda \cdot L}{\Delta l}, \quad (5.2.7)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання лазера, значення якої беруть із результатів обчислень, проведених у першій частині роботи; L – відстань від волосини до екрана; Δl – відстань між двома сусідніми максимумами або мінімумами дифракційної картини $\Delta l = l_{m+1} - l_m$.

Порядок виконання роботи

1. Волосину закріпити перпендикулярно до пучка променів лазера.
2. Три рази виміряти на екрані величину Δl між сусідніми максимумами різних порядків m . Для кожного виміру Δl_m обчислити значення b за формулою (5.2.7) і знайти середнє значення $b_{\text{сер}}$ в мікрометрах.
3. Результати записати до табл. 5.2.2 в програмі Excel.

Таблиця 5.2.2

Відстань між максимумами			$L, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$b_{\text{сер}}, \text{ мкм}$
$\Delta l_1, \text{ м}$	$\Delta l_2, \text{ м}$	$\Delta l_3, \text{ м}$			

Контрольні запитання

1. Що таке дифракція?
2. Сформулюйте принцип Гюйгенса – Френеля.
3. Що таке когерентність, почасова та просторова когерентність?
4. Які хвилі називають монохроматичними?
5. Чим відрізняється дифракція Фраунгофера від дифракції Френеля?
6. Що таке дифракційні ґрати? Назвіть характеристики дифракційних ґрат.
7. Що таке геометрична й оптична різниця ходу променів? Побудуйте хід променів за дифракції Фраунгофера і покажіть різницю ходу променів.
8. Запишіть умови дифракційних максимумів та мінімумів. Поясніть виникнення дифракційного спектра в білому світлі.

Лабораторна робота № 5.3. Дослідження поляризованого світла

Мета роботи: вивчити явище поляризації світла і методи одержання поляризованих променів, перевірити закон Малюса, встановити ступінь поляризованості лазерного випромінювання.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: поляризація світла; поляризація світла під час відбивання та заломлення на межі двох діелектриків; подвійне променезаломлення у кристалах; закон Малюса; поляризаційні прилади.

Література: [1, т.3, §§ 5.1, 5.2, 5.4–5.6; 2, §§ 190–194; 3, §§ 12.7; 4, т.2, §§ 134–136]

Дія світла на середовище зумовлена переважно *вектором напруженості електричного поля* електромагнітної хвилі, тому в оптиці цей вектор називають *світловим*. Якщо світловий вектор в кожному цузі хвиль має переважний напрямок коливань, то світло називають поляризованим, на відміну від неполяризованого, або природного, світла, для якого будь-який напрямок коливань світлового вектора трапляється з однаковою ймовірністю.

У разі поширення світлового променя перпендикулярно до площини сторінки, основні випадки можливої орієнтації світлового вектора схематично показано на рис. 5.3.1. На рис. 5.3.1(а) показано природне світло, на рис. 5.3.1(б) зображено частково поляризоване світло (світловий вектор коливається переважно у вертикальній площині),

а
рис.5.3.1 (в) відповідає лінійно-поляризованому світлу (світловий вектор коливається тільки в одній, жорстко зафіксованій у просторі площині).

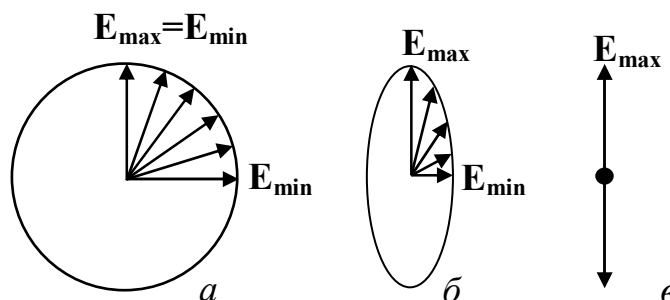


Рис. 5.3.1

Оптичний прилад, під час проходження через який неполяризоване світло стає поляризованим, називається *поляризатором*. Площина поляризатора – це площина, у якій коливається світловий вектор пучка на виході з поляризатора. Поляризатор використовують також для аналізу стану поляризації світла. У цьому випадку його називають *аналізатором*.

Якщо площини поляризатора й аналізатора утворюють кут α , то в разі падіння на аналізатор світла інтенсивністю I_0 з нього вийде світловий пучок інтенсивністю (*закон Малюса*):

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (5.3.1)$$

Нехай на аналізатор падає частково (еліптично) поляризоване світло. Тоді під час обертання аналізатора за законом Малюса інтенсивність світла на виході буде змінюватись від I_{\max} (площина поляризації світла паралельна до площини аналізатора) до I_{\min} (площина аналізатора перпендикулярна до площини поляризації світла). Стан поляризації світла характеризують ступенем поляризації:

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%. \quad (5.3.2)$$

Для лінійно поляризованого світла $k = 1$, для природного світла $k = 0$, а в разі частково поляризованого світла $0 < k < 1$.

Найбільш поширеними є поляризатори, принцип дії яких базується на явищі анізотропії та оптичного дихроїзму. Як відомо, в анізотропних кристалах можуть поширюватись лише лінійно поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах звичайний і незвичайний промені. В оптично-дихроїчних кристалах коефіцієнт поглинання одного з променів такий великий, що цей промінь практично повністю поглинається на шляху порядку десяти мікрон і з кристала виходить фактично лінійно поляризоване світло. *Поляріод* – це два скла, між якими розміщено тонкий шар оптично-дихроїчних мікрокристалів, орієнтованих в одному напрямі.

Закон Малюса вивчають на установці, схему якої наведено на рис. 5.3.2. Джерело лінійно поляризованого світла – лазер, одним з елементів якого є встановлений під кутом *Брюстера* поляризатор.

Лазерний промінь проходить крізь аналізатор (поляроїд) А і потрапляє на фото-приймач Ф. Під дією світла у фотоприймачі генерується фото-ЕРС, а тому з'єднаний з ним гальванометр Г фіксує струм, пропорційний інтенсивності світла.

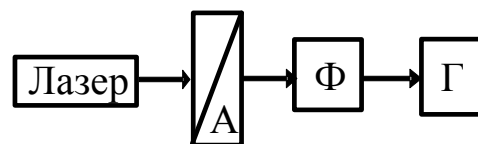


Рис. 5.3.2

Порядок виконання роботи

1. Згідно з інструкцією увімкнути лазер.
2. Встановити аналізатор у початкове положення (0^0) і записати до табл. 5.3.1 відповідне значення сили струму I .
3. Повертаючи аналізатор щоразу на кут 15^0 , визначати силу струму у діапазоні кутів $0...360^0$. Усі дані записати до табл. 5.3.1.
4. Вимкнути лазер.
5. За отриманими даними побудувати графік залежності $I = f(\alpha)$.
6. Користуючись графіком, визначити I_{\max} і I_{\min} .
7. Визначити ступінь поляризації за формулою (5.3.2).
8. Обчислити функцію $I = I_{\max} \cos^2 \alpha$ у діапазоні кутів $0...360^0$ і позначати відповідні точки на експериментальному графіку.
9. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 5.3.1.

Таблиця 5.3.1

α^0	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$I, \mu A$													
α^0	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	
$I, \mu A$													

Контрольні запитання

1. Що таке світло?
2. Що називають поляризацією світла?
3. Дайте означення неполяризованого, плоскополяризованого, частково поляризованого та поляризованого по колу світла.
4. Назвіть способи отримання плоскополяризованого світла. Які поляризаційні пристрої працюють на їхній основі?
5. Запишіть закон Брюстера. Що називають кутом Брюстера?
6. Що являють собою поляризатор та аналізатор?
7. Що таке ступінь поляризації частково поляризованого світла?
8. Запишіть закон Малюса та поясніть його.
9. Наведіть приклади застосування явища поляризації.

Лабораторна робота № 5.6. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРОНІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Мета роботи: вивчити основні закономірності зовнішнього фотоелектричного ефекту; визначити роботу виходу та максимальну швидкість фотоелектронів.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: зовнішній фотоелектричний ефект та його закони; рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту; фотоелементи та їхнє застосування.

Література: [1, т.3, §§ 9.1–9.3; 2, §§ 202–204; 3, §§ 13.5; 4, т.3, §§ 9]

Процес взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини, називається *фотоелектричним ефектом* (фотоелектричним ефектом). Розрізняють зовнішній та внутрішній фотоелектричний ефект. *Зовнішній фотоелектричний ефект* – це процес, під час якого електрон під дією випромінювання виходить за межі поверхні речовини, а внутрішній призводить тільки до збільшення числа вільних електронів всередині речовини.

Уперше на це явище звернув увагу Рентген, дослідив та встановив відповідні закони Столетов, а теоретично обґрунтував зовнішній фотоелектричний ефект Ейнштейн на основі квантової теорії світла (гіпотези Планка), згідно з якою світло випромінюється і поглинається речовиною окремими порціями – квантами (або фотонами). Енергія фотона, який відповідає світловій хвилі з частотою ν (довжиною хвилі λ), визначається за формулою:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ де } h \text{ – стала Планка; } c \text{ – швидкість світла у вакуумі;}$$

λ – довжина хвилі світла.

Унаслідок падіння пучка фотонів на поверхню металу виникає взаємодія фотона з електроном, в результаті якої фотон віддає електрону всю свою енергію. Якщо ця енергія перевищує роботу виходу електрона з металу ($A_{\text{вих}}$), то електрон виходить за межі матеріалу та має певну кінетичну енергію. Кінетична енергія буде максимальною у тому випадку, коли електрон, виходячи з металу, не витрачав енергію на зіткнення з кристалічною ґраткою та іншими електронами.

Тоді, відповідно до закону збереження енергії, *формула Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту* матиме такий вигляд:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}, \quad (5.6.1)$$

тобто енергія фотона внаслідок взаємодії з електроном повністю витрачається на «виривання» електрона з поверхні речовини та надання йому кінетичної енергії.

Рівняння (5.6.1) називається рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту і пояснює всі основні його закони (*закони Столетова*):

- *перший*: сила фотоструму насичення не залежить від частоти світла, яке падає на речовину, а визначається тільки його інтенсивністю;
- *другий*: максимальна швидкість фотоелектронів залежить від частоти світла і не залежить від його інтенсивності;
- *третій*: існує червона межа фотоефекту, тобто така максимальна довжина хвилі (або мінімальна частота), за якої фотоефект ще можливий.

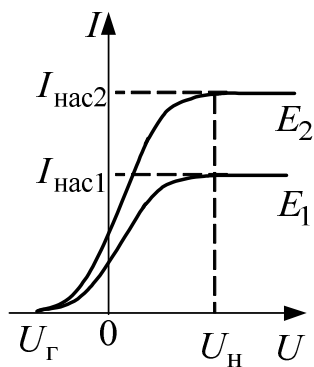


Рис. 5.6.1

Підтвердженням цих законів є вимірювання сили струму та напруги на установці, що використовується в цій роботі (рис. 5.6.2). За одержаними результатами можна побудувати типові *вольт-амперні характеристики* (ВАХ) фотоефекту (рис. 5.6.1), тобто залежність фотоструму від напруги між катодом та анодом за сталої освітленості катода

E_1 та E_2 ($E_1 > E_2$). З графіка $I=f(U)$ видно, що за деякої напруги $U_n > 0$ фотострум досягає максимального значення і далі залишається незмінним. Цей струм, який називають *струмом насичення* $I_{нас}$, відповідає стану, коли всі фотоелектрони, котрі вириваються світлом за одиницю часу з катода, досягають анода, що й підтверджує перший закон Столетова.

З ВАХ (рис. 5.6.1) видно, що за відсутності напруги між катодом й анодом сила фотоструму відмінна від нуля. Це пояснюється тим, що деякі електрони, які вириваються з катода під дією світла, мають кінетичну енергію, достатню для того, щоб досягти анода незалежно від дії зовнішнього електричного поля. Ці електрони утворюють фотострум за нульової напруги (рис. 5.6.1). Для того щоб зовсім припинити цей струм, між катодом й анодом потрібно створити поле з напругою U_Γ , що повністю гальмує електрони. Тоді, як відомо, робота електричного поля внаслідок гальмування електронів дорівнюватиме зміні їхньої кінетичної енергії:

$$eU_\Gamma = \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (5.6.2)$$

де e – заряд електрона; ν_{\max} – максимальне значення швидкості фотоелектронів; m – маса електрона; U_Γ – гальмівна напруга.

Запишемо рівняння (5.6.1) у вигляді

$$eU_\Gamma = h\nu - A_{\text{вих}}$$

звідки:

$$U_\Gamma = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вих}}}{e} \quad (5.6.3)$$

Вимірявши гальмівну напругу для відповідної частоти світла можна побудувати графік залежності $U_\Gamma = f(\nu)$. Це буде пряма лінія, з рівняння якої можна визначити роботу виходу електрона з даного металу та значення сталої Планка h .

Отримавши значення роботи виходу електрона з даного металу можна розрахувати червону межу фотоефекту за формулою:

$$\lambda_{\text{чер}} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}. \quad (5.6.4)$$

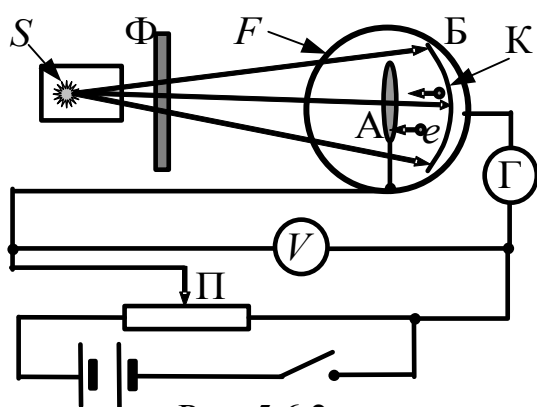


Рис. 5.6.2

Експериментальну установку зібрано на основі вакуумного сурм'яно-цезієвого фотоелементу (рис. 5.6.2). Катодом К слугує внутрішня поверхня скляного балону Б, вкрита світлочутливим шаром. Анодом слугує невеликий диск А, розміщений в центрі балона.

Схему установки зображено на рис. 5.6.2, де S – джерело світла; Φ – змінний світлофільтр; F – фотоелемент; Π – потенціометр; Γ – гальванометр; V – вольтметр.

Порядок виконання роботи

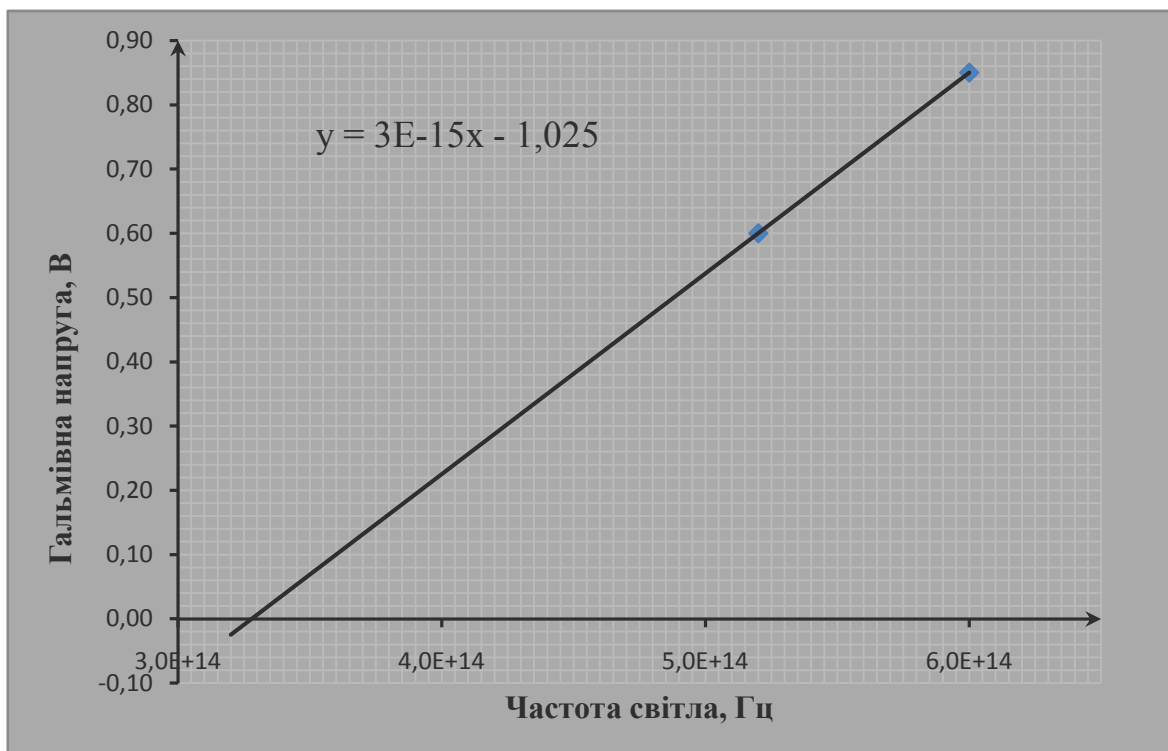
1. Записати значення частоти синього та оранжевого світла ν (вказані на лабораторній установці) до табл. 5.6.1.
2. Увімкнути установку та за допомогою потенціометра Π встановити між катодом та анодом напругу, що дорівнює нулю.
3. Увімкнути освітлювальну лампу, розмістити перед нею синій світлофільтр. При цьому гальванометр Γ повинен фіксувати значення фотоструму, відмінне від нуля.
4. За допомогою потенціометра встановити негативну напругу між катодом й анодом U_{Γ} , за якої фотоструму у колі не буде ($I = 0$).
5. За допомогою вольтметра виміряти значення гальмівної напруги U_{Γ} .
6. Пункти 1-4 повторити для оранжевого світлофільтра.
7. Розрахувати у програмі Excel довжини хвилі λ для кожного з світлофільтрів.
8. Розрахувати максимальну швидкість фотоелектронів v_{\max} для кожного з випадків (окремих світлофільтрів), застосувавши формулу (5.6.2) у програмі Excel.
9. Побудувати графік залежності $U_{\Gamma} = f(\nu)$ у програмі Excel із зазначенням рівняння прямої (приклад 5.6).

10. З рівняння визначити роботу виходу електрона з даного металу (у еВ) та значення сталої Планка h . Розрахувати $A_{\text{вих}}$ у Джоулях у програмі Excel.
11. За графіком визначити значення мінімальної частоти світла $\nu(\text{min})$ та розрахувати у програмі Excel червону межу досліджуваного світлочутливого шару фотоелемента $\lambda_{\text{чер}(1)}$ за формулою $\lambda_{\text{чер}} = \frac{c}{\nu_{\text{min}}}$, де $c=3 \cdot 10^8$ м/с.
12. Обчислити червону межу досліджуваного світлочутливого шару фотоелемента $\lambda_{\text{чер}}(2)$ за формулою (5.6.4).
13. Розрахувати середнє значення $\lambda_{\text{чер}}$.
14. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 5.6.1.

Таблиця 5.6.1

	ν , Гц	c , м/с	λ , м	UГ, В	ν , м/с	$A_{\text{вих}}$, еВ	$A_{\text{вих}}$, Дж	h , Дж*с	ν_{min} , Гц	$\lambda_{\text{чер}(1)}$, м	$\lambda_{\text{чер}(2)}$, м	$\lambda_{\text{чер(сер)}}$, м
Синій												
Оранжевий												

Приклад графіка 5.6



Контрольні запитання

1. Що називають фотоелектричним ефектом? У чому різниця між внутрішнім та зовнішнім фотоелектричним ефектом?
2. Наведіть схему експериментальної установки для дослідження зовнішнього фотоелектричного ефекту.
3. Покажіть типову вольт-амперну характеристику. Що називають фотострумом насичення і гальмівною різницею потенціалів?
4. Сформулюйте закони Столетова для зовнішнього фотоелектричного ефекту.
5. Що називають червоною межею фотоелектричного ефекту?
6. Запишіть і поясніть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту. Що таке квант світла (фотон)?
7. Що таке робота виходу електрона з металу?
8. Як пояснити закони фотоелектричного ефекту на підставі рівняння Ейнштейна?
9. Охарактеризуйте фотоелементи та їхнє застосування.

Лабораторна робота № 6.1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА

Мета роботи: вивчити елементи зонної теорії твердих тіл; визначити ширину забороненої зони напівпровідника.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: розщеплення енергетичних рівнів та виникнення енергетичних зон у кристалах; принцип Паулі; розподіл електронів за енергетичними станами; поділ твердих тіл на провідники, напівпровідники та діелектрики відповідно до зонної теорії.

Література: [1, т.2 §§3.2, 3.5, 3.6; т.3 §§ 14.2; 2, §§ 240–243; 4, т.3 §§ 51, 53, 58, 59]

Для розгляду поведінки електрона в твердому тілі можна застосувати рівняння Шредінгера і знайти допустимі стани й значення його енергії. Такий підхід приводить до створення *зонної теорії твердого тіла*, в основі якої лежить адіабатичне наближення. Оскільки маси та швидкості ядер та електронів суттєво відрізняються, можна вважати, що ядра у вузлах кристалічної ґратки нерухомі, а рух електронів розглядається в постійному періодичному полі ядер. Застосовується також наближення самоузгодженого поля. Взаємодія певного електрона з рештою електронів замінюється дією на нього *стаціонарного періодичного електричного поля*, яке утворюється усередненим в просторі зарядом решти електронів і ядер. Таким чином, в зонній теорії багатоелектронна задача зводиться до задачі про рух одного електрона в зовнішньому періодичному полі – *усередненому і самоузгодженому полі всіх ядер й електронів*.

Розглянемо уявно процес утворення твердого тіла з ізольованих атомів. Поки атоми ізольовані, тобто знаходяться на макроскопічних відстанях один від одного, їхні схеми енергетичних рівнів збігаються (рис. 6.1.1). Уразі "стискання" моделі до

кристалічної ґратки, тобто коли відстані між атомами стануть однаковими з міжатомними відстанями у твердих тілах, взаємодія між атомами призведе до того, що енергетичні рівні атомів змістяться, розщепляться та розширяться в зони, утворюючи так званий *зонний енергетичний спектр*.

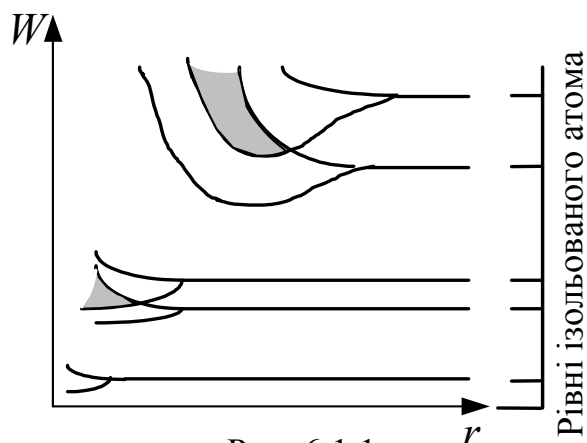


Рис. 6.1.1

Із рис. 6.1.1, на якому зображено розщеплення рівнів як функції відстані між атомами, видно, що суттєво розщеплюються лише рівні зовнішніх, валентних електронів, які найслабше пов'язані з ядром і мають найбільшу енергію, а також більш високі рівні, які в основному стані

атома взагалі не зайняті електронами. Рівні внутрішніх електронів або зовсім не розщеплюються, або розщеплюються слабо.

Утворення зонного енергетичного спектра в кристалі є квантово-механічним ефектом і впливає із співвідношення невизначеностей Гейзенберга та принципу Паулі. В кристалі валентні електрони атомів можуть переходити від атома до атома крізь потенціальні бар'єри, що розділяють атоми, тобто переміщуватися без зміни повної енергії (тунельний ефект). Це призводить до того, що середній час життя валентного електрона в цьому атомі порівняно з ізолюваним атомом суттєво зменшується і становить приблизно 10^{-15} с (для ізолюваного атома – приблизно 10^{-8} с). Час життя електрона в будь-якому стані пов'язаний з невизначеністю його енергії (ширина рівня) співвідношенням невизначеностей $\Delta W \cdot \tau \geq \hbar$. Отже, якщо природна ширина спектральної лінії становить приблизно 10^{-7} еВ, то в кристалах вона сягає 1...10 еВ, тобто енергетичні рівні валентних електронів розширюються в зону дозволених значень енергії.

Енергія зовнішніх електронів може набувати значення в межах зафарбованих на рис. 6.1.1 ділянок, які називаються дозволеними

енергетичними зонами. Кожна дозволена зона «вміщує» стільки близько розміщених дискретних рівнів, скільки атомів містить кристал. Відстань між сусідніми рівнями в зоні становить приблизно 10^{-22} еВ. Оскільки це дуже маленьке значення, зони можна вважати практично неперервними, але факт кінцевого числа рівнів у зоні відіграє важливу роль у розподілі електронів за енергетичними станами.

Дозволені енергетичні зони розділені зонами заборонених значень енергії, які називаються забороненими енергетичними зонами. В заборонених зонах електрони перебувати не можуть. Ширина зон (дозволених і заборонених) не залежить від розмірів кристалу. Дозволені зони тим ширші, чим слабший зв'язок електрона з ядром.

Зонна теорія твердих тіл дає змогу з єдиної позиції розглянути існування металів, діелектриків і напівпровідників, пояснюючи відмінності їхніх електричних властивостей, по-перше, *неоднаковим заповненням електронами дозволених зон* і, по-друге, *шириною заборонених зон*.

Ступінь заповнення електронами енергетичних рівнів в зоні визначається заповненням відповідного атомного рівня. Якщо, наприклад, якійсь рівень атома повністю заповнений електронами відповідно до принципу Паулі, то утворена з нього зона також повністю заповнена. Загалом можна говорити про *валентну зону*, яка повністю заповнена електронами й *утворена з енергетичних рівнів внутрішніх електронів вільних атомів*, і про *зону провідності* (вільна зона), яка або частково заповнена електронами, або вільна й *утворена з енергетичних рівнів зовнішніх «колективізованих» електронів ізолюваних атомів*. Зона, яка заповнена електронами частково або вільна (за $T=0$ К), називається зоною провідності. Верхня зона, яка повністю заповнена електронами (за $T=0$ К), називається валентною зоною.

Залежно від міри заповнення зон електронами та ширини забороненої зони можливі чотири випадки, зображені на рис. 6.1.2.

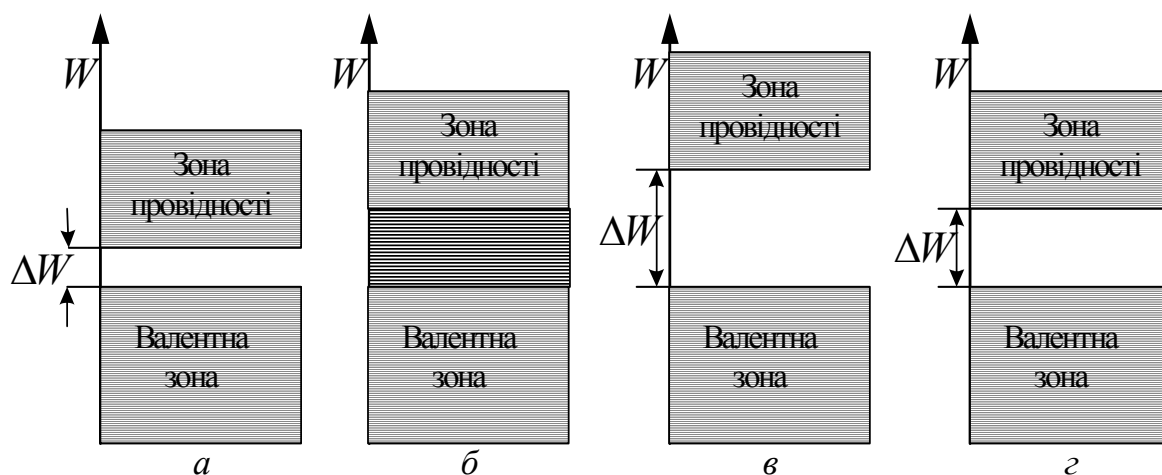


Рис. 6.1.2

На рис. 6.1.2, *а* верхня зона, яка містить електрони, заповнена лише частково, тобто в ній є вакантні рівні. У цьому випадку електрон, отримавши будь-яку незначну енергію (наприклад, завдяки тепловому збудженню або електричному полю), зможе перейти на більш високий енергетичний рівень тієї ж зони, тобто стати вільним і брати участь у процесі провідності. Таким чином, якщо в твердому тілі є зона, яка частково заповнена електронами, то таке тіло завжди буде провідником електричного струму. Саме цю властивість мають *метали*.

Тверде тіло буде провідником електричного струму також в тому випадку, якщо валентна зона перекривається вільною зоною, що призводить до частково заповненої зони (рис.6.1.2, *б*). В такому випадку утворюється так звана «гібридна» зона, яка заповнюється валентними електронами лише частково. Це є характерним для лужноземельних елементів (Be, Mg, Ca, Zn та ін.). Отже, *тверде тіло буде провідником, якщо зона провідності заповнена електронами частково*.

Крім розглянутого вище перекриття зон, можливим є також перерозподіл електронів між зонами, які утворилися з рівнів різних атомів, в результаті чого замість двох частково заповнених зон в кристалі буде одна повністю заповнена (валентна) зона та одна вільна зона (зона провідності). Тверді тіла, у яких енергетичний спектр електронних станів складається з валентної зони та вільної

зони провідності, будуть діелектриками або напівпровідниками залежно від ширини забороненої зони ΔW .

Якщо ширина забороненої зони кристала ΔW становить кілька електрон-вольт, то енергії теплового руху не вистачає для переходу електронів з валентної зони в зону провідності і кристал буде *діелектриком*, залишаючись ним за всіх реальних температур (рис. 6.1.2, в). Якщо ширина забороненої зони ΔW невелика (порядку 1 еВ), то перехід електрона з валентної зони в зону провідності може відбуватись порівняно легко або шляхом теплового збудження, або завдяки зовнішньому джерелу, яке здатне надати електронам енергію не меншу, ніж ширина забороненої зони, і кристал буде *напівпровідником* (рис. 6.1.2, г).

Різниця між металами та діелектриками з погляду зонної теорії полягає в тому, що за $T = 0$ К в зоні провідності металів є електрони, а в зоні провідності діелектриків їх немає. Різниця між діелектриками та напівпровідниками визначається шириною заборонної зони: для діелектриків вона становить кілька електрон-вольт, для напівпровідників – порядку 1 еВ. За температур близьких до 0 К, напівпровідники поведуться як діелектрики. З підвищенням температури в напівпровідниках зростає кількість електронів, які внаслідок теплового збудження переходять в зону провідності, отже, електрична провідність напівпровідників в такому випадку зростає.

У природі напівпровідники існують у вигляді елементів IV, V та VI груп періодичної системи елементів, а саме Si, Ge, As, Se, Te, а також хімічних сполук, наприклад оксидів, сульфідів, селенідів та сплавів елементів різних груп. Розрізняють *власні та домішкові напівпровідники*. Прикладом власних напівпровідників можуть бути хімічно чисті речовини Ge, Se, а також багато хімічних сполук: InSb, GaAs, CdS тощо. За 0 К власні напівпровідники поведуть себе як діелектрики, оскільки в зоні провідності відсутні електрони. За підвищення температури електрони з верхніх рівнів валентної зони можуть бути перекинуті на нижні рівні зони провідності, що призведе до появи вільних електронів й створить можливість існування електричного струму.

У фізиці твердого тіла доведено, що питома електрична провідність γ бездомішкового напівпровідника залежить від температури за експоненціальним законом:

$$\gamma = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right).$$

Зважаючи на обернену залежність між питомим опором і питомою провідністю ($\gamma = 1/\rho$) та на лінійну залежність між опором і питомим опором, можна визначити опір напівпровідника за формулою:

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right) \quad (6.1.1)$$

де ΔW – ширина забороненої зони; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Коефіцієнт A також залежить від температури, але порівняно з експонентою ця залежність незначна, тому у досить вузькому інтервалі температур його можна вважати сталим.

Прологарифмуємо формулу (6.1.1):

$$\ln R = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \left(\frac{1}{T}\right). \quad (6.1.2)$$

Графік залежності $\ln R = f(1/T)$ буде прямою лінією, градієнт якої дорівнюватиме:

$$\text{grad} = \frac{\Delta W}{2k} \quad (6.1.3).$$

На рисунку 6.1.3 наведено схему експериментальної установки.

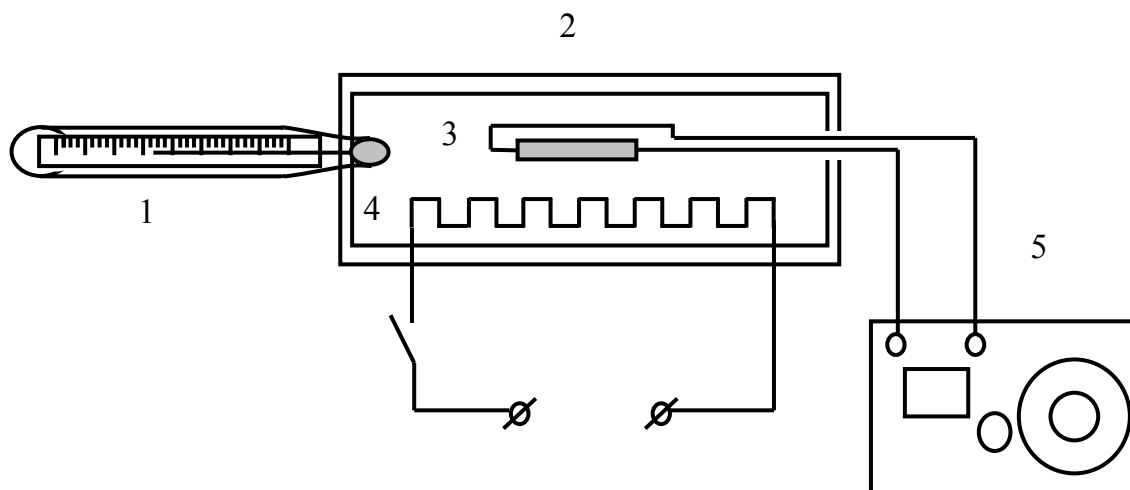


Рис. 6.1.3

На схемі застосовано такі позначення: 1 – термометр; 2 – масляна баня; 3 – терморезистор; 4 – нагрівник; 5 – омметр.

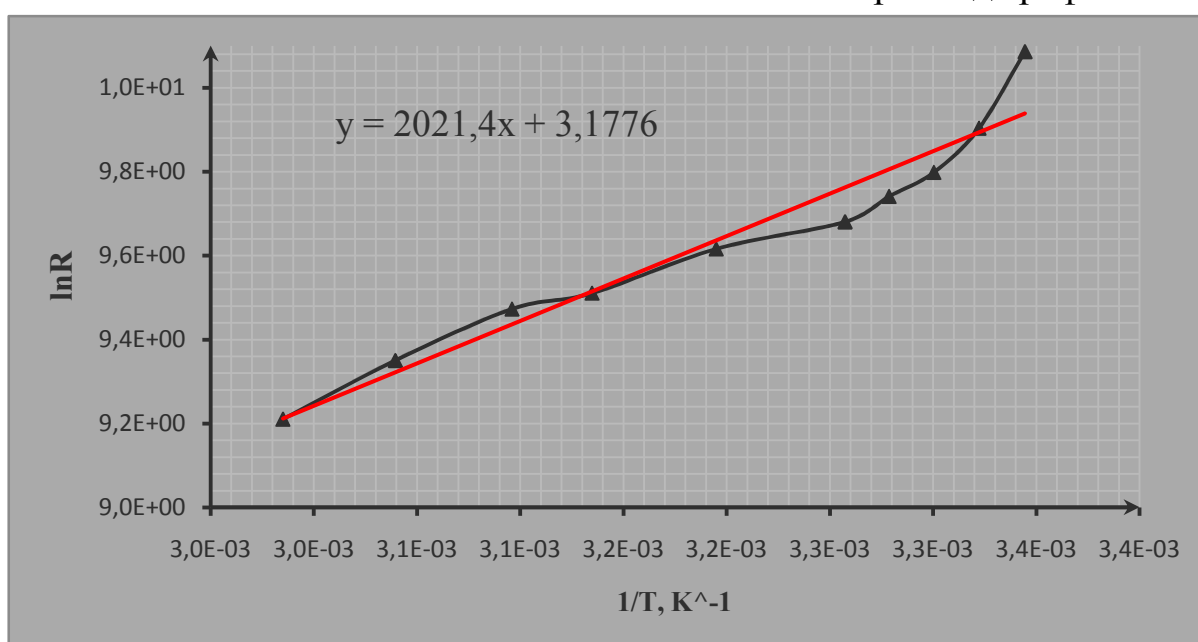
Порядок виконання роботи

1. За допомогою омметра визначити опір терморезистора за кімнатної температури.
2. Увімкнути нагрівник і через кожні 5...10 °С за допомогою омметра вимірювати опір напівпровідника. Температура не повинна перевищувати 80 °С.
3. Результати вимірювань записати в табл. 6.1.1.
4. Побудувати графік залежності $\ln R$ від $\frac{1}{T}$ у програмі Excel із зазначенням рівняння прямої (приклад 6.1).
5. З рівняння визначити градієнт та розрахувати ширину забороненої зони із співвідношення (6.1.3) у програмі Excel.
6. Виразити значення ширини забороненої зони в електрон-вольтах, зважаючи на те, що $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
7. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 6.1.1.

Таблиця 6.1.1

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$\frac{1}{T}, \text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$

Приклад графіка 6.1



Контрольні запитання

1. Поясніть причину розщеплення енергетичних рівнів та виникнення енергетичних зон у кристалах з погляду зонної теорії твердого тіла.
2. Сформулюйте принцип Паулі.
3. Чим, з погляду зонної теорії твердого тіла, відрізняються провідники, напівпровідники та діелектрики?
4. Що називають валентною зоною? Що називають зоною провідності?
5. Поясніть, що таке заборонена зона?
6. Що таке рівень Фермі?
7. Згідно з яким принципом заповнюються зони в кристалі?
8. Елементи якої групи таблиці Менделєєва належать переважно до напівпровідників?
9. Як залежить опір напівпровідників від температури? Поясніть причину такої залежності.
10. Чи можна діелектрик зробити провідником? У який спосіб?

Лабораторна робота № 6.2. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Мета роботи: вивчити властивості p - n переходу та його випрямну дію; виміряти вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: власна та домішкова провідність напівпровідників; електронний та дірковий напівпровідники; контактна різниця потенціалів; контакт електронного та діркового напівпровідників (p - n перехід).

Література: [1, т.2 §§ 3.6; 2, §§ 243, 249, 250; 4, т.3 §§ 59, 64]

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до роботи № 6.1.

Основним елементом напівпровідникових випрямлячів є напівпровідникові (кристалічні) діоди, які мають ряд переваг порівняно з вакуумними діодами. Варто відмітити малі габарити, велику механічну міцність, довговічність та інші позитивні особливості напівпровідникових діодів.

В основі роботи напівпровідникових діодів лежить випрямна дія p - n переходу (електронно-діркового переходу). P - n перехід – це тонкий шар на межі між двома ділянками напівпровідника, які відрізняються типом провідності. Відомо, що в напівпровідниках можливі два різних процеси електропровідності – електронний і дірковий.

Для утворення домішкового напівпровідника з електронним типом провідності (напівпровідника n -типу) в кристал германію або кремнію (4-х валентної речовини) додають атоми домішок з більшою валентністю, наприклад, 5-ти валентного миш'яку. Для утворення ковалентних зв'язків з атомами основної речовини миш'яку достатньо 4-х електронів. П'ятий електрон, не зв'язаний з

атомами кристалічної ґратки, після надання йому незначної енергії ΔW_1 (рис. 6.2.1, *a*) стає вільним – електроном провідності. Атом домішки (миш'яку) перетворюється на додатний іон, який не може переміщуватись у кристалі. Домішки, які постачають електрони провідності, називають *донорами*.

Домішки викривлюють електричне поле ґратки, що призводить до появи локальних енергетичних рівнів, розміщених в забороненій зоні енергетичних зон кристала (рис. 6.2.1, *a*). Рівень Фермі в напівпровіднику *n*-типу лежить між донорним рівнем та дном зони провідності (рис. 6.2.1, *a*).

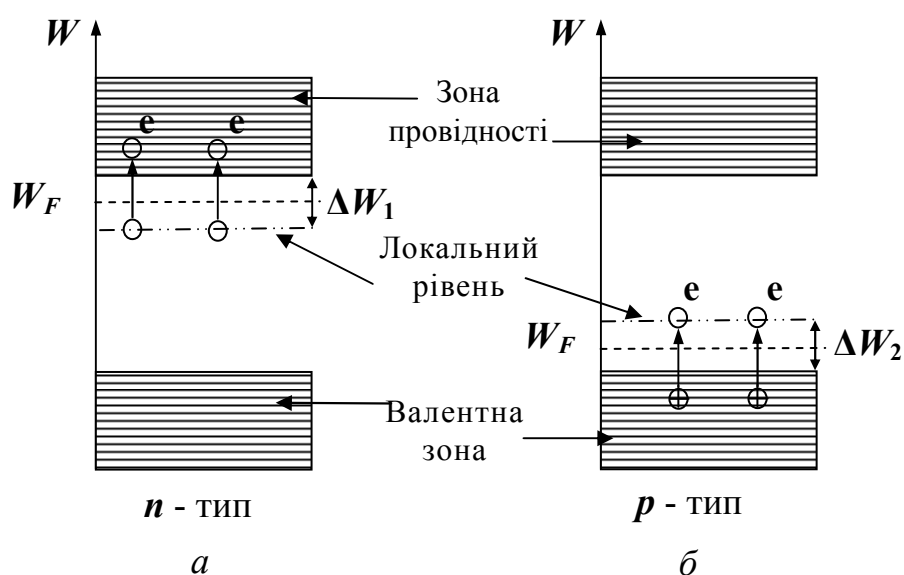


Рис. 6.2.1

Для утворення домішкового напівпровідника з дірковою провідністю (напівпровідника *p*-типу) в кристал германію або кремнію додають атоми домішок з меншою валентністю, наприклад, бору, який має три валентні електрони. Трьох валентних електронів атома бору не вистачає для утворення подвійного ковалентного зв'язку з чотирма сусідніми атомами основної речовини. Тому атом бору захоплює один з валентних електронів германію (або кремнію) і перетворюється у негативно заряджений іон. На місці захопленого електрона залишається дірка – квазічастинка, яка має додатний заряд, який за величиною дорівнює заряду електрона. Після надання дірці незначної кількості енергії ΔW_2 (рис. 6.2.1, *б*) вона стає вільним носієм заряду.

Домішкові атоми, які можуть захоплювати електрони з валентної зони, називаються *акцепторами*. Акцепторні рівні енергії розміщені трохи вище від верхнього краю валентної зони основного кристала (див. рис. 6.2.1, б). Рівень Фермі в напівпровідниках *p*-типу лежить між верхнім рівнем валентної зони та акцепторним рівнем (див. рис. 6.2.1, б).

Отже, якщо концентрація вільних електронів у напівпровіднику більша за концентрацію дірок, то такий напівпровідник має електронну провідність і називається *напівпровідником n-типу*. Якщо перевищує концентрація дірок, то напівпровідник має діркову провідність і носить назву *напівпровідник p-типу*.

Розглянемо процеси на межі двох напівпровідників з різним типом провідності (рис. 6.2.2). Оскільки концентрація вільних електронів в *n*-області є

більшою, ніж в *p*-області, то електрони дифундують через контакт в бік *p*-області. У зворотному напрямку дифундують дірки. Потрапляючи в ділянки з протилежною

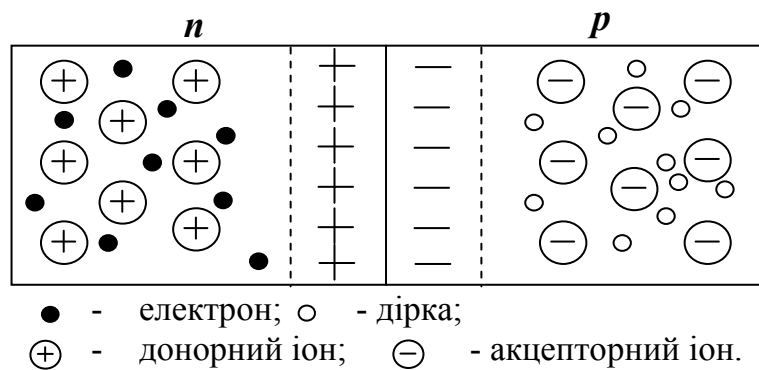


Рис. 6.2.2

провідністю, електрони рекомбінують з дірками, і поблизу контакту спостерігається зменшення концентрації вільних електронів і дірок. Оскільки атомні залишки в *n*-області заряджені позитивно, а в *p*-області – негативно, то в *n*-області біля межі накопичується позитивний заряд, а в *p*-області – негативний. Утворюється так званий *p-n* перехід. Це призводить до виникнення між напівпровідниками *p*- і *n*-типу контактної різниці потенціалів (потенціального бар'єру), що перешкоджає подальшому переміщенню через межу основних носіїв струму – електронів з *n*-області і дірок з *p*-області.

У той же час електричне поле, що утворюється на межі, стимулює рух через p - n перехід неосновних носіїв струму. За відсутності зовнішнього електричного поля повний струм через p - n перехід дорівнює нулю завдяки динамічній рівновазі, що встановлюється на межі, коли середня кількість зарядів, які рухаються проти поля, врівноважується зарядами, що проходять межу в протилежному напрямку.

Дослідним шляхом з'ясовано, що в деяких випадках контакт двох напівпровідників має властивість проводити електричний струм переважно в одному напрямку.

Під'єднаємо розглянуту систему напівпровідників до електричного поля так, щоб зовнішня різниця потенціалів зменшувала контактну (прямий напрямок рис. 6.2.3, *а*). У такому випадку зменшується висота потенціального бар'єра для основних носіїв струму. Зовнішнє електричне поле «притискує» основні носії струму до межі, через що ширина p - n переходу зменшується. Відповідно зменшується опір p - n переходу – тим більше, чим більша зовнішня напруга. Через p - n перехід іде струм, зумовлений рухом основних носіїв струму, сила якого зі збільшенням напруги зростає за експоненціальним законом.

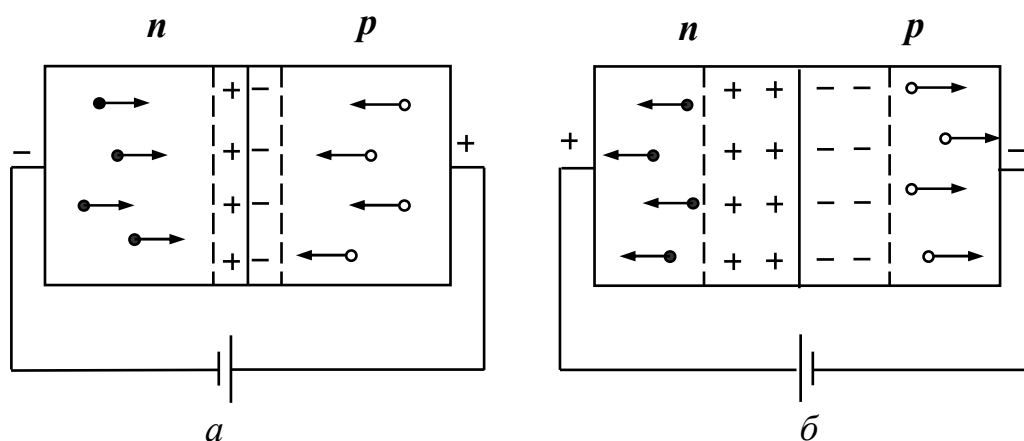


Рис. 6.2.3

Зміна полярності зовнішньої батареї (обернений напрямок) призводить до збільшення висоти потенціального бар'єра для основних носіїв струму (рис. 6.2.3, *б*). Зовнішнє електричне поле «відтягує» основні носії струму від межі, внаслідок чого ширина p -

n переходу і його опір збільшуються. Основні носії не можуть подолати потенціального бар'єра. Тим часом потік неосновних носіїв струму не змінюється (для них бар'єра немає). Через p - n перехід проходить невеликий струм I_n (струм насичення), сила якого майже не залежить від напруги.

Таким чином, p - n перехід має властивість односторонньої провідності, тому може бути використаний для випрямлення змінного струму.

Залежність сили струму через p - n перехід від прикладеної напруги $I=f(U)$ як в прямому, так і в оберненому напрямках має назву вольт-амперної характеристики напівпровідникового випрямляча ВАХ (рис. 6.2.4).

Щоб дослідити односторонню провідність p - n переходу, у цій роботі використовують напівпровідниковий діод. У зв'язку з тим, що прямий струм набагато більший від оберненого, для їхнього вимірювання застосовують прилади різної чутливості. Обернений струм вимірюють мікроамперметром, а прямий – міліамперметром. На панелі лабораторної роботи є перемикач, який дає змогу вмикати діод у прямому та оберненому напрямках.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись із електричною схемою установки.
2. Виміряти силу струму за різних значень (5...6 вимірів) прикладеної напруги (зняти ВАХ – $I=f(U)$) у режимі прямого струму.
3. Перемикачем змінити напрям струму через діод. Зняти ВАХ у режимі оберненого струму.
4. Результати вимірювань записати в табл. 6.2.1.
5. Побудувати графік залежності сили струму від напруги (ВАХ) для прямого та оберненого режиму роботи напівпровідникового діода у програмі Excel.

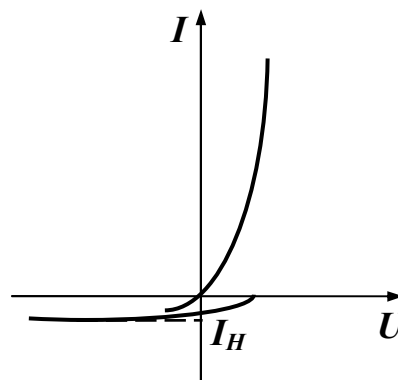


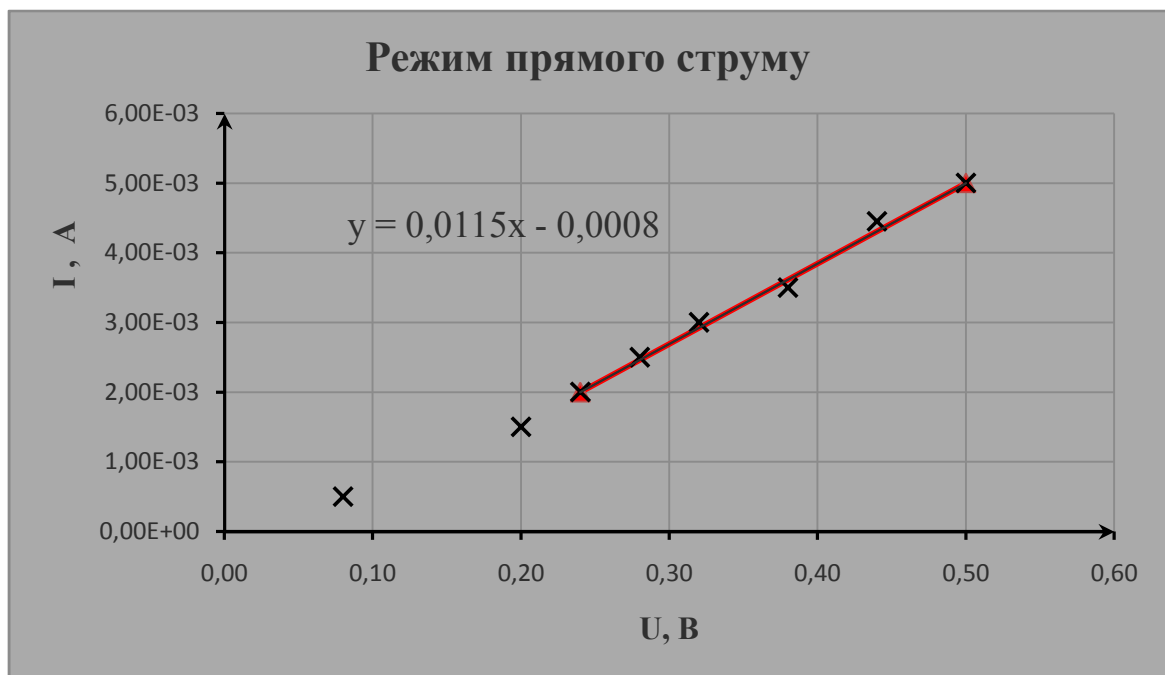
Рис.6.2.4

6. Для лінійної ділянки ВАХ задати рівняння прямої у програмі Excel (приклад 6.1) та за градієнтом визначити внутрішній опір напівпровідникового діода у прямому та оберненому режимах його роботи:

$$R=1/(\text{grad}).$$

7. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 6.2.1.

Приклад графіка 6.1



Таблиця 6.2.1

№ пор.	Режим прямого струму			Режим оберненого струму		
	U, B	I·10 ⁻³ , A	R, Ом	U, B	I·10 ⁻⁶ , A	R, Ом

Контрольні запитання

1. Що називають домішковою провідністю?
2. Що таке напівпровідник n-типу? Які носії струму є основними в напівпровіднику n-типу?
3. Накресліть зонну діаграму напівпровідника n-типу. Де розміщений рівень Фермі в домішковому напівпровіднику n-типу?

4. Що таке напівпровідник p -типу? Які носії струму є основними в напівпровіднику p -типу?
5. Накресліть зонну діаграму напівпровідника p -типу. Де розміщений рівень Фермі у домішковому напівпровіднику p -типу?
6. Що називають n - p переходом і як технічно його отримують?
7. Як виникає контактне електричне поле та потенціальний бар'єр для носіїв струму в n - p переході?
8. Чому запірний прошарок n - p переходу має великий опір?
9. Накресліть ВАХ для n - p переходу, поясніть вигляд її окремих ділянок.
10. Які переваги мають кристалічні діоди перед ламповими?

Лабораторна робота № 6.3. ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА

Мета роботи: дослідити явище виникнення фото-ЕРС в фотоелементах із запірним прошарком; визначити світлову характеристику вентильного фотоелемента та його інтегральну чутливість.

Література: [1, т.3 §§ 9.2, 14.2; 2, §§ 244; 4, т. §§ 65]

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: власна та домішкова провідність напівпровідників; напівпровідники p - та n - типу; контакт електронного та діркового напівпровідників (p - n перехід); контакти M - та M - p ; контактна різниця потенціалів; фотоелектричні явища у напівпровідниках та їхнє практичне застосування.

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до робіт № 6.1, № 6.2.

Вентильні фотоелементи на основі кремнію, германію, сірчаного срібла тощо широко застосовують в науці і техніці для безпосереднього перетворення енергії світла в енергію електричного струму, а також для реєстрації і вимірювання світлових потоків. Кремнієві і деякі інші вентильні фотоелементи використовують для виготовлення «сонячних» батарей, наприклад, для живлення радіоапаратури штучних супутників Землі. Їхній ККД сягає 10 – 11 %. У цій роботі визначається світлова характеристика фотоелемента ФЕСС-У-10.

Вентильний фотоелемент являє собою металеву пластинку 1, поверхню якої дифузійним методом покрито кристалічним напівпровідником n -типу 2 (рис. 6.3.1) з напівпрозорим захисним шаром 3 з того ж металу. Між шаром металу 1 та напівпровідником n -типу 2 утворюється контакт M - n (метал-напівпровідник) із запірним прошарком. Такий самий запірний прошарок виникає і на контакті напівпровідника n -типу 2 з металевим покриттям 3. При

цьому контактні різниці потенціалів однакові і включені у коло назустріч. Еквівалентну схему вентильного фотоелемента зображено на рис. 6.3.2. Виникнення ЕРС на фотоелементі зумовлене явищем внутрішнього фотоелефекту в запірному прошарку $K2$ внаслідок попадання на нього світла через прозоре металеве покриття 3 .

За відсутності опромінювання контактні різниці потенціалів U_{K1} та U_{K2} однакові за величиною. Оскільки у колі (див. рис. 6.3.2) вони включені назустріч, різниця потенціалів

$$\varepsilon = U_{K1} - U_{K2} \quad (6.3.1)$$

дорівнює нулю і струм через гальванометр не проходить.

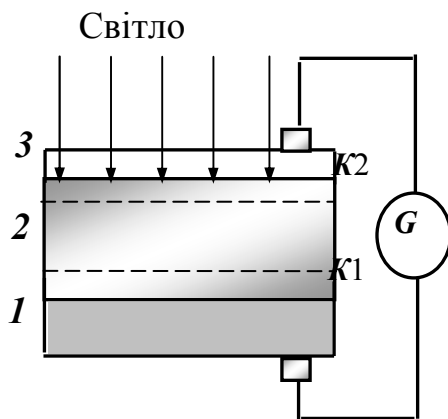


Рис.6.3.1

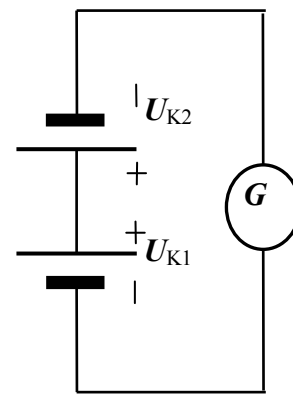


Рис. 6.3.2

За наявності світлового потоку в запірному прошарку $K2$ з'являються додаткові носії заряду (фотоелектрони та фотодірки), які знижують контактну різницю потенціалів U_{K2} так, що фото-ЕРС відповідно до (6.3.1) стає відмінною від нуля. Це зниження відбувається на контакті $K2$, енергетична зонна структура якого зображена на рис. 6.3.3.

Запірний прошарок Δx (рис. 6.3.3) для контакту метал – напівпровідник n -типу утворюється тоді, коли робота виходу електрона з металу A_M є більшою за роботу виходу з напівпровідника n -типу A_n . При цьому виникає рівноважна зовнішня контактна різниця потенціалів U_{K2} :

$$U_{K2} = \frac{A_M - A_n}{e}.$$

Тобто метал має надлишковий негативний заряд, а напівпровідник *n*-типу – позитивний, виникає контактне електричне поле, вектор напруженості E_K якого показано на рис. 6.3.3.

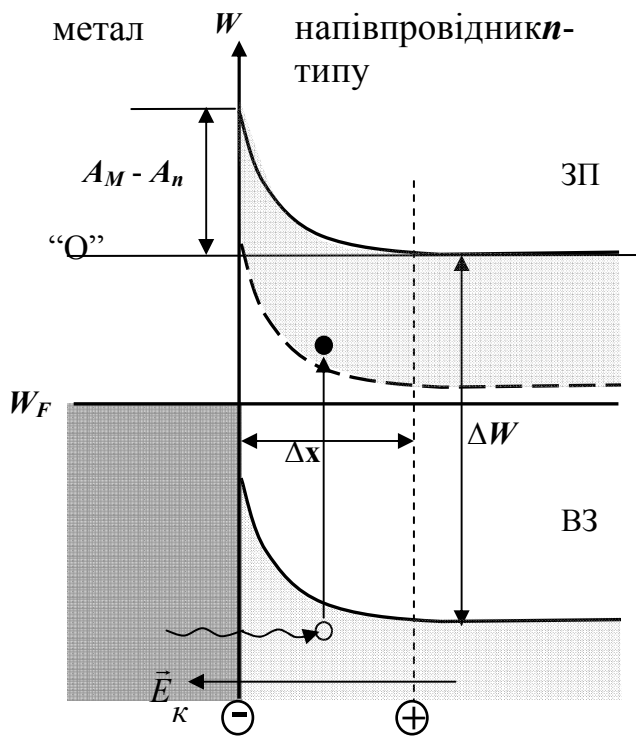


Рис. 6.3.3

Квант світла (зображений хвилястою лінією зі стрілкою на рис. 6.3.3) попадає в запiрний прошарок через напівпрозорий метал і викликає внутрішній фотоефект, тобто переводить електрон із валентної зони (B3) у зону провідності (ЗП). Внаслідок цього виникають два додаткових носії заряду – дірка у B3 та електрон у ЗП. Під дією

електричного поля електрон переміщується в ділянку напівпровідника, а дірка, відповідно, у ділянку металу. Це викликає компенсацію надлишкових зарядів, що виникли під час утворення контакту метал – напівпровідник, а з ним і контактної різниці потенціалів U_{K2} .

Неперервний потік таких квантів зумовлює постійне зниження цієї контактної різниці потенціалів так, що фото-ЕРС (6.3.1) буде відмінною від нуля, а отже, й відмінним від нуля буде струм у колі.

Світловою характеристикою фотоелемента називається залежність фотоструму I від променевого потоку, що падає на нього $I = f(\Phi)$. Однією з характеристик фотоелемента є інтегральна чутливість q_i . Вона чисельно дорівнює приросту фотоструму в разі зростання на одиницю променевого потоку:

$$q_i = \frac{dI}{d\Phi}. \quad (6.3.2)$$

Схему установки зображено на рис. 6.3.4. Для визначення світлового потоку Φ , що падає на поверхню фотоелемента 2, треба змінювати відстань r від фотоелемента до джерела світла 1.

Зважаючи на те, що сила світла лампи j залишається сталою, потік випромінювання Φ , що падає на поверхню фотоелемента площею S , розраховується за відомим співвідношенням:

$$\Phi = j \frac{S \cos \alpha}{r^2}, \quad (6.3.3)$$

де α – кут, який утворює нормаль до поверхні фотоелемента з напрямком світлового потоку; r – відстань від фотоелемента до джерела світла.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з лабораторною установкою.
2. Встановити фотоелемент так, щоб кут $\alpha = 0^\circ$. Ввімкнути джерело світла. Змінюючи відстань r від джерела світла до фотоелемента (5 – 7 значень), записати показники мікроамперметра I .
3. Повторити операції п.2 для кута $\alpha = 60^\circ$.
4. Отримані результати вимірювань занести до таблиці 6.3.1 в програмі Excel.
5. Значення сили світла джерела j та площі фотоелемента S (вказані на установці) записати в табл. 6.3.1.

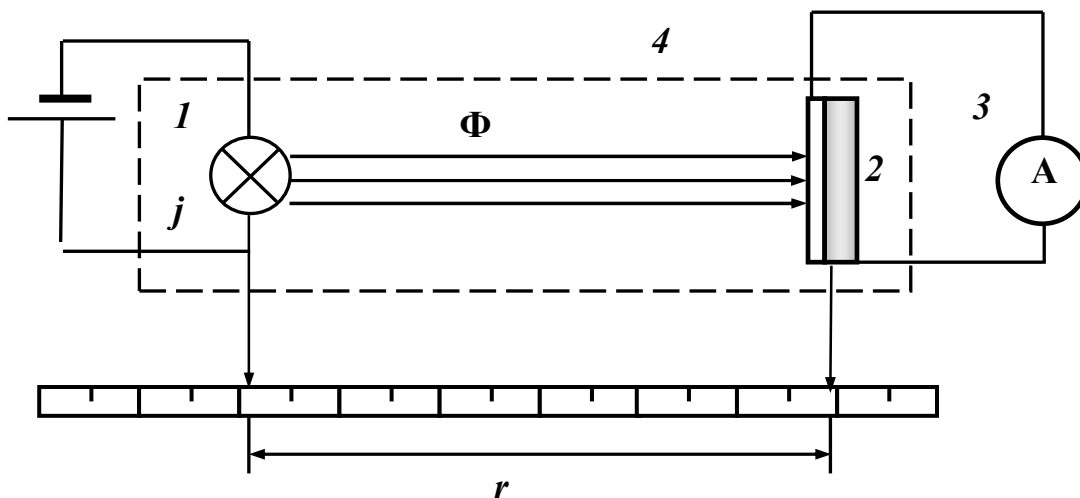


Рис. 6.3.4

6. Обчислити в програмі Excel (за формулою 6.3.3) світловий потік Φ для кожного значення r .
7. Побудувати світлову характеристику фотоелемента $I = f(\Phi)$ у програмі Excel.
8. Визначити інтегральну чутливість q_i фотоелемента. Для цього провести пряму на лінійній ділянці графіка $I = f(\Phi)$, записати рівняння цієї прямої та визначити приріст променевого потоку $d\Phi$ та відповідний йому приріст фотоструму dI .
9. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 6.3.1.

Таблиця 6.3.1

№ пор.	r , м	I , А	j , кД	S , м ²	Φ , лм	q_i , А/лм

Контрольні запитання

1. Що називають власною та домішковою провідністю напівпровідників?
2. У чому полягає внутрішній фотоефект?
3. Що називають «червоною межею» внутрішнього фотоефекту?
4. Покажіть схематично будову вентильного фотоелемента та поясніть принцип його роботи.
5. Як у вентильному фотоелементі відбувається пряме перетворення світлової енергії в електричну?
6. Що таке спектральна чутливість фотоелемента?
7. Наведіть приклади використання фотоелементів.
8. Які причини зумовлюють низький ККД фотоелементів?

Лабораторна робота № 7.1.ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ

Мета роботи: ознайомлення з різними видами радіоактивного випромінювання та способами їхньої реєстрації; визначення активності радіоактивного джерела за допомогою лічильника Гейгера – Мюллера.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: будова атомного ядра; масове число та заряд ядра; види радіоактивного випромінювання; закон радіоактивного розпаду; правила зміщень; методи спостереження та реєстрації радіоактивних випромінювань.

Література: [1, т.3 §§ 15.9–15.13; 2, §§ 251, 254–259; 3, §§ 17.8–17.12; 4, т.3 §§ 14, 66–68, 70]

Атомне ядро – це центральна частина атома, в якій зосереджено позитивний заряд та майже вся його маса. Воно складається з нуклонів (позитивно заряджених протонів 1_1p і нейтральних нейтронів 1_0n), які утримуються разом ядерними силами. Кількість протонів у ядрі називається зарядовим числом Z , яке дорівнює порядковому номеру елемента у таблиці Менделєєва. Кількість нейтронів у ядрі називається ізотонічним числом N . Сума чисел $Z+N$ показує загальну кількість нуклонів ядра A і приблизно середню масу атома. Ядро позначають як A_ZX . Ядра з однаковим числом Z та різними N називають *ізотонами*, з однаковим числом N та різними Z – *ізотонами*, з однаковим A , проте різними Z та N – *ізобарами*.

Відомо, що нестабільні ядра, а також всі ядра у збудженому стані перетворюються спонтанно, що призводить до зміни складу ядра і його внутрішньої енергії. Такі спонтанні процеси ядерних перетворень називаються *радіоактивністю*.

Закон, за яким відбувається радіоактивний розпад ядер, пов'язує початкову кількість ядер (N_0), які розпадаються, із кількістю ядер, що не розпалися (N) за певний проміжок часу (t):

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7.1.1)$$

де λ – стала розпаду, яку можна виразити через період напіврозпаду ($T_{1/2}$) – час, за який розпадеться половина початкових ядер:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}.$$

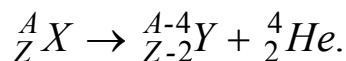
Проте такий закон справедливий лише для випадку, коли дочірні ядра є стабільними. У решті випадків буде спостерігатися подальший розпад утворених ядер, для яких стала розпаду є іншою. Таку послідовність розпаду описують системами диференціальних рівнянь:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1.$$

Якщо $T_{1/2}$ материнського ядра $\gg T_{1/2}$ дочірнього ізотопу, то $\lambda_1 N_1 \approx \lambda_2 N_2$.

До основних типів радіоактивних перетворень належать α -, β^+ -, β^- - розпади, γ -випромінювання, e^- (K^-) поглинання, спонтанний поділ, протонна радіоактивність тощо. Розглянемо деякі основні типи радіоактивних перетворень.

1. *Випромінювання α -частинки.* Розпад ядра відбувається з вильотом ядра атома ${}^4_2\text{He}$. Правило зміщення Содді, яке дає змогу визначити місце ізотопу – продукту розпаду у періодичній системі елементів, для альфа-розпаду можна записати таким чином:



Для того щоб відбувся альфа-розпад, потрібно, щоб енергія зв'язку дочірнього ядра та α -частинки окремо були більшим за енергію зв'язку материнського ядра, а це означає, що в цьому процесі виділяється енергія. α -частинка має заряд, тому для того, щоб вона покинула ядро, їй треба подолати кулонівський бар'єр. Внаслідок цього α -розпад відбувається за час $10^{-10} \div 10^{-7}$ с.

2. *Випромінювання β -частинки.* Ядро випромінює електрон/позитрон. Процес відбувається лише всередині ядра, коли один з нейтронів (протонів) розпадається, утворюючи протон та електрон (нейтрон та позитрон).



де $\tilde{\nu}_e$, ν_e – електронне антинейтрино та нейтрино, які випромінюються під час процесу β -розпаду.

Існування цих частинок було передбачене теоретично для обґрунтування спектра енергій β -частинок. Нейтрино/антинейтрино має нульові заряд та масу спокою і спін $\hbar/2$.

Вільний нейтрон може розпадатися ($T_{1/2} \approx 11-15$ хв) поза межами ядра, а в ядрі може залишатися стабільним. Протон, навпаки, вважається стабільною частинкою ($T_{1/2} \approx 10^{29}$ років) поза межами ядра і може розпадатися у нейтрон всередині.

3. *γ -випромінювання* – це електромагнітні хвилі з високою про-никністю, які не відхиляються ні в електричному, ні в магнітному полях. Воно не виникає самостійно, а супроводжує α -, β - розпади, виникає в ядерних реакціях, в процесах гальмування заряджених частинок, в процесі їхнього розпаду тощо. γ -спектр має лінійчасту структуру. Цей вид радіоактивного випромінювання не описується правилом зміщення тому, що A та Z ядра залишаються незмінними в цих процесах.

Основними механізмами взаємодії γ -випромінювання з речовиною, що призводять до послаблення його інтенсивності, є фотоефект, комптон-ефект і народження електронно-позитронних пар (див. лаб. роб. №7.2).

Важливою характеристикою радіоактивного джерела є його активність (A), яка показує, скільки ядер (dN) відповідного ізотопу розпадається за одиницю часу:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (7.1.2)$$

Одиниці виміру радіоактивності $[1\text{Ки}] = [3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}] = [3,7 \cdot 10^{10} \text{ розпадів/с}]$.

Перетворення ядра завжди супроводжується випромінюванням γ -квантів, тому активність препарату можна оцінити за кількістю γ -квантів, які випромінює джерело за одиницю часу і які реєструє лічильник.

Щоб визначити кількість ядер (N) у масі речовини (m), можна скористатися визначенням моля речовини:

$$v = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu}, \quad (7.1.3)$$

де N_A – стала Авогадро, μ – молярна маса речовини.

За допомогою формул (7.1.2) та (7.1.3) знаходимо масу радіоактивного препарату:

$$m = \frac{A \cdot \mu}{N_A \cdot \lambda}. \quad (7.1.4)$$

У цій лабораторній роботі для визначення активності радіоактивного препарату знаходять кількість γ -квантів, зареєстрованих за допомогою лічильника за одиницю часу (I , імп/с). Зважаючи на те, що випромінювання поширюється в усіх напрямках рівномірно, на лічильник, площа перерізу якого S , на відстані R від джерела припадає $S/4\pi R^2$ частини випромінювання (рис. 7.1.2).

Крім того, лічильник реєструє тільки частину η випромінювання, яке на нього падає (η називають "ефективністю лічильника"). Тому швидкість рахування лічильником γ -квантів становить:

$$I = A\eta \frac{S}{4\pi R^2} \quad (7.1.5)$$

де R – відстань від джерела до лічильника.

Співвідношення (7.1.5) визначає інтенсивність випромінювання у точці на відстані R від джерела і називається законом обернених квадратів. Із (7.1.5) слідує, що графіком залежності I від R^2 є пряма лінія, тангенс кута нахилу якої до осі R^2 дорівнюватиме:

$$\operatorname{tg}\alpha = A\eta \frac{S}{4\pi}. \quad (7.1.6)$$

Слід мати на увазі, що визначена з дослідів швидкість відліку містить також значення інтенсивності I_{Φ} , зумовлене наявністю природного фону. Тому значення I у формулі (7.1.5) треба розраховувати як різницю значень I_x та I_{Φ} , тобто $I = I_x - I_{\Phi}$.

Для реєстрації випромінювання застосовують різні детектори заряджених частинок, які можна поділити на лічильники та трекові детектори, іонізаційні, іскрові та пропорційні камери. У цій роботі використовується лічильник Гейгера – Мюллера. Цей лічильник є газорозрядним, принцип дії якого заснований на явищі самостійного газового розряду, що буде існувати без зовнішньої іонізації газу, якщо його примусово не загасити.

Лічильник є тонкостінною, зазвичай скляною герметичною камерою циліндричної форми. Із зовнішнього боку камера вкрита тонким шаром металу, який виконує роль катода 1 (рис. 7.1.1). Анод – це тонка (діаметром близько 0,05 мм) металева нитка 2, протягнута вздовж осі циліндра. Така асиметрія геометрії електродів призводить до того, що електричне поле має високу напруженість лише на малій ділянці навколо анодної нитки і малу – в решті простору всередині лічильника.

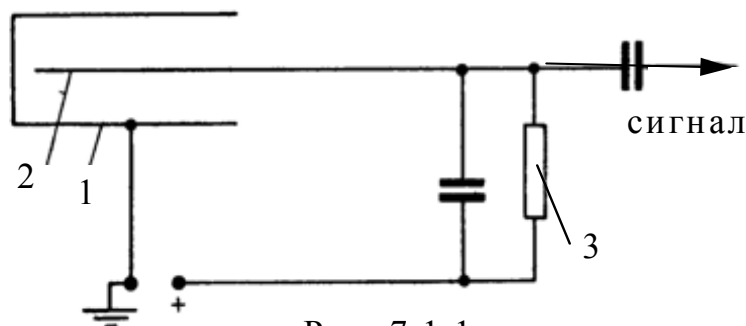


Рис. 7.1.1

Трубка всередині заповнюється розрідженим газом, найчастіше аргоном або неоном. Коли γ -кванти радіоактивного ізотопу попадають на стінки лічильника, вони вибивають електрони, які попадають всередину і рухаються у газовому просторі. Зустрівши атоми газу, електрони іонізують їх (утворюють вільний електрон і додатний іон). Електричне поле між катодом і анодом прискорює електрони до енергій, за яких починається

ударна іонізація. Виникає лавина іонів, і струм, який тече через лічильник, різко зростає.

При цьому на опорі 3 (рис. 7.1.1) виникає імпульс напруги, який передається до реєстраційного приладу. Щоб лічильник зміг зареєструвати наступну частинку, яка до нього попадає, лавинний розряд треба загасити. Це відбувається автоматично, адже в момент появи імпульсу струму на опорі виникає велике падіння напруги, тому напруга між анодом і катодом різко зменшується настільки, що розряд зникає і лічильник знову може приймати імпульс.

Схему лабораторної установки зображено на рис. 7.1.2, де 1 – радіоактивне джерело на рухомій платформі; 2 – лічильник Гейгера – Мюллера; 3 – лінійка; 4 – високовольтний випрямляч; 5 – секундомір; 6 – лічильник імпульсів; 7 – шторка.



Рис. 7.1.2

Порядок виконання роботи

Насамперед студент повинен ознайомитись із правилами техніки безпеки, далі виконувати роботу у такій послідовності:

1. Увімкнути живлення пристрою та прогріти його протягом 5...7 хв.
2. За допомогою регулятора напруги, що знаходиться на лічильнику імпульсів 4, встановити робочу напругу на лічильнику Гейгера – Мюллера.
3. Виміряти швидкість відліку за двох відстаней препарату до лічильника та перевірити закон обернених квадратів за формулою (7.1.5). Для цього потрібно:
 - а) встановити шторку перед препаратом. Увімкнути лічильник, визначити кількість імпульсів за 3 хв та обчислити швидкість відліку I_{Φ} , що відповідає природному фону;

б) встановити препарат на відстані $R=40$ см від лічильника та відсунути шторку і визначити кількість відліків за 3 хв. Повторити ці дії на відстані $R=30, 25, 15, 10$ см;

в) дані записати в табл. 7.1.1;

г) знайти середню швидкість відліку I для кожного значення R та відняти від нього значення I_{ϕ} ;

д) побудувати графік залежності швидкості відліку I від R^2 .

Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 7.1.1.

4. Обчислити активність препарату та його масу, для цього:

а) на побудованому графіку вибрати дві довільні точки й обчислити значення тангенса кута нахилу прямої:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{I_2 - I_1}{\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_1^2}}; \quad (7.1.7)$$

б) підставивши значення $\operatorname{tg}\alpha$ у формулу (7.1.6), обчислити активність препарату:

$$A = \frac{4\pi \cdot \operatorname{tg}\alpha}{\eta \cdot S}; \quad (7.1.8)$$

в) за формулою (7.1.4) знайти масу радіоактивного препарату.

Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до табл. 6.7.1.

Для розрахунків прийняти значення періоду напіврозпаду ядра $^{238}\text{U}=4,47 \cdot 10^9$ років (1 рік $\approx 3,16 \cdot 10^7$ сек.), а «ефективність лічильника» $\eta=0,6$.

Таблиця 7.1.1

$R, \text{ м}$	$I_x, \text{ імпл/с}$	$I_{\phi}, \text{ імпл/с}$	$I_x - I_{\phi}, \text{ імпл/с}$	$R^2, \text{ м}^2$
0,40				
0,30				
0,25				
0,20				
0,15				
0,10				

Контрольні запитання

1. Дайте визначення радіоактивності.
2. Назвіть основні види радіоактивних перетворень та охарактеризуйте їх.
3. На прикладі ядра ${}^7_3\text{Li}$ охарактеризуйте склад ядра будь-якого елемента.
4. Що називається ізотопами? Назвіть ізотопи атома водню.
5. Напишіть реакцію α - розпаду ізотопу ${}^{238}_{92}\text{U}$.
6. Які основні методи реєстрації іонізуючих випромінювань вам відомі?
7. Опишіть будову лічильника Гейгера – Мюллера та пояснить принцип його роботи.
8. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
9. Що називають періодом напіврозпаду радіоактивного препарату? Як він пов'язаний із сталою розпаду?
10. Що таке активність радіоактивного препарату?
11. Виведіть формулу для обчислення маси радіоактивного препарату та його активності.
12. Що таке поглинальна та експозиційна доза опромінення? Назвіть одиниці їхнього вимірювання.

Лабораторна робота № 7.2.ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Мета роботи: дослідити основні види взаємодії радіоактивного випромінювання з речовиною та визначити коефіцієнт поглинання γ - випромінювання різними матеріалами.

Вказівки до виконання роботи

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: радіоактивне випромінювання та його види; закономірності α , β і γ - розпаду та їхні властивості; поглинута, експозиційна та біологічна дози опромінення, їхні одиниці; потужність дози опромінення.

Література: [1, §§ 255 – 259, 2, §§ 188, 254–258, 260; 4, § 70]

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до роботи № 7.1.

Радіоактивністю називають процес спонтанного перетворення одних атомних ядер в інші, який супроводжується випромінюванням різних частинок. Найбільшу проникну здатність має γ -випромінювання, яке супроводжує α і β - розпади у процесі перетворення ядра. Під час проходження пучка γ -квантів крізь речовину інтенсивність γ -випромінювання зменшується в основному внаслідок трьох процесів – *фотоефекту, народження пар та комптонівського розсіяння*, кожен з яких переважає за певних енергій γ -випромінювання.

Розглянемо окремо ці процеси.

1. *Фотоефект* – це процес поглинання γ -квантів речовиною, в якому їхня енергія витрачається на народження вільних електронів, які або покидають поверхню матеріалу (зовнішній фотоефект) або залишаються вільними носіями заряду всередині (внутрішній фотоефект). Цей процес є переважним серед трьох зазначених видів

взаємодії за низьких енергій γ -квантів. Наприклад, фотоелектричне поглинання є найбільш суттєвим в алюмінії для енергій $E_\gamma < 50$ кеВ, у свинці за $E_\gamma < 0,5$ МеВ.

2. У міру збільшення енергії γ -квантів переважає процес *комptonівського розсіяння*– розсіяння γ -квантів на вільних або слабо зв'язаних електронах (енергія зв'язку електронів у атомі є набагато меншою за енергію γ -квантів). Внаслідок комптон-ефекту енергія розсіяного фотона зменшується, а електрон, на якому відбулося розсіяння, набуває кінетичної енергії. Цей процес переважає за енергій γ -квантів в алюмінії $60 \text{ кеВ} < E_\gamma < 15 \text{ МеВ}$ і у свинці $0,7 \text{ МеВ} < E_\gamma < 5,0 \text{ МеВ}$.

3. *Утворення пар* домінує над цими двома процесами за великих енергій γ -квантів. Процес полягає у тому, що в кулонівському полі ядра або зарядженої частинки (яка отримує частку енергії фотона, що вступає у взаємодію) виникає електрон-позитронна пара. Поріг цієї реакції у полі важкого ядра $\approx 2m_e c^2 \approx 1,022 \text{ МеВ}$, а в полі електрона $\approx 4m_e c^2$.

Зміна інтенсивності γ -випромінювання під час проходження крізь речовину, описується законом Бугера:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (7.2.1)$$

де I_x – інтенсивність γ -випромінювання після проходження шару речовини товщиною x ; I_0 – початкова інтенсивність γ -випромінювання; μ – повний лінійний коефіцієнт поглинання, який характеризує зменшення інтенсивності випромінювання під час проходження крізь речовину. Одиниці вимірювання лінійного коефіцієнта поглинання $[\mu] = 1 \text{ м}^{-1}$.

Повний лінійний коефіцієнт (лінійний коефіцієнт) поглинання визначає долю моноенергетичних γ -квантів, які вибувають із паралельного пучка на одиниці шляху випромінювання у речовині. Він залежить від густини, порядкового номеру речовини та від енергії γ -квантів, отже, містить три складові $\mu = \tau + \varepsilon + \chi$, де τ – лінійний коефіцієнт поглинання у випадку фотоелектричного ефекту, ε – лінійний коефіцієнт поглинання для комптон-ефекту, χ – лінійний коефіцієнт поглинання для процесу утворення пар.

Основними характеристиками дії γ -випромінювання, а також інших видів іонізуючого випромінювання на речовину, є поглинута, експозиційна та біологічна дози випромінювання і потужність дози опромінення.

Поглинута доза показує, яка кількість енергії випромінювання поглинається одиницею маси опромінюваного тіла. Одиницею вимірювання поглинутої дози у системі СІ є грей (Гр). Один грей – це доза, за якої речовині масою 1 кг передається енергія іонізуючого випромінювання в 1 Дж (або 1 Гр = 100 рад).

Для повітря кількість випромінювання, яке викликає іонізацію, названо *експозиційною дозою*. Вона виражає сумарний заряд всіх іонів одного знаку в елементарному об'ємі повітря відносно до маси даного об'єму. Позасистемна поширена одиниця вимірювання експозиційної дози – рентген (Р), а в системі СІ – Кл/кг.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

Важливим є вимірювання дози, поглинутої біологічною тканиною. Для оцінювання міри біологічної небезпеки, яка залежить від типу іонізуючого випромінювання, введено поняття *еквівалентної дози*. Одиниця вимірювання еквівалентної дози випромінювання – бер. Один бер – це доза опромінення, аналогічна за своєю біологічною дією до дози опромінення рентгенівськими променями в один рентген.

Для прогнозування радіоактивного впливу введено поняття *потужності дози опромінення*, яке використовується як для експозиційної, так і для поглинутої, еквівалентної дози опромінення. В кожному випадку відповідна потужність визначає дозу, яку отримує речовина за одиницю часу.

Скориставшись формулою (7.2.1), можна отримати вираз для визначення лінійного коефіцієнту поглинання γ -випромінювання:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I_x}, \quad (7.2.2)$$

Із одержаної формули видно, що лінійний коефіцієнт поглинання γ -випромінювання різними матеріалами визначається

шляхом вимірювання інтенсивності випромінювання I_x , що проходить крізь різні товщини x шару речовини, розміщеної між джерелом γ -випромінювання та лічильником, а також початкової інтенсивності γ -випромінювання I_0 .

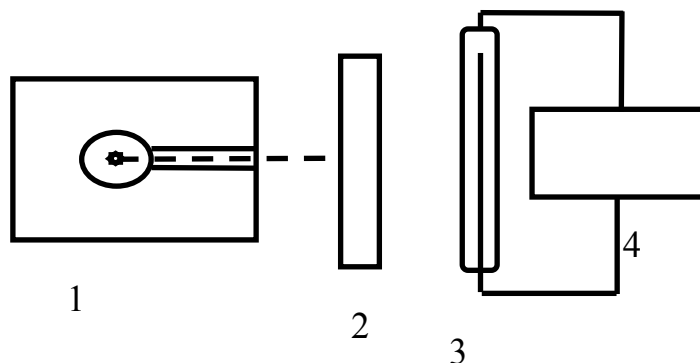


Рис.7.2.1

Для одержання точніших значень інтенсивності γ -випромінювання рекомендовано від одержаних даних I_x та I_0 відняти I_ϕ – інтенсивність випромінювання природного фону, тобто випромінювання, яке фіксує лічильник, якщо джерело радіоактивного випромінювання закрито свинцевим блоком (див. хід роботи).

Таким чином, робоча формула набуває вигляду:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0 - I_\phi}{I_x - I_\phi}. \quad (7.2.3)$$

Якщо відома густина ρ досліджуваного матеріалу, можна визначити масовий коефіцієнт поглинання, який вимірюється в $[\mu_m] = 1 \text{ м}^2/\text{кг}$:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}. \quad (7.2.4)$$

Схему приладу для вимірювання коефіцієнта поглинання показано на рисунку 7.2.1. Він складається зі свинцевого блоку 1, в якому розміщено радіоактивний препарат, що випромінює майже паралельні γ -промені; добір змінних поглиначів 2, коефіцієнт поглинання яких визначається в цій лабораторній роботі; лічильник Гейгера – Мюллера 3 (опис див. в роботі №7.1); лічильний пристрій 4.

Порядок виконання роботи

1. Радіоактивний препарат 1 закрити свинцевим екраном 2.
2. Увімкнути лічильний пристрій 4.
3. Записати кількість імпульсів N_{ϕ} , зумовлених природним фоном, тричі по одній хвилині.
4. Відкрити свинцевий екран, та зробити вимірювання кількості імпульсів джерела N_0 тричі по одній хвилині.
5. Виміряти товщину поглиначів x (метал, дерево, цегла або бетон).
6. Досліджуваний зразок (метал, дерево, цегла або бетон) розмістити між джерелом радіоактивного випромінювання та лічильником.
7. Зробити вимірювання кількості імпульсів N_x так само (тричі по одній хвилині).
8. Усі результати записати в табл. 7.2.1. у програмі Excel.
9. Розрахувати інтенсивність випромінювання I_{ϕ} , I_0 та I_x та знайти середнє значення у програмі Excel.
10. Використовуючи середні значення I_x, I_0 та I_{ϕ} , визначити μ за формулою (7.2.3) та μ_m за формулою (7.2.4) у програмі Excel.

Контрольні запитання

1. Розкажіть про склад ядра атома.
2. Що називається енергією зв'язку та дефектом маси ядра?
3. Що називається радіоактивністю?
4. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
5. Назвіть основні види іонізуючих випромінювань та охарактеризуйте їхні властивості.
6. Запишіть правила зміщень для α - і β -розпадів.
7. Які механізми взаємодії γ -випромінювання з речовиною вам відомі? За яких умов можливий кожен з цих механізмів взаємодії?
8. Що називається поглинутою, експозиційною, біологічною дозами випромінювання, потужністю дози опромінення?
9. Сформулюйте та поясніть закон Бугера.
10. Який фізичний зміст лінійного та масового коефіцієнтів поглинання?
11. Виведіть формулу, що дає змогу визначити зв'язок між лінійним коефіцієнтом поглинання і товщиною матеріалу.

Таблиця 7.2.1

	Кількість імпульсів, N	Інтенсивність, I, імп/с	Середнє значення інтенсивності I _{сер} , імп/с	Товщина матеріалу, x, м	μ , 1/м	μ_m , м ² /кг
Фон						
Джерело						
Дерево						
Залізо						
Бетон						

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Загальний курс фізики*: навч. посібник для студ. вищих техн. і пед. закладів освіти. В 3 тт. /за ред. І.М.Кучерука. – К.: Техніка, 1999.
2. *Трофимова Т.И.* Курс фізики: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1990.
3. *Чолпан П.П.* Фізика: підручник. – К.: Вища шк., 2003.
4. *Савельев И.В.* Курс фізики: учеб.: В 3-х тт. – М.: Наука, 1977.
5. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
6. *Азнаурян І.О.* Фізика та фізичні методи дослідження: навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2008. – 250 с.
7. *Фізика в будівництві*: навчальний посібник/ В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян, Н.Б. Бурдейна, В.Б. Долгошей, С.М. Пономаренко. – К.: КНУБА, 2011. – 252 с.
8. *Фізика. Лабораторний практикум*: навчальний посібник. – 2-ге вид., випр. і доп. /В.І. Клапченко, В.І. Тарасевич, І.О. Азнаурян та ін. /за ред. В.І.Клапченка. – К.: КНУБА, 2006. - 228 с.

Основні одиниці Міжнародної системи (СІ)

Довжина	Маса	Час	Сила електричного струму	Термодинамічна температура	Кількість речовини	Сила світла
Метр, м	Кілограм, кг	Секунда, с	Ампер, А	Кельвін, К	Моль, моль	Кандела, кд

Деякі позасистемні величини

$1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад	1 рік = 365 діб = $3,11 \cdot 10^7$ с	Å – ангстрем (10^{-10})
1 мм рт. ст. = 133,3 Па	1 доба = 86400 с	1 еВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
1 кал = 4,18 Дж	1 кВт·год = $3,6 \cdot 10^6$ Дж	1 Кі(кюри) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк

Теплопровідність деяких твердих тіл, Вт/(м·К)

Дерево	0,175	Повсть	0,046
Цегла	0,55...0,84	Пісок сухий	0,325
Алюміній	210	Пробка	0,050
Залізо	58,7	Накип (на стінках котла)	0,60
Мідь	390	Ебоніт	0,174
Войлок	0,046	Кварц плавлений	1,37

Основні фізичні сталі

Назва фізичної сталої	Позначення	Числове значення
Гравітаційна стала	γ	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Число Авогадро	N_A	$6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	R	$8,315 \cdot \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Молярний об'єм ідеального газу	V_m	$22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Електрична стала	ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Стала Больцмана	k	$1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Число Фарадея	F	$9,649 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Стала закону Стефана–Больцмана	σ	$5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$
Стала закону зміщення Віна	b	$2,897 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Питомий заряд електрона	e/m	$1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Заряд електрона	e	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Швидкість світла у вакуумі	c	$2,997 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Борівський радіус	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Маса спокою електрона	m_e	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.}$
Маса спокою протона	m_p	$1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00727 \text{ а.о.м.}$
Маса спокою нейтрона	m_n	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.}$
Енергія іонізації атома водню	W_i	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$

Робота виходу електронів з металів

Метал	$A10^{-19}$, Дж	A , еВ
Калій	3,5	2,2
Літій	3,7	2,3
Платина	10,0	6,3
Рубідій	3,4	2,1
Срібло	7,5	4,7
Цезій	3,2	2,0
Цинк	6,4	4,0

Товщини шару половинного ослаблення та коефіцієнти поглинання-променів деякими матеріалами

Матеріал	Товщина шару половинного ослаблення, м	Лінійний коефіцієнт поглинання, m^{-1}	Масовий коефіцієнт поглинання, $10^{-3}, m^2/kg$
Бетон (густина $3,2 \cdot 10^3$ кг/м ³)	0,1	6,93	2,17
Сталь (броня)	0,03	23,11	2,96
Свинець	0,02	34,66	3,06

Десяткові префікси до назв одиниць

Е – екса (10^{18})	М – мега (10^6)	д – деци (10^{-1})	н – нано (10^{-9})
П – пета (10^{15})	к – кіло (10^3)	с – санти (10^{-2})	п – піко (10^{-12})
Т – тера (10^{12})	г – гекто (10^2)	м – мілі (10^{-3})	ф – фемто (10^{-15})
Г – гіга (10^9)	да – дека (10^1)	мк – мікро (10^{-6})	а – атто (10^{-18})

ДЛЯ НОТАТОК

Навчально-методичне видання

Ф І З И К А

Практичний посібник
до виконання лабораторних робіт із застосуванням
пакета Excel для студентів усіх спеціальностей
з галузі знань «Інформаційні технології»

Укладачі: **КЛАПЧЕНКО** Василь Іванович,
АЗНАУРЯН Ірина Олександрівна,
КРАСНЯНСЬКИЙ Григорій Юхимович,
ГЛИВА Валентин Анатолійович,
ПАНОВА Олена Василівна,
КУЗНЕЦОВА Ірина Олександрівна

Комп'ютерне верстання *Т.І. Кукарєвої*

Підписано до друку 20.02.2018. Формат 60 × 84_{1/16}
Ум. друк. арк. 5,81. Обл.-вид. арк. 6,25.
Електронний документ. Вид. № 55/III-17.

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680
тел. (044)241-54-22, 241-54-87

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
Видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.