

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електронних технологій, транспорту та машинобудування

ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ

Частина II

для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр” спеціальностей 125, 131, 133, 141,
144, 161, 181, 172, 174, 175, 192, 193, 274, 275.

Черкаси 2025

УДК 535
ББК

*Затверджено вченою радою ФЕТАМ,
протокол № ___ від _____.2025 р.
згідно з рішенням кафедри
фундаментальних дисциплін та
прикладного матеріалознавства,
протокол № ___ від _____ 2025 р.*

Упорядники:

Колінько С.О., к.ф.-м.н., доцент
Бутенко Т.І., к.т.н., доцент
Цибулін В.В.

Рецензент:

Яценко І.В., д.т.н., професор

Фізика твердого тіла: лабораторний практикум з фізики для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр” спеціальностей 125, 131, 133, 141, 144, 161, 181,172, 174,175, 192,193, 274, 275. (Частина ІІ). [Електронний ресурс] / [упоряд. : С.О. Колінько, Т.І. Бутенко, В.В. Цибулін; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2025. – 34 с.

Лабораторний практикум містить теоретичні матеріали та методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “ Фізика”, розділ «Фізика твердого тіла», які можуть бути використані для підготовки та виконання лабораторних робіт при вивченні навчальної дисципліни студентами.

Для студентів та викладачів вищих технічних навчальних закладів.

Фізика твердого тіла:
лабораторний практикум з фізики для здобувачів освітнього ступеня
“бакалавр” спеціальностей
125, 131, 133, 141, 144, 161, 181,172, 174,175, 192, 193, 274, 275.
(Частина ІІ)

Упорядники:
Колінько Сергій Олександрович,
Бутенко Тетяна Іванівна,
Цибулін Валентин Вікторович

В авторській редакції.

© С.О.Колінько, Т.І.Бутенко, В.В. Цибулін, упорядкування, 2025

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 408 ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ І РУХЛИВОСТІ НОСІВ СТРУМУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ	4
Лабораторна робота № 409 ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА	10
Лабораторна робота № 410 ВИВЧЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ	14
Лабораторна робота № 411 ВИВЧЕННЯ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНЕТИКА ЗА ДОПОМОГОЮ ОСЦИЛОГРАФА	18
Лабораторна робота № 412 ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ТРАНЗИСТОРА	24
Лабораторна робота № 413 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА СПІВВІДНОШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА	30
Література	34

Лабораторна робота № 408

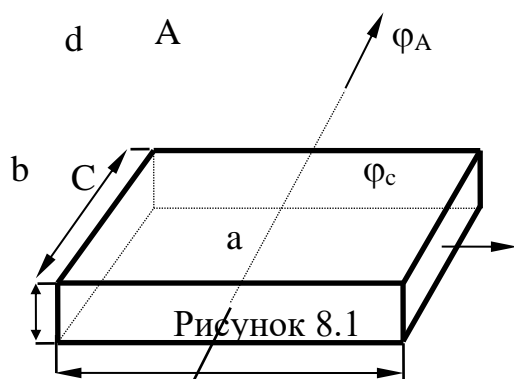
ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ І РУХЛИВОСТІ НОСІЇВ СТРУМУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Мета роботи - ознайомлення з ефектом Холла та експериментальне визначення концентрації і рухливості носіїв струму для германію.

Прилади і матеріали: електромагніт, пластинка германію розміром $10 \times 5 \times 1$ мм, ступінчастий випрямляч, селеновий випрямляч, подільник напруги, мілівольтметр, міліамперметр, ключ.

Основні теоретичні відомості

Якщо пропускати електричний струм I уздовж металевої пластинки, розміщеної в магнітному полі, індукція якого B , то на протилежних гранях пластинки виникає різниця потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C$ (рис. 8.1).



В Це явище було виявлене в 1879 році американським вченим Холлом і носить назву ефекта Холла. Дослідним шляхом встановлено, що поперечна різниця потенціалів прямо пропорційна силі струму I , який іде через пластинку, індукції магнітного поля B , і обернено пропорційна товщині пластинки d .

$$\Delta\varphi = R_x \frac{I \cdot B}{d}, \quad (8.1)$$

де R_x - постійна Холла.

Ефект Холла обумовлений тим, що у магнітному полі з індукцією B на потік рухомих зарядів діє сила Лоренца F_L , яка відхиляє їх у напрямку, перпендикулярному до напрямку струму I .

Якщо електричний струм обумовлений рухом позитивних зарядів, то під дією сили Лоренца ці заряди відхиляються уверх. В результаті на верхній грані пластинки виникає надлишковий позитивний заряд, а на нижній – негативний заряд (рис. 8.2).

А коли струм обумовлений рухом електронів, то верхня грань буде заряджена від'ємно, а нижня - додатно (рис. 8.3)

В результаті накопичення зарядів на гранях А і С між ними виникає різниця потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C$. Це є причиною виникнення поперечного електричного поля E . Тоді на заряди, які рухаються уздовж пластинки, діє ще й електрична сила.

$$F = qE_k. \quad (8.2)$$

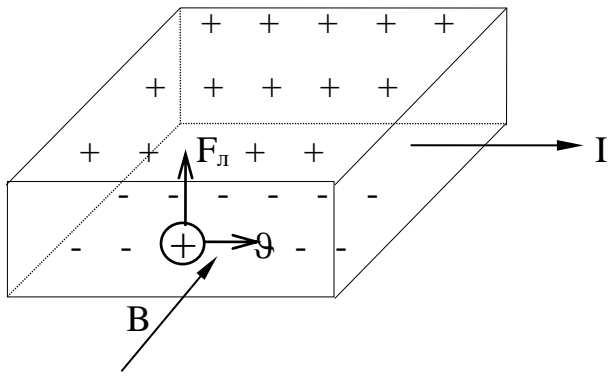


Рисунок 8.2

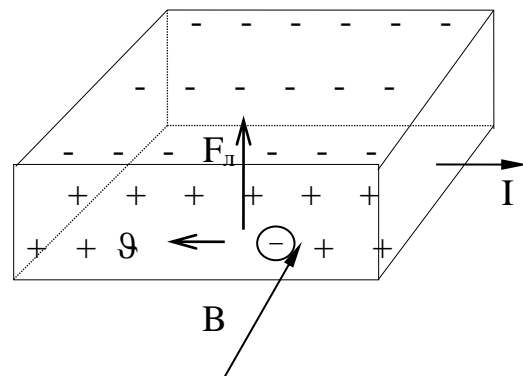


Рисунок 8.3

Процес накопичення заряду на гранях пластинки і одночасне зростання поперечної різниці потенціалів $\phi_A - \phi_C$ буде продовжуватись доти, поки електрична сила F не зрівноважить силу Лоренца F_L (рис. 8.4).

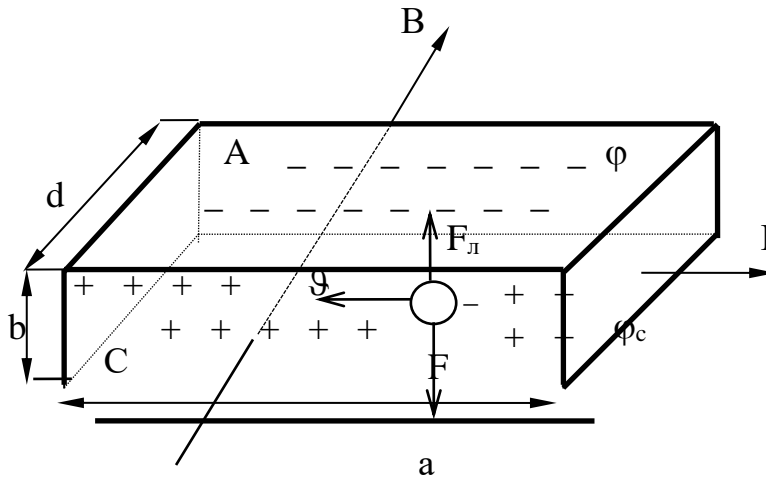


Рисунок 8.4

Після цього заряди будуть рухатись уздовж пластинки, накопичення зарядів припиниться і встановиться стаціонарний стан.

Таким чином, при стаціонарному стані

$$F_L = F \text{ або } q \cdot \mathcal{E} \cdot B = q \cdot E_k, \quad (8.3)$$

звідки $E_k = \mathcal{E} \cdot B$.

Як відомо, різниця потенціалів $\Delta\phi$ прямо пропорційна напруженості поля і відстані між точками, де визначається ця різниця. Для нашого випадку можна записати

$$\Delta\phi = E_k \cdot b. \quad (8.4)$$

Підставивши значення E_x із формули (8.3) отримаємо

$$\Delta\varphi = \mathcal{E} \cdot B \cdot b . \quad (8.5)$$

Швидкість зарядів \mathcal{E} виразимо через густину струму j , величину заряду q і концентрацію n : $\mathcal{E} = \frac{j}{n \cdot q}$ де $j = \frac{I}{S}$, а переріз провідника $S = b \cdot d$.

$$\text{Тоді} \quad \mathcal{E} = \frac{I}{b \cdot d \cdot n \cdot q} . \quad (8.6)$$

Підставивши значення швидкості зарядів із формули (8.6) у вираз (8.5), отримаємо

$$\Delta\varphi = \frac{1}{n \cdot q} \frac{I \cdot B}{d} . \quad (8.7)$$

Ефект Холла, тобто виникнення поперечної різниці потенціалів спостерігається не тільки в металах, але і в напівпровідниках. Якщо, наприклад, помістити в магнітне поле пластинку германію з електронною провідністю, то картина буде такою ж, як і та, що розглядалася вище для металевієї пластинки (рис. 8.3).

А якщо візьмемо напівпровідник з дірковою провідністю, то картина буде іншою. Тепер уже дірки будуть відхилятися під дією сили Лоренца вгору і додатно зарядяться верхня грань А пластинки, а нижня грань С зарядиться від'ємно, як на рис. 8.2. Таким чином, при одному і тому ж напрямку струму і зовнішнього магнітного поля поперечна різниця потенціалів $\Delta\varphi$ у електронного і діркового напівпровідників має протилежні знаки. Цю відмінність можна використати для визначення знаку носіїв струму у напівпровідниках.

Крім того, ефект Холла має й і інше важливе практичне застосування. На його основі створено ряд пристроїв і приладів, за допомогою яких можна вимірювати постійні і змінні магнітні поля, струми високої частоти. Ефект Холла застосовується в електронних перетворювачах, підсилювачах і генераторах електричних коливань тощо.

Порівнюючи вирази (8.1 і 8.7), бачимо, що постійна Холла дорівнює:

$$R_x = \frac{1}{n \cdot q} . \quad (8.8)$$

Цей вираз для постійної Холла справедливий лише для металевих провідників.

Таким чином, постійна Холла обернено пропорційна добутку заряду q на концентрацію n носіїв струму. Знак постійної Холла визначається знаком заряду. Якщо провідність обумовлена електронами, то $R_x < 0$, а коли провідність обумовлена рухом додатних зарядів, то $R_x > 0$.

У металах концентрація електронів провідності дуже велика, тому постійна Холла R_x має малі значення. Наприклад, для натрію $R_x = -25 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{ Кл}$, для міді $R_x = -5,5 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{ Кл}$. У напівпровідниках, де концентрація носіїв струму відносно мала, постійна Холла має значно більші значення. Наприклад, для кремнію $R_x = -10^2 \text{ м}^3/\text{ Кл}$, для арсеніда індію (InAs) $R_x = -10^2 \text{ м}^3/\text{ Кл}$.

Формула (8.8) є надзвичайно важливою, оскільки з її допомогою можна обчислити концентрацію носіїв струму:

$$n = \frac{1}{R_x \cdot q} \quad (8.9)$$

Для напівпровідників із носіями заряду одного знаку

$$R_x = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{q \cdot n} \quad (8.10)$$

Звідси

$$n = \frac{3\pi}{8 \cdot q \cdot R_x} \quad (8.11)$$

Для напівпровідників із змішаною провідністю (електронною і дірковою) маємо:

$$R_x = \frac{3\pi}{8q} \cdot \frac{pU_p^2 - nU_n^2}{(pU_p + nU_n)^2}, \quad (8.12)$$

де n і p - концентрації електронів і дірок; U_n і U_p - рухливості електронів і дірок.

Якщо для напівпровідника відомі значення R_x і питомої електропровідності γ , то у випадку носіїв заряду одного знаку їх рухливість дорівнює

$$U = \frac{8}{3\pi} \cdot R_x \cdot \gamma, \quad (8.13)$$

де γ - питома електропровідність.

Опис установки

Установка для виконання даної роботи зображена на рис. 8.5.

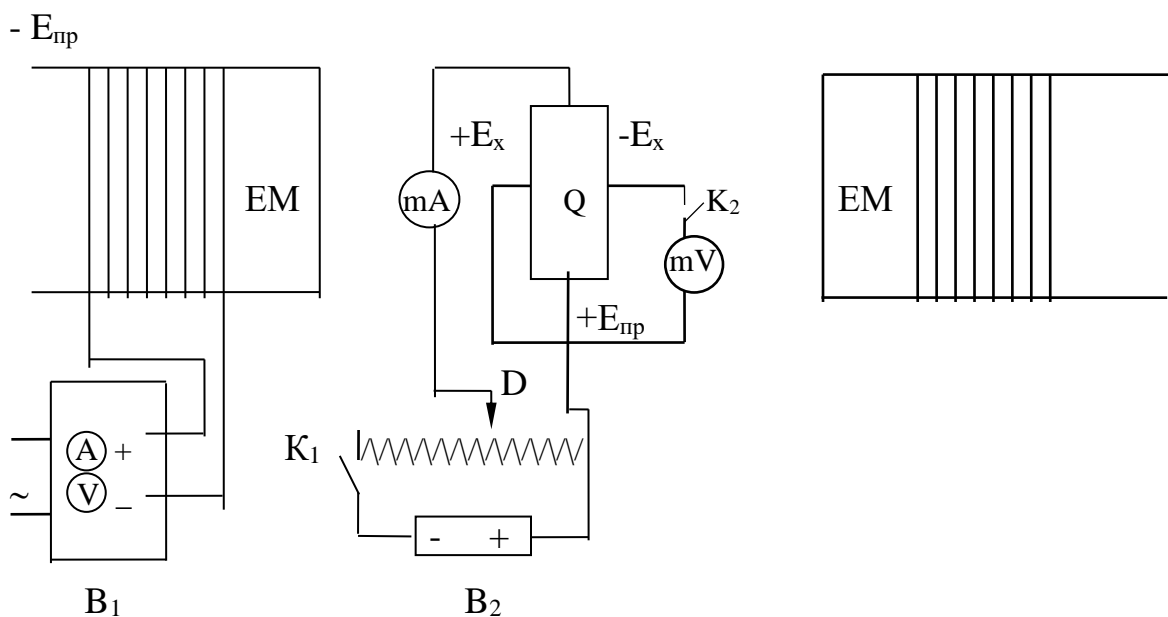


Рисунок 8.5

Електромагніт живиться постійним струмом від ступінчастого випрямляча V_1 на 30 В. Електрична схема дозволяє змінювати силу струму в обмотках електромагніту в межах від 2 до 10 А, що відповідає зміні індукції магнітного поля B від 0,001 до 0,5 Тл. Для дослідження використовується пластинка германію розмірами $d=1$ мм, $b=5$ мм і $a=10$ мм з електронною провідністю. Пластинка розміщена всередині корпусу із оргскла.

Мілівольтметром (mV) вимірюється холлівська різниця потенціалів $\Delta\phi$. Міліамперметром (mA) - сила струму, який іде через пластинку Q . Сила струму регулюється подільником D . Подільник під'єднаний до селенового випрямляча V_2 .

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему, як показано на рис.8.5.
2. Увімкнути ключ K_2 і, переміщуючи рукоятку подільника D , встановити струм через пластинку германію в 40 мА. Величина струму вимірюється міліамперметром.
3. Увімкнути коло живлення електромагніту, встановивши в ньому струм 2 А.
4. Увімкнути ключ K_2 і за допомогою мілівольтметра (mV) виміряти е.р.с. Холла $\Delta\phi$. Вимкнути мілівольтметр.
5. Почергово виставити струм в обмотці електромагніту 4, 6 і 8 А. Для кожного значення струму виміряти е.р.с. Холла. Досліди повторити не менше трьох разів і обчислити середнє значення. Дані вимірювань занести в таблицю.
6. Із формули (8.1) визначити постійну Холла.

Примітка - Величина індукції B для кожного значення сили струму, який протікає через обмотку електромагніту, наводиться в таблиці в кінці роботи.

7. За формулою (8.11) визначити концентрацію електронів.

8. За формулою (8.13) визначити рухливість електронів U . Питома електропровідність для германію $\gamma = 2,7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.
9. Після закінчення роботи вимкнути кола живлення електромагніту, напівпровідникового зразка і розібрати схему.

I, А	2	4	6	8	
B, Тл	0,0057	0,0114	0,0152	0,0177	
$\Delta\varphi_1$, В					
$\Delta\varphi_2$, В					
$\Delta\varphi_3$, В					
$\Delta\varphi_{\text{ср}}$, В					
R_x					$R_{x \text{ ср}}$
n					$n_{\text{ср}}$
u					$u_{\text{ср}}$

Контрольні запитання

1. В чому полягає ефект Холла ?
2. Що таке сила Лоренца ?
3. Розкажіть про застосування ефекту Холла.
4. Напишіть робочі формули даної роботи.

Лабораторна робота № 409

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Мета роботи - вивчення основних закономірностей теплового випромінювання, визначення сталої Стефана-Больцмана.

Прилади і матеріали: оптичний пірометр ОППР - 09; акумулятор на 2 А і 4 В; ватметр на 300 Вт, реостат опором 400 Ом, розрахований на 220 В і 400 Вт.

Основні теоретичні відомості

Якщо на тіло падає потік світла, то частина цього потоку буде відбиватися від його поверхні, а друга частина потоку, що проникає в тіло, буде поглинатися частинками тіла і перетворюватися в інші форми енергії, в кінцевому рахунку - в теплоту.

Відношення відбитого потоку $\Delta\Phi_{\text{відб.}}$ до падаючого потоку $\Delta\Phi$ називається коефіцієнтом відбивання або поглинаючою здатністю тіла, тобто $a = \Delta\Phi_{\text{відб.}} / \Delta\Phi$, а відношення потоку, що поглинається тілом, до падаючого потоку називається коефіцієнтом поглинання або поглинаючою здатністю тіла, тобто $\rho = \Delta\Phi_{\text{погл.}} / \Delta\Phi$.

Різні тіла по різному як відбивають, так і поглинають світло, що падає на них, а тому значення ρ і a характерні для кожного тіла і залежать як від довжини хвилі світла λ , так і від абсолютної температури T .

Тіло у якого поглинаюча здатність $a=1$, тобто воно повністю відбиває світло, що падає на нього, називається абсолютно білим. При цьому колір такого тіла повністю визначається спектром світла, що його освітлює.

Тіло, у якого $\rho = 1$, тобто воно повністю поглинає промені, що падають на нього, називається абсолютно чорним тілом. Таких тіл у природі немає, але найбільш близько до нього підходять, наприклад, сажа, платинова чорнота, у яких $\rho = 0,99$.

Тіло, у якого поглинаюча здатність $\rho < 1$, але однакова для всіх довжин хвиль, називається сірим тілом.

Але крім відбивання і поглинання світла тіла здатні самі світитися. Коли тіло світиться в результаті нагрівання, то таке світіння називається температурним або тепловим випромінюванням. Кількісною характеристикою теплового випромінювання тіла є його спектральна густина енергетичної світності r_{λ} , тобто кількість променевої енергії, що випромінює одиниця поверхні тіла за одиницю часу (Дж/м²·с) при температурі тіла T . Величина r_{λ} є функцією від довжини хвилі λ і температури тіла T , тобто $r_{\lambda} = f(\lambda, T)$ і для різних тіл ця величина є різною.

Повна енергетична світність по всіх довжинах хвиль, як показали Стефан (в 1878 році дослідним шляхом) і Больцман (в 1884 році теоретичним шляхом), для абсолютно чорного тіла пропорційна температурі в четвертій степені, тобто

$$R_e = \sigma \cdot T^4, \quad (9.1)$$

де σ - стала Стефана-Больцмана, яку нам і потрібно визначити в даній роботі.

Якщо при кімнатній температурі T_0 абсолютно чорне тіло одержує від середовища енергію в одиницю часу W_0 , а повна енергія, що випромінюється цим тілом при температурі T в одиницю часу, - W , то потужність енергії W_1 , що випромінює абсолютно чорне тіло, виходячи із закону Стефана-Больцмана, визначається за формулою :

$$W = W_1 - W_0 = \sigma \cdot S (T^4 - T_0^4), \quad (9.2)$$

де S - площа поверхні, що випромінює енергію.

Температура розжареного тіла T визначається дослідним шляхом за допомогою оптичного пірометра. Температура тіла, що визначається за допомогою оптичного пірометра, буде дійсною тільки для абсолютно чорного тіла. Для всіх інших тіл випромінювальна здатність менша, ніж для абсолютно чорного тіла, тому температура, яку нам покаже пірометр, буде більша від дійсної. Для того, щоб правильно визначити значення сталої σ , потрібно у формулу (9.2) ввести відносний коефіцієнт C , який дорівнює відношенню енергетичної світності даного тіла до енергетичної світності абсолютно чорного тіла. Тоді формула (9.2) буде мати вигляд :

$$W = \sigma \cdot C \cdot S (T^4 - T_0^4),$$

звідси

$$\sigma = W / CS (T^4 - T_0^4). \quad (9.3)$$

Для вольфраму $C = 0,43$; $S = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Опис приладу

Оптичний пірометр із зникаючою ниткою розжарення типу ОППР-09 призначений для вимірювання температур нагрітих тіл методом порівняння інтенсивності випромінювання досліджуваного і еталонного джерел світла.

Схема приладу наведена на рис. 9.1 разом зі схемою лабораторної установки.

Оптичний пірометр складається із зорової труби, усередині якої в головній фокальній площині об'єктива O_6 розміщена еталонна лампа розжарення $Л$, яка живиться від акумулятора $Е$. Послідовно з ниткою лампи ввімкнено гальванометр Γ і реостат R , за допомогою якого регулюється розжарення нитки. Пірометр має червоний світлофільтр Φ_c , який пропускає світло з довжиною хвилі 660 нм.

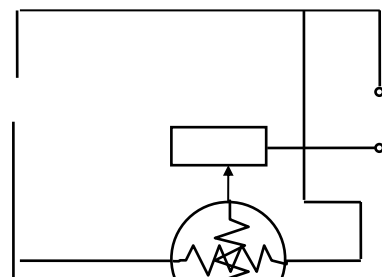
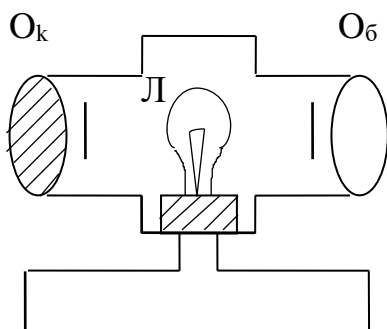




Рисунок 9.1

Фільтр Φ_c розміщено перед окуляром O_k . Перед об'єктивом O_b розміщено димчасте скло D , яке служить для гасіння яскравості лампи випромінювання (температуру нитки розжарення якої визначаємо), щоб не перегрівати еталонного джерела світла, при вимірюванні температури вище 1500°C .

Гальванометр пірометра має дві шкали - верхню і нижню. Шкали проградуєвано в градусах, що відповідають випромінюванню абсолютно чорного тіла. Нижньою шкалою користуються без застосування димчастого скла.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло лампи L_1 , яка є досліджуваним випромінювачем, як показано на рис. 9.1. На рисунку W - ватметр, R_1 - реостат для регулювання потужності, що подається на лампу L_1 . Вмикати лампу в мережу дозволяється лише після перевірки кола викладачем.
2. Ввімкнути акумулятор E , що живить лампу L пірометра.
3. Навести зорову трубу на лампу L_1 і, пересуваючи окуляр, добитися чіткого зображення нитки лампи пірометра на середині зображення лампи випромінювача.
4. Повертаючи за годинниковою стрілкою регульовальний реостат пірометра R , ввімкнути еталонну лампу L і підібрати таку ж яскравість зображення нитки лампи пірометра, як і нитки лампи-випромінювача. Записати виміряну температуру по гальванометру і потужність по ватметру.
5. За допомогою реостата R_1 змінити силу струму в колі лампи L_1 і для кожного разу виміряти температуру нитки розжарення при різних споживаних потужностях.

Починати вимірювання температури нитки при потужності 40 Вт з подальшим збільшенням потужності на 10 Вт. Коли температура нитки буде більша ніж 1500°C , то необхідно поставити димчасте скло і користуватися нижньою шкалою.

6. Результати вимірювання і дані записати в таблицю :

	T_0, K	T_1, K	m^2	C	$\sigma, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$	$\Delta\sigma, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$
1			$3,3 \times 10^{-4}$	0,43		
2						
3						
4						
5						

7. За формулою (9.3) обчислити сталу σ в законі Стефана-Больцмана.
 8. Обчислити абсолютну і відносну похибки і записати кінцевий результат у вигляді :

$$\sigma = \sigma_{\text{сер.}} \pm \Delta\sigma_{\text{сер.}}$$

9. Побудувати графік залежності температури нитки розжарення від споживаної потужності

$$T = f(W)$$

Контрольні запитання

1. Яке тіло називається абсолютно чорним, абсолютно білим, сірим?
2. Сформулюйте і запишіть закон Стефана-Больцмана.
3. Який фізичний зміст сталої в законі Стефана-Больцмана?
4. Чому температура нитки лампи, що вимірюється пірометром, нижча від дійсної?
5. Будова і призначення пірометра із зникаючою ниткою розжарення.

Лабораторна робота № 410

ВИВЧЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ

Мета роботи - визначення роботи виходу електронів із металу.

Прилади і матеріали: дзеркальний гальванометр, вакуумний фотоелемент, світлофільтр, потенціометр, джерело струму, джерело світла, вольтметр.

Основні теоретичні відомості

Фотоефект - це явище виривання електронів з поверхні тіла під дією освітлення. Класична електродинаміка, згідно з якою світло поширюється у вигляді неперервних електромагнітних хвиль, не може пояснити всіх закономірностей фотоефекту. Суть його розкриває квантова теорія випромінювання. Випромінювання і поглинання світла відбуваються не безперервно, а окремими порціями - квантами світла (фотонами). Згідно з формулою Планка енергія кванта світла :

$$E = h \cdot \nu , \quad (10.1)$$

де h - стала Планка, ν - частота світла.

Коли квант світла з енергією $h \cdot \nu$ падає на метал, то його енергія передається електрону і витрачається на роботу A виходу електрона із металу та надання електрону кінетичної енергії $\frac{mv^2}{2}$, тобто

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} . \quad (10.2)$$

Рівняння (10.2) називають рівнянням Ейнштейна для фотоефекту. Частота ν_0 , при якій $h\nu_0 = A$, називається "червоною межею" фотоефекту. При частотах $\nu < \nu_0$ фотоефект не спостерігається, він буде спостерігатися тільки при частотах $\nu > \nu_0$.

Кінетична енергія фотоелектронів $\frac{mv^2}{2}$ може бути будь-якою в залежності від того, з якої глибини і з якого енергетичного рівня виривається електрон. Але вона не перевищує максимального значення

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} . \quad (10.3)$$

Прилади, робота яких основана на явищі фотоефекту, називаються фотоелементами. Звичайна конструкція вакуумного фотоелемента показана на рис. 10.1. Нанесений на частину внутрішньої поверхні вакуумної колби шар металу з малою роботою виходу є катодом K . Роль анода виконує дротяне кільце A усередині колби.

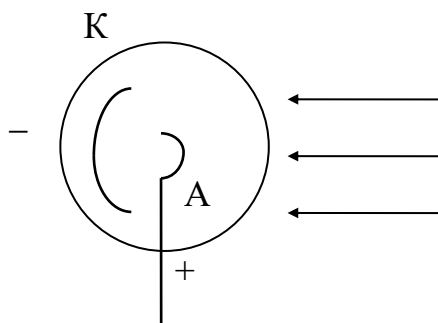


Рисунок 10.1

Якщо на катод К направити пучок світла і створити між анодом і катодом різницю потенціалів, то прискорені електричним полем фотоелектрони летять до аноду і обумовлюють проходження струму.

Якщо ж на анод подати від'ємний потенціал, тобто між анодом і катодом створити для електронів затримуюче електричне поле, то ці електрони можна загальмувати. При деякій різниці

потенціалів навіть найшвидші електрони не будуть долітати до аноду і струм в колі припиниться. Це буде за умови, коли

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3, \quad (10.4)$$

де e - заряд електрона, U_3 - затримуюча різниця потенціалів між анодом і катодом, (eU - це робота сил електричного поля по переміщенню заряду e між двома точками поля з різницею потенціалів U).

Тоді з рівняння (10.2) одержимо, що

$$h\nu = A + eU_3, \quad (10.5)$$

а звідси

$$A = h\nu - eU_3. \quad (10.6)$$

Залежність фотоструму від напруги виражається кривою, яка називається вольтамперною характеристикою фотоелемента (рис. 10.2).

Вирвані із катоду електрони мають певну кінетичну енергію і досягають аноду навіть при відсутності прискорюючої різниці потенціалів між катодом і анодом. При цьому гальванометр покаже наявність фотоструму (на графіку $I_0 = 0$ В). При поданні на анод позитивної напруги фотострум зростає, поки не досягне насичення.

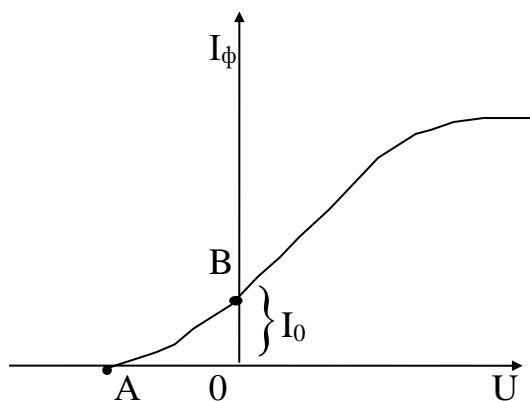


Рисунок 10.2

У випадку затримуючої різниці потенціалів U_3 на аноді фотострум буде зменшуватися. Крива зменшення фотоструму від величини затримуючої різниці потенціалів буде асимптотично наближатися до осі абсцис внаслідок того, що не всі електрони, які вилітають із катоду, мають однакову швидкість.

Опис установки

Фотоелемент ФЕ, освітлювальна лампа S і світлофільтр СФ змонтовані всередині закритої коробки. Фотоелемент ФЕ з'єднаний з дзеркальним гальванометром ЗГ, який закріплений на столі.

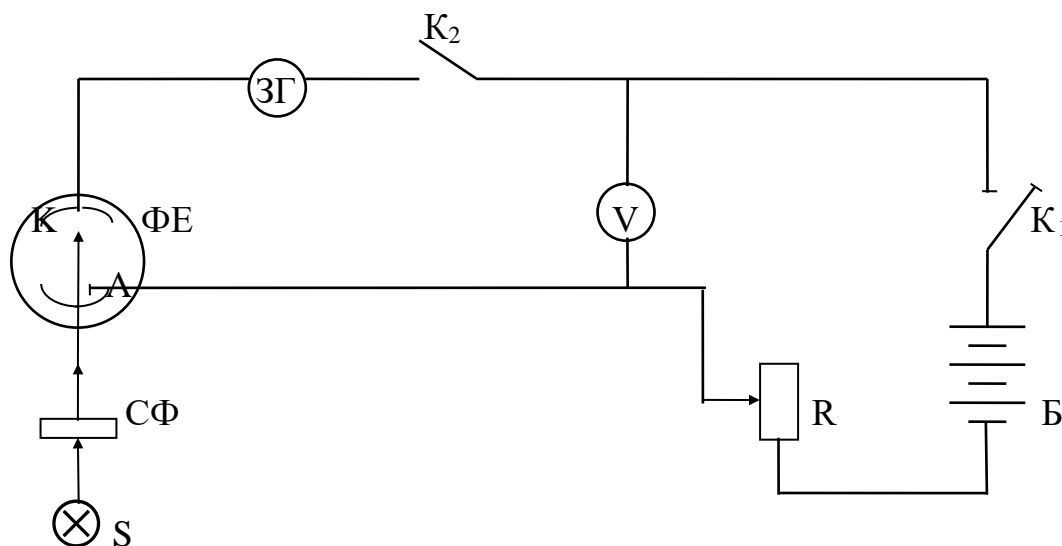


Рисунок 10.3

Перед початком роботи його потрібно відрегулювати так, щоб нуль шкали збігався з лінією відліку. Напруга від джерела регулюється потенціометром.

Хід роботи

1. Підготувати до роботи дзеркальний гальванометр (спитати дозволу у викладача), для чого :
 - а) за допомогою дзеркала, розміщеного в оправі збоку, добитися рівномірного освітлення шкали гальванометра ;
 - б) за допомогою нуль-коректора, що знаходиться на гальванометрі, підвести нуль шкали до лінії відліку.
2. Зібрати схему установки, як показано на рис. 10.3.
3. Ввімкнути лампу освітлення фотоелемента. При цьому відхилення показчика гальванометра від положення рівноваги визначає величину фотоструму.
4. Ввімкнути джерело напруги в коло фотоелемента. Змінюючи за допомогою потенціометра R напругу через $0,2 \div 0,3$ В, записати покази гальванометра. Останній відлік зробити, коли нуль шкали збігається з лінією відліку (шкала встановиться в положенні рівноваги).

5. Виключити освітлювач і джерело напруги в колі фотоелемента.
6. Побудувати графік залежності фотоструму від напруги.
7. За формулою (10.5) визначити роботу виходу. Довжина хвилі світла, що його пропускає світлофільтр, вказана на установці.

Контрольні запитання

1. Що називається фотоефектом ?
2. Напишіть рівняння Ейнштейна для фотоефекту.
3. Що називається “червоною” межею фотоефекту ?
4. Виведіть робочу формулу даної роботи.
5. Наведіть приклади застосування зовнішнього і внутрішнього фотоефекту.

Лабораторна робота № 411

ВИВЧЕННЯ ПЕТЛІ МАГНІТНОГО ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНЕТИКА ЗА ДОПОМОГОЮ ОСЦИЛОГРАФА

Мета роботи – одержання осцилограми петлі гістерезиса і визначення магнітної проникливості μ , коерцитивної сили H_c , залишкової індукції B_r і втрати енергії на перемагнічування феромагнетика.

Прилади і обладнання: електронний осцилограф; тороїд з двома катушками; амперметр змінного струму; вольтметр змінного струму; опори R_1 і R_2 ; конденсатор; трансформатор .

Основні теоретичні відомості

Всі величини в природі за магнітними властивостями поділяються на п'ять видів: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики і феримагнетики.

Магнітну властивість виявляють всі речовини без виключення, тому природно припустити, що магнітні властивості речовин визначаються елементарними частинками, що входять до складу кожного атома. Такими однаковими для всіх атомів частинками є електрони, нейтрони і протони. Дослідження показали, що магнітні моменти протона і нейтрона майже на три порядки менші від найменшого магнітного моменту електрона, тому в першому наближенні можна знехтувати магнітним моментом ядра, що складається із протонів і нейтронів, і вважати, що магнітні властивості атома повністю визначаються електронами. Це положення є фундаментальним в електронній теорії магнетизму, яка є загальноприйнятою у вченні про магнетизм.

Особливий клас магнетиків утворюють речовини, що здатні намагнічуватись навіть у відсутності зовнішнього магнітного поля. По своєму найбільш поширеному представнику - залізу - вони одержали назву феромагнетики. До їх числа належать залізо, нікель (Ni), кобальт (Co), гадоліній (Gd), їх сплави і сполуки, а також деякі сплави і з'єднання марганцю і хрому з неферомагнітними елементами (наприклад, Mn, AlCu, CrTe та ін.)

Феромагнетики є сильномагнітними речовинами - їх намагнічування у величезне число раз (до 10^{10}) перевищує намагнічування діа- і парамагнетиків, що належать до категорії слабомагнітних речовин.

Намагніченість феромагнетиків залежить від напруженості H зовнішнього поля досить складно. На рис. 11.1 зображено криву намагнічування феромагнетика, магнітний момент якого напочатку був рівний нулю (вона називається основною кривою намагнічування).

Уже в полях порядку 100-200 А/м намагнічування досягає насичення. Але зручніше розглядати залежність B від H . Основна крива намагнічування на діаграмі B - H наведена на рисунку 11.2 (крива 0-1).

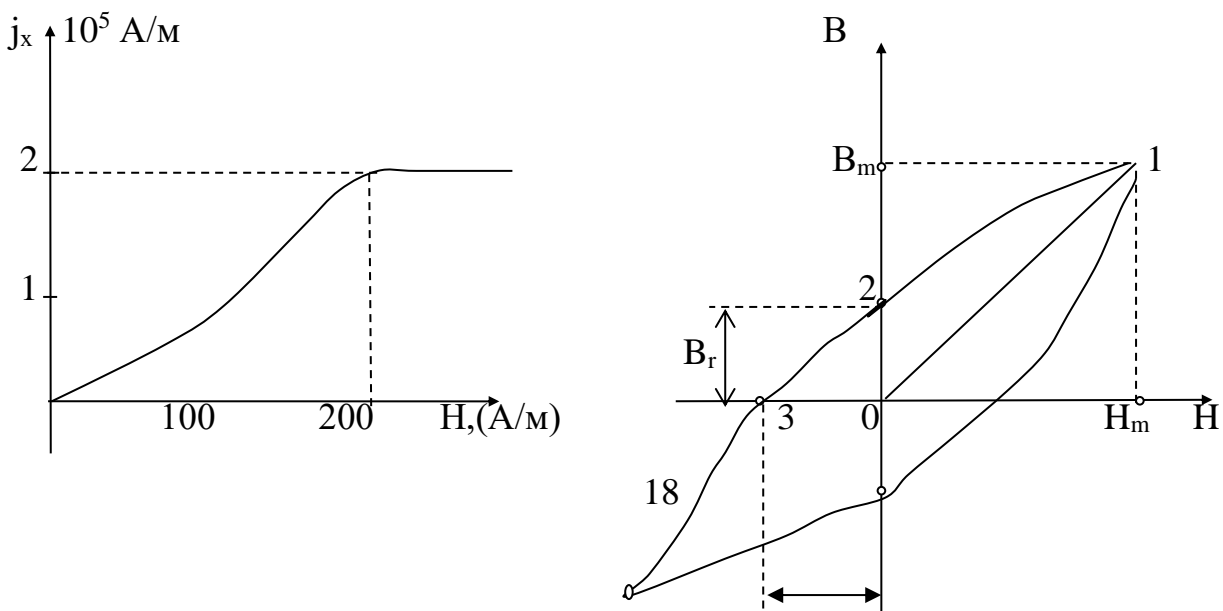


Рисунок 11.1

4 H_c

Рисунок 11.2

Так як $B = \mu_0 (H + j)$, то при досягненні насичення B продовжує зростати із збільшенням H за лінійним законом: $B = \mu_0 H + \text{const}$, де $\text{const} = \mu_0 H_{\text{нас}}$.

Крива намагнічування заліза була вперше одержана і детально досліджена російським вченим О.Г. Столетовим.

Крім лінійної залежності між H і B для феромагнетиків характерна також наявність гістерезиса. Якщо довести намагнічування до насичення (точка 1 на рис. 11.2), а потім зменшувати напруженість магнітного поля, то намагнічування відбудеться не за попередньою кривою (0-1), а змінюється у відповідності до кривої 1-2. В результаті, коли напруженість зовнішнього поля стане рівною нулю (точка 2), намагнічування не зникає і характеризується величиною B_r , яка називається залишковою індукцією. Намагнічення B_r стає рівним нулю (точка 3) лише під дією поля H , що має напрям, протилежний полю намагнічування. Напруженість H_c називається коерцитивною силою.

Існування залишкового намагнічування дає можливість виготовляти постійні магніти, тобто такі, які без затрати енергії на підтримку макроскопічних струмів мають магнітний момент і створюють в навколишньому середовищі магнітне поле.

Очевидно, що постійний магніт тим краще зберігає свої властивості, чим більша коерцитивна сила матеріалу, із якого він виготовлений. При дії на феромагнетик змінного магнітного поля індукція змінюється у відповідності до кривої 1-2-3-4-5-1 (рис. 11.2), яка називається петлею гістерезису.

Щоб одержати осцилограму динамічної петлі гістерезису, на горизонтальний підсилювач осцилографа слід подати напругу, пропорційну напруженості H намагнічуючого поля, а на вертикальний підсилювач - напругу, яка пропорційна миттєвим значенням магнітної індукції B . В цьому випадку на екрані осцилографа з'явиться замкнута крива, яка і відтворить в деякому масштабі динамічну петлю гістерезису.

Масштаб зображення може бути встановлений із показів електровимірних приладів і використаний для визначення числових значень магнітних характеристик феромагнетика: коерцитивної сили H_c , залишкової індукції B_r , магнітної проникливості μ , та тощо.

Слід врахувати, що магнітні властивості феромагнетиків у змінних полях характеризуються значенням динамічної магнітної проникливості, яка є відношенням амплітудного значення індукції до амплітудного значення напруженості магнітного поля.

$$\mu_N = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}, \quad (11.1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м .

Величина втрати енергії намагнічуючого поля W за один цикл перемагнічування чисельно дорівнює площі петлі гістерезису:

$$W = S \cdot h \cdot b , \quad (11.2)$$

де $h \cdot b$ - масштабна одиниця зображення петлі гістерезису.

Опис вимірювальної схеми і приладів

Для одержання осцилограми петлі гістерезису складають схему, яка зображена на рис. 11.3. Досліджуваним феромагнетиком є матеріал, із якого виготовлено тороїд T . На тороїд намотано дві обмотки. Одна із них (первинна) намотана по всьому тороїду, вона живиться від трансформатора ($\nu = 50$ Гц) і служить для створення змінного магнітного поля H , що намагнічує тороїд. В коло цієї обмотки ввімкнено амперметр A і опір R_1 , з якого подається напруга U_H на горизонтальний підсилювач осцилографа. Легко бачити, що миттєве значення H намагнічуючого поля

$$H = \frac{I \cdot N_1}{l} = \frac{U \cdot N_1}{R_1 l} , \quad (11.3)$$

де l - довжина середньої лінії тороїда, N_1 - число витків первинної обмотки.

Витки невеликої індукційної (вторинної) обмотки намотано на частину тороїда. В коло цієї обмотки ввімкнено вольтметр V , опір R_2 і конденсатор C .

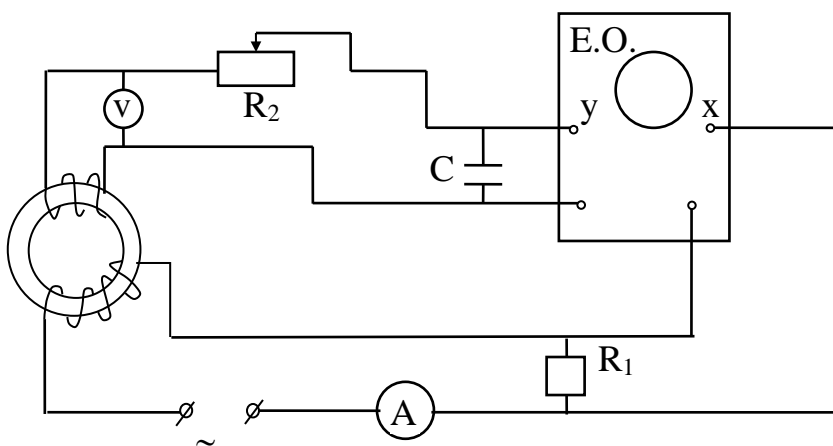


Рисунок 11.3

Напруга U_B з обкладок конденсатора підводиться до пластин вертикального відхилення осцилографа. Можна показати, що вона пропорційна магнітній індукції B . Дійсно, в колі обмотки джерела струму I_2 е.р.с. індукції, яка дорівнює

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} , \quad (11.4)$$

де Φ - магнітний потік, зчеплений з обмоткою.

Якщо S - площа поперечного перерізу обмотки, то

$$\Phi = BS \cdot N_2 . \quad (11.5)$$

Тоді

$$\varepsilon = - SN_2 \frac{dB}{dt} . \quad (11.6)$$

Нехтуючи, внаслідок незначної величини, е.р.с. самоіндукції в цьому колі і враховуючи, що $R_2 \gg \frac{1}{2\pi\nu C}$, силу струму I_2 в ньому з урахуванням рівняння (11.6) можна виразити формулою

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} = - \frac{SN_2}{R_2} \frac{dB}{dt} . \quad (11.7)$$

Тоді

$$U_B = \frac{1}{C} \int I_2 dt = - \frac{SN_2 B}{CR_2} . \quad (11.8)$$

Отже, миттєве значення напруги U_B , яка подається на вертикальний підсилювач осцилографа, пропорційне миттєвому значенню індукції B .

Масштаб зображення динамічної петлі гістерезиса визначається таким чином. В первинному колі амперметр показує ефективне значення струму, яке пропорційне його амплітудному значенню I_m .

$$I_{\text{еф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} . \quad (11.9)$$

Очевидно, що максимальному значенню I_m струму відповідає максимальне значення напруженості H_m . Тому, згідно з формулою (11.3) і з врахуванням рівняння (11.9) можна записати

$$H_m = \frac{I_m N_1}{l} = \frac{I_{\text{еф}} \cdot N_1 \sqrt{2}}{l} . \quad (11.10)$$

Таким чином, підставивши в формулу (11.10) значення $I_{\text{еф}}$ амперметра і вказані на робочому місці числові значення N_1 і l , можна обчислити значення H_m . За допомогою міліметрового паперу можна знайти довжину відрізка $OH_m = L_k$

на осцилограмі в міліметрах і визначити горизонтальний масштаб зображення петлі за формулою

$$h = \frac{H_m}{L_k} . \quad (11.11)$$

Аналогічно можна визначити вертикальний масштаб. Дійсно, покази вольтметра V відповідають ефективному значенню напруги

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} ,$$

де U_m - амплітуда значення напруги у вторинній обмотці, що відповідає максимальному значенню B_m і індукції B .

Згідно з формулою (11.8) можна записати

$$B_m = \frac{U_{\text{эф}} \sqrt{2} R_2}{SN_2} . \quad (11.12)$$

Знаючи покази $U_{\text{эф}}$ вольтметра і скориставшись даними, що вказані на робочому місці, можна знайти числове значення B_m . За допомогою міліметрового паперу можна знайти довжину відрізка $OB = L_B$ в мм на осцилограмі і обчислити вертикальний масштаб за формулою

$$b = \frac{B_m}{L_B} . \quad (11.13)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рисунком 11.3.
2. Ввімкнути тумблер «Сеть» осцилографа. Перемикач «Диапазон частот» поставити в положення «Выкл».
3. Перемикач «Усиление» по X і Y поставити на нуль. Користуючись перемикачами «Ось X » і «Ось Y », одержати в центрі екрана осцилографа сфокусовану світлу пляму.
4. Ввімкнути трансформатор в первинне коло. Регулюючи вертикальне і горизонтальне підсилення, одержати на екрані зображення петлі гістерезису.
5. Записати покази $I_{\text{эф}}$ і $U_{\text{эф}}$ і перезняти зображення петлі на міліметровий папір.
6. Вимкнути осцилограф і відключити трансформатор.
7. За формулою (11.12) обчислити H_m , а по осцилограмі визначити довжину відрізка OH_m в мм і за формулою (11.11) знайти h .
8. За формулою (11.12) обчислити B_m , по осцилограмі визначити довжину відрізка OB_m в мм і, користуючись знайденим значенням B_m , за формулою (11.13) знайти b .
9. Скориставшись одержаною осцилограмою і знайденими значеннями H і b , визначити числове значення коерцитивної сили H_c і залишкову індукцію B_r .

10. Підставивши у формулу (11.1) величини H_m і B_m , обчислити значення динамічної магнітної проникливості μ_N .
11. З допомогою міліметрової сітки виміряти площу S петлі гістерезису в мм^2 і визначити величину втрат за формулою (11.2).

Контрольні запитання

1. Що називається петлею магнітного гістерезису ?
2. На які види діляться всі тіла за магнітними властивостями ?
3. Що таке коерцитивна сила ?
4. Яка величина називається залишковою індукцією ?
5. Що таке динамічна магнітна проникливість феромагнетика ?
6. Від чого залежить форма петлі і її площа ?
7. Де використовують феромагнетика ?
8. Яким способом можна пояснити залишкову намагніченість ?

Лабораторна робота № 412

ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ТРАНЗИСТОРА

Мета роботи – знімання характеристик транзистора і обчислення його статичних параметрів.

Прилади і обладнання: транзистор, міліамперметр, два вольтметри, джерело живлення, два потенціометри, з'єднувальні провідники.

Основні теоретичні відомості

Напівпровідникові прилади широко застосовують тепер в електротехніці, а особливо - напівпровідникові тріоди - транзистори.

Транзистор - це напівпровідниковий прилад з двома електронно-дірковими переходами. Розрізняють два типи транзисторів : р-п-р (рисунок 12.1.а) і п-р-п (рис. 12.1.б).

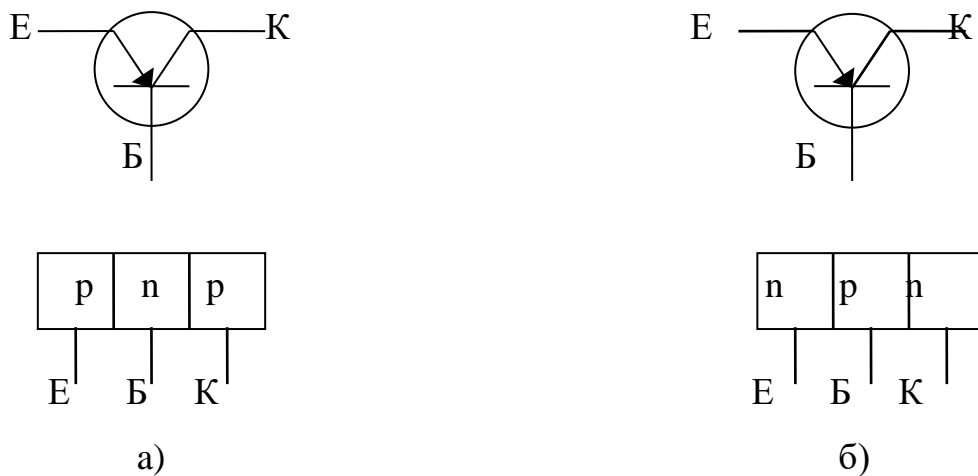


Рисунок 12.1

Фізичні процеси, що відбуваються в обох типах транзисторів, аналогічні. Середня частина транзистора називається базою Б , одна крайня - емітером Е, друга - колектором К.

Розглянемо транзистор типу р-п-р (рис. 12.2). В транзисторі є два р-п переходи: емітерний (між емітером і базою) і колекторний (між базою і колектором).

При виготовленні транзистора область бази роблять дуже тонкою, так що відстань між цими переходами не перевищує 20 мкм. Крім того, концентрація основних носіїв заряду в емітері повинна в багато разів перевищувати концентрацію основних носіїв у базі. До емітерного переходу подається напруга U_e порядку десяти часток вольт в прямому напрямі.

Напруга U_k , яка подається між базою і колектором, має порядок декількох вольт і є заперною для колекторного переходу. При такому ввімкненні джерел напруги через емітерний перехід іде прямий струм I_e , утворений дірками, що йдуть із емітера в базу I_1 , і зустрічними електронами I_2

$$I_e = I_1 + I_2 . \quad (12.1)$$

Оскільки як концентрація дірок в емітері в багато разів більша концентрації електронів у базі, то $I_1 \gg I_2$, отже, емітерний струм обумовлений в основному переходом в область бази

$$I_e \approx I_1 . \quad (12.2)$$

Дірки, які попали в базу, для якої вони є неосновними носіями заряду, починають рекомбінувати з електронами, утворюючи струм бази I_b . Внаслідок

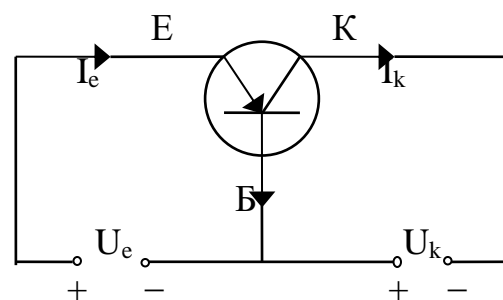


Рисунок 12.2

того, що концентрація вільних електронів у базі порівняно невелика, то в створенні струму бази бере участь лише невелика частина дірок, що прийшли в базу. Основна ж частина дірок проникає через тонку область бази і потрапляє в зону колекторного переходу. При відсутності напруги U_e через колекторний перехід іде малий струм неосновних носіїв I'_k , утворений потоком дірок із бази і електронів із колектора, тому що напруга U_k ввімкнена в заперному напрямі. Якщо ж на емітерний перехід подано пряму напругу U_e і відбувається дифузія дірок, що перейшли із емітера через базу в зону колекторного р-п переходу, то концентрація неосновних носіїв заряду (дірок) в приконтатному шарі збільшується. Для цих дірок напруга, що подається на колекторний перехід, буде прискорюючою, і колекторний струм збільшиться. Таким чином, нехтуючи малою величиною зворотного струму колекторного переходу I'_k , можна вважати, що колекторний струм I_k утворюється потоком дірок, що перейшли із емітера в базу і не взяли участь в процесі рекомбінації, тобто:

$$I_k = I_e - I_B . \quad (12.3)$$

Із формули (412.3) видно, що сила колекторного струму залежить від сили емітерного струму. При зміні емітерної напруги, а відповідно, і сили емітерного струму сила колекторного струму також змінюється.

Основною характеристикою транзистора є коефіцієнт передачі по струму α , тобто відношення зміни вихідного струму до зміни вхідного струму.

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} \quad \left| \begin{array}{l} \\ U_k = \text{const} \end{array} \right. . \quad (12.4)$$

Описана схема ввімкнення транзистора називається схемою зі спільною базою, тому що база в цьому випадку є спільним електродом для вхідного і вихідного кіл транзистора. Для такої схеми ввімкнення коефіцієнт передачі по струму близький до одиниці ($\alpha \leq 1$).

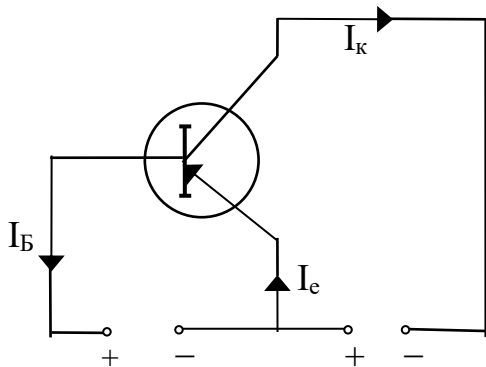


Рисунок 12.3

Існує також схема ввімкнення транзистора із спільним емітером і спільним колектором. В схемі зі спільним емітером (рис. 12.3) вхідна напруга подається між емітером і базою, а джерело живлення колектора вмикається між емітером і колектором. В цьому випадку вхідним струмом є малий по силі струм бази, а вихідним - струм колектора.

Коефіцієнт передачі по струму в схемі зі спільним емітером дорівнює

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_B} \quad \left| \begin{array}{l} \\ U_k = \text{const} \end{array} \right. . \quad (12.5)$$

Вхідний і вихідний опори транзистора при такій схемі вмикання визначаються за формулами :

$$R_{\text{вх}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{Б}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{к}} = \text{const}} \quad (12.6)$$

$$R_{\text{вих}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{к}}} \right|_{U_{\text{Б}} = \text{const}} \quad (12.7)$$

Схема вмикання транзистора зі спільним емітером є найбільш поширеною, так як вона в порівнянні з іншими схемами має найбільш високий коефіцієнт передачі по струму (порядку декількох десятків).

Властивості транзистора створювати великі коливання сили струму в колі бази дають можливість використовувати його як підсилювач коливань сили струму і напруги.

Залежність між силами струму і напругами на вході і виході транзистора зображують у вигляді сімейства статичних характеристик. Звичайно використовують два види характеристик: вхідні і вихідні. Вхідна характеристика для схеми зі спільним емітером це залежність сили струму бази від напруги на базі при сталій напрузі на колекторі (рис. 12.4.а).

$$I_{\text{Б}} = f(U_{\text{Б}}) \text{ при } U_{\text{к}} = \text{const.}$$

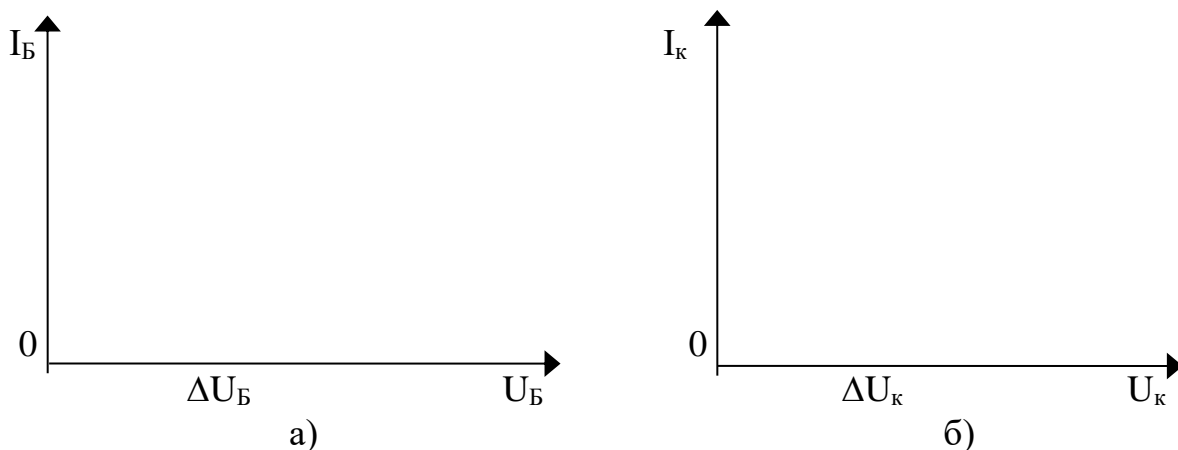


Рисунок 12.4

Вихідною характеристикою є залежність сили колекторного струму від напруги між колектором і емітером при постійному струмі бази (рис. 12.4.б).

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к}}) \text{ при } I_{\text{Б}} = \text{const.}$$

Із рисунків видно, як з допомогою статичних характеристик транзистора можна обчислити його параметри: коефіцієнт передачі по струму, вхідний і вихідний опори.

Для виготовлення транзисторів використовують германій або кремній, тому що рухливість носіїв заряду в цих елементів більша, ніж в других напівпровідниках. Крім того, рекомбінація електронів і дірок в цих елементах відбувається порівняно повільно, що важливо для доброї роботи транзистора.

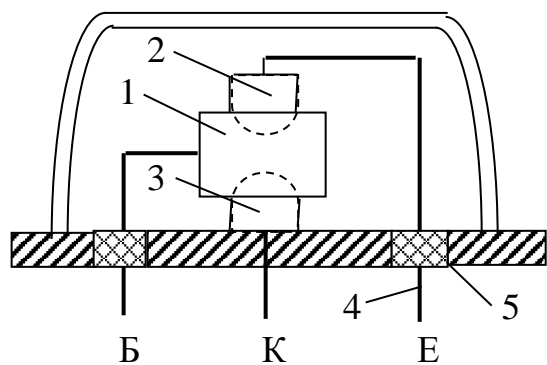


Рисунок 12.5

транзистора. До пластин припаюються провідники 4, які через ізолятори 5 виводяться назовні. Вся система розміщена в закритому корпусі 6.

Схематично будова транзистора зображена на рис. 12.5. Базою транзистора є пластинка 1 кристалічного германію з електронною провідністю, на яку з двох сторін наплавлена пластинка індію. При цьому в місцях сплавлення утворюються шари германію з дірковою провідністю. Ці шари є емітером 2 і колектором 3

Опис установки

В даній роботі потрібно зняти статичні характеристики транзистора р-п-р типу, ввімкненого по схемі зі спільним емітером. Схема для вимірювання наведена на рис. 12.6. Напряга від джерела живлення ε_1 подається через потенціометр R_1 на базу транзистора Т. Потенціометр R_1 дає можливість змінювати напругу на базі відносно емітера.

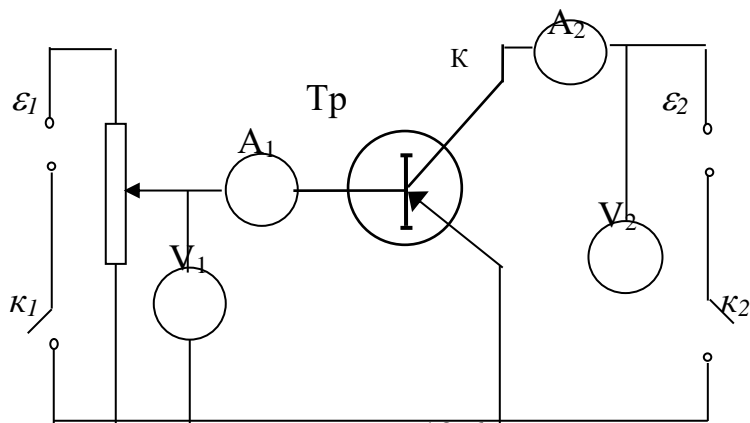


Рисунок 12.6

Напряга на колекторі відносно емітера встановлюється джерелом напруги ε_2 з регульованою напругою. Напряга на базі і колекторі вимірюється вольтметрами V_1 і V_2 . Сила струму в колі бази I_B вимірюється міліамперметром A_1 , сила струму в колі колектора I_K вимірюється

міліамперметром A_2 .

УВАГА! При виконанні роботи необхідно додержуватися таких правил:

- 1). Вмикати і вимикати напругу на колекторі можна лише при наявності напруги на базі.
- 2). Напруга на колекторі не повинна перевищувати 12 В.
- 3). Напруга на базі не повинна перевищувати 0,3 В.

Порядок виконання роботи

1. Зняти вхідні характеристики транзистора:

- 1.1. Ввімкнути джерело напруги кола база-емітер E_1 .
- 1.2. За допомогою потенціометра R_1 установити напругу $U_B = 0,05$ В.
- 1.3. Ввімкнути джерело напруги кола колектор-емітер E_2 і встановити напругу (вольтметр V_2), рівну U_{K1} .
- 1.4. Змінюючи з допомогою потенціометра R_1 напругу між базою і емітером на 0,05 В, виміряти для кожної напруги силу струму бази I_B . Напругу на колекторі підтримувати постійною.
- 1.5. Встановити на колекторі напругу U_{K2} і повторити операції, вказані в п.п.1-4.
- 1.6. Результати вимірювань записати в таблицю 12.1.
- 1.7. Побудувати графіки залежності I_B від U_B при двох значеннях напруги на колекторі (U_{K1} і U_{K2}).

Таблиця 12.1

$U_{K1} =$		$U_{K2} =$	
$U_B, \text{В}$	$I_B, \text{мА}$	$U_B, \text{В}$	$I_B, \text{мА}$

2. Зняти вихідні характеристики транзистора:

- 2.1. За допомогою потенціометра R_1 встановити струм бази I_{B1} .
- 2.2. Збільшуючи регулятором джерела E_2 напругу на колекторі від 0 до 12 В, виміряти силу струму колектора I_K через кожні 0,5 В. Силу струму бази підтримувати постійною.
- 2.3. Встановити струм бази I_{B2} і повторити операції, вказані в п.2.2.
- 2.4. Результати вимірювання записати в таблицю 12.2.
- 2.5. Побудувати графіки залежності I_K від U_K при двох значеннях сили струму бази I_{B1} і I_{B2} .

3. Обчислення параметрів транзистора:

- 3.1. Використовуючи вхідні характеристики, обчислити вхідний опір $R_{вх}$ транзистора за формулою (12.6).
- 3.2. Використовуючи вихідні характеристики, обчислити вихідний опір $R_{вих}$ за формулою (12.7), а також коефіцієнт передачі по струмові β за формулою (12.5).

Таблиця 12.2

$I_{B1} =$	I_{B2}

$U_K, В$	$I_K, мА$	$U_K, В$	$I_K, мА$

Контрольні запитання

1. Що являє собою транзистор?
2. Опишіть процеси, які відбуваються в транзисторі при поданні на нього напруги.
3. Перерахуйте можливі схеми ввімкнення транзистора.
4. Запишіть вирази для визначення коефіцієнта передачі по струмові, вхідного і вихідного опорів транзистора при ввімкненні його по схемі зі спільним емітером.
5. Зобразіть вхідні і вихідні характеристики транзистора.
6. Як по статичних характеристиках транзистора визначити його параметри?
7. Які переваги транзистора в порівнянні з вакуумним триодом?

Лабораторна робота № 413

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА СПІВВІДНОШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Мета роботи – експериментальне підтвердження справедливості співвідношення невизначеностей Гейзенберга для фотонів.

Прилади та матеріали: лазер, щілина змінної ширини, екран, лінійка.

Основні теоретичні відомості

Світло має хвильові і корпускулярні властивості. Хвильові властивості проявляються у таких явищах, як інтерференція та дифракція, а фотоефект, ефект Комптона та деякі інші підтверджують корпускулярні властивості світла. Тому з точки зору сучасної фізики світло - це потік фотонів (квантів світла), які мають

одночасно і хвильові, і корпускулярні властивості. Енергія фотона пропорційна його власній частоті:

$$\varepsilon = h \cdot \nu, \quad (13.1)$$

де h - стала Планка.

Теорія відносності Ейнштейна дає такий зв'язок між енергією та імпульсом будь-якої частинки:

$$\varepsilon = \sqrt{p^2 c^2 + (mc^2)^2}, \quad (13.2)$$

де p - імпульс частинки, m - маса спокою частинки, c - швидкість світла.

Маса спокою фотона дорівнює нулю, тому для фотона маємо:

$$\varepsilon = p \cdot c. \quad (13.3)$$

Оскільки довжина будь-якої хвилі дорівнює добутку швидкості хвилі на період коливань, то для фотона можна записати таке співвідношення:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}. \quad (13.4)$$

Тоді вираз для імпульсу можна записати так :

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (13.5)$$

Співвідношення невизначеності Гейзенберга говорить про те, що неможливо одночасно з великою точністю виміряти координату частинки та проекцію вектора імпульсу цієї частинки на дану координатну вісь

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}. \quad (13.6)$$

Якщо паралельний пучок світла падає на щілину шириною Δx , то на екрані ми побачимо світлу пляму, ширина D якої більша ніж ширина щілини. Це явище називається дифракцією світла.

Крім основної світлої плями (основного максимуму) можна побачити і додаткові (менш яскраві), світлі плями (додаткові максимуми).

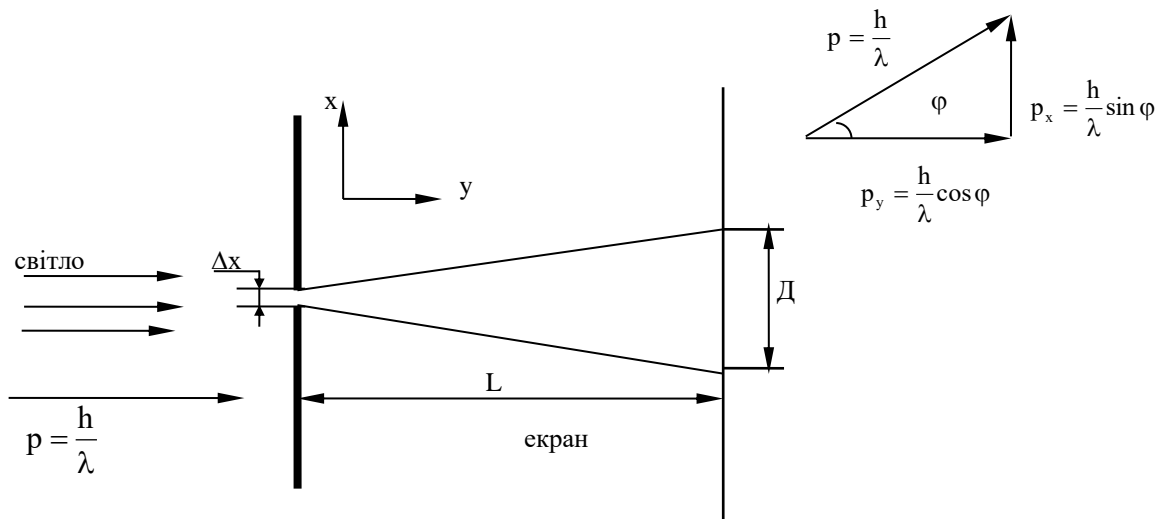


Рисунок 13.1

Якщо світло падає перпендикулярно на щілину (див. рисунок 13.1), то проекція імпульсу на вісь X дорівнює нулю. Після того, як світло пройде через щілину, проекція імпульсу на вісь X вже не буде дорівнювати нулю, і може набувати значення від нуля до

$$p_x = \frac{h}{\lambda} \approx \frac{h}{\lambda} \frac{D}{2L}, \quad (13.7)$$

де L - відстань від щілини до екрана ($\frac{D}{2L} \ll 1$). Тобто, якщо невизначеність координати дорівнює Δx, то невизначеність імпульсу дорівнює

$$\Delta p_x = p_x = \frac{h}{\lambda} \frac{D}{2L}. \quad (13.8)$$

Підставляючи отриманий вираз у співвідношення невизначеностей Гейзенберга, отримаємо:

$$\Delta x \cdot \frac{h}{\lambda} \frac{D}{2L} \geq \frac{h}{2\pi} \text{ або } \frac{\Delta x \cdot D}{\lambda \cdot L} \geq \frac{1}{\pi}. \quad (13.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Встановити на одній осі лазер, щілину та екран.
2. Змінюючи розміри щілини, домогтися чіткого зображення щілини на екрані.
3. Поставити між щілиною та екраном дифракційні ґрати і виміряти довжину хвилі світла, що випромінює лазер, за формулою:

$$x = d \frac{y}{L_d}, \quad (13.10)$$

де d - постійна дифракційних ґрат, y - відстань від центрального максимуму на екрані до першого максимуму, L_d - відстань від дифракційних ґрат до екрана. Зауважимо, що повинно виконуватись співвідношення :

$$\frac{y}{L_d} \ll 1. \quad (13.11)$$

Зробити виміри тричі, змінюючи відстань від дифракційних ґрат до екрана.

4. Прибрати дифракційні ґрати і, зменшуючи ширину щілини, зафіксувати такий момент, коли світло від лазера вже не потраплятиме на екран. Ширина щілини при цьому дорівнює нулю. Зафіксувати відповідну поділку на барабані, за допомогою якої змінюють ширину щілини.
5. Збільшуючи ширину щілини, спостерігати за тим, як зменшується ширина максимуму від щілини.
6. Зробити не менше п'яти вимірів ширини основного дифракційного максимуму при відповідній ширині щілини.
7. Виміряти відстань від щілини до екрана L .
8. Заповнити таблицю:

L_d , м	y , м	λ , м	$\lambda_{\text{сер}}$, м	Δx , м	D , м	L , м	$\frac{\Delta x \cdot D}{x_{\text{сер}} L}$	$(\frac{\Delta x \cdot D}{x_{\text{сер}} L})_{\text{сер}}$

9. Накреслити графік залежності ширини основного максимуму від ширини щілини $D = f(x)$.
10. Порівняти отримане середнє значення величини $\frac{\Delta x \cdot D}{\lambda L}$ з числом $\frac{1}{\pi}$.
11. Зробити висновок про залежність ширини основного максимуму від ширини щілини та про те, чи виконується співвідношення невизначеностей Гейзенберга для фотонів.

Контрольні запитання

1. Які явища підтверджують хвильові властивості світла ?
2. Які явища підтверджують корпускулярні властивості світла ?
3. Сформулюйте співвідношення невизначеностей Гейзенберга.
4. Як у даній роботі визначається довжина хвилі світла, яке випромінює лазер ?
5. Запишіть формулу Планка для енергії фотона.
6. Який зв'язок між імпульсом фотона та його енергією ?
7. Як визначити імпульс фотона, знаючи довжину хвилі ?
8. Як у даній роботі визначається невизначеність імпульсу фотона ?

Література

1. Прямухін В.Є., Колінько С.О., Бутенко Т.І. Оптика. Теорія відносності. Навчальний посібник / За ред. проф. Ващенко В.А. – М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2021. –44 с.

2. Кучерук І.М, Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3-х т./ За ред.. І.М. Кучерука. – 2-ге вид., випр. – К: Техніка, 2006.
3. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» / С. О. Решетняк, Р. В. Захарченко, В. Н. Захарченко, Ю. Б. Скірта – Електронні текстові данні (1 файл: 5,3 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 191 с.
4. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро-та наноелектроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Ільченко, Т. Ю. Обухова. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,41 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 56 с.
5. Лінчевський, І. В. Загальна фізика. Оптика. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник / І. В. Лінчевський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського ; за заг. ред. І. В. Лінчевського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 38 с.