

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

# **ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА**

## **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ**

Частина I

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 № 5 від 27.03. 2025 р.*

Упорядники:

Колінько С.О., к.ф.-м.н., доцент  
Бутенко Т.І., к.т.н., доцент  
Ващенко В.А., д.т.н., професор

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 1). [Електронний ресурс] / [упоряд. : С.О. Колінько, Т.І. Бутенко, В.А. Ващенко; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2025. – 43 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 1)

Упорядники:  
Колінько Сергій Олександрович,  
Бутенко Тетяна Іванівна,  
Ващенко Вячеслав Андрійович

*В авторській редакції.*

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

## ЗМІСТ

Лабораторна робота № 401	
<b>ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙЧАСТИХ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ АТОМІВ РТУТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ РІДБЕРГА В СЕРІЇ БАЛЬМЕРА СПЕКТРА ВОДНЮ</b>	3
Лабораторна робота № 402	
<b>ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА</b>	9
Лабораторна робота № 403	
<b>ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ МЕТАЛІВ І НАПІВПРОВІДНИКІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ</b>	17
Лабораторна робота № 404	
<b>ВИВЧЕННЯ ПРОНИКНОЇ ЗДАТНОСТІ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ</b>	21
Лабораторна робота № 405	
<b>ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ОДНОСТОРОННЬОЇ ПРОВІДНОСТІ</b>	27
Лабораторна робота № 406	
<b>ВИВЧЕННЯ ФОТОЕЛЕМЕНТА ІЗ ЗАПІРНИМ ШАРОМ</b>	30
Лабораторна робота № 407	
<b>ВИВЧЕННЯ ФОТООПОРУ</b>	35
Література	42

## Лабораторна робота № 401

### ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙЧАСТИХ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ АТОМІВ РТУТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ РІДБЕРГА В СЕРІЇ БАЛЬМЕРА СПЕКТРА ВОДНЮ

**Мета роботи** - спостереження і вивчення лінійчатого спектра випромінювання атомів ртуті, градування стилоскопа, визначення сталої Рідберга при спостереженні і визначенні довжин хвиль серії Бальмера спектра водню.

**Прилади і матеріали:** стилоскоп САП-2; ртутна лампа ПРК-2 з трансформатором, спектральна воднева трубка, газосвітний трансформатор, трансформатор ЛАТР-2, штатив для водневої трубки.

#### Основні теоретичні відомості

Якщо світло від розжареного твердого або рідкого тіла пропустити через тригранну призму, то на екрані за призмою ми одержимо смугу, що називається суцільним спектром, в якій один колір поступово переходить в інший. Такий спектр дає звичайна лампа розжарення, якщо світло від неї направити на призму.

Коли ж джерелом світла є розжарені гази або пари, то спектр має інший вигляд - на темному фоні видно окремі яскраві, вузькі лінії - і називається лінійчатим спектром випромінювання. Такі спектри виникають у тих випадках, коли джерелом випромінювання є атоми або іони хімічних елементів, що перебувають в газоподібному стані, наприклад, пари ртуті або гази водню, неону, гелію та інших. Лінійчаті спектри різних елементів відрізняються один від одного числом ліній, інтенсивністю і розміщенням їх у спектрі. Ці лінії можна об'єднати в окремі групи, так звані спектральні серії, які можуть знаходитися в різних областях спектра (ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоної).

Який же механізм випромінювання світла атомами при одержанні лінійчатих спектрів?

Відповідь на це питання була дана датським фізиком Н.Бором (1913 р.) в теорії пояснення спектрів атома водню, яка ґрунтувалась на постулатах Бора.

1. Електрон в атомі може обертатися навколо ядра тільки по таких орбітах, для яких момент імпульсу електрона ( $mvr$ ) кратний числу  $\frac{h}{2\pi}$ , тобто

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (1.1)$$

де  $m$  - маса електрона;  $v$  - швидкість електрона на  $n$ -ій орбіті;  $r$ -радіус  $n$ -ї орбіти;  $n=1,2,3,\dots$ - головне квантове число, що визначає номер електрона або номер енергетичного рівня електрона в атомі (оскільки електрон, знаходячись на певній орбіті, має певну енергію). Рівність (1.1) називають правилом відбору стаціонарних станів або умовою квантування орбіт.

2. Електрони в атомі можуть перебувати тільки в стійких стаціонарних станах, при цьому атом не випромінює і не поглинає енергію.

3. При переході електрона в атомі з одного стаціонарного стану в інший атом випромінює (або поглинає) квант енергії, що дорівнює різниці енергій в цих станах:

$$h\nu = E_n - E_k \quad (n > k).$$

При переході електрона з рівня  $n$  на рівень  $k$  випромінюється квант енергії, а при зворотному переході поглинається такий же квант енергії.

Із постулатів Бора випливає, що атоми мають дискретні значення енергії, характерні для кожного хімічного елемента. При переході електрона між цими рівнями випромінюються відповідні частоти. Тому спектри атомів лінійчаті, характерні для кожного хімічного елемента. Застосовуючи теорію Бора, можна одержати формулу енергії кванта, що випромінює атом водню при переході електрона з  $n$ -го на  $k$ -й рівень :

$$h\nu = E_n - E_k = \frac{z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1.2)$$

Звідки частота випроміненого кванта -

$$\nu = \frac{z^2 e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1.3)$$

Введемо хвильове число  $N = \frac{1}{\lambda}$ , що показує, скільки довжин хвиль

вміщується на одиниці довжини (в системі СІ це буде 1м). Оскільки  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , то

$N = \frac{\nu}{c}$  і формула (1.3) для хвильового числа набуде вигляду:

$$N = \frac{z^2 e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1.4)$$

де множник перед дужками є сталою Рідберга

$$R = \frac{z^2 e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^3 c}. \quad (1.5)$$

Тоді формула для хвильових чисел набере остаточного вигляду:

$$N = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1.6)$$

Формула (1.6) називається серіальною. З її допомогою можна обчислити хвильові числа і довжини хвиль всіх серій атома водню. Для кожної серії формули (1.6) величина  $k$  має відповідне постійне значення.

З теорії Бора виходить, що ті лінії спектра водню, які одержуються при переході електронів із будь-якого верхнього енергетичного рівня на перший ( $k=1$ ), складають серію Лаймана (рис. 401.1). Лінії спектра, які утворилися при переході електронів з будь-якого верхнього рівня на другий ( $k=2$ ), складають серію Бальмера.

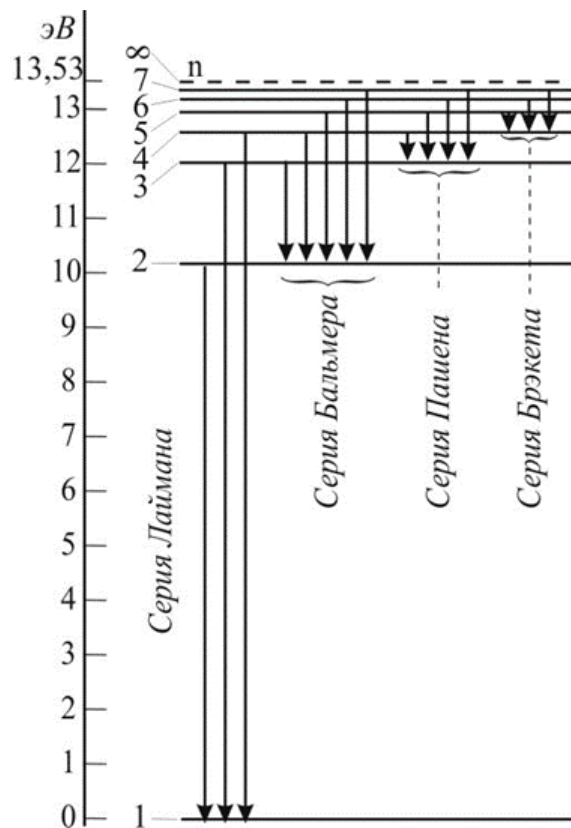


Рисунок 401.1

Ця серія знаходиться у видимій частині спектра і вивчається в даній роботі. А при переході електронів з будь-якого верхнього рівня на третій ( $k=3$ ) випромінюється серія Пашена, на четвертий ( $k=4$ ) - серія Бреккета, на п'ятий ( $k=5$ ) - серія Пфундта, шостий рівень - серія Хамфрі. Серія Лаймана знаходиться в ультрафіолетовій частині спектра, а всі інші - в інфрачервоній.

Слід зазначити, що теорія Бора пояснює тільки спектр атома водню і воднеподібних атомів (атомів з одним електроном, наприклад,  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$ ). Спектрів більш складних атомів вона не пояснює. Серійні закономірності є яскравим проявом квантових властивостей атомних систем.



Рисунок 401.2

спрямовує промені світла на конденсор 4. Із конденсора 4 промені через щілину 5 потрапляють на об'єктив 6. Щілина знаходиться в фокусі об'єктива. Із об'єктива паралельний пучок променів проходить дві диспергуючі призми 7,8. Великий катет призми 8 посріблений, тому, відбиваючись від нього, світло проходить у зворотному напрямі через призми 8 і 7, чим збільшується дисперсія приладу.

Через об'єктив 6, який фокусує промені, і призму 9 промені проходять через окуляр 10, після якого їх можна спостерігати. Спектральна схема приладу (об'єктив, диспергуючі призми і призма 9) розташована в корпусі 11 (рис. 401.3).

Збоку від корпусу приладу розміщується барабан 12 з поділками 13. Повертаючи барабан 12, повертають призму 8, внаслідок чого спектр переміщується в полі зору окуляра 14. Оправа із щілиною розміщена в металевій трубці 15. Для фіксації спектральних ліній у полі зору окуляра 14 є конусоподібний покажчик.

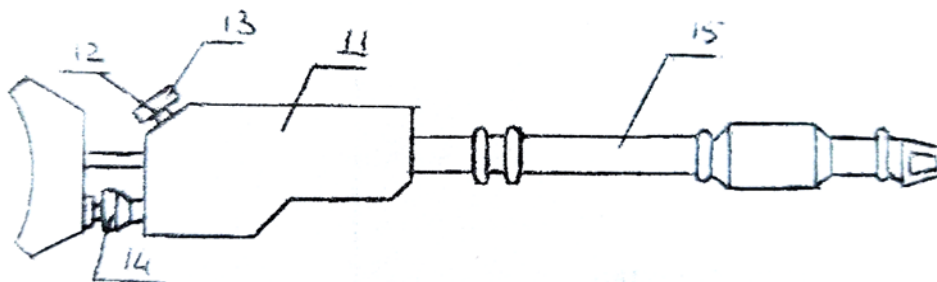


Рисунок 401.3

### **Порядок виконання роботи**

#### *А. Градування стилоскопа.*

Градування стилоскопа полягає в побудові графіка  $\lambda = f(n)$  ( $\lambda$  - довжина хвилі,  $n$  - число поділок шкали барабана 12).

1. Встановити ртутну лампу ПРК-2 перед захисним склом 1 на відстані 4-5 см так, щоб щілина лампи була паралельна захисному склу.
2. Ввімкнути ртутну лампу в мережу і через 5-10 хвилин почати спостереження.
3. Спостерігаючи спектр ртуті в окуляр 14 і повільно повертаючи вгору від себе барабан 12, підвести покажчик на потрібну лінію і записати покази шкали

барабана 12. Покази знімаємо тільки для тих ліній, які даються в таблиці 401.1 в черзі їх розміщення.

Таблиця 401.1

№ п/п	Характеристика спектральних ліній	Довжина хвилі, $\text{Å}$	Покази шкали барабана n
1.	Червона перша	6940	22
2.	Червона друга	6670	
3.	Червона яскрава	6234	
4.	Червоно-оранжева перша	6124	
5.	Червоно-оранжева друга	6073	
6.	Жовта яскрава перша	5791	
7.	Жовта яскрава друга	5770	
8.	Жовто-зелена	5461	
9.	Зелена яскрава	4916	
10.	Синя розмита	4356	
11.	Синя яскрава	4348	
12.	Синьо-фіолетова яскрава	4239	
13.	Фіолетова	4108	
14.	Фіолетова яскрава	4077	

4. Побудувати графік залежності  $\lambda = f(n)$ , відкладаючи на міліметровці по осі абсцис покази шкали барабана, а по осі ординат - довжини хвиль. За цим графіком можна визначити довжину хвилі будь-якої невідомої лінії в іншому спектрі, якщо відомо для неї покази шкали барабана.

5. Внизу під графіком замалювати спектр ртуті, зберігаючи інтервали по довжинах хвиль між спектральними лініями.

*Б. Визначення сталої Рідберга.*

1. Перед захисним склом 1 стилоскопа поставити спектральну водневу трубку. Показчик трансформатора ЛАТР-2 встановити на 50В і ввімкнути трансформатор в електромережу. При цьому спектральна трубка починає світитися.

**Примітка.** При ввімкненій спектральній трубці категорично заборонено торкатися її електродів руками, оскільки на трубку подається через газосвітний трансформатор напруга понад 10000В!

- Спостерігаючи спектр водню, зафіксувати з допомогою шкали барабана 13 основні лінії серії Бальмера  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H_{\gamma}$ , тобто визначити покази шкали барабана  $n$  для кожної лінії, починаючи з червоної.
- За побудованим графіком  $\lambda = f(n)$  (див. частину А) і за показами шкали барабана  $n$  визначити довжину хвиль вказаних ліній.
- Обчислити хвильове число  $N$  для кожної довжини хвилі.
- Обчислити сталу Рідберга для всіх хвильових чисел  $N$  за формулою (1.6.)
- За одержаними значеннями знайти середнє значення  $R_{\text{сер}}$  і обчислити похибки вимірів.
- Одержані дані занести в таблицю 401.2.

Таблиця 401.2

Колір і індекс спектральної лінії	Покази шкали барабан а n	Довжина хвилі		Хвильове число N	Квантові числа		Стала Рідберга R, м <sup>-1</sup>	$\Delta R$	$\frac{\Delta R}{R}$
		0 A	M		k	n			
Яскраво-червона $H_{\alpha}$ (25-35)					2	3			
Зелено-голуба $H_{\alpha}$ (90-100)					2	4			
Синя $H_{\gamma}$ (135-145)					2	5			

- За формулою (1.5) обчислити теоретичне значення  $R$  і порівняти його з одержаним значенням.
- Записати кінцевий результат для вимірюваного:

$$R = R_{\text{сер}} \pm \Delta R_{\text{сер}}$$

### Контрольні запитання

- Які бувають види спектрів?
- Поясніть, як одержуються лінійчасті спектри випромінювання?
- Сформулюйте постулати Бора.
- Напишіть серіальну формулу для атомів водню.
- Що називається хвильовим числом?
- Які серії спостерігаються в спектрі атома водню?
- Призначення і будова стилоскопа.
- Напишіть робочу формулу для визначення сталої Рідберга.
- Як відбувається градування стилоскопа?
- Як можна визначити невідому довжину хвилі за графіком градування стилоскопа?

## Лабораторна робота №402

### ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА

**Мета роботи:** вимірювання залежності опору напівпровідника від температури і визначення ширини забороненої зони.

**Прилади і матеріали:** напівпровідник (термістор), нагрівач, термометр, міст для вимірювання опору.

#### Основні теоретичні відомості

За електричними властивостями тверді тіла поділяються на провідники, напівпровідники і діелектрики. Питомий опір при кімнатній температурі провідників (металів)  $10^{-8} \div 10^{-6}$  Ом·м; напівпровідників  $10^{-5} \div 10^{+8}$  Ом·м; діелектриків  $10^{+8} \div 10^{+16}$  Ом·м. До напівпровідників належать: германій (Ge), кремній (Si), фосфор (P), миш'як (As), сірка (S), селен (Se), телур (Te), йод (I) і багато інших сполук типу А"В""", А""В". Відмінність в електричних властивостях провідників, напівпровідників і діелектриків пов'язана з розподілом валентних електронів у твердих тілах. У вільному атомі (газоподібний стан) електрони можуть мати тільки відповідні для даного атома значення енергії - дискретні енергетичні рівні  $E_1, E_2 \dots$ . Коли ж атоми зближуються і утворюють тверде тіло, то в результаті їх взаємодії енергетичні рівні зміщуються і розщеплюються в зони близько розміщених рівнів, які називаються дозволеними енергетичними зонами (рис. 2.1). Між ними знаходяться інтервали енергій, яких електрони

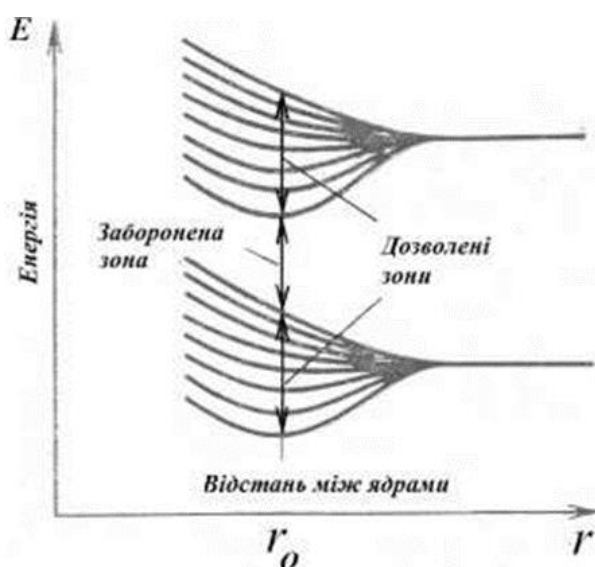


Рисунок 2.1

не можуть мати. Вони називаються забороненими зонами. Розщеплення енергетичних рівнів і їх заповнення підлягають принципу Паулі: на одному енергетичному рівні може знаходитися не більше двох електронів з протилежно направленими спінами. Якщо в кристал об'єднується  $N$  атомів, то кожний енергетичний рівень атома розщеплюється на  $N$  рівнів.

Дозволена зона, утворена із розщеплення рівнів валентних електронів, називається валентною зоною. Над нею знаходяться не зайняті електронами зони, перша з яких від валентної зони називається вільною.

Розглянемо, як теорія твердих тіл на основі уявлення про енергетичні зони (зонна теорія) пояснює електропровідність твердих тіл.

Електричний струм - це направлений рух електричних зарядів. В твердих тілах - це, в основному, направлений рух електронів. При відсутності зовнішнього електричного поля електрони не мають переважного напрямку руху, їх швидкості розподілені рівномірно по всіх напрямках. Цей розподіл можна змінити зовнішнім полем, тільки переводячи електрони на незаповнені рівні, оскільки повинен виконуватися принцип Паулі.

Таким чином, електропровідність твердого тіла залежить від наявності близько розміщених (практично в одній і тій же зоні) вільних енергетичних рівнів. Якщо зона заповнена повністю, то електричне поле не зможе змінити розподіл швидкостей електронів цієї зони. Ці електрони не беруть участі в електричному струмі. Якщо в зоні є вільні рівні, то тепловий рух і зовнішнє електричне поле переводять електрони на вільні рівні і викликають їх направлений рух.

Всі метали є добрими провідниками. Це пояснюється тим, що у них валентна зона не повністю заповнена електронами.

Якщо валентна зона заповнена повністю електронами, а розміщена над нею вільна зона відділена забороненою зоною  $\Delta E$  менше 3 eV, то тверде тіло є напівпровідником.

Якщо заборонена зона шириною  $\Delta E$  більше 3 eV, то тверде тіло буде діелектриком (рис. 2.2).

При температурах, близьких до абсолютного нуля, напівпровідник не проводить електричний струм: валентна зона заповнена, і її електрони не беруть участі в провідності, а у вільній зоні електронів немає. При підвищенні температури енергія теплового руху атомів зростає (при кімнатній температурі середня енергія теплового руху 0,025eV), частина електронів одержує енергію, більшу від ширини забороненої зони, і переходить у вільну зону. При цьому в направленому русі беруть участь електрони в вільній і валентній зоні, де звільнилися рівні, з яких електрони перейшли в зону провідності (рис. 2.3).

Провідність, обумовлена рухом валентних електронів по енергетичних рівнях біля верхньої межі валентної зони, називається дірковою. Питома

провідність  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  ( $\rho$  - питомий опір речовини) за Лоренцом:

$$\sigma = enu,$$

$e$  – заряд носіїв струму (електрона, дірки...);  $n$  – концентрація частинок, число частинок в одиниці об'єму;  $u$  – рухливість носіїв.

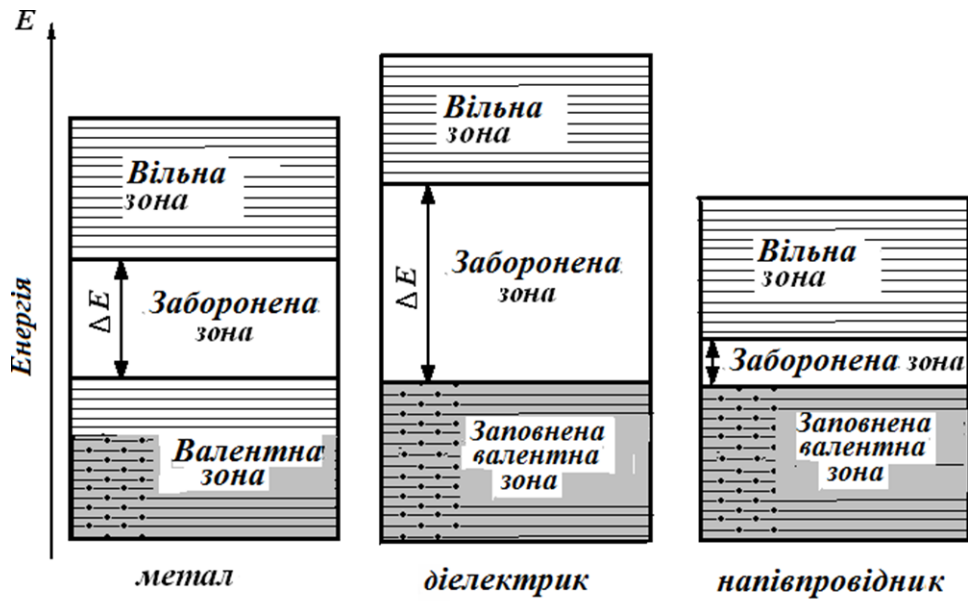


Рисунок 2.2

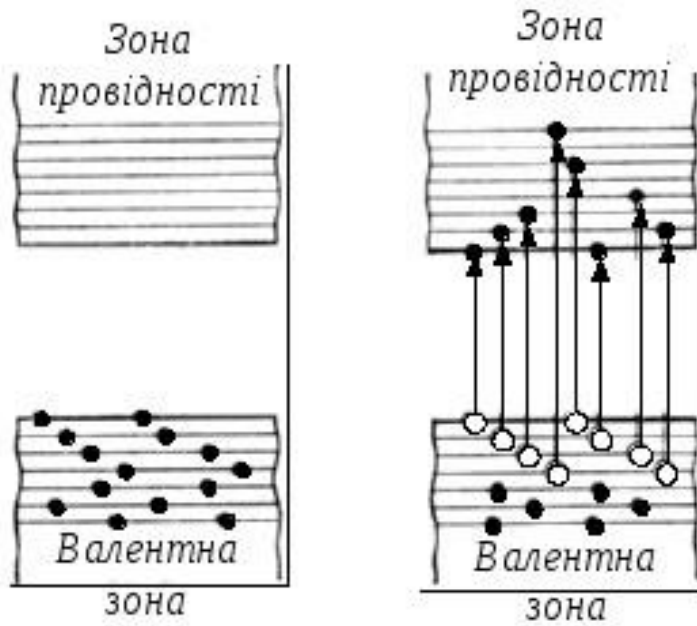


Рисунок 2.3

Швидкість направленого руху носіїв струму пропорційна напруженості електричного поля:

$$v_{\text{напр}} \sim E \text{ або } v_{\text{напр}} = uE,$$

де  $u$  рухливість носіїв струму (чисельно дорівнює швидкості направленого руху при напруженості електричного поля рівній одиниці).

Рухливість носіїв завжди зменшується із збільшенням температури за законом:

$$U \sim T^{-\alpha}.$$

Для різних речовин  $\frac{1}{2} \leq \alpha \leq \frac{3}{2}$ .

Концентрація носіїв у напівпровідниках у вільній зоні залежить від температури за законом:

$$n \sim e^{-\frac{\Delta E}{kT}},$$

де  $\Delta E$  – енергія активації носіїв.

Провідність напівпровідника, обумовлена переходом електронів із валентної зони в зону провідності, називається власною провідністю. В цьому випадку концентрація електронів у вільній зоні дорівнює концентрації вільних місць (дірок) у валентній зоні ( $n=p$ ):

$$\sigma = e(nU_n + pU_p) = en(U_n + U_p),$$

де  $U_n$  – рухливість електронів у вільній зоні;  $U_p$  – рухливість дірок у валентній зоні.

Велике значення для електропровідності напівпровідників має наявність або відсутність домішок. В залежності від виду атомів домішки до основного напівпровідника існують домішки двох видів: донорні та акцепторні. Донорні – це домішки, атоми яких створюють заповнення енергетичних рівнів біля «дна» зони провідності (рис. 2.4). Такий напівпровідник, на відміну від власного, має переважно провідність одного типу – електронну провідність у вільній зоні.

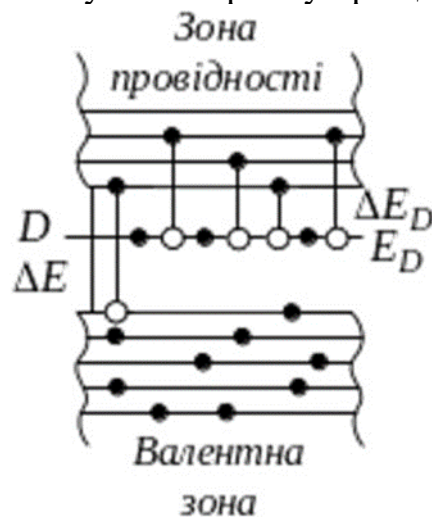


Рисунок 2.4

Донорні рівні локальні, вони існують тільки біля домішкового атома для досить малих концентрацій домішкових атомів ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  %). При великих концентраціях домішкових атомів донорні рівні можуть також створювати зону, по якій може відбуватися провідність.

Велике значення має енергія активації донорного рівня

$\Delta E_D$  в порівнянні із шириною забороненої зони  $\Delta E$ . Якраз ця обставина приводить до провідності одного виду в домішковому провіднику. При невеликих температурах, коли  $\Delta E \gg kT$  і  $\Delta E_D \approx kT$ , в зону провідності переходять електрони з донорних рівнів, а перехід електронів із валентної зони ще незначний. Це дозволяє регулювати провідність домішкового напівпровідника концентрацією введених в нього домішок:

$$\sigma_n = enU_n,$$

де  $U_n$  - рухливість носіїв n- типу. Концентрація вільних електронів  $n$  пропорційна концентрації домішкових атомів  $N_D$ :

$$n = N_D e^{-\frac{\Delta E_D}{kT}}.$$

Температура, при якій майже всі електрони залишають донорні рівні, називається температурою вичерпання донорних рівнів. При зростанні температури, при якій  $kT \leq \Delta E$ , все більшого значення набувають переходи електронів із валентної зони, і провідність стає біполярною.

Напівпровідники n - типу можна одержати, якщо в решітку атомів германію (Ge - чотиривалентний,  $\Delta E = 0,68$  eV) ввести атоми п'ятивалентних елементів (P – фосфор, As – миш'як). При цьому чотири валентних електрони атома фосфору утворюють ковалентний зв'язок з чотирма атомами германію, а п'ятий валентний електрон фосфору виявляється слабо зв'язаним з атомом фосфору і утворює мілкий донорний рівень  $\Delta E_d \sim 0,05$  eV.

Можливі домішки і другого типу – акцепторні, які можуть приєднувати до себе зайві електрони. Такі атоми утворюють локальні енергетичні рівні в забороненій зоні біля верхнього рівня валентної зони (рис. 2.5). Якщо  $\Delta E_d \ll \Delta E$ , то при низьких температурах електрони із валентної зони частково

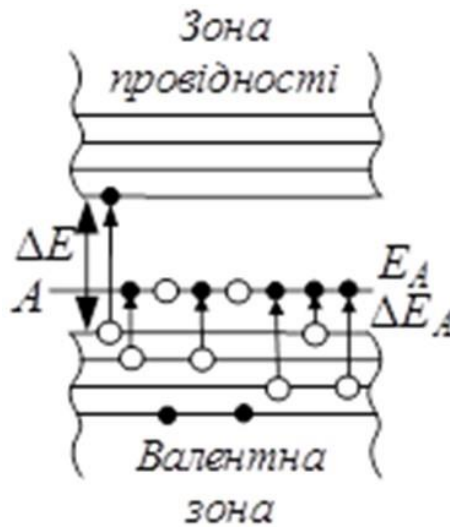


Рисунок 2.5

переходять на акцепторні рівні. У валентній зоні утворюються вільні рівні, по яких можливий направлений рух електронів. Але їх рух біля максимуму енергії у валентній зоні має інший характер, ніж рух електронів у зоні провідності біля мінімуму енергії в зоні. Цей рух описують рухом додатно заряджених квазічастинок – дірок:

$$\sigma = \sigma_p = e p u_p,$$

де  $p$ - концентрація дірок у валентній зоні

$$p = N_A e^{-\frac{\Delta E_A}{kT}}.$$

Напівпровідники р-типу провідності можна одержати, якщо, наприклад, у кристали германію ввести домішки атомів тривалентного індію. У цьому випадку в атомах індію не вистачає одного електрона для утворення стійкого зв'язку з атомами германію чотирма парами електронів. Для заповнення цього зв'язку забирається електрон в сусідніх атомах германію, зв'язаних між собою чотирма парами електронів. При цьому енергія забраних електронів - акцепторний домішковий рівень - знаходиться в забороненій зоні близько біля верхнього рівня валентної зони. Оскільки  $\Delta E_d \ll \Delta E$  і одного порядку з енергією теплового руху електронів при кімнатній температурі ( $\sim 0,05\text{eV}$ ), то на ці рівні переходять електрони з валентної зони, а в цій зоні утворюються вільні рівні. Акцепторні рівні локальні, тобто існують біля домішкових атомів, електрони не можуть переміщатись по цих рівнях у кристалічній решітці. Рівні енергії у валентній зоні проходять по всьому об'ємові напівпровідника. Тому, коли там утворюються вільні рівні, валентні електрони можуть переміщатися в направленому русі зарядів - електричному струмові. Але рух електронів біля максимуму енергії в зоні відбувається не так, як біля мінімуму енергії. Електрони з енергією близько  $E_{\text{max}}$  зони характеризуються ефективною масою, яка буде від'ємною. Так описувати незручно. Тому замість цих електронів використовують квазічастинки - дірки з додатним зарядом і додатною

ефективною масою.

У цій роботі необхідно визначити ширину забороненої зони напівпровідника. Як напівпровідник в роботі використовується термістор типу ММТ-4. Термістори - це напівпровідникові термоопори, які мають великий температурний коефіцієнт опору, що дає можливість використовувати їх для вимірювання температури як термометри.

Залежність опору напівпровідника від температури виражається формулою:

$$R_T = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (2.1.)$$

де  $R_T$  - опір напівпровідників при температурі  $T$ ;  $R_0$  - опір напівпровідника при  $T \rightarrow \infty$ ;  $\Delta E$  - ширина забороненої зони напівпровідника;  $k=1,38 \times 10^{-23}$  Дж/к - стала Больцмана.

Із формули (2.1) можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника  $\Delta E$ . Для цього прологарифмуємо (2.1) і візьмемо два значення опору  $R_n$  і  $R_m$ , виміряні при температурах  $T_n$  і  $T_m$ :

$$\ln R_n = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T_n};$$

$$\ln R_m = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T_m}.$$

Віднімаючи один вираз від другого, одержимо

$$\Delta E = 2k \frac{\ln R_m - \ln R_n}{\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_n}}. \quad (2.2.)$$

### Опис установки

Установка для виконання роботи містить регулятор напруги ЛАТР-2, який використовується для нагрівання напівпровідника. До ЛАТР-2 вмикається нагрівач Н. Нагрівачем є опір в кераміці.

Усередині нагрівача Н знаходяться досліджуваній напівпровідник П (термістор типу ММТ-4) і термометр  $T_p$  для вимірювання температури напівпровідника. Напівпровідник П підключається до кабельного моста КМ-1, за допомогою якого вимірюють його опір при різних температурах. Для живлення моста підключають до клем ЗБ зовнішню батарею.

## Порядок виконання роботи

1. Приєднати до затискачів «R» і «RC» кабельного моста КМ-1 досліджуваний напівпровідник (термістор ММЕ-4).

2. Приєднати зовнішню батарею ЗБ до затискачів ЗБ (зовнішня батарея).

3. Ручку «питание» поставити в положення «---», ручку «схема» в положення «МВ».

4. Ручку плечей відношення (перша ручка зліва на панелі приладу) поставити на цифру відношення 10:1. Після цього ручку гальванометра - в положення «грубо». Обертанням ручки декад порівнювального плеча добитися встановлення стрілки гальванометра на нуль. Потім перевести ручку «гальв.» в положення «точно» і знову добитися встановлення стрілки на нуль, повертаючи ручку декад. Величину вимірюваного опору визначаємо за формулою:

$R_x = \frac{r_1}{r_2} R$ , де  $R$ - відлік по лімбах декад порівняльного плеча;  $\frac{r_1}{r_2}$  - значення

відношення плечей, які вказано на лімбі першої зліва декади моста (100:1, 10:1, 1:1, 1:10). Наприклад, якщо ручка відношення плечей стоїть на 10:1, це означає,

що  $\frac{r_1}{r_2} = 10:1 = \frac{10}{1}$ . На першій ручці декад ( $\times 1000$ ) напроти покажчика стоїть

цифра 3, на другій ( $\times 100$ )- цифра 6, на третій ( $\times 10$ )- цифра 5, на четвертій ( $\times 1$ ) - цифра 4. Тоді вимірюваний опір:

$$R = \frac{10}{1} (3 \times 1000 + 6 \times 100 + 5 \times 10 + 4 \times 1) = 10 \times 3654 = 36540 \text{ Ом.}$$

Виміряти опір при кімнатній температурі.

5. Ввімкнути вилку регулятора напруги в мережу 220 В. На регуляторі встановити стрілку на 80 В (не більше), щоб температура при нагріванні напівпровідника підвищувалася повільно.

6. Нагріваючи термістор, вимірювати його опір через кожні  $10^0$  С, починаючи з кімнатної температури і закінчуючи  $80^0$ - $90^0$ . Дослід провести два-три рази. Дані записати в таблицю:

№ п/п	$t^0\text{C}$	$R$ , Ом	$T=273+t$ , К	$\ln R$	$1/T$ , $\text{K}^{-1}$

7. Побудувати графіки залежності опору  $R$  від температури  $T$  та  $\ln R$  від  $1/T$ .

8. Обчислити ширину забороненої зони  $\Delta E_{\text{сер}}$  за значеннями  $\ln R$ , взятими для однієї пари температур ( $T_m$ ,  $T_n$ ) за графіком. Обчислення провести за формулою (2.2.). Ширину забороненої зони обчислити в джоулях і електрон-вольтах.

## Контрольні запитання

1. Що таке ширина забороненої зони?

2. Що являє собою термістор і для чого він використовується?

3. За якою ознакою поділяються тверді тіла на провідники (метали), напівпровідники і діелектрики з точки зору зонної теорії?
4. Які види провідності є у напівпровідників?
5. Що таке напівпровідник n і p-типу?
6. Що являють собою акцептори і донори?
7. Як і чому залежить опір металів і напівпровідників від температури?
8. Виведіть робочу формулу для роботи.
9. Як визначити опір за допомогою кабельного моста?

### Лабораторна робота №403

## ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ МЕТАЛІВ І НАПІВПРОВІДНИКІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

**Мета роботи** - вимірювання опору металевого провідника і напівпровідника з підвищенням температури.

**Прилади і матеріали:** дротяний опір (котушка мідного дроту), напівпровідник (термістор типу ММТ-4), нагрівник, міст для вимірювання опору.

### Основні теоретичні відомості

Метали належать до провідників першого роду. Електричний струм у них здійснюється вільними електронами. У першому наближенні (класична теорія провідності металів) рух вільних електронів можна розглядати подібно руху атомів ідеального газу - хаотичний тепловий рух. Але основну роль у здійсненні рівноважного стану електронного газу відіграють зіткнення електронів з іонами кристалічної решітки.

У металевому провіднику, якщо в ньому створити електричне поле, на кожний вільний електрон буде діяти сила  $\vec{F} = e\vec{E}$ , яка й викличе їх направлений рух. Електричне поле створить електричний струм, густина якого визначається за формулою Лоренца:

$$\vec{J} = en\vec{v}_{\text{сер}},$$

де  $e$ - заряд електрона;  $n$ - концентрація вільних електронів;  $\vec{v}_{\text{сер}}$  - середня швидкість направленного руху вільних електронів.

Відомо, що середня швидкість направленного руху пропорційна напруженості електричного поля:

$$\vec{v}_{\text{сер}} = u\vec{E},$$

де  $u$  - рухливість носіїв заряду, що дорівнює  $v_{\text{ср}}/E$ . Це означає, що виконується закон Ома:

$$\vec{J} = enu\vec{v}_{\text{ср}} = \sigma\vec{E},$$

де  $\sigma$  - питома провідність металів  $\sigma = 1/\rho$ . Ця величина визначає ступінь розсіювання зарядів в провіднику. А розсіювання визначає величину рухливості.

У металах основну роль в розсіюванні електронів відіграє розсіювання їх на теплових коливаннях іонів кристалічної решітки. Із збільшенням температури металу концентрація вільних електронів практично залишається сталою, а рухливість носіїв зменшується. Тому при зменшенні  $\sigma$  або збільшенні  $\rho$  (питомий опір) змінюється і опір провідника  $R = \rho \frac{l}{S}$ :

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

де  $R_t$  - опір провідника при  $t^\circ\text{C}$ ;  $R_0$  - опір провідника при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору, який для металів додатний і залежить від речовини, будови, домішок і дуже слабо від температури. Для деяких сплавів (манганін, константан)  $\alpha$  дуже малий, і в невеликому інтервалі температур опір цих сплавів залишається сталим;  $t$  - температура провідника.

Більш точно описує стан електронів у металах квантова теорія, яка враховує хвильові властивості частинок і їх тотожність. Основні висновки квантової теорії: валентні електрони в металі розподілені у відповідності до принципу Паулі за рівнями зони провідності; при цьому електрони займають високі енергетичні рівні, які відповідають середній енергії електронів при температурі  $\sim 1000$  К; це приводить до високого ступеня виродження електронів зони провідності. На рис.3.1 зображено графік функції розподілу при  $T=0$  К (пунктиром) і при  $T \geq 0$  К (суцільна лінія). За графіком для  $T > 0$  К видно, що в електричному струмі бере участь невелика частина електронів зони в межах інтервалу енергій  $E_F \pm kT$ . Це приводить до росту концентрації електронів, які беруть участь у перенесенні заряду при електричному струмі. Зменшення рухливості електронів при збільшенні температури значно перевищує збільшення  $n$ , так що  $\sigma(T) = enu$  зменшується приблизно пропорційно температурі.

Напівпровідники - це речовини, у яких зона провідності відділена від валентної забороненою зоною шириною  $\Delta E < 3$  еВ. Опір напівпровідників залежить від температури, освітленості, електричного і магнітного полів і інших сплавів. До напівпровідників належать: елементи В (бор), С (вуглець), Si (кремній), Р (фосфор), S (сірка), Ge германій, As (миш'як), Se (селен), Те (телур), І (йод); хімічні сполуки типу  $A''''B^\vee$ ,  $A''B^\vee$ ,  $A'B^\vee$ , чимало

багатоатомних сполук, у яких в середньому на один атом припадає по чотири валентних електрони, а також деякі органічні сполуки.

Опір невідроджених напівпровідників зменшується з підвищенням температури. Це пояснюється механізмом провідності напівпровідників. При  $T=0$  К зона провідності вільна і напівпровідник є діелектриком. При підвищенні температури тепловий рух переводить електрони із валентної зони в зону провідності (рис.3.2), що сприяє збільшенню концентрації електронів у зоні провідності:

$$n(T) = n_0 e^{-\Delta E / 2kT}.$$

Провідність визначається за формулою  $\sigma = enu_n$ . Оскільки рухливість  $u_n$

зменшується із збільшенням температури  $u_n \sim T^{3/2}$ , то збільшення концентрації носіїв за експоненціальним законом перевищує зменшення  $u_n$  і тоді

$\sigma \sim e^{-\Delta E / 2kT}$ , а  $\rho = \frac{1}{\sigma} \sim e^{\Delta E / 2kT}$ . Досліди підтверджують таку залежність опору

$R(T) = R_0 e^{\Delta E / kT}$ , де  $\Delta E$  - енергія активації носіїв напівпровідника.

Залежність опору металів і напівпровідників від температури знаходить в техніці різноманітні застосування. Наприклад, стабілізатор струму (баратер) являє собою залізний або вольфрамовий дріт, розміщений в балоні, наповненому воднем. Опір дроту зростає при збільшенні температури, а це перешкоджає

збільшенню струму; термометри опору - це прилади, основані на властивостях металів змінювати свій опір при зміні температури. Якщо побудуємо графік залежності опору термометра від температури, то за цим графіком, знаючи опір термометра, можна визначити температуру нагрівання. Звичайно такі

термометри проградуєвані і показують температуру за зміною опору. Термістори - це напівпровідникові опори, у яких із збільшенням температури зменшується опір. Вони використовуються для вимірювання і регулювання

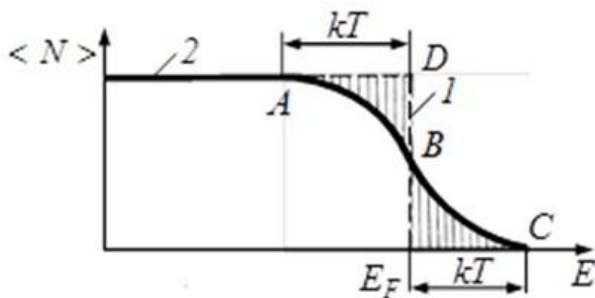


Рисунок 3.1

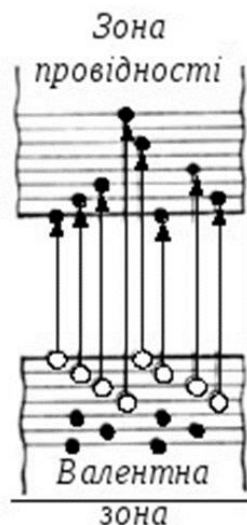


Рисунок 3.2

температури, температурної компенсації, аналізу газової суміші, вимірювання вакууму, як реле з витримкою часу, для вимірювання потужності в променевій енергії в оптиці і енергії електромагнітних коливань, в радіотехніці надвисоких частот тощо.

### Опис установки

В роботі для нагрівання металевго провідника і напівпровідника використовується опір, намотаний на керамічну трубку і залитий склом, що нагрівається струмом від автотрансформатора. З одного кінця в трубку встановлено термометр, а з другого кінця виходять виводи від провідника і напівпровідника. В коло вимірюваних опорів увімкнено перемикач для вимірювання опорів обох зразків при одній і тій же температурі.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з роботою універсального моста постійного струму.
2. Приєднати досліджувані зразки до затискачів моста і виміряти їх опір при кімнатній початковій температурі.
3. Увімкнути в електромережу автотрансформатор і подати на нагрівальний елемент напругу 50-80 В.
4. Провести вимірювання опорів провідника і напівпровідника при їх

5. нагріванні через кожні  $10^0$  не менше семи раз. Результати вимірювання записати в таблицю.

№ п/п	Температура	Опір напівпровідника	Опір провідника

5. За одержаними даними побудувати графіки залежності опору від температури для провідника і напівпровідника окремо. Зробити висновки.

### Контрольні запитання

1. Яка залежність опору металів і напівпровідників від температури?
2. Які речовини відносяться до напівпровідників?
3. Де і в яких приладах використовується залежність опору від температури?
4. Як вимірюється опір за допомогою універсального моста?

### Лабораторна робота №404

#### ВИВЧЕННЯ ПРОНИКНОЇ ЗДАТНОСТІ ГАММА ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Мета роботи:** вивчення проникності гамма-променів для різних речовин і вивчення лінійного коефіцієнта поглинання для цих речовин.

**Прилади і матеріали:** дозиметричний прилад типу ДП-100, джерело  $\gamma$ -випромінювання, свинцевий контейнер, набір пластинок із різних матеріалів (свинцю, алюмінію, заліза, вініпласту).

#### Основні теоретичні відомості

Радіоактивність - це спонтанне перетворення ядер нестійких ізотопів одних елементів в ядра ізотопів інших елементів, яке зумовлене внутрішніми причинами та супроводиться випромінюванням фотонів, елементарних частинок і  $\alpha$ -частинок.

Випромінювання, яке дуже сильно відхиляється в магнітному полі, являє собою потік швидких електронів, що рухаються із швидкостями, близькими до швидкості світла. Це  $\beta$ -промені ( $\beta$ -частинки).

Випромінювання, яке відхиляється слабкіше в магнітному полі і в сторону, протилежну відхиленню  $\beta$ -частинок, було назване  $\alpha$ -промені ( $\alpha$ -частинки).

Альфа-частинки мають додатний заряд, що дорівнює  $2e$  (де  $e$ - елементарний заряд), і являють собою ядра атомів гелію.

Ті промені, які не відхиляються в магнітному полі, були названі  $\gamma$ -промені. Вони являють собою електромагнітне випромінення з довжиною хвилі від  $10^{-3}\text{Å}$  до  $1\text{Å}$ .

$\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ -промені при рухові в повітрі чи в будь-якому іншому середовищі витрачають свою енергію на іонізацію і збудження зустрічних атомів.

Оскільки  $\alpha$ -частинки являють собою ядра атомів гелію і мають великі заряд і масу, то вони енергійно взаємодіють з атомами середовища при своєму русі і швидко втрачають енергію.  $\alpha$ -частинки, пройшовши відповідний шлях  $R$ , який називають пробігом, і захопивши два електрони, зупиняються і перетворюються в нейтральні атоми гелію. Таким чином,  $\alpha$ -частинки мають велику іонізуючу і проникну здатність. Так, в повітрі при нормальних умовах  $\alpha$ -частинки пробігають шлях близько 7 см. Лист паперу із звичайного зошита майже повністю затримує  $\alpha$ -частинки.

$\beta$ -частинки мають менший заряд і масу, ніж  $\alpha$ -частинки. Тому при проходженні через речовину їх іонізуюча здатність майже в 100 разів слабкіша, а проникна здатність в стільки ж разів більша, ніж у  $\alpha$ -частинок.

$\gamma$ -промені не мають електричного заряду, і їх іонізуюча здатність дуже велика (майже в 100 разів більша, ніж у  $\beta$ -частинок) при тій же енергії.

Проходячи через речовину,  $\gamma$ -квант рухається із швидкістю світла і або зовсім не взаємодіє з частинками речовини (не змінює швидкості і напрямку), або взаємодіє із зарядженою частинкою і поглинається.

Таким чином, по мірі проходження через речовину число  $\gamma$ -квантів зменшується і відповідно зменшується інтенсивність пучка  $\gamma$ -променів. Зменшення інтенсивності  $\gamma$ -променів відбувається за експоненціальним законом:

$$I=I_0e^{-\mu X}, \quad (4.1)$$

де  $I_0$  - початкова інтенсивність;  $I$  - інтенсивність після проходження шару речовини товщиною  $x$ ;  $\mu$  - лінійний коефіцієнт поглинання, який залежить від властивостей речовини і енергії  $\gamma$ -кванта. Часто замість лінійного коефіцієнта  $\mu$  вводиться масовий коефіцієнт поглинання  $\mu_m = \mu/\rho$ , ( $\rho$  - густина речовини).

Товщина шару  $x_{1/2}$ , який зменшує інтенсивність пучка  $\gamma$ -променів у два рази, називається шаром половинного поглинання.

Тоді, з формули (4.1) одержимо:

$$\frac{I_0}{2}=I_0e^{-\mu x_{1/2}}, \quad \text{звідки} \quad x_{1/2}=\frac{\ln 2}{\mu}=\frac{0,693}{\mu}$$

Для  $\gamma$ -променів з великою енергією товщина шару половинного поглинання в свинці - 1,6 см, в залізі - 2,4 см, в алюмінії - 12 см, в землі - 15 см, а в повітрі за нормальних умов - 770 м.

$\gamma$ -промені викликають біологічну дію на живі організми, оскільки вони спричиняють іонізацію атомів і розкладання молекул всередині клітин біологічної тканини, що призводить до зміни і порушення клітин, може створити явища, що становлять загрозу для організму. Тому при роботі з іонізаційними випромінюваннями необхідно передбачити захист людини від великих доз опромінення.

Дозу поглинутої енергії  $\gamma$ -променів, як і рентгенівських променів, вимірюють у рентгенах. Рентгеном (Р) називається доза випромінювання, при якій в  $1,2930 \times 10^{-6}$  кг повітря утворюються іони з сумарним зарядом  $\frac{1}{3} \times 10^{-9}$  Кл кожного знака, тобто  $IP = 2,57976 \times 10^{-4}$  Кл/кг, що відповідає утворенню  $2,08 \times 10^9$  пар одновалентних іонів в  $10^{-6}$  м<sup>3</sup> повітря за нормальних умов і пов'язано з поглинанням близько  $84 \times 10^{-4}$  Дж енергії 1 кг повітря.

При опроміненні біологічної тканини фізичною дозою  $\gamma$ -променів в IP в кожному грамі тканини поглинається близько  $93 \times 10^{-7}$  Дж енергії випромінювання. Гранично допустима добова доза опромінення не повинна перевищувати 0,05 Р. Смертельною дозою для людини вважається одноразово одержана доза, що перевищує 500 Р.

### Опис установки

Для вивчення проникної здатності  $\gamma$ -променів у різних матеріалах використовується декадно-лічильна установка ДП-100. Установка (рис. 4.1) призначена для вимірювання числа електричних імпульсів, що надходять від газових лічильників (лічильник Гейгера-Мюллера), і забезпечує перерахування імпульсів з коефіцієнтом перерахунку лічильного блока, що дорівнює 100:1.

В комплект лабораторної установки входять, також, свинцевий контейнер (всередині контейнера знаходяться газовий лічильник і каретка, де в кюветі розміщують радіоактивний препарат), сигнальний кабель, і кабель живлення. Свинцевий контейнер виконує екрануючу роль для захисту газового лічильника від дії зовнішнього радіоактивного випромінювання і для захисту людини, що працює з установкою, від радіоактивного джерела, що знаходиться всередині контейнера.

$\gamma$ -кванти безпосередньо не відчуються людиною, якщо доза опромінювання не дуже велика, але їх можна виявити за допомогою приладів. Одним з таких приладів є газовий лічильник Гейгера-Мюллера (рис. 4.2), який являє собою іонізаційну камеру, тобто газорозрядний проміжок з дуже неоднорідним електричним полем. Зовнішній циліндр лічильника є катодом, а тонка дротина, що розміщується по осі циліндра, - анодом. Електроди розміщені

в герметично закритій трубці, заповненій яким-небудь газом (повітрям, аргоном, воднем) при тиску 100-2000 мм.рт.ст. Якщо напруга, що подається на лічильник  $V_0$ , перевищує початковий потенціал запалювання газового розряду  $V_z$ , то будь-яка заряджена частинка викличе коронний розряд. Розвиток розряду відбувається за  $10^{-6}$ - $10^{-7}$ с. Через  $10^{-4}$ с розряд вимушено гаситься з допомогою спеціальних контурів, і лічильник починає реєструвати наступну частинку. Електричні імпульси, що виникають при цьому в зовнішньому колі, підсилюються і реєструються електромеханічним лічильником.

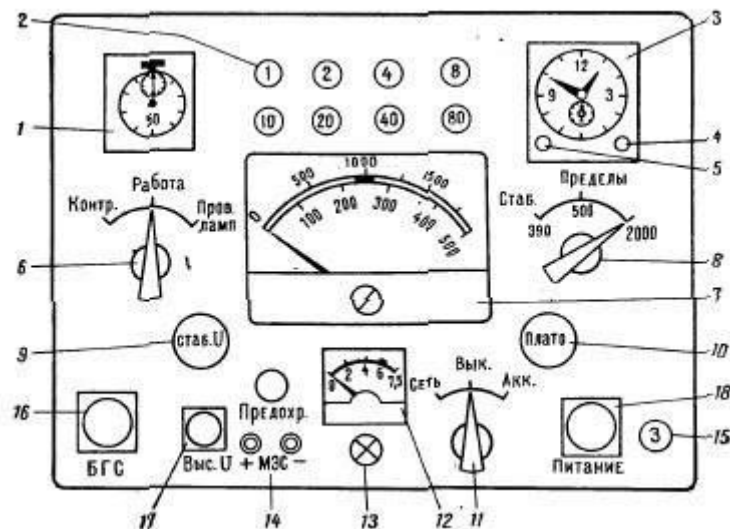


Рисунок 4.1

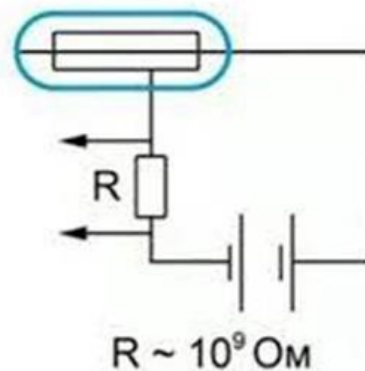


Рисунок 4.2

Важливою характеристикою лічильника є його лічильна характеристика, яка показує залежність швидкості відліку від величини напруги, прикладеної до лічильника при незмінних умовах опромінення (рис. 4.3).

Крива має поріг напруги (точка А), нижче якого імпульси не реєструються.

Із збільшенням напруги починається ділянка пропорційного відліку (ділянка АВ). У деяких лічильниках ця зона використовується для реєстрації частинок, що викликають сильну іонізацію. При подальшому збільшенні напруги з'являється зона, в якій частинки, що потрапляють в об'єм лічильника, будуть реєструватися. Це - ділянка Гейгера-Мюллера (ділянка ВС), яка інакше називається «плато». В ділянці ВС і працює лічильник Гейгера-Мюллера. В даній роботі використовується лічильник типу СГС-6. Внаслідок того, що на лічильник подається висока напруга (400 В), будьте обережними в поводженні з ним! Торкатися лічильника можна тільки при вимкнутій установці.

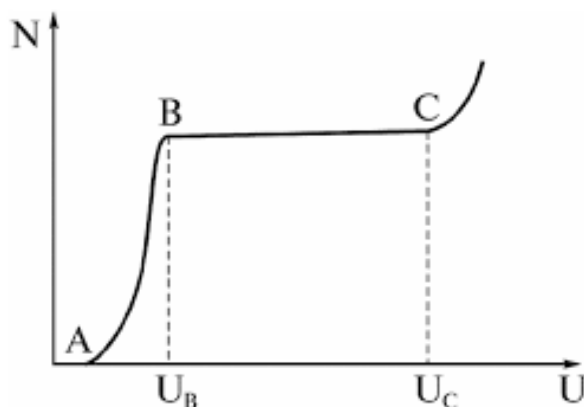


Рисунок 4.3

### Порядок виконання роботи

Починають роботу з установкою тільки в присутності викладача або лаборанта!

1. Відкрити верхню і бічну стінки свинцевого контейнера) Відпустити затискний гвинт і вийняти каретку із свинцевого контейнера. Із каретки вийняти кюветку з радіоактивною речовиною поставити знову каретку в контейнер і закрити його.

2. Перемикач 6 установити в положення «раб.», а перемикач 8 - в положення «390».

3. Вилку кабеля ввімкнути в електромережу. Перемикач 11 повернути в положення «сеть», при цьому повинна засвітитися червона лампочка 13. Стрілка 7 приладу ИП-1 повинна показувати 390 В, а стрілка 12 приладу ИП-2 повинна знаходитися в межах виділеного червоного поля.

4. Натисненням на кнопку електромеханічного лічильника 1 встановити стрілки лічильника в нульове положення. Натисненням на кнопку 4 секундоміра 3 встановити секундну стрілку на нуль. Після цих операцій установка готова до роботи.

5. Виміряти інтенсивність фону  $I_f$ , який зумовлений сторонніми

частинками: космічними променями,  $\gamma$ - променями від сусідніх джерел, квантами, розсіяними від стінок контейнера. Для підрахунку інтенсивності  $\gamma$ - випромінювання (тобто числа імпульсів) потрібно зробити таке.

Натисненням на кнопку 4 ввімкнути одночасно лічильник імпульсів 1 і секундомір 3. При цьому починають блимати тератрони . Через хвилину знову натиснути на кнопку 4 і зупинити електромеханічний лічильник імпульсів і секундомір. При цьому частина тератронів гасне, а частина залишається горіти.

За лічильником і тератронами, що горять, зняти число нарахованих імпульсів. Лічильник має дві шкали: велику і малу. За малою рахуються сотні, а за великою - десятки і одиниці. На кожному тератроні є цифра, яка показує число імпульсів, що їх нарахував тератрон. Тератрони можуть нарахувати 99 імпульсів. Як тільки на тератрон буде поданий сотий імпульс, велика стрілка лічильника перейде на одну поділку. Якщо, наприклад через одну хвилину підрахунку маленька стрілка зупинилася між цифрами 1 і 2, а велика стрілка показує 25, то лічильник нарахував  $125 \times 100$  імпульсів. До цього числа потрібно додати число імпульсів, що їх дають тератрони, які горять. Наприклад, залишилися горіти тератрони з числами - 40, 20, 3 і 1, які дають в сумі 64 імпульси. Тоді загальна кількість імпульсів буде:  $I = 125 \times 100 + 64 = 12564$ .

6. Поставити на нуль секундомір натисненням на кнопку 4, а натисненням на кнопку поставити на нуль лічильник 1.

7. Визначити початкову інтенсивність  $I_0$ , тобто інтенсивність до поглинаючого шару. Для цього вимкнути установку із мережі, повертаючи ручку перемикача 11 в положення «выкл.». Відкрити бічну стінку свинцевого контейнера, зняти верхню кришку з кювети радіоактивної речовини і поставити відкриту кювету в каретку під середину лічильника Гейгера-Мюллера . Закрити стінку контейнера. Ввімкнути установку і виміряти інтенсивність  $I_0$ , як було зазначено в пункті 5.

8. Визначити інтенсивність  $\gamma$ - променів і після проходження поглинаючого шару товщиною  $x$ . При цьому знову ввімкнути установку, відкрити бічну стінку і на підставку з оргскла покласти найтоншу пластинку свинцю, вимірявши перед цим її товщину  $x$ . Закрити контейнер, ввімкнути установку і протягом однієї хвилини визначити інтенсивність  $I_1$ . Таким чином визначити інтенсивність  $I_2, I_3, I_4, I_5$  для пластинок свинцю товщиною  $x_2, x_3, x_4, x_5$ .

При кожному вимірюванні інтенсивностей  $I$  і  $I_0$  із одержаних значень на лічильнику потрібно відняти значення  $I_{\phi}$ .

10. Потрібні вимірювання провести для кожних п'яти пластинок алюмінію і вініпласту, починаючи з найтонших. Результати вимірювання записати в таблицю:

№ п/п	Свинець		Алюміній		Вініпласт	
	X	I	X	I	X	I
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

Відключити від мережі кабель живлення, перемикач 11 перевести в положення «выкл.», закрити кришкою кюветку з радіоактивною речовиною, закрити свинцевий контейнер, стрілки лічильника і секундоміра поставити на нуль.

### Контрольні запитання

1. Що називається радіоактивністю?
2. Що являють собою  $\alpha$ -,  $\beta$ - частинки,  $\gamma$ - промені і які властивості вони мають?
3. Якими одиницями вимірюється доза радіоактивного випромінювання?
4. За яким законом відбувається зменшення інтенсивності  $\gamma$ - променів при проходженні через речовину?
5. Будова і робота лічильника Гейгера-Мюллера.

### Лабораторна робота № 405

#### ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ОДНОСТОРОННЬОЇ ПРОВІДНОСТІ

**Мета роботи** : побудова вольт-амперної характеристики селенового випрямляча; визначення коефіцієнта випрямлення  $k$ ; опорів селенового випрямляча в пропускному та запірному нарядках.

**Прилади і матеріали** : селеновий випрямляч, міліамперметр з різними межами вимірювань, вольтметр, потенціометр, перемикач.

#### Основні теоретичні формули

Випрямлячем називають прилад, який має властивість односторонньої провідності, тобто може змінний струм перетворити в постійний.

Розглянемо явища, які виникають

в місці контакту діркового А і електронного В напівпровідників (рис. 5.1). При контакті виникає дифузія електронів із напівпровідника В в дірковий напівпровідник А і дифузія дірок із напівпровідника А в напівпровідник В. У результаті цього приконтатний шар електронного напівпровідника буде заряджений додатно, а діркового напівпровідника - від'ємно. При цьому виникає контактне поле напруженістю  $E_0$ , яка протидіє продовженню переходу електронів і дірок через контакт.

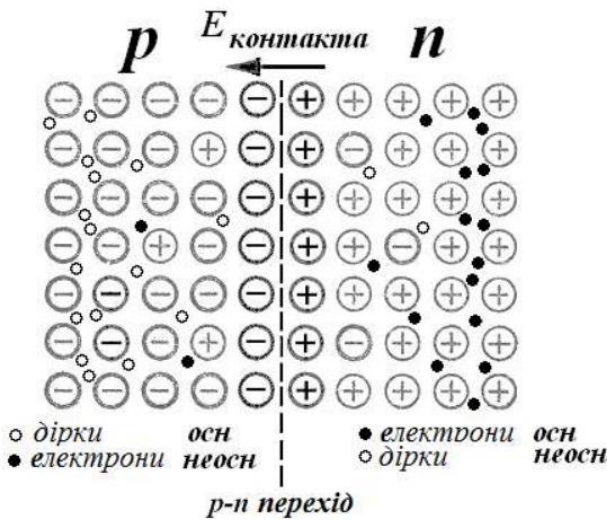


Рисунок 5.1

Таким чином на місці контакту виникає шар, товщина якого  $d$ , збіднений основними носіями струму, названий запірним. Питомий електричний опір шару  $d$  значно більший від питомого опору самих напівпровідників А і В, що прилягають до цього шару з обох сторін, незважаючи на малу товщину шару  $d$  (близько  $10^{-5}$  см).

Якщо на запірний шар накласти зовнішнє електричне поле  $E_1$  (рис. 5.2) такого ж напрямку, як і контактне поле  $E_0$ , то загальне поле збільшиться, тобто  $E = E_1 + E_0 > E_0$ . Основні носії зарядів будуть віддалятися від межі контакту, що приведе до збільшення товщини запірного шару  $d_1$ . Опір запірного шару стане ще більшим, і він зможе пропускати лише дуже малий струм, який називають запірним.

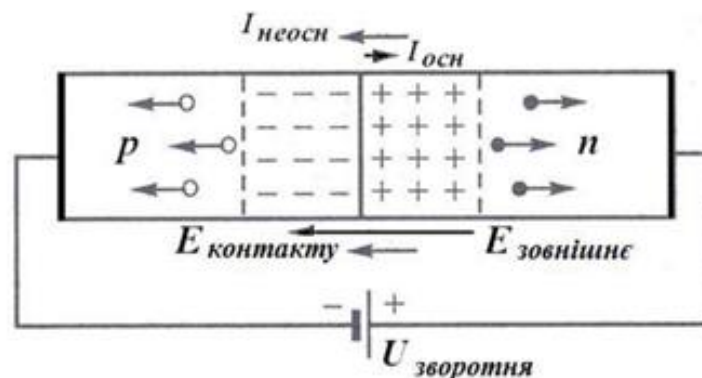


Рисунок 5.2

При прикладанні на запірний шар зовнішнього електричного поля направлено в сторону, протилежну напрямку контактного поля  $E_0$  (рис. 5.3),

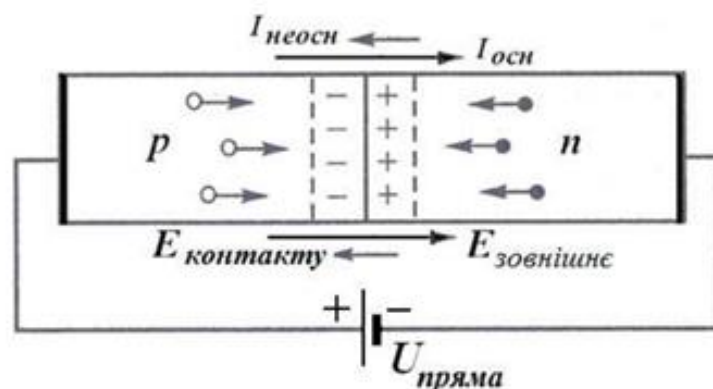


Рисунок 5.3

загальне поле  $E$  за величиною стане меншим від  $E_0$ , тобто  $E = E_0 - E_2 < E_0$ .

При цьому товщина запірного шару  $d_2$  зменшиться. Продовжуючи збільшувати зовнішнє поле  $E_2$ , можна досягти такого стану, коли товщина запірного шару стане рівною нулю. Це відбувається за умови, коли зовнішнє поле  $E_2$  повністю компенсує контактне поле  $E_0$ , тобто  $E_2 = E_0$ . За цієї умови загальне електричне поле на межі розділу напівпровідників А і В стане рівним нулю. Електрони і дірки підійдуть щільно до межі розділу. Це означає, що запірний шар зникне і в електричному полі залишаються тільки опори напівпровідників А і В. Якщо ж зовнішнє поле  $E_2$  буде збільшуватися і далі, то електрони і дірки перейдуть через межу розділу і створять струм, який буде збільшуватись із збільшенням напруги. Його називають пропускним струмом, а напрям струму називають пропускним напрямом.

Відношення струму в пропускному напрямі до струму в запірному напрямі при одній і тій же напрузі зовнішнього поля характеризує випрямні властивості системи і називається коефіцієнтом випрямлення. Для напівпровідникових контактів пропускний струм приблизно в тисячу разів більший від запірного, тобто :

$$k = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{зап}}} \approx 1000.$$

### Опис установки

В даній роботі використовується селеновий випрямляч. Розглянемо його будову. Тонкий випрямляючий диск D із м'якої сталі покривається шаром нікелю N. На нікельовану поверхню диска наноситься тонкий (0,1 мм) шар селену А, який є анодом. На шар селену наносять верхній електрод К, який є катодом. Він являє собою металевий сплав, що складається із вісмуту, кадмію, олова. Все це разом називається селеновою шайбою. Для утворення запірного шару  $d$  шайбу піддають формовці. В процесі формовки на поверхні селену

виникає тонкий шар селенистого кадмію, який має електронну провідність. Сам селен має діркову провідність. Запірний шар  $d$  з'являється на межі між селеном і селенистим кадмієм.

Основні електричні параметри селенових випрямлячів - робоча напруга і дозволена сила струму в пропускнутому напрямі. Для всіх типів селенових шайб робоча напруга однакова, не перевищує 11...18 В. Дозволена сила струму через шайбу визначається її площиною і не повинна перевищувати 50 мА на 1 см<sup>2</sup> площини шайби. Для одержання випрямлених напруг більше 18 В селенові шайби з'єднують послідовно, нанизуючи їх на металевий стрижень з ізолюючим циліндром. Для охолодження повітрям шайби розділяють металевими прокладками і стискають гайками. Одержуються селеновий стовпчик. В даній роботі селеновий стовпчик складається із восьми селенових шайб.

Напруга на селеновий стовпчик подається з потенціометра і вимірюється вольтметром. Струм вимірюється міліамперметром. Для вимірювання пропускнутого струму приєднуються затискачі "-" і "75 мА", а для вимірювання запірного струму - затискачі "-" і "3 мА". Напруга на потенціометр подається від випрямляча, що живиться від мережі змінного струму.

### Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути випрямляч, що живить схему. Перемикачем ввімкнути пропускнутий напрям струму, при цьому "+" перемикача повинен бути з'єднаним з червоною клемою селенового стовпчика.
2. Міняючи потенціометром напругу на селеновому стовпчику, виміряти силу пропускнутого струму  $I_{пр}$  при напругах, вказаних в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

U, В	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
$I_{пр}$ , мА											

3. Ввімкнути перемикачем К запірний напрям напруги, повернувши перемикач у протилежний бік.
4. Змінюючи потенціометром напругу на селеновому стовпчику, виміряти силу запірного струму  $I_{зап}$  при напругах, що вказані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2.

U, В	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18
$I_{зап}$ , мА									

6. Побудувати графік залежності струму, що проходить через селеновий стовпчик, від величини і напрямку прикладеної напруги.

7. Визначити коефіцієнт випрямлення  $K$  для струмів, взятих при напрузі 4В.
8. Визначити опір селенового стовпчика в пропускному і запірному напрямках:  
 $R_{\text{пр}} = \frac{U}{I} - R' \text{ мА}; R_{\text{зап}} = \frac{U}{I} - R'' \text{ мА}$ . Значення опору міліамперметра в пропускному  $R' \text{ мА}$  і запірному  $R'' \text{ мА}$  напрямках вказані на робочому місці. Напругу  $U$  і струм  $I$  потрібно брати посередені прямолінійної ділянки вольт-амперної характеристики.

### Контрольні запитання

1. Які види провідності бувають у напівпровідників ?
2. Як утворюється запірний шар і яку властивість він має ?
3. Що називається коефіцієнтом випрямлення ?
4. Будова і принцип дії селенової шайби.
5. Що називається вольт-амперною характеристикою селенового стовпчика?

### Лабораторна робота № 406

#### ВИВЧЕННЯ ФОТОЕЛЕМЕНТА ІЗ ЗАПІРНИМ ШАРОМ

**Мета роботи:** зняття світлової характеристики фотоелемента і визначення його інтегральної та спектральної чутливості.

**Прилади і матеріали:** джерело світла (лампа розжарення), фотоелемент із запірним шаром типу СФ-10, мікроамперметр, вимірювальна лінійка.

#### Основні теоретичні формули

Фотоелементи - це прилади, в яких світлова енергія перетворюється в електричну. Фотоелементи є вакуумні і з запірним шаром. Вакуумні фотоелементи побудовані на зовнішньому фотоелементі. Для їх роботи потрібна зовнішня е.р.с.

Фотоелементи із запірним шаром побудовані на внутрішньому фотоелементі, який належить до внутрішнього фотоелементу. Вентильні фотоелементи працюють без зовнішньої е.р.с.

У даній роботі використовується селеновий фотоелемент із запірним шаром типу СФ-10, схематично зображений на рис. 6.1, де 1- позитивний електрод, 2 - напівпрозорий шар металу (золото), 3 - селен, 4 - металева підкладка - від'ємний електрод. Фотоелемент складається із напівпровідника - 3, яким є селен, нанесений на металеву підкладку - 4. Металева підкладка є від'ємним електродом фотоелемента. Другим додатним електродом є металеве кільце - 1, з'єднане з напівпрозорим тонким шаром металу (золото) - 2. Метал 2 наноситься на напівпровідник тонким напівпрозорим шаром, щоб він міг пропускати світло до напівпровідника 3. Між плівкою металу 2 і напівпровідником 3 утворюється так званий запірний шар, який має

властивість пропускати електрони тільки в одному напрямі - від плівки металу 2 до напівпровідника 3, і не пропускати їх в протилежному напрямі. Напівпровідник 3 має діркову провідність. Світло, потрапляючи на напівпровідник через напівпрозору плівку, вириває із його атомів електрони, які закріплюються на атомах домішок, створюючи дірки. Електрони із металу 2 вільно проходять через запірний шар в напівпровідник 3 і заповнюють дірки. Електрод 1, з'єднаний з плівкою металу 2, заряджається позитивно, а електрод 4 - негативно.

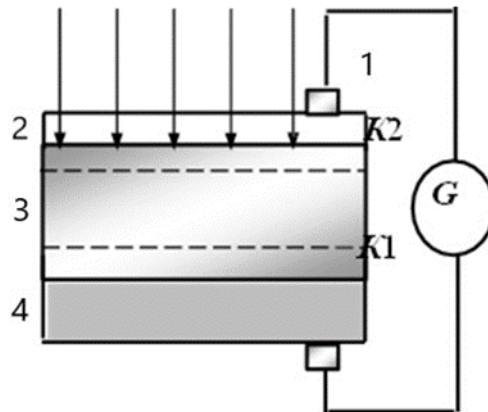


Рисунок 6.1

Зворотний перехід для електронів не завжди можливий, оскільки різниця потенціалів в запірному шарі перешкоджає йому. Якщо замкнути зовнішнє коло, то в ньому піде струм  $i_{\phi}$ , величина якого буде пропорційна кількості світла, що потрапляє на межу розділу металу і напівпровідника.

Залежність  $i_{\phi}$  від освітленості  $E$  має нелінійний характер, і ця нелінійність збільшується із збільшенням освітленості. Вибираючи для роботи той чи інший фотоелемент, потрібно перш за все цікавитися його експлуатаційними даними. Одним із таких експлуатаційних даних є чутливість фотоелемента, тобто здатність його реагувати на дію світла. Чутливість фотоелемента вимірюється в мікроамперах на люмен (мкА/Лм) і показує, якої величини струм в мікроамперах виникає в фотоелементі при дії на нього одиниці світлового потоку (1 люмен).

Чим більший струм виникає в фотоелементі при дії однакового світлового потоку, тим більша чутливість фотоелемента. Кожний фотоелемент характеризується двома видами чутливості : інтегральною і спектральною. Інтегральна чутливість характеризує чутливість фотоелемента до білого світла і виражається формулою :

$$a = \frac{i_{\phi}}{\Phi}, \quad (6.1.)$$

де  $i_{\phi}$  - величина фотоструму при дії потоку білого світла;  $\phi$  - повний потік білого світла, що падає на відкриту поверхню фотоелемента.

Спектральна чутливість фотоелемента до світлового потоку відповідної довжини хвилі (відповідного кольору - червоного, жовтого, зеленого тощо) :

$$a_{\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{\Phi_{\lambda}}, \quad (6.2.)$$

де  $i_{\phi\lambda}$  - величина фотоструму при дії монохроматичного світла потоком  $\phi_{\lambda}$ . Як видно із формули (6.1.) і (6.2.), для визначення чутливості необхідно знати величину струму  $i_{\phi}$  і світлового потоку  $\phi$ . Фотострум вимірюється мікроамперметром, а світловий потік можна визначити із виразу

$$\Phi = E \cdot S. \quad (6.3.)$$

Освітленість визначається із закону освітленості за формулою

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (6.4.)$$

де  $I$  - сила світла джерела;  $r$  - віддаль від джерела світла до фотоелемента.

Площа, на яку падає світловий потік :

$$S = \pi R^2, \quad (6.5.)$$

де  $R$  - радіус відкритої поверхні фотоелемента. Тоді світловий потік

$$\Phi = E \cdot S = \frac{I}{r^2} \pi R^2. \quad (6.6.)$$

Підставивши значення світлового потоку із (6.6) в (6.1) і (6.2) одержимо вирази :

$$\text{для інтегральної чутливості : } \alpha = \frac{i_{\phi}}{\Phi} = \frac{i_{\phi} \cdot r^2}{I \pi R^2}; \quad (6.7.)$$

$$\text{для спектральної чутливості : } \alpha = \frac{i_{\phi\lambda}}{\Phi_{\lambda}} = \frac{i_{\phi\lambda} \cdot r^2}{I_{\lambda} \cdot \pi \cdot R^2}. \quad (6.8.)$$

Інтегральна чутливість у фотоелементів із запірним шаром значно більша, ніж у фотоелементів із зовнішнім фотоэффектом (вакуумних). Наприклад, максимальна чутливість для фотоелементів, мкА/Лм : вакуумних - 120, селенових - 400-600, сірчано-срібних - 8000, германієвих - 30000.

Фотоелементи із запірним шаром знаходять широке використання як перетворювачі сонячної енергії в електричну, як сонячні батареї для живлення радіоапаратури штучних супутників Землі, різні датчики тощо. Основний недолік напівпровідникових фотоелементів із запірним шаром - їх велика інертність, обумовлена, головним чином, їх власною ємністю.

### Опис установки

Установка для виконання роботи складається із циліндричної камери 4 на підставці, з лівої бічної сторони якої нерухомо закріплене джерело світла 1. Джерелом світла є електрична лампа розжарення силою світла 18 кд (рис. 6.2).

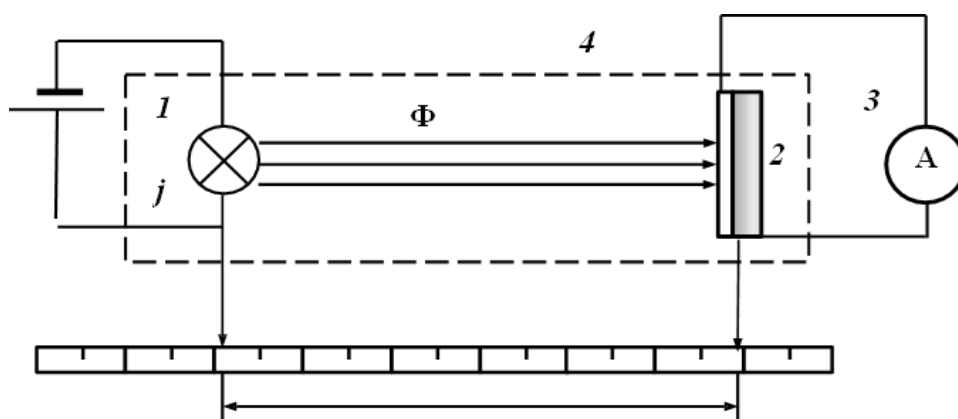


Рисунок 6.2

Всередині камери на оптичній лаві знаходиться фотоелемент 2 із запірним шаром типу СФ-10, який може пересуватися вперед і назад по оптичній лаві відносно джерела струму. Із фотоелементом жорстко зв'язаний показчик, за допомогою якого проводиться відлік відстані  $r$  від джерела світла до фотоелемента по шкалі. Величина фотоструму вимірюється за допомогою мікроамперметра 3. Для визначення спектральної чутливості перед джерелом світла необхідно поставити світлофільтр.

### Порядок виконання роботи

1. Перемістити фотоелемент 2 в крайнє праве положення. Ввімкнути електричну лампу 1 без світлофільтра.
2. За допомогою показчика визначити відстань  $r$ , а величину струму  $I_{\phi}$  виміряти за допомогою мікроамперметра 3.
3. Пересуваючи фотоелемент у напрямі джерела світла, через кожні 10 см вимірювати  $r$  і  $I_{\phi}$ . При вимірюваннях дивитися, щоб стрілка мікроамперметра не відхилялася за межі шкали. Таких вимірювань  $r$  і  $I_{\phi}$  зробити не менше

семи. Потім проробити те ж саме, переміщуючи фотоелемент в зворотному напрямі, і визначити  $r_{сер}$  і  $I_{ф сер}$  при одній і тій же відстані від джерела світла до фотоелемента. Дані вимірювань занести в таблицю:

№ п/п	Відстань $r$ в м		$r_{сер}$ , м	Величина струму		$I_{ф сер}$ , мкА	Освітленість Е, лк
	вперед	назад		вперед	назад		

- Для кожного значення  $r$  обчислити освітленість в люксах і побудувати світлову характеристику, тобто графік залежності  $I_{ф} = f(E)$ .
- За формулою (6.7) при трьох різних відстанях визначити інтегральну чутливість фотоелемента  $a$  і знайти середнє значення  $a_{сер}$ .
- Витягнути лампу з футляром із камери, надіти світлофільтра 5 і вставити лампу знову в камеру.
- При трьох значеннях  $r_1, r_2, r_3$  зафіксувати за мікроамперметром значення  $I_{ф\lambda 1}, I_{ф\lambda 2}, I_{ф\lambda 3}$  для червоного і зеленого світлофільтра I, за формулою (6.8.) визначити спектральну чутливість  $\alpha$  фотоелемента для червоного і зеленого світла. Радіус освітленої поверхні фотоелемента  $R = 1,7$  см. Сила світла спектральних джерел  $I_r$  і  $I_3$  дається на робочому місці.

### Контрольні запитання

- В чому суть фотоефекту ?
- Види фотоефекту.
- Фотоефект якого виду спостерігається в даній роботі ?
- Будова фотоелемента із запірним шаром.
- Що називається освітленістю, силою світла і світловим потоком ? Якими одиницями вони вимірюються ?
- Закон освітленості.
- Що називається чутливістю фотоелемента ? Яких видів вона буває ?
- Якими одиницями вимірюється чутливість ?
- Виведіть робочу формулу для визначення чутливості фотоелемента.

## Лабораторна робота № 407

### ВИВЧЕННЯ ФОТООПОРУ

**Мета роботи :** зняття спектральної характеристики фотоопору і визначення ширини забороненої зони.

**Прилади і матеріали :** джерело напруги, джерело світла, конденсор, монохроматор, фотоопір, мікроамперметр.

#### Основні теоретичні відомості

В кристалічних твердих тілах електрони можуть приймати тільки такі значення енергії, які відповідають дозволеним станам або дозволеним зонам. Більшість явищ взаємодії світла і речовини можна пояснити, враховуючи тільки дві дозволені зони енергії (рис. 7.1.): валентну (V-зону), яка в основному заповнена електронами, і зону провідності (С-зону), в основному вільну від електронів у напівпровідниках. Зони дозволених енергій розділені забороненою зоною шириною  $E_3$ , що дорівнює мінімальній енергії, яка потрібна для переведення електрона із валентної зони в зону провідності.

У напівпровідників значення  $E_3$  знаходиться в межах десятих часток електрон-вольта до 3 еВ ( $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Фоторезистором називається напівпровідниковий прилад, опір якого змінюється при його освітленні. В неосвітленому напівпровіднику електропровідність зумовлена електронами в С-зоні і дірками в V-зоні. В цьому випадку носії струму називаються рівноважними. Питома електропровідність  $\sigma_0$  при цьому буде виражатися формулою :

$$\sigma_0 = e(n_0 U_n + p_0 U_p), \quad (7.1.)$$

де  $e$  - заряд електрона;  $n_0$ ,  $p_0$  - концентрація рівноважних електронів і дірок;  $U_n$ ,  $U_p$  - рухливість електронів і дірок.

Фоторезистори виготовляють із широкозонних напівпровідників з  $E_3=1\text{eV}$  (CdS, CdSe, CoAs, PbSi др.), у яких концентрація рівноважних носіїв струму при кімнатній температурі не перевищує  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Якщо величина енергії кванта світла  $h\nu \geq E_3$ , то поглинання такого кванта

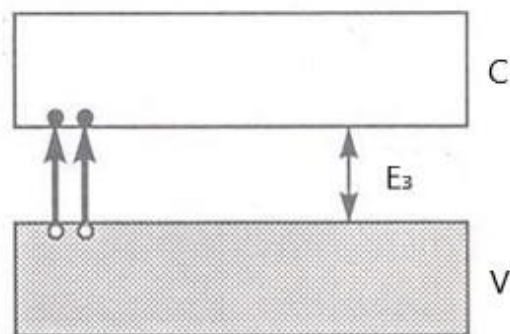


Рисунок 7.1

матеріалом фоторезистора супроводжується переходом електрона із валентної зони в зону провідності, тобто приводить до збільшення концентрації носіїв струму. Ці носії називаються нерівноважними. Нехай інтенсивність світла, що падає на напівпровідниковий кристал є одиниця. Тоді кількість поглинутої енергії  $dI$  за одиницю часу в шарі товщиною  $dx$  і одиничною площею пропорційна  $I$  і товщині шару  $dx$ , буде

$$-dI = kI dx, \quad (7.2.)$$

де  $k$  - коефіцієнт поглинання. Із формули (2) знайдемо кількість енергії поглинутої в одиниці об'єму :

$$-\frac{dI}{dx} = kI. \quad (7.3.)$$

Якщо енергія кванта  $h\nu$ , то кількість квантів світла, які поглинуті в одиниці об'єму кристала за одиницю часу,  $N = \frac{kI}{h\nu}$ .

Кількість утворених в одиниці об'єму за одиницю часу електронів  $\Delta n$  і дірок  $\Delta p$  пропорційна  $N$ :

$$\Delta n = \Delta p = \beta \frac{kI}{h\nu}, \quad (7.4.)$$

де  $\beta$  - квантовий вихід, який показує, скільки вільних носіїв заряду виникає при поглинанні одного фотона. Як правило,  $\beta < 1$ . Це означає, що не кожний поглинутий фотон приводить до створення пари вільних носіїв струму. При відсутності рекомбінації число надлишкових нерівноважних носіїв безперервно збільшувалось би з часом.

Внаслідок рекомбінації, швидкість якої збільшується із зростанням концентрації нерівноважних носіїв, у напівпровіднику установиться стаціонарний стан, якому буде відповідати постійна концентрація надлишкових носіїв  $n_\phi$  і  $p_\phi$ . Оскільки надлишкові носії мають практично таку ж рухливість, як і рівноважні носії, то аналогічно рівноважній провідності, стаціонарна фотопровідність напівпровідника :

$$\sigma_\phi = e(n_\phi U_n + p_\phi U_p) \quad (7.5)$$

Загальна провідність напівпровідника складається із рівноважної провідності  $\sigma_0$  і фотопровідності  $\sigma_\phi$  :  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_\phi$ .

Практично  $\sigma_\phi \gg \sigma_0$  і тоді  $\sigma \approx \sigma_\phi$ . Концентрація неосновних носіїв струму залежить від швидкості їх рекомбінації або часу життя - часу від моменту їх народження до моменту зникнення. Для стаціонарного стану швидкість

генерації носіїв струму  $\Delta n$ ,  $\Delta p$ , що обумовлена освітленням, дорівнює швидкості їх рекомбінації  $\frac{n_{\phi}}{\tau_n}$ ,  $\frac{p_{\phi}}{\tau_p}$ , тому:

$$n_{\phi} = \tau_n \Delta n, \quad p_{\phi} = \tau_p \Delta p. \quad (7.6.)$$

Час життя неосновних носіїв струму  $\tau_n$  ( $\tilde{C}_p$ ) залежить від механізму рекомбінації і визначається концентрацією центрів рекомбінації (домішкових атомів і дефектів кристалічної решітки).

Збільшення концентрації неосновних носіїв при заданому потоці падаючих світлових квантів  $\frac{I}{h\nu}$ , як впливає із формули (7.2), визначається величиною квантового виходу і коефіцієнтом поглинання. А коефіцієнт поглинання дуже залежить від частоти. Це зв'язано з тим, що основні переходи, які залежать від забороненої зони, можуть відбуватися при поглинанні фотонів, енергія яких відповідає таким переходам.

Крім переходу електронів з валентної зони у зону провідності, у домішкових напівпровідниках участь в утворенні неосновних носіїв струму приймають домішкові енергетичні рівні у забороненій енергетичній зоні (рис. 7.2).

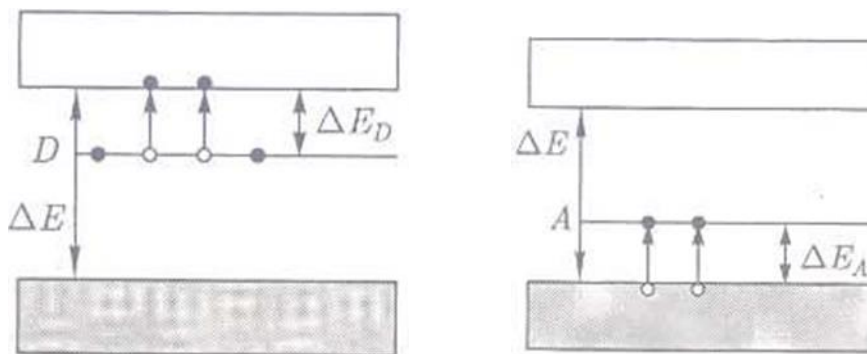


Рисунок 7.2

### Опис установки

В установку входять : джерело напруги, джерело світла, а також конденсор, монохроматор, мікроамперметр.

Освітлення фотоопору здійснюється монохроматором (рис. 7.3), джерелом світла, для якого служить лампа розжарення Л. Конденсор К служить для фокусування спіралі лампи на вхідну щілину 1 монохроматора. Ширина вхідної щілини регулюється мікрометричним гвинтом 2. У вікні передньої

частини монохроматора видно шкалу 3 з рухомих показчиком. За поділками шкали і градуювальним графіком визначається довжина хвилі світла, що виходить із щілини 4. Ширина цієї щілини регулюється гвинтом 5. Маховик 8 служить для повертання дифракційної решітки і одержання відповідної довжини хвилі. На вихідному отворі монохроматора закріплено фотоопір 6. Величина фотоструму вимірюється мікроамперметром 7.

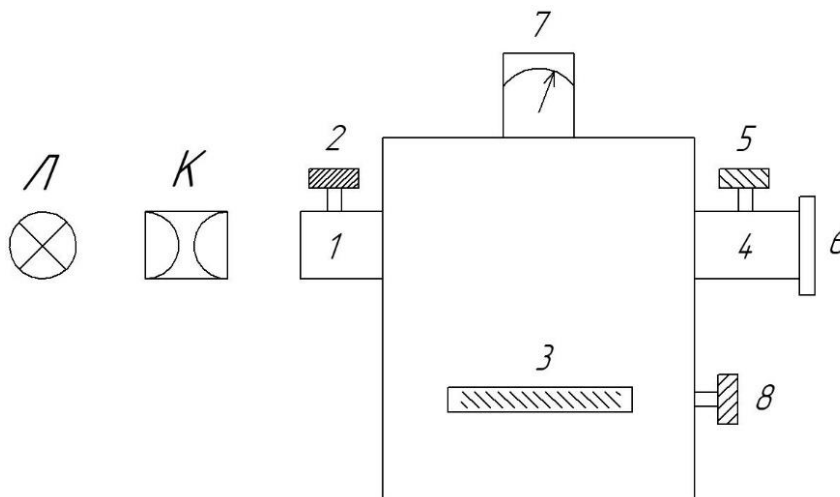


Рисунок 7.3

### Порядок виконання роботи

1. Розглянути установку і впевнитися в її робочому стані.
2. Увімкнути джерело світла і джерело напруги (з дозволу викладача).
3. Впевнитися, що нитка розжарення сфокусована конденсором на поверхню кришки вхідної щілини монохроматора.
4. Встановити напругу, яка вказана на установці.
5. Відкрити вхідну щілину монохроматора.
6. Повільно переміщуючи маховик 8 в межах поділок 380-800, виміряти і записати силу струму через кожні 50 поділок. У ділянці зменшення фотоструму із збільшенням номера поділок шкали вимірювання струму здійснювати через 10-15 поділок.
7. За градуювальним графіком монохроматора визначити довжини хвиль, відповідних поділкам шкали, для яких виміряні значення фотоструму.
8. Побудувати графік залежності фотоструму від довжини хвилі.
9. Екстраполяцією спадаючої вітки графіка визначити довжину хвилі межі фотоефекту  $\lambda_r$ .
10. За формулою  $E_z = hc/\lambda_k$  визначити ширину забороненої зони напівпровідника фотоопору (в електрон-вольтах).

## Контрольні запитання

1. Пояснити явище фотопровідності.
2. Яку роль у фотопровідності відіграє рекомбінація неосновних носіїв струму ?
3. Пояснити залежність фотопровідності від довжини хвилі.
4. Який принцип роботи дифракційного монохроматора ?

## 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.