



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Т. В. Лютий, О. С. Денисова

## ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ з ФІЗИКИ

для напрямку підготовки 6.040106 -  
екологія, охорона навколишнього  
середовища та збалансованого  
природокористування

ЧАСТИНА 3



Навчальний посібник



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Т. В. Лютий, О. С. Денисова**

## **Лабораторний практикум із фізики**

*Рекомендовано вченою радою  
Сумського державного університету  
як навчальний посібник*

Суми  
Сумський державний університет  
2012

2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс фізики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике: в 3 т. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 8 т. Том 5. Атомная физика. – М.: Наука, 1980.

## Графік виконання лабораторних робіт

### III модульний цикл

Номер бригади	Тиждень 1	Тиждень 2	Тиждень 3	Тиждень 4	Тиждень 5	Заліковий тиждень
I	11	12	13	14	13	13
II	11	12	13	14	13	13
III	12	13	13	14	11	13
IV	12	13	13	14	11	13
V	13	11	15	14	13	13
VI	13	11	15	14	13	13
VII	11	15	13	14	12	13
VIII	11	15	13	14	12	13

*13* – індивідуальний захист виконаних лабораторних робіт

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Умови досліджу	№ вимірювання	Показання лічильника $I_i$	$\Delta I_{ij} = \langle I_i \rangle - I_{ij}$	Кількість імпульсів без фону $I_i - I_\phi$	$\ln \frac{I_0 - I_\phi}{I_i - I_\phi}$	$l$ , мкм	
Нульовий фон ( $i \equiv \phi$ )	1			0	-		
	2						
	3						
	4						
	5						
	$\langle \dots \rangle$						
З препаратом без пластин ( $i \equiv 0$ )						0	
З 1 пластиною ( $i \equiv 1$ )						$1 \cdot \langle I_0 \rangle$	
...						...	
З $N_{\max}$ пластинами ( $i \equiv N_{\max}$ )						$N_{\max} \cdot \langle I_0 \rangle$	
$l_{01} =$	$l_{02} =$	$l_{03} =$	$l_{04} =$	$l_{05} =$	$\langle l_0 \rangle =$	$\Delta_1 L =$ 5 мкм	$\Delta_2 L =$

- де  $N_i$  – кількість вимірювань. Результати занесіть до таблиці 1.
- Відніміть середнє значення величини фону від середніх значень показань лічильника для випадків із препаратом. Заповніть решту таблиці 1.
  - За результатами вимірювань побудуйте графік, як показано на рисунку 4.
  - Визначте коефіцієнт поглинання матеріалу за формулою (10).
  - Знайдіть похибку визначення  $\mu$  за формулою (11). Врахуйте, що похибка  $\Delta L$  визначається у відповідності до виразу (13), а похибки  $I_0, I_\phi$  визначаються згідно з виразом (14).
  - Зробіть висновки до лабораторної роботи.

4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	50
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ .....	52
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	53
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	54
<b>Лабораторна робота 15. ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....</b>	<b>55</b>
1. МЕТА РОБОТИ.....	55
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	55
2.1. Радіоактивність .....	55
2.2. Дія радіоактивного випромінювання на біологічні об'єкти .....	57
2.3. Закон Бугера .....	60
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ .....	61
4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	61
4.1. Лічильник Гейгера-Мюллера .....	61
4.2. Методика визначення коефіцієнта поглинання .....	63
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	64
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	67
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	67

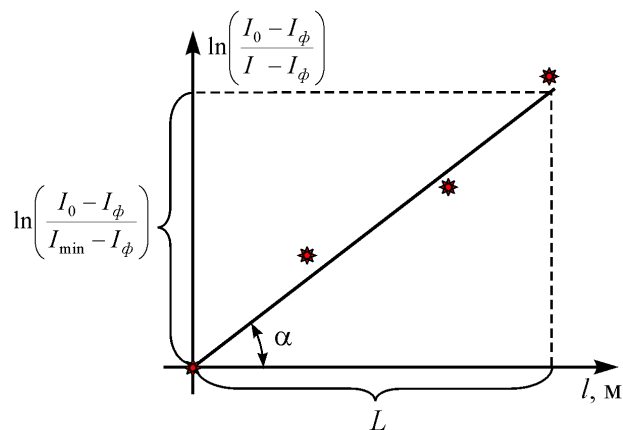


Рисунок 4 – Графік, що пояснює методику визначення коефіцієнта поглинання речовини за експериментальними даними з поглинання радіоактивного випромінювання

$$\Delta\mu = \mu \left\{ \frac{\Delta L}{L} + \left[ \ln \left( \frac{I_0 - I_\phi}{I_{\min} - I_\phi} \right) \right]^{-1} \times \left[ \frac{\Delta I_\phi (I_{\min} + I_0 - 2I_\phi)}{(I_{\min} - I_\phi)^2} + \frac{\Delta I_0}{I_{\min} - I_\phi} \right] \right\}, \quad (11)$$

де  $\Delta I_\phi$ ,  $\Delta I_0$  - відповідно похибки визначення нульового фону та інтенсивності радіоактивного препарату без поглинаючих пластин. Ці похибки мають лише випадкові складові. Похибка визначення загальної товщини пластин  $\Delta L$  містить як систематичну (інструментальну), так і випадкову складові. Величина  $I_{\min}$  визначається за допомогою знайденого з рисунка значення  $\ln[(I_0 - I_\phi)/(I_{\min} - I_\phi)]$ .

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся із попередніми розділами даної лабораторної роботи та будовою установки.
2. Увімкніть установку в електричну мережу.

рні, що супроводжується випромінюванням електромагнітних хвиль. Спектр такого випромінювання може охоплювати інфрачервону, видиму та ультрафіолетову області.

У процесі випромінювання тіло втрачає теплову енергію та охолоджується. Для підтримання температури на сталому рівні необхідно брати енергію ззовні – за рахунок нагрівання електричним струмом, зовнішнім джерелом тепла та ін. Якщо температура тіла, що випромінює, стала – це означає, що воно знаходиться в стані **термодинамічної рівноваги**, який є особливістю саме теплового випромінювання.

Для кількісного опису теплового випромінювання вводяться такі характеристики.

**Потік енергії** – енергія, що випромінюється з усієї поверхні тіла за одиницю часу

$$\Phi = \frac{dW}{dt}. \quad (1)$$

**Енергетична світність** – потік енергії, що випромінюється з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках у напівпростір

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dS \cdot dt}. \quad (2)$$

Зважаючи на складний механізм теплового випромінювання, воно складається із великої кількості монохроматичних електромагнітних хвиль різної довжини. Весь діапазон довжин таких хвиль називають **спектром випромінювання**. При цьому амплітуди хвиль спектра не повинні бути однаковими. Відомо, що енергія, яка переноситься монохроматичною хвилею, пропорційна квадрату її амплітуди. Відповідно внесок у загальну енергію, що випромінюється тілом, від хвиль різних довжин буде різним. Для того щоб охарактеризувати даний внесок, використовують так звану **випромінювальну здатність** або **спектральну густину енергетичної світності** – величину, яка за даної температури  $T$  визначає потік енергії  $d\Phi_{\lambda T}$ , що випромінюється з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках в *одиночному* діапазоні довжин хвиль

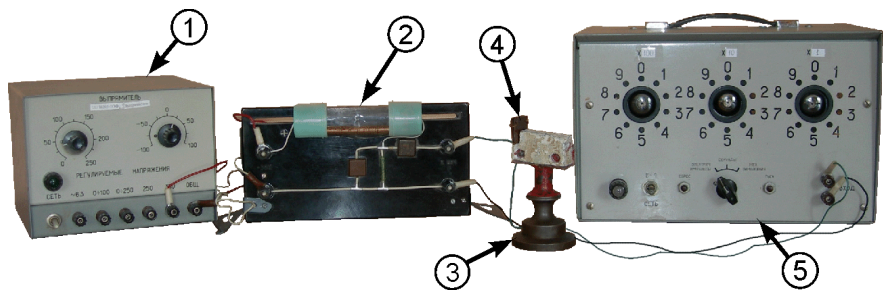


Рисунок 2 – Видгляд лабораторної установки: 1– блок живлення; 2 – лічильник Гейгера-Мюллера; 3 – штатив з радіоактивним препаратом; 4 – металеві поглинаючі пластини; 5 – лічильник імпульсів

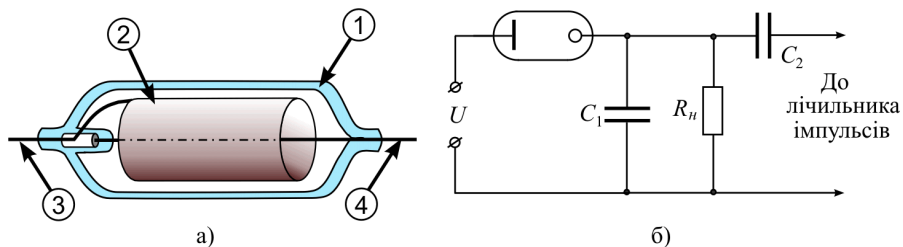


Рисунок 3 – Будова робочої частини лічильника Гейгера-Мюллера (а): 1 – скляна герметична колба; 2 – катод; 3 – вивід катода; 4 – анод. Принципова схема лічильника Гейгера-Мюллера (б)

коло замикається, і вся зовнішня напруга падає на баластному опорі  $R_n$  (див. рис. 3б). Сигнал з останнього через конденсатор  $C_2$  подається на лічильник імпульсів 5, показання якого збільшуються на одиницю. У той самий час напруга на діоді різко зменшується, струм припиняється і лічильник знову готовий до роботи. Таким чином, лічильник буде рахувати кількість іонізуючих частинок, що потрапляють у простір між анодом і катодом. Конденсатори  $C_1$  та  $C_2$  у схемі (див. рис. 3б) відіграють допоміжну роль.

Лічильник Гейгера-Мюллера має практично стовідсоткову ймовірність реєстрації однієї частинки, оскільки для виникнення розряду достатньо однієї електрон-іонної пари. Однак тривалість реєстрації лічильника порівняно велика ( $\sim 10^{-4}$  с). Саме цей час потрібен для того, щоб повільні позитивні іони від анода дійшли до катода та відновили чутливість детектора.

Для зручності теоретичного опису теплового випромінювання використовують абстрактне поняття **абсолютно чорного тіла**. Таким тілом вважають об'єкт, який поглинає все падаюче на нього випромінювання незалежно від діапазону довжин хвиль та температури; для нього  $a_{\lambda T} \equiv 1$ . Зручність даної моделі в тому, що згідно з (6) випромінювальна здатність для абсолютно чорного тіла є *незалежною* від його природи. Зауважимо, що абсолютно чорних тіл у природі не існує. Максимально близькими до них можна вважати тіла з різко неоднорідною поверхнею, яка передбачає багатократне відбивання електромагнітної хвилі. Під час кожного відбивання її енергія буде втрачатися, а ймовірність її повного поглинання пропорційна до кількості відбивань.

Для багатьох тіл спектр випромінювання є подібним до спектра абсолютно чорного тіла. При цьому поглинальна здатність тіла не залежить від довжини хвилі, тобто  $a_{\lambda T} \equiv a_T$ . Такі тіла називають **сірими**. Випромінювальна здатність сірого тіла визначається як випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, помножена на відповідний коефіцієнт чорноти  $a_T$ .

Встановлено, що енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню абсолютної температури

$$R_T = \sigma T^4, \quad (7)$$

де  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – стала Стефана-Больцмана, а вираз (7) має назву закону **Стефана-Больцмана**. Також із експериментів відомо, що енергетична світність  $r_{\lambda T} = 0$ , коли  $\lambda \rightarrow 0$ , і  $r_{\lambda T} \rightarrow 0$ , якщо  $\lambda \rightarrow \infty$  (див. рис. 1). При цьому положення максимуму залежить від температури таким чином, що

$$T\lambda_{\max} = b. \quad (8)$$

Тут  $\lambda_{\max}$  – довжина хвилі, що відповідає максимуму випромінювальної здатності за даної температури  $T$ ;  $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$  м·К. Вираз (8) називають **законом зміщення Віна**. Він свідчить про те, що максимум випромінювальної здатності тіл з більшою температурою відповідає меншим довжинам хвиль (див. рис. 1). Да-



4) **Гранично допустима доза** – це біологічна доза опромінення, що призводить до патологічних наслідків у вигляді соматичних ефектів. Як правило, за допустиму дозу опромінення для людини приймають 0,3 бер на тиждень. Таким чином, людина, яка опромінюється у таких дозах, за 30 років отримає дозу близько 450 бер. Але така сама доза, отримана середньостатистичною здоровою людиною віком до 30 років, при однократному опроміненні в 50 % випадків виявляється смертельною. Для генетичних ефектів не існує граничної дози. Їх прояв може спостерігатися навіть при дуже малих дозах.

Стійкість різних організмів до дії іонізуючих випромінювань коливається у дуже широких межах. При цьому чим більш складним є організм, тим легше він руйнується під дією випромінювання. Так, наприклад, бактерії у тисячі разів стійкіші до радіації, ніж людина і високорозвинені тварини.

## 2.2. Закон Бугера

Для захисту від радіоактивного випромінювання використовують різноманітні екрани, саркофаги і т. ін. Задача таких конструкцій полягає у поглинанні випромінювання. Кількість поглинутих частинок  $dn$  має бути пропорційною до товщини матеріалу  $dl$ , через який проходить випромінювання, та до початкової кількості  $n$  частинок у потоці (див. рисунок 1а). Тоді справедливим є вираз

$$-dn = \mu n dl, \quad (8)$$

де  $\mu$  – так званий коефіцієнт поглинання, який залежить від типу матеріалу. Знак «-» відображає той факт, що кількість частинок у початковому потоці зменшується. Інтегрування співвідношення (8) з урахуванням того, що інтенсивність випромінювання  $I$  пропорційна кількості частинок, дасть вираз

$$I = I_0 \exp(-\mu L), \quad (9)$$

де  $I_0$  – початкова інтенсивність випромінювання;  $L$  – загальна товщина шару, який пройшов пучок частинок. Вираз (9) називається **законом Бугера**.

Вираз (10) ще називають **формулою Планка**. За її допомогою шляхом інтегрування можна одержати закон Стефана-Больцмана (7) та закон зміщення Віна (8) шляхом знаходження екстремуму функції. Отже, положення про дискретний спектр енергій дозволяє поєднати теорію з експериментом і водночас є абсолютно безпідставним з точки зору класичної фізики. Таким чином, проблема теплового випромінювання та шлях її вирішення ознаменували початок розвитку нового розділу фізики – квантової фізики.

## 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Пірометр.
2. Лампа розжарювання.
3. Вольтметр.
4. Амперметр.
5. Блок живлення.

## 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Закон Стефана-Больцмана (7) покладений в основу зручного способу визначення температур тіл. Енергетична світність є величиною, яку досить легко вимірювати за допомогою технічних засобів. Також з огляду на достатньо велику чутливість людське око здатне розрізнити яскравість свічення тіл, температури яких є близькими. Тому неважко шляхом порівняння яскравості свічення певного тіла зі свіченням еталона (тобто тіла із заданою температурою) визначити невідому температуру. Даний спосіб вимірювання є безконтактним, що надає йому суттєвих переваг. Так, за надто високих температур контактні методи є неприйнятними, оскільки вимірювальні засоби будуть руйнуватися в процесі вимірювання. Крім того, контактним способом неможливо визначити температуру недосяжних об'єктів (наприклад, небесних тіл). Означені принципи реалізовані у вимірювальному приладі, який називають **оптичним пірометром** (див. рис. 2). У середині корпусу приладу знаходиться еталонна металева дуга, по якій проходить електричний струм. Залежно від сили струму

Одиницею вимірювання активності в СІ є **бекерель** (Бк). Нестандартною, широко застосовною одиницею активності є **кюрі**. Один кюрі – це активність такого препарату, в якому за 1 с відбувається  $3,7 \cdot 10^9$  актів розпаду (активність 1 грама радію).

Дія радіоактивного випромінювання на об'єкти, що оточують радіоактивний препарат, залежить як від його активності, так і від типу випромінюваних частинок. Альфа-частинки завдяки своїй великій масі мають досить велику енергію ( $\sim 1$  МеВ), а також електричний заряд, тому дуже інтенсивно взаємодіють з речовиною. Сутність цієї взаємодії у першу чергу полягає в **іонізації** атомів речовини. Альфа-частинки сильно іонізують атоми середовища, однак досить швидко втрачають свою енергію, тому довжина вільного пробігу  $\lambda$  у них невелика ( $\lambda \sim 10^{-5}$  м у твердому тілі та  $\lambda \sim 10^{-2}$  м у повітрі). Бета-частинки характеризуються меншою енергією і вдвічі меншим зарядом. Це є причиною того, що їх іонізуюча дія менша порівняно з  $\alpha$ -частинками. Однак, як наслідок, більшою є проникна здатність:  $\lambda \sim 10^{-2}$  м у твердому тілі. Гамма-випромінювання має найменшу іонізуючу дію, проте має дуже велику проникну здатність. Так, шар залізобетону півметрової товщини ослаблює їх потік лише наполовину.

Біологічна дія радіоактивного випромінювання обумовлена його іонізуючою дією. Внаслідок іонізації атомів може відбуватися порушення структури молекул, з яких побудовані клітини живого організму. Первинні процеси іонізації не спричиняють великих порушень у тканинах. Руйнівна ж дія випромінювання пов'язана із вторинними реакціями, при яких відбувається розрив зв'язків усередині складних органічних молекул унаслідок дії **вільних радикалів**. Наприклад, дуже поширеним є так **званий радіоліз води** – розпад молекул води за схемою



з утворенням вільних радикалів Н та ОН, які мають винятково високу хімічну активність.

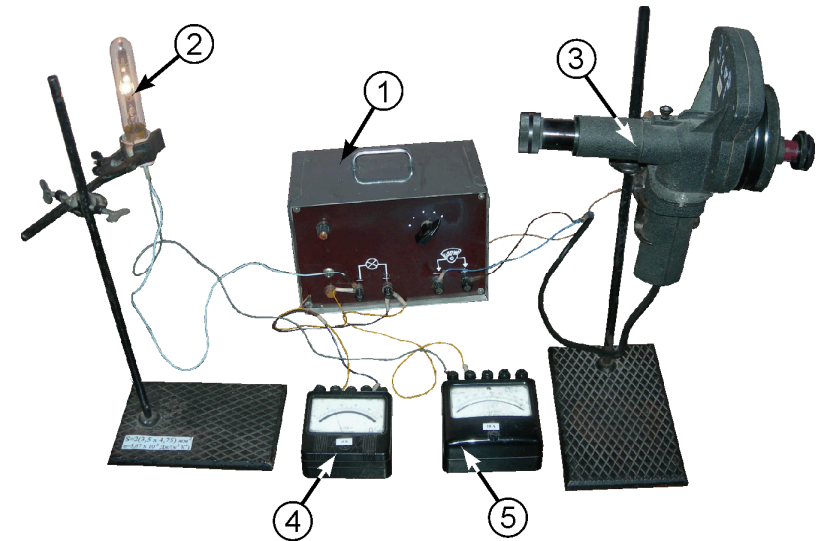


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – блок живлення; 2 – лампа розжарювання; 3 – пірометр; 4 – вольтметр; 5 – амперметр

$$\Phi = RS = IU, \quad (11)$$

де  $S$  – площа поверхні спіралі;  $I$  – сила струму через спіраль;  $U$  – падіння напруги на ній. З урахуванням виразів (7) та (4), а також того, що випромінювальна здатність сірого тіла є добутком випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла та коефіцієнта чорноти  $a_T$ , енергетична світність спіралі становить

$$R = a_T \sigma T^4. \quad (12)$$

З виразів (11) та (12) коефіцієнт чорноти вольфрамової спіралі дорівнює

$$a_T = \frac{UI}{\sigma T^4 S}. \quad (13)$$

Температура спіралі вимірюється за допомогою пірометра згідно з методом, описаним вище. Технічні подробиці вимірювання зрозумілі з рисунка 4.



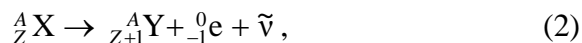
гелію ( $\alpha$ -частинка) складається з двох протонів та двох нейтронів. У результаті випромінювання  $\alpha$ -частинки ядро залишку Y, як правило, залишається у збудженому стані. Надлишок енергії може бути вивільнений у два способи. Перший полягає у випромінюванні ядром  $\gamma$ -кванта, а другий – у віддаванні енергії електрону внутрішньої оболонки, внаслідок чого електрон виходить за межі атома. Останнє явище називається *електронною конверсією*. Вакансія, яка виникає при цьому, заповнюється електроном з верхніх оболонок. У свою чергу, такі переходи електронів супроводжуються характеристичним рентгенівським випромінюванням.

Бета-частинки утворюються у результаті так званого  $\beta$ -розпаду. Всього відомо три типи такого розпаду:

- а)  $\beta^-$  - розпад (електронний розпад);
- б)  $\beta^+$  - розпад (позитронний розпад);
- в) *електронне захоплення*.

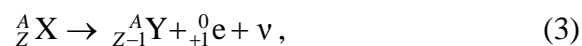
Розглянемо детально кожен.

**Електронний розпад** (або  $\beta^-$  - розпад) відбувається за схемою



де  ${}^0_{-1} e$  – електрон;  $\tilde{\nu}$  – так зване **антинейтрино**. Теоретичним підґрунтям існування такої частинки є закон збереження моменту імпульсу, який свідчить про те, що сумарний момент імпульсу частинок у лівій частині співвідношення (2) повинен дорівнювати сумі у правій частині. Оскільки антинейтрино не має заряду, а його маса набагато менша маси електрона, цю частинку дуже складно спостерігати експериментально, однак це було зроблено. Спектр енергій електронів, що випромінюються під час  $\beta$ -розпаду, є досить широким та щільним, оскільки енергія розподіляється між електроном та антинейтрино у довільних пропорціях.

**Позитронний розпад** (або  $\beta^+$  - розпад) відбувається за схемою



де  ${}^0_{+1} e$  – позитрон – частинка, маса якої дорівнює масі електрона, а заряд за модулем дорівнює заряду електрона, проте є додатний;

3. Під'єднайте пірометр та лампу розжарювання до блока живлення 1 та ввімкніть його в електричну мережу.
4. Якісно перевірте закон зміщення Віна. Для цього відкрийте червоний світлофільтр в окулярі і ручкою реостата 4 (див. рис. 2) поступово збільшуйте струм через еталонну дугу. Переконайтеся, що світло від дуги спочатку має червоний відтінок, а потім жовто-білий.
5. Перемикачем на блоці живлення 1 (див. рис. 3) встановіть мінімальну яскравість свічення лампи, а перемикач 5 (див. рис. 2) переведіть у положення “ ”. Закрийте червоним світлофільтром 6 зображення еталонної дуги.
6. Перепишіть показання вольтметра 4 та амперметра 5 (див. рис. 3) до таблиці 1.
7. Наведіть об'єктив пірометра на лампу так, щоб взаємне розміщення зображень спіралі та еталонної дуги було подібним до рисунка 4.
8. Ручкою реостата 4 (див. рис. 2) прирівняйте яскравість свічення дуги до яскравості свічення спіралі. Виміряну температуру запишіть до таблиці 1.

*Слід враховувати інертність пірометра: набуття еталонною дугою яскравості свічення, відповідної заданому положенню ручки реостата, відбувається не відразу, а через декілька секунд.*

9. Повторіть вимірювання на даному положенні перемикача блока живлення ще 4 рази. Результати занесіть до таблиці 1.
10. Переведіть перемикач діапазонів вимірювань пірометра 5 (див. рис. 2) в положення “20”.
11. Проведіть наступні 4 серії вимірювань температури для різних положень перемикача блока живлення. Результати занесіть до таблиці 1. При цьому до таблиці слід щоразу записувати показання амперметра та вольтметра.
12. Розрахуйте середні значення абсолютних температур та відповідні їм значення коефіцієнта чорноти  $a_T$  за формулою (13).
13. Оцініть похибки визначення  $a_T$  за формулою

### На оцінку “добре”

6. Записати вираз для визначення довжини хвилі де Бройля, якщо відомий імпульс частинки.
7. Що таке ПЕМ? В яких режимах він може працювати? Чим відрізняються ці режими?
8. Описати оптичну систему ПЕМ.
9. Одержати формулу Вульфа-Брегга. Дати визначення усіх величин, що до неї входять.
10. Що називають атомними площинами? Скільки їх може існувати в кристалі?

### На оцінку “відмінно”

11. Пояснити, чому електронोगрами від монокристалічних та полікристалічних зразків мають саме такий вигляд, як наведено на рисунку 4.
12. Розкрити сутність методики визначення довжини хвилі де Бройля з електроногам.
13. Одержати формулу для визначення довжини хвилі де Бройля з електроногам.
14. Одержати вираз для підрахунку похибки (12).
15. Одержати співвідношення (6) та (7) для розрахунку теоретичних значень довжини хвилі де Бройля.

### СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики: в 3 т. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.

8. Будова та принцип дії пірометра. В чому його переваги як інструмента з вимірювання температури?
9. Що називають абсолютно чорним тілом, сірим тілом?
10. Методика визначення коефіцієнта чорноти в даній роботі.

### На оцінку “відмінно”

11. Сформулювати та довести закон Кірхгофа.
12. Пояснити механізми теплового випромінювання.
13. Користуючись виразом для випромінювальної здатності (10), одержати закон Стефана-Больцмана (7).
14. Розкрити сутність гіпотези Планка. На базі квантових уявлень вивести вираз залежності середньої енергії випромінювання від частоти  $\nu$ .
15. Вивести формулу для розрахунку похибок визначення коефіцієнта чорноти (15).

### СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная. Физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Особливість даної роботи полягає у тому, що студент не працює безпосередньо на електронному мікроскопі, оскільки даний прилад є надто складним в експлуатації, а одержання електроннограм потребує значного часу.

1. Уважно ознайомтеся із попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Візьміть участь в екскурсії до лабораторії, де розміщений електронний мікроскоп, та уважно вислухайте розповідь відповідального лаборанта.
3. Одержіть у викладача електроннограми від полікристалічних зразків і такі дані, необхідні для подальших розрахунків: а) величину прискорюючої напруги  $U_1$  та  $U_2$  для обох зразків; б) ефективну відстань  $L$ ; в) відстані  $d_i$  між атомними площинами (див. вираз (10)). Запишіть ці дані у таблицю 1.
4. Виміряйте не менше як три рази діаметри **всіх** дифракційних кілець електроннограм двох зразків та запишіть їх у таблицю 1.
5. Побудуйте для кожного зразка графік згідно з рисунком 6б та визначте з нього величини  $1/d_{\min}$ ,  $1/d_{\max}$  та  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$ . Дані запишіть у таблицю 1. Важливо врахувати, що зазначені залежності мають виходити з нуля координат.
6. Визначте довжини хвиль де Бройля для кожного зразка з одержаних даних за допомогою співвідношення (11).
7. Похибки визначення оцініть як

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D_{\min}}\right)^2}. \quad (12)$$

Тут похибкою  $\Delta D$  слід вважати половину товщини дифракційного кільця на електроннограмі.

8. Розрахуйте теоретичні значення  $\lambda$  згідно із виразами (6) та (7). Порівняйте одержані значення між собою та із експериментально визначеними довжинами хвиль.
9. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

- 1) Кількість електронів, що вибиваються світлом з поверхні металу за одну секунду (так званих фотоелектронів), прямо пропорційна інтенсивності світлового потоку.
- 2) Швидкість фотоелектронів визначається виключно частотою падаючого випромінювання та не залежить від інтенсивності світлового потоку.
- 3) Існує мінімальна частота світлового випромінювання, за якої фотоелектронів ще є можливим. Цю частоту (або відповідну довжину хвилі) називають **червоною межею фотоелектру**.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотоелемента – приладу, в основу роботи якого покладено явище фотоелектру, – показані на рисунку 2. Наявність частини ВАХ в області від'ємних напруг свідчить про те, що електрони вилітають із катода фото-

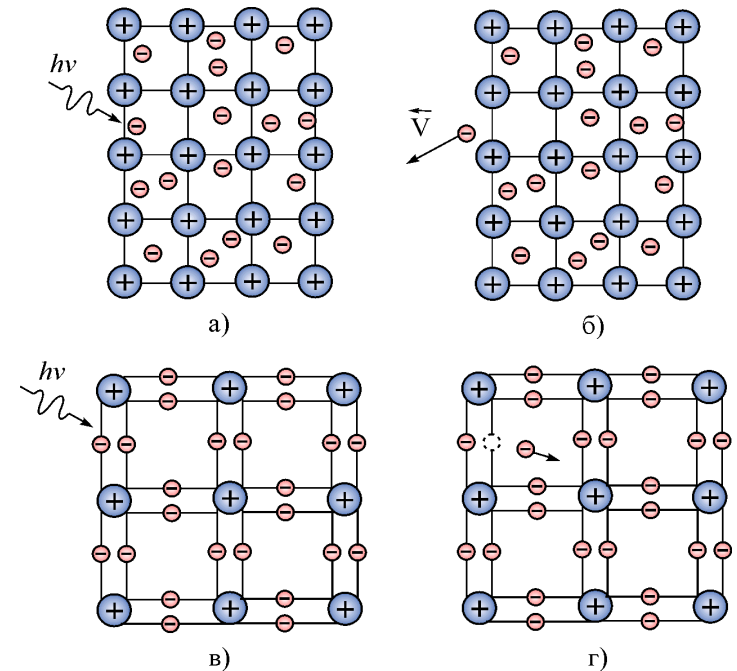


Рисунок 1 – Зовнішній фотоелектр супроводжується виходом електрона за межі матеріалу, що опромінюється (а, б). Внутрішній фотоелектр полягає у виході електрона, що зв'язаний з іоном, у простір між вузлами кристалічної решітки (в, г)

Якщо зразок полікристалічний (див. рис. 5), то умова (9) буде виконуватись одночасно для багатьох хаотично зорієнтованих монокристалічних складових (так званих зерен) полікристала. У результаті для кожної системи атомних площин та кожного  $n$  одержимо не один напрямок максимуму дифракції, а їх множини, що утворює конічну поверхню. Вісь такої поверхні буде збігатися з напрямком початкового електронного променя, а кінцева дифракційна картина матиме вигляд системи дифракційних кілець (див. рис. 4б).

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Електронний мікроскоп.
2. Електронограми полікристалічних зразків.
3. Лінійка.

### 4. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Користуючись виразом (9) та знаючи всі величини, що входять до його складу, можна визначити довжину хвилі де Бройля електрона з електронограми полікристалічного зразка. На рисунку ба зображений хід електронного променя через зразок. У випадку, коли кут між атомною площиною та напрямком ходу променя становить  $\theta$ , кут між початковим напрямком променя та напрямком його виходу буде становити  $2\theta$ . Якщо кут  $\theta$  порівняно малий ( $\theta \ll 1$ ), справедливі такі наближені рівності:

$$\operatorname{tg}2\theta \approx 2\theta \approx 2\sin\theta.$$

З урахуванням останнього виразу та того, що  $\operatorname{tg}2\theta = D/2L$  (див. рисунок ба), формула (9) для першого максимуму ( $n = 1$ ) набуває вигляду

$$\lambda = \frac{1}{2L} D_i d_i, \quad (10)$$

$$h\nu = A + \frac{m_e V^2}{2}, \quad (3)$$

де  $A$  – так звана **робота виходу** – енергія, яку необхідно надати електрону на подолання сил притягання з боку кристалічної решітки. Саме наявність  $A$  зумовлює існування червоної межі фотоефекту. Якщо частота випромінювання  $\nu < \nu_0 = A/h$ , то після поглинання фотона електрон не отримує енергії, необхідної для виходу з матеріалу катода. Вираз (3) ще називають **рівнянням Ейнштейна для фотоефекту**.

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Фотоелемент.
2. Освітлювач.
3. Реостат.
4. Набір світлофільтрів.
5. Вольтметр.
6. Гальванометр.
7. Два ключі.

### 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

З урахуванням (1) рівняння Ейнштейна (3) можна переписати у вигляді

$$h\nu = A + eU_3. \quad (4)$$

Останній вираз є більш зручним з точки зору проведення експерименту. Вимірювати швидкість фотоелектронів дуже важко, в той час як процедура визначення затримувальної напруги  $U_3$  є досить простою. Установка для дослідження фотоефекту зображена на рисунку 3, а її принципова схема – на рисунку 4а.

З означення випливає, що  $U_3$  – така напруга, прикладена у зворотному напрямку, за якої не буде проходити струм через фотоелемент.

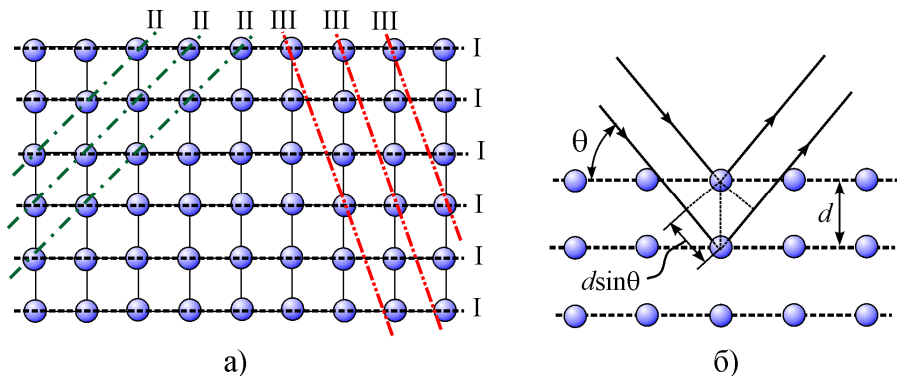


Рисунок 3 – Схематичне зображення кристалічної решітки. Площини, проведені через атомні площини у кристалі (а); до пояснення формули Вульфа-Брегга (б)

У подальшому будуть досліджуватися електронограми кристалічних зразків, тому зупинимося більш детально саме на них. Атоми в кристалі розміщені впорядковано, утворюючи кристалічну решітку. Користуючись підходом, який запропонували Ю. Вульф, У.Л. Брегг та У.Г. Брегг, проведемо через періодично розміщені атоми умовні площини, які будемо називати **атомними площинами** (див. рисунок 3а). Електрони будуть відбиватися від сусідніх паралельних атомних площин та інтерферувати між собою подібно вторинним хвилям, що йдуть від різних щілин дифракційної решітки. Зі схеми на рисунку 3б простежується, що умова максимуму дифракційної картини матиме вигляд

$$2d \sin \theta = \pm n\lambda, \quad (9)$$

де  $d$  – відстань між атомними площинами (величина, відома для кожного типу матеріалу);  $\theta$  – кут між напрямком падіння електронів та атомною площиною;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – ціле додатне число. Вираз (9) називається **формулою Вульфа-Брегга**. Атомних площин можна провести нескінченно багато, проте вони будуть відрізнятися щільністю розміщення атомів на них, як показано на рисунку 3а.

Завдяки внутрішній симетрії кристала одному й тому самому напрямку падіння електронного променя може відповідати декілька різних за положенням та інтенсивністю дифракційних мак-

тимуть різні значення затримувальної напруги, а з (4) випливає, що залежність  $U_3(\nu)$  матиме лінійний характер

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}. \quad (5)$$

У виразі (5)  $h/e$  не є нічим іншим, як тангенсом кута нахилу, а  $A/e$  – точка перетину прямої з віссю ординат. Для освітлення фотоелемента світлом, близьким до монохроматичного, використовуються світлофільтри із заданою смугою пропускання. Шляхом заміни світлофільтрів на шляху між освітлювачем 8 та фотоелементом 7 можна одержати набір експериментальних значень  $U_3(\nu)$ , який має репрезентувати пряму лінію (див. рисунок 4б). Згідно з виразом (5) тангенс кута нахилу одержаної прямої визначить виміряне значення сталої Планка

$$\frac{h}{e} = \text{tg } \alpha \Rightarrow h = e \text{tg } \alpha, \quad (6)$$

а точка перетину графіка з віссю  $U_3$ , у свою чергу, визначить роботу виходу  $A$  для матеріалу катода.

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Підключіть реостат до джерела живлення 1. Увімкніть освітлювач 8 у мережу живлення та зробіть відстань між ним та фотоелементом 7 якомога меншою.
3. Візьміть світлофільтр із запропонованого набору та розмістіть його між освітлювачем та фотоелементом.
4. Шляхом переміщення бігунка реостата компенсуйте струм у колі фотоелемента. При цьому стрілка гальванометра вказуватиме на нульову позначку. Запишіть значення затримувальної напруги до таблиці 1.
5. Повторіть вимірювання для того самого світлофільтра ще 4 рази. Результати запишіть у таблицю 1.

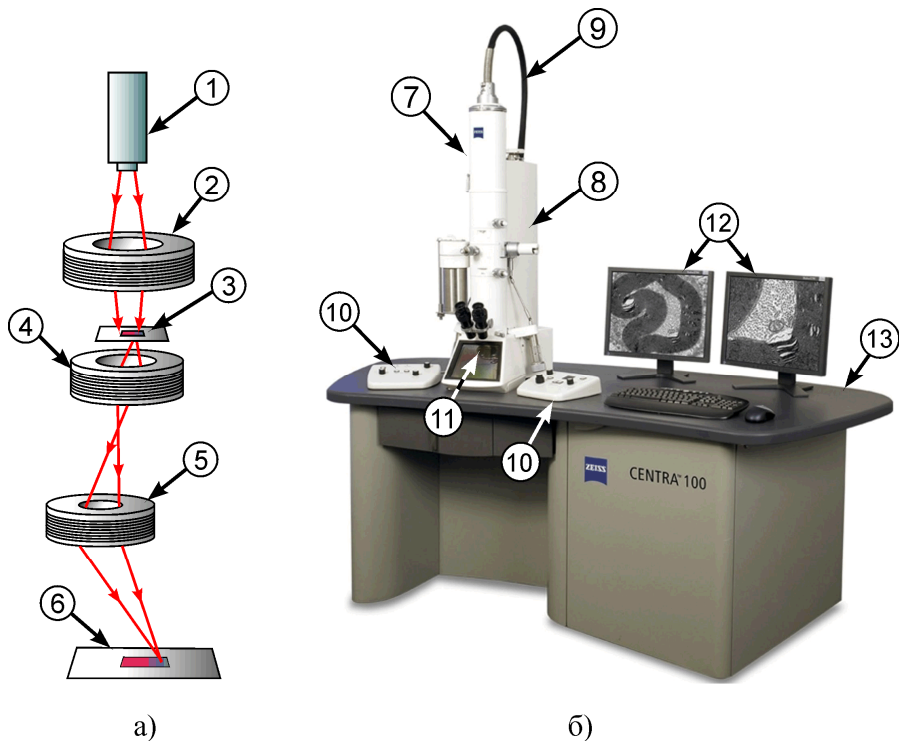


Рисунок 2 – Оптична схема ПЕМ (а); сучасний ПЕМ компанії “Carl Zeiss” (б): 1 – електронний прожектор; 2 – конденсорна лінза; 3 – досліджуваний зразок; 4 – проєкційна лінза; 5 – об’єктивна лінза; 6 – екран із зображенням; 7 – колона з оптичною системою ПЕМ; 8 – вакуумна система; 9 – високовольтний кабель; 10 – органи керування мікроскопом; 11 – вікно екрана; 12 – монітори комп’ютера; 13 – станина

Схематично будова оптичної частини ПЕМ наведена на рисунку 2а. Джерелом електронів, як і в електронно-променевої трубі, є так званий електронний прожектор 1. Він складається з підігрівного катода, який завдяки термоелектронній емісії випромінює електрони, та системи анодів, що фокусують їх у вузький пучок, а потім прискорюють. Подальше проектування променя на екран 6 відбувається, як правило, за допомогою магнітних лінз. Магнітна лінза конструкційно являє собою котушку зі струмом, розміщену у спеціальному кожусі з кобальт-нікелевого сплаву.

$$v = c/\lambda, \quad (8)$$

де  $c$  ( $\approx 2,98 \cdot 10^8$  м/с) – швидкість світла у вакуумі.

9. Підготуйте координатну площину  $U_3(v)$  на міліметровому папері в такому масштабі, щоб експериментальні дані займали усе її поле.
10. Обчисліть середні значення  $U_3$  та нанесіть точки, що відповідають експериментально знайденим даним  $\langle U_3(v) \rangle$ , на координатну площину.
11. За допомогою лінійки проведіть пряму лінію так, щоб кожна одержана експериментально точка лежала якомога ближче до неї.
12. Знайдіть тангенс кута нахилу одержаної прямої  $\alpha$ , як показано на рисунку 4б

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta'U}{\Delta'v} \quad (9)$$

та розрахуйте сталу Планка за виразом (6).

13. Зробіть оцінку похибки вимірювань

$$\Delta h = h \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{\Delta'U_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta'v}\right)^2}. \quad (10)$$

Тут як  $\Delta U$  слід брати інструментальну похибку  $\Delta U_3$ , а як  $\Delta v$  – максимальне значення похибки визначення частоти з ряду  $\Delta v_i$ , що відповідають кожному світлофільтру

$$\Delta v_i = \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i} v_i. \quad (11)$$

14. Підготуйте другу координатну площину  $U_3(v)$  на міліметровому папері в такому масштабі, щоб одержати точку перетину експериментального графіка з віссю  $U_3$ .
15. Знайдіть відстань  $U_1$  між точкою перетину графіка з віссю  $U_3$  та нулем координат і визначте роботу виходу  $A$  електронів з матеріалу катода

$$A = eU_1. \quad (12)$$



## 2.2. Електронний мікроскоп

До 80 % інформації людина одержує через органи зору. Тому інструментальні засоби візуального спостереження за об'єктами навколишнього світу невпинно вдосконалювалися впродовж усієї історії людства. При цьому традиційно використовувалися джерела світла оптичного діапазону, а розрахунок приладів проводився на базі формалізму геометричної оптики. Однак, як було показано англійським фізиком Релеєм, дві точки можуть бути зареєстровані роздільно лише тоді, коли кутова відстань  $\delta\varphi$  між ними

$$\delta\varphi \geq 1,22\lambda'/2R, \quad (8)$$

де  $\lambda'$  – довжина світлової хвилі;  $R$  – радіус лінзи, сферичного дзеркала або діафрагми. Для підвищення роздільної здатності стандартних оптичних приладів потрібно або збільшувати радіус  $R$ , або зменшувати довжину хвилі  $\lambda'$ . Перший спосіб обмежений технічними можливостями виробництва лінз. Зменшення ж довжини хвилі означає недоступність зображення для людського ока, оскільки тоді світлові хвилі будуть лежати в ультрафіолетовій частині спектра. Цю складність можна подолати за допомогою спеціальних перетворювачів та методу фотографії. Але ультрафіолетового діапазону не достатньо для істотного розширення меж вимірювання, а рентгенівськими променями неможливо керувати за допомогою звичних лінз, оскільки їх показник заломлення в цій області спектру майже дорівнює одиниці.

Саме тут і слід згадати про хвильові властивості мікрочастинок, зокрема електрона. Аналіз виразів (6) та (7) показує, що відповідна довжина хвилі де Бройля визначається прискорюючою різницею потенціалів  $U$ . Наприклад, величині  $U \sim 100$  кВ відповідає  $\lambda \sim 0,01$  нм. Цей факт і є фізичною основою для роботи цілого класу вимірювальних приладів – електронних мікроскопів. За стандартним означенням прилад, який дозволяє одержувати збільшені зображення об'єктів, використовуючи для їх освітлення потік розігнаних до високих швидкостей електронів, називається **електронним мікроскопом**. Проте зараз завдяки бурхливому розвитку методу електронної мікроскопії та виникненню

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алагон ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.:Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

## Лабораторна робота 14

### ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ДЕ БРОЙЛЯ ЕЛЕКТРОНА

#### 1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися з будовою та принципом дії електронного мікроскопа.
2. Визначити довжину хвилі де Бройля, користуючись електронограмами металевих полікристалічних зразків.
3. Дослідити вплив релятивістських ефектів на величину хвилі де Бройля.

#### 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

##### 2.1. Хвильові властивості речовини

Згідно з сучасними уявленнями про матеріальний світ класичні поняття “частинка” та “хвиля” є просто абстрактними моделями реальних об’єктів, які не здатні розкрити усієї множини явищ природи, особливо у мікросвіті. Будь-який реальний мікроскопічний об’єкт (наприклад, електрон або фотон) має як властивості частинки, так і властивості хвилі, і залежно від конкретних умов спостереження у нього можуть проявлятися або одні, або інші. Останнє твердження складає зміст так званого **корпускулярно-хвильового дуалізму** матерії. З квантової оптики відомо, що електромагнітній хвилі з частотою  $\nu$  відповідає частинка – фотон – з енергією  $W$ , яка визначається співвідношенням

$$W = h\nu, \quad (1)$$

де  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка. За аналогією з цим французький фізик Луї де Бройль висловив гіпотезу, згідно з якою кожній частинці з імпульсом  $\vec{p}$  відповідає хвиля з довжиною  $\lambda$ . Зв’язок між модулем імпульсу  $p$  та  $\lambda$  визначається таким чином:

вини за допомогою вивчення спектра її випромінювання називають **спектральним аналізом**. У переважній більшості випадків спектральний аналіз точніший, швидший та більш чутливіший за хімічні методи і тому широко застосовується у сучасному виробництві та наукових дослідженнях. Особливу роль даний метод відіграє в астрофізиці: тут це єдиний експериментальний метод визначення хімічного складу речовин зірок та міжзоряного середовища, а також швидкості руху космічних об’єктів.

Історія сучасних уявлень про мікроскопічну будову речовини починається з початку 20-го сторіччя і свідчить про ключову роль аналізу спектрів випромінювання. У 1911 р. англійський фізик Е. Резерфорд на основі аналізу даних відомого експерименту з розсіювання  $\alpha$ -частинок на тонкому шарі золота запропонував так звану планетарну модель атома. Згідно з цією моделлю атом складається з позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертаються електрони. При цьому майже вся маса атома зосереджена в ядрі, а характерні відстані електронів від центра ядра набагато більші від його діаметра. Класична електродинаміка передбачає безперервне випромінювання електромагнітної хвилі зарядженою частинкою, що рухається з прискоренням, за рахунок її енергії. Для електрона, що обертається навколо ядра, втрати енергії за рахунок випромінювання повинні зумовити поступове зменшення радіуса його орбіти до нульового значення. Останнє означає падіння електрона на ядро та припинення існування атома. Проте досвід показує, що час стабільного існування атомів може бути необмежено довгим.

З іншого боку, електрон, що обертається по орбіті змінного радіуса, повинен випромінювати хвилю змінної частоти безперервного спектра. Проте експериментально встановлено, що атомарні спектри хімічних елементів є **дискретними**. В цьому і полягає сутність другого протиріччя планетарної моделі атома з точки зору класичних уявлень про матерію.

Перша спроба розв’язати дану проблему була зроблена датським фізиком Н. Бором у 1913 р. В її основу покладено два постулати, які просто стали узагальненням експериментальних фактів та вважалися правильними, незважаючи на їх несумісність із класичною фізикою.

6. Заповніть решту таблиці 1. Значення  $r(n)$  слід знаходити за формулою (11).
7. Одержані значення нанесіть на графік  $\lambda(r)$  (див. рисунок 4) та проведіть пряму лінію так, щоб кожна одержана експериментально точка лежала якомога ближче до неї.
8. Знайдіть тангенс кута нахилу одержаної прямої  $\alpha$  згідно з рисунком 4

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta' \lambda}{\Delta' r}. \quad (12)$$

9. Визначте сталу Рідберга як

$$R = c / \operatorname{tg} \alpha. \quad (13)$$

10. Порівняйте одержане за формулою (13) значення з теоретичним, що дається виразом (8).
11. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

## 6. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

1. Описати планетарну модель атома.
2. Сформулювати постулати Бора.
3. Що називають дисперсійною кривою монохроматора?
4. Що таке спектроскопія?
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

### На оцінку “добре”

6. Пояснити механізм випромінювання електромагнітної хвилі атомом. Чому спектр випромінювання є дискретним?
7. У чому суть явища дисперсії? Її роль у роботі монохроматора.
8. Описати будову та принцип роботи монохроматора УМ-2.
9. У чому переваги спектроскопії над іншими методами? Навести приклади.

нерухожим. На електрон з боку ядра буде діяти сила Кулона. За другим законом Ньютона рух електрона по стаціонарній орбіті описується таким рівнянням:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e V_n^2}{r_n}, \quad (3)$$

де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала. Сумісне розв’язання співвідношень (1) та (3) відносно радіуса та швидкості дасть

$$V_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 n h}, \quad r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2. \quad (4)$$

Повна енергія електрона визначається сумою кінетичної та потенціальної складових

$$W_n = W_n^{kin} + W_n^{nom} = \frac{m_e V_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}. \quad (5)$$

Підстановкою (4) в (5) одержимо вираз для енергії електрона

$$W_n = W(n) = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}. \quad (6)$$

З урахуванням (2) та співвідношення між циклічною частотою та довжиною хвилі  $\nu = c/\lambda$  одержимо вираз, який задає дискретну послідовність довжин хвиль спектра атома водню

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{c} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (7)$$

де  $m = 1, 2, 3, \dots$  – додатне ціле число, а

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ (c}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

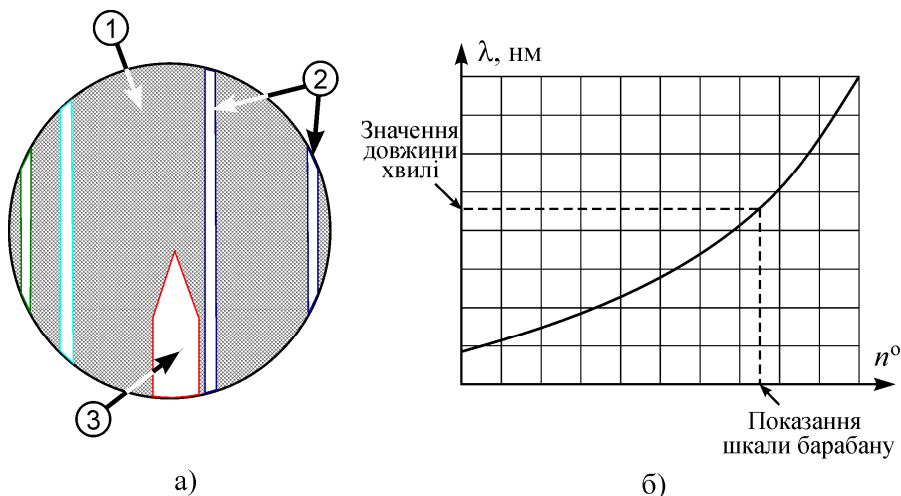


Рисунок 3 – Поле зору окуляра (а): 1 – темний фон; 2 – спектральні лінії; 3 – візир. Характерний вигляд дисперсійної кривої (б)

Якісний аналіз спектра випромінювання водню показує, що даний елемент дійсно випромінює лише хвилі на окремих частотах, що є прямим доказом дискретності спектра енергій електрона в атомі.

### 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з будовою установки та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.

**Увага!** Окремі елементи лабораторної установки знаходяться під високою напругою. Тому заборонено знімати кожух з капілярної трубки та контактувати з індукційною котушкою 3 (див. рисунок 1).

2. Увімкніть установку в мережу. Натисканням пускової кнопки на блоці живлення 1 (рисунок 1) подайте напругу на трубку з воднем 2. Обертаючи барабан 7, позиціонуйте першу (червону) спектральну лінію точно за візиром. Показання на барабані запишіть до таблиці 1.

### 3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Монохроматор УМ-2.
2. Блок живлення.
3. Капілярна трубка з воднем.
4. Індукційна високовольтна котушка.
5. Графік залежності довжини хвилі від показів барабану монохроматора (дисперсійна крива).

### 4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Перепишемо співвідношення (7) у такому вигляді:

$$\lambda = \frac{c}{R} \cdot \frac{m^2 n^2}{n^2 - m^2}. \quad (9)$$

Для експериментальної перевірки справедливості виразу (9) в межах видимої частини спектра ( $m = 2$ ) потрібно показати лінійність залежності

$$\lambda = \lambda(r) = Ar, \quad (10)$$

де

$$r = r(n) = \frac{4n^2}{n^2 - 4}, \quad (11)$$

а константа  $A$  дорівнює  $c/R$ . Тут  $n = 3, 4, 5, 6$ , оскільки у лабораторній роботі спостерігаються 4 спектральних лінії.

За кімнатних температур водень перебуває у молекулярному стані ( $H_2$ ). Крім того, електрони у молекулах перебувають в основних станах, тому випромінювання відсутнє. У найпростіший спосіб одержати атомарний водень, електрони якого перебувають у збуджених станах, можна шляхом прикладання високої напруги до розрідженого молекулярного водню. В даній лабораторній роботі газ знаходиться у спеціальній капілярній трубці 2 (див. рис. 1), до якої підводиться напруга від індукційної високовольтної котушки 3. Наявні внаслідок спонтанної іонізації