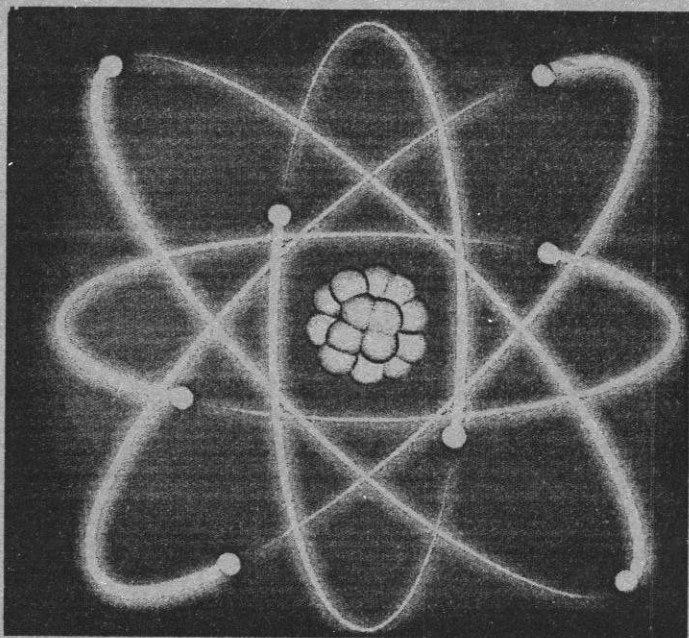


22.3.14.4.9173-5

Б73

О.І.Богатирьов

# Лабораторний практикум з фізики атома



173

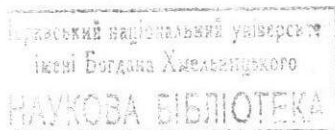
Міністерство освіти і науки України  
Черкаський національний університет  
імені Богдана Хмельницького

**О. І. Богатирьов**

## **Лабораторний практикум з фізики атома**

**Навчально-методичний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів**

Черкаси – 2010



УДК 539.18(075.8)  
ББК 22.134.4я73-1  
Б 73

**Рецензенти:**

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри загальної фізики  
Черкаського національного університету  
імені Богдана Хмельницького

*М. О. Пасічний;*

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізики  
Черкаського державного технологічного університету

*С. О. Колінько.*

**Богатирьов О. І.**

Б 73

Фізичний практикум з фізики атома. Навчально-методичний посібник для студентів вищих закладів освіти. – Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, – 2010. – 96 с.  
ISBN 978-966-353-179-3

Посібник містить опис лабораторних робіт з фізики атома та рекомендації щодо їх виконання. До кожної роботи наведені приклади тестових завдань для вхідного та підсумкового контролю знань студентів.

Для студентів вищих закладів освіти.

УДК 539.18(075.8)  
ББК 22.134.4я73-1

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Черкаського національного університету  
імені Богдана Хмельницького  
(протокол № 6 від 15.06.2010 року)*

ISBN 978-966-353-179-3

© ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2010  
© О. І. Богатирьов, 2010

**Зміст**

|  |    |
|--|----|
| 1. Вступ .....   | 4  |
| 2. Вивчення явища фотоелектричного ефекту та визначення сталої Планка .....  | 6  |
| 3. Визначення сталої Стефана – Больцмана .....   | 13 |
| 4. Вивчення закономірностей у спектрі водню і визначення сталої Рідберга .....   | 19 |
| 5. Якісний спектральний аналіз сплавів .....   | 27 |
| 6. Дослідження спектрального складу люмінесценції кристалофосфору .....  | 33 |
| 7. Визначення коефіцієнтів пропускання скляних світлофільтрів .....  | 42 |
| 8. Вивчення будови та принципу дії газових квантових генераторів .....   | 50 |
| 9. Перевірка співвідношень невизначеностей для фотонів .....   | 58 |
| 10. Вивчення випромінювання світла напівпровідниками .....   | 64 |
| 11. Вивчення роботи радіометричної установки та визначення коефіцієнтів поглинання радіоактивного випромінювання ..... | 71 |
| 12. Додатки .....  | 78 |
| 12.1. Фізичні константи .....  | 78 |
| 12.2. Латинська та грецька абетки .....  | 81 |
| 12.3. Множники для утворення кратних і часткових одиниць .....   | 82 |
| 12.4. Деякі математичні сталі .....  | 82 |
| 12.5. Значення синусів і тангенсів .....   | 82 |
| 12.6. Показникові функції .....  | 84 |
| 12.7. Радіуси атомів .....   | 86 |
| 12.8. Діаметри деяких молекул .....  | 87 |
| 12.9. Перші потенціали іонізації атомів .....  | 88 |
| 12.10. Робота виходу електронів та червона межа фотоелектричного ефекту .....  | 89 |
| 12.11. Заповнення електронних оболонок атомів .....  | 89 |
| 12.12. Спектри випромінювання .....  | 91 |
| 12.12.1. Гази .....  | 91 |
| 12.12.2. Метали .....  | 92 |
| 12.13. Коефіцієнти поглинання рентгенівського випромінювання .....   | 92 |
| 13. Термінологічний словник .....  | 93 |

## Вступ

Упродовж всієї історії науки вивчення неживої природи, а фізика саме цим і займається, відбувалося двома взаємно доповнюючими, рівноцінними по своїй суті шляхами – теоретичним та емпіричним. Саме завдяки органічному зв'язку теоретичних і емпіричних досліджень сучасна фізика досягла найвищого розвитку серед інших наук.

Теорія є розвинутою формою наукового пізнання. Вона описує, пояснює і передбачає ті чи інші явища природи. Зазвичай теорія виникає із-за необхідності пояснити накопичений практичний досвід, узагальнити його. Поряд з цим теорія йде далі, у глибину явища, розкриваючи нові зв'язки між його складовими, нові, невідомі із практики, риси досліджуваного об'єкта. Результати, одержані шляхом теоретичних досліджень, обов'язково підлягають емпіричній перевірці. У свою чергу, нові емпіричні дані стимулюють подальшу розробку теорії. Основою розвитку теорії є практика. Одночасно вона слугує і критерієм істинності теорії.

Виходячи саме з природного єднання теоретичного і експериментального методів дослідження, сплановано та реалізується навчання фізики, зокрема, і в університетах. Від студентів, особливо фізичних спеціальностей, вимагається не лише знання теорії, але й уміння експериментувати.

У фізиці розрізняють мисленні, віртуальні та реальні експерименти. Найбільшу користь під час вивчення фізики приносять реальні експерименти. Саме вони дають студентам можливість ознайомитися з сучасними фізичними приладами, їх будовою та принципом дії, перевірити теоретично встановлені закони, експериментально визначити певні фізичні константи і, щонайголовніше, долучитися до наукового експериментування. Такий підхід до навчання фізики передбачає, що у підсумку студенти не лише набудуть знання про закони природи, але й будуть їх розуміти.

Виходячи з поставленої дидактичної мети, навчальний експеримент може бути реалізований у формі демонстрації, наприклад, на лекції, під час виконання лабораторних робіт, при розв'язуванні експериментальних задач, у домашніх умовах тощо. На фізичному факультеті особливо важлива роль відводиться лабораторному практикуму. Навчальними планами підготовки бакалавра фізики на виконання лабораторних робіт передбачено близько третини того часу, який надається на вивчення загального курсу фізики.

Лабораторне заняття – це такий вид навчальної діяльності, на якому студенти особисто, але під керівництвом викладача, проводять експерименти чи досліді з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень фізики. Лабораторні заняття сприяють набуттю студентами навичок роботи з фізичним обладнанням, вимірювальними приладами. Саме у лабораторіях студенти вперше знайомляться з методикою проведення експериментальних досліджень. Проходять заняття у спеціально обладнаному приміщенні (лабораторії), де зосереджене необхідне устаткування, прилади та матеріали. Студент, після належної домашньої підготовки, складає робочу

схему експерименту, проводить необхідні вимірювання, виконує математичну обробку одержаних результатів та їх аналіз.

Особливість пропонованого практикуму полягає в тому, що підготовленість студента до конкретної лабораторної роботи (вхідний контроль) перевіряється у формі комп'ютерного тестування, мета якого – виявлення необхідних знань для виконання даної роботи. Комп'ютерне тестування використовується і при захисті робіт (підсумковий контроль). Приклади тестових завдань як для вхідного, так і для підсумкового контролю додаються до кожної лабораторної роботи.

Студент має самостійно виконати всі роботи і прозвітуватися за них. Одержані за виконання кожної лабораторної роботи бали складаються і враховуються при підсумковому оцінюванні знань студента після завершення семестру.

Ще однією особливістю лабораторного практикуму з фізики атома є застосування достатньо складного обладнання, а також значний обсяг необхідних вимірювань. Виходячи з цього, на виконання кожної лабораторної роботи відводиться чотири академічні години.

Виконанню будь-якої лабораторної роботи повинно передувати ретельне вивчення студентом правил безпечного поводження з тим устаткуванням, яке використовується у даній роботі. Перш за все, слід запобігати ураження електричним струмом, берегти очі від високоінтенсивного випромінювання електричної дуги, ртутних ламп, лазерів, берегтися опіків тощо. Конкретні правила техніки безпеки стосовно кожної роботи містяться в інструктивних матеріалах до неї.

Необхідні для виконання лабораторних робіт довідникові відомості (фізичні константи, таблиці фізичних величин, деякі математичні дані) наведені у додатках до практикуму.



Лабораторна робота №1

**Вивчення явища фотоелектричного ефекту та визначення сталої Планка**

*Мета роботи:* вивчення явища зовнішнього фотоелектричного ефекту.

*Прилади і матеріали:* лампа розжарювання з джерелом живлення, фотопомножувач ФЕП-2 у світлонепроникному корпусі, набір світлофільтрів, гальванометр, вольтметр, акумулятор.

*Завдання:* а) при домашній підготовці:

- засвоїти теоретичні відомості щодо визначення сталої Планка;
- зарисувати у робочий зошит електричну схему;
- описати будову та принцип дії приладів, що використовуються.

б) при виконанні роботи:

- скласти електричну схему і показати її викладачеві для перевірки;
- визначити сталу Планка методом затримуючого потенціалу;
- виконати необхідні розрахунки з визначення шуканої величини;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

*Правила техніки безпеки:*

- розташуйте прилади таким чином, щоб уникнути їх падіння;
- при складанні електричної схеми використовуйте провідники з непошкодженою ізоляцією.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Під зовнішнім фотоелектричним ефектом розуміють звільнення електронів з поверхні металів за допомогою світла. Явище було відкрито у 1887 році Г. Герцем, а пояснене А. Ейнштейном у 1905 році. Виходячи з квантових уявлень, Ейнштейн закон збереження енергії при взаємодії кванта світла  $h\nu$  з електроном речовини записав у вигляді формули, яка зараз носить його ім'я:

$$h\nu = A + \frac{m_e v_{\max}^2}{2}$$

тут  $A$  – робота виходу електрона з металу,  $m_e$  – маса електрона,  $v_{\max}$  – його максимальна швидкість.

Щоб припинити вихід електронів, потрібно прикласти до металу зворотну гальмівну різницю потенціалів, величина якої  $U$  визначається із співвідношення:

$$\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = eU.$$

У цьому разі  $h\nu = A + eU$ . Оскільки для даного металу  $A = const$ , то гальмівна напруга залежить лише від частоти  $\nu$  світла, яке спрямовується на метал. Це

відкриває можливість, вимірявши гальмівні напруги  $U_1$  і  $U_2$  при освітленні фотоелемента світлом двох різних частот  $\nu_1$  і  $\nu_2$ , визначити сталу Планка  $h$ :

$$\begin{cases} h\nu_1 = A + eU_1 \\ h\nu_2 = A + eU_2 \end{cases}$$

Розв'язок цієї системи рівнянь відносно  $h$  приводить до результату:

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \nu_2},$$

або через довжини світлових хвиль

$$h = \frac{e\lambda_1\lambda_2(U_1 - U_2)}{c(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (1).$$

Якщо скористатись принаймні трьома світлофільтрами із стандартного набору, то комбінуючи їх по два, можна одержати три результати відносно  $h$ , що є хоча і мінімальною, проте достатньою кількістю значень для визначення усередненої величини сталої Планка.

Спектральні характеристики деяких скляних світлофільтрів наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

| № | Марка світлофільтра | Товщина скла, мм | Довжина хвилі максимального пропускання, м | Частота хвилі максимального пропускання, Гц |
|---|---------------------|------------------|--|---|
| 1 | КС-13               | 2,78             | $700 \cdot 10^{-9}$                        | $4,3 \cdot 10^{14}$                         |
| 2 | ОС-13               | 3,02             | $650 \cdot 10^{-9}$                        | $4,6 \cdot 10^{14}$                         |
| 3 | ЖС-18               | 3,07             | $600 \cdot 10^{-9}$                        | $5,0 \cdot 10^{14}$                         |
| 4 | ЗС-1                | 1,00             | $540 \cdot 10^{-9}$                        | $506 \cdot 10^{14}$                         |
| 5 | СС-2                | 1,00             | $390 \cdot 10^{-9}$                        | $7,7 \cdot 10^{14}$                         |
| 6 | ФС-6                | 1,00             | $360 \cdot 10^{-9}$                        | $8,3 \cdot 10^{14}$                         |

Інший шлях визначення сталої Планка, у межах цієї лабораторної роботи, наступний. З рівняння  $h\nu = A + eU$  визначимо значення гальмівної напруги:

$$U = \frac{h\nu - A}{e} \quad (2).$$

Звідси слідує, що залежність  $U$  від частоти падаючого світла лінійна. Використавши шість вище зазначених світлофільтрів, одержимо шість значень для  $U$ . Графічно залежність  $U$  від  $\nu$  має вигляд відрізка прямої ВС на рис.1.1. Провести цей відрізок слід так, щоб кількість точок, нанесених на графік, зверху і знизу відрізка була однаковою.

Із рівняння (2) слідує, що  $tg\alpha = \frac{h}{e}$ . Тоді, визначивши із рис.1

$$tg\alpha = \frac{U_6 - U_1}{\nu_6 - \nu_1}, \text{ знаходимо } h = \frac{U_6 - U_1}{\nu_6 - \nu_1} \cdot e. \text{ Тобто одержали, як і слід було чекати,}$$

той самий вираз, але графічним шляхом.

Продовживши відрізок ВС до перетину його з вертикальною віссю U, отримуємо точку D. Із рівняння (2) слідує, що довжина відрізка OD, виміряна у масштабі напруг, дорівнює  $\frac{A}{e}$ . Тоді

$$A = e \times U_r \quad (3).$$

Роботу виходу A прийнято визначати у електрон-вольтах, вона для металів не перевищує кількох еВ.

У роботі використовується вакуумний сурм'яно-цезієвий фотоелектронний помножувач ФЕП-2. Його зовнішній вигляд зображено на рис.1.2.

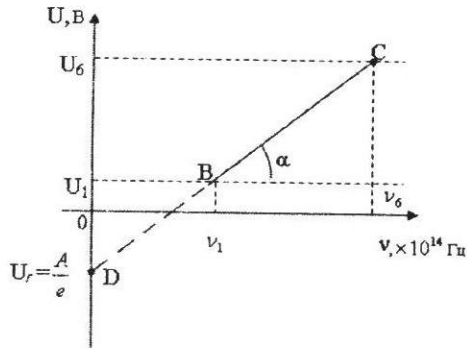


Рис.1.1

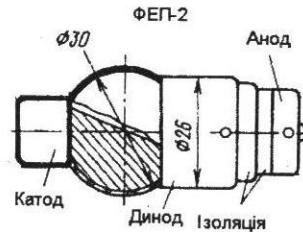


Рис.1.2

Електрична схема установки складається з двох незалежних кіл – кола освітлювача і кола фотопомножувача (рис.1.3).

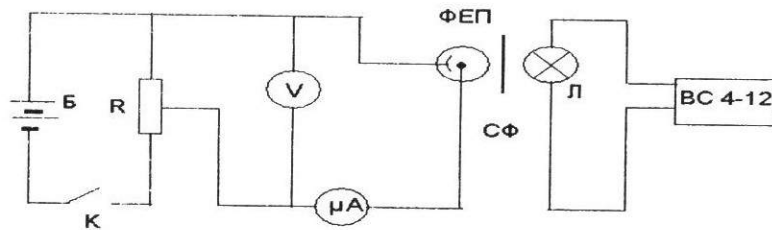


Рис.1.3

У якості освітлювача використовується низьковольтна лампочка розжарення, яка живиться від випростувала BC 4-12. Світло від лампочки через світлофільтр спрямовується на фотопомножувач. Гальмівна напруга на фотопомножувач подається через потенціометр від акумулятора. Вольтметр

повинен бути розрахований на декілька вольт і мати точність вимірювання не гірше 0,1 В. Мікроамперметр необхідно вибрати якомога чутливим.

#### Послідовність виконання роботи

1. Скласти електричну схему згідно рис. 1.3, показати її для перевірки викладачеві.
2. Перед фотоелементом встановити світлофільтр.
3. Тумблер на приладі ВС 4-12 поставити в положення «Вкл».
4. Ключем К замкнути коло фотопомножувача.
5. Спостерігаючи за показами мікроамперметра, переміщувати повзунок реостату до положення, поки мікроамперметр покаже відсутність струму.
6. Зняти з максимальною точністю покази вольтметра.
7. Замінити світлофільтр. *Увага!* При заміні світлофільтра слід обов'язково вимкнути освітлювач, перевівши тумблер на приладі ВС 4-12 у положення «Вик».
8. Після заміни світлофільтра повторити дії 3, 5, 6.
9. Виміряти гальмівну напругу для усіх світлофільтрів.
10. За формулою (1) визначити сталу Планка щонайменше для трьох пар світлофільтрів, розрахувати похибки вимірювань.
11. Побудувати графік залежності гальмівної напруги від частоти падаючого на фотокатод світла.
12. Користуючись одержаним графіком, визначити сталу Планка і роботу виходу.
13. Провести аналіз одержаних результатів, порівнявши їх з табличними.

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 239 - 247.
2. Кучерук І.М., Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1999. – 463с., ст. 260 – 264.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992.– 512 с., ст. 434 - 437.
4. Методична розробка до роботи.

#### Завдання для самоконтролю:

1. У чому полягає явище фотоефекту?
2. Сформулюйте закони фотоефекту.
3. Який вигляд має рівняння Ейнштейна для фотоефекту?
4. Що таке робота виходу?
5. Що таке червона межа фотоефекту?
6. Яка будова вакуумного фотоелемента?
7. Що таке затримуючий потенціал?
8. Чим пояснити наявність струму насичення у вакуумних фотоелементах? Чи буде струм насичення у газонаповнених фотоелементах?

9. Який принцип дії фотопомножувача?

10. Чи існують явища обернені фотоефекту?

Тестові завдання для вхідного контролю

1. Під фотоефектом розуміють:
  - а) звільнення електронів з речовини при її освітленні;
  - б) втрату металом позитивного заряду під дією світла;
  - в) утворення в речовині під дією світла пари «електрон-дірка»;
  - г) перерозподіл у речовині під дією світла електронів на енергетичних рівнях.

Яке з цих тверджень є хибним?

2. Яке з перелічених нижче явищ не може відбуватися під дією світла?
  - а) зовнішній фотоефект;
  - б) внутрішній фотоефект;
  - в) ядерний фотоефект;
  - г) вентиляний фотоефект.
3. При фотоефекті проявляються:
  - а) хвильові властивості світла;
  - б) корпускулярні властивості світла;
  - в) дуалістичні властивості світла;
  - г) дотепер невідомі властивості світла.
4. Поверхня деякого тіла освітлюється світлом з частотою  $\nu$ . Яку енергію може поглинати тіло?
  - а)  $0,5 h\nu$ ;
  - б)  $h\nu$ ;
  - в)  $2h\nu$ ;
  - г) будь-яку між  $h\nu$  та  $2h\nu$ .
5. Максимальна кінетична енергія вибитих світлом з металу електронів не залежить від:
  - а) частоти падаючого світла;
  - б) інтенсивності світла;
  - в) освітлюваного металу;
  - г) довжини світлової хвилі.
6. Кількість електронів, вибитих світлом за 1 с з металу, залежить від:
  - а) освітлюваного металу;
  - б) інтенсивності світла;
  - в) частоти світла;
  - г) температури металу.
7. Фотоефект може припинитися, якщо:
  - а) збільшити в 2 рази температуру освітлюваного металу;
  - б) збільшити в 2 рази відстань між поверхнею металу і джерелом світла;
  - в) зменшити в 2 рази світловий потік;
  - г) зменшити в 2 рази частоту падаючого світла.
8. Інерційність фотоефекта можна визначити за допомогою:
  - а) звичайного секундоміра;
  - б) мілісекундоміра;
  - в) мікросекундоміра;
  - г) наносекундоміра.
9. Падаюче на метал світло викликає фотоефект. Якщо інтенсивність світлового потоку збільшити удвічі, то кінетична енергія фотоелектронів:
  - а) не зміниться;
  - б) збільшиться;
  - в) збільшиться удвічі;
  - г) збільшиться учетверо.

10. Робота виходу електрона з металу:

$$\begin{matrix}
 \text{а) } A = h\nu; & \text{б) } A = \frac{hc}{\lambda_{\min}} & \text{в) } A = h\nu_{\max} & \text{г) } A = \frac{hc}{\lambda_{\max}}.
 \end{matrix}$$

Тестові завдання для підсумкового контролю

1. Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту має вигляд:

$$\begin{matrix}
 \text{а) } E = mc^2; \\
 \text{б) } h\nu = A + \frac{m\varrho^2}{2}; \\
 \text{в) } \frac{m\varrho^2}{2} = Q + h\nu; \\
 \text{г) } A = \frac{m\varrho^2}{2} + h\nu.
 \end{matrix}$$

2. Кількість електронів, вибитих світлом з одиниці поверхні освітлюваного металу за 1 с, залежить від:

- а) сили світла джерела;
- б) яскравості джерела світла;
- в) світлового потоку;
- г) освітленості поверхні металу.

3. При фотоефекті кінетична енергія вибитих з металу електронів залежить від: 1) частоти падаючого світла, 2) освітлюваного металу, 3) інтенсивності падаючого світла. Яке (-і) твердження вірне (-і)?

- а) лише перше;
- б) перше і друге;
- в) перше і третє;
- г) всі три.

4. Довжина хвилі, що відповідає червоній межі фотоефекта:

$$\begin{matrix}
 \text{а) } \lambda_{\max} = \frac{A}{c}; & \text{в) } \lambda_{\max} = \frac{hc}{A}; \\
 \text{б) } \lambda_{\max} = \frac{A}{h}; & \text{г) } \lambda_{\max} = \frac{Ac}{h}.
 \end{matrix}$$

де  $A$  – робота виходу електрона з металу.

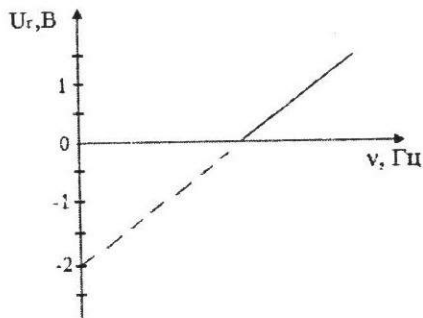
5. При зовнішньому фотоефекті гальмівна напруга залежить:

- а) лише від частоти світла;
- б) лише від інтенсивності світла;
- в) лише від того металу, який освітлюють;
- г) як від металу, так і від частоти світла.

6. Величина гальмівної напруги змінюється з частотою світла, яке викликає фотоефект: а) у прямій пропорційній залежності;

- б) у оберненій залежності;
- в) лінійно;
- г) за експоненціальним законом.

7. На рисунку наведено графік залежності гальмівної напруги від частоти світла, що діє на деякий метал. Чи можна визначити за цим графіком який це метал?



- а) не можна, недостатньо даних;  
 б) це може бути платина;  
 в) це срібло;  
 г) це може бути цезій.

8. Який з нижче наведених виразів для визначення гальмівної напруги є принципово хибним?

а)  $U = \frac{m_e \vartheta_{\max}^2}{2e}$ ;

б)  $U = \frac{A}{e}$ ;

в)  $U = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}$ ;

г)  $U = \frac{h}{e} \nu$ ,

де  $m_e$  – маса електрона,  $e$  – заряд електрона,  $\vartheta$  – швидкість фотоелектрона,  $A$  – робота виходу електрона з металу,  $\nu$  – частота світла, що викликає фотоелектричний ефект.

9. Збільшення інтенсивності падаючого на метал світла призводить до:

- а) збільшення кінетичної енергії вилітаючих електронів;  
 б) збільшення фотоструму;  
 в) збільшення гальмівної напруги;  
 г) зменшення роботи виходу;

10. Фотоелемент – це пристрій для:

- а) перетворення світлового сигналу в електричний;  
 б) підсилення світла;  
 в) підсилення фотоструму;  
 г) перетворення електричного сигналу у світловий.

**Визначення сталої Стефана – Больцмана**

*Мета роботи:* вивчити закони теплового випромінювання.

*Прилади і матеріали:* пірометр з телескопом ТЕРА-50, електрична лампочка, ЛАТР, вольтметр, амперметр, лінійка.

*Завдання:* а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою, вивчити закономірності теплового випромінювання;
  - з фізичного практикуму записати теоретичні відомості, порядок виконання роботи, зарисувати оптичну та електричну схеми;
  - вивчити будову та принцип дії пірометра.
- б) при виконанні роботи:
- скласти електричну схему і показати її викладачеві для перевірки;
  - визначити температуру спіралі лампи розжарювання безконтактним методом за її тепловим випромінюванням;
  - визначити сталу у законі Стефана – Больцмана;
  - виконати необхідні розрахунки з визначення шуканої величини та можливих похибок;
  - оформити звіт і подати його викладачеві.

*Правила техніки безпеки:*

- бережіться пошкодження очей при роботі з ТЕРА-50;
- при складанні електричної схеми використовуйте провідники з непошкодженою ізоляцією;
- при користуванні ЛАТРОм будьте уважні – напруга 220В!

*Теоретичні відомості та опис установки*

У становленні квантової механіки значну роль відіграло вивчення закономірностей теплового випромінювання, а в ньому – введення Г. Кірхгофом (1862р.) абстракції абсолютно чорного тіла. Це таке ідеалізоване тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання будь-яких частот при будь-яких температурах, поглинаюча здатність для нього рівна одиниці. Кірхгофом також було встановлено, що випромінювальна здатність тіл, температури яких однакові, найбільша саме у абсолютно чорного. Ця обставина зумовила у подальшому пошук тих параметрів, від яких залежить випромінювання чорного тіла, та їх взаємозв'язку. Перший крок у цьому напрямку був зроблений Й. Стефаном (1879 р.), який, на основі виконаних ним та іншими дослідниками експериментальних вимірювань, висловив здогадку, що повна енергія, випромінювана з одиниці поверхні тіла за одиницю часу, залежить лише від температури і пропорційна четвертому степеню абсолютної температури тіла. Пізніше (1884 р.) Л. Больцман теоретичними розрахунками підтвердив це припущення. Таким чином, було встановлено, що повна (інтегральна) випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла  $E$  є функцією лише температури  $T$  і пропорційна четвертому степеню цієї температури. Тобто

$$E(T) = \sigma T^4.$$

Цей вираз одержав назву закону Стефана – Больцмана, а коефіцієнт  $\sigma$  – сталої Стефана – Больцмана. Ретельні вимірювання показали, що

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Одним із завдань даної роботи є експериментальне визначення сталої  $\sigma$ . З цією метою зібрана установка (рис.2.1), яка складається з кола джерела

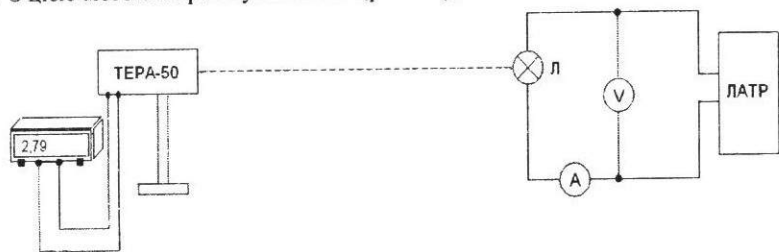


Рис.2.1

випромінювання та кола приймача випромінювання. Як випромінювач застосовується лампа розжарення з широкою плоскою спіраллю. Регульована напруга на неї подається від автотрансформатора. Приймачем випромінювання слугує пірометр з телескопом ТЕРА-50. Припускається, що потужність електричного струму, яким живиться лампа, пропорційна потужності випромінювання з поверхні її спіралі. Тобто  $\frac{IU}{S} \sim \sigma T^4$ , де  $S$  – площа видимої у телескоп ТЕРА-50 розжареної спіралі лампи.

Якщо дослідження відбуваються у середовищі з температурою  $T_0$  (у нашому випадку це абсолютна температура повітря у лабораторії), то  $\frac{IU}{S} \sim \sigma(T^4 - T_0^4)$ , або  $IU = a_r S(T^4 - T_0^4) \cdot \sigma$ . Звідки

$$\sigma = \frac{IU}{a_r S(T^4 - T_0^4)} \quad (2.1)$$

Коефіцієнт  $a_r$  – це стала приладу, яка залежить від ряду обставин, зокрема, враховує те, що спіраль лампи не є абсолютно чорним тілом, що не вся електрична енергія перетворюється у випромінювання тощо.

Крім того,  $a_r$  залежить і від температури випромінювача. Значення  $a_r \cdot S$  для деяких температур наведені у таблиці 2.1. Тут же подано співвідношення між напругою на виході пірометра та температурою випромінювача.

Таблиця складена для випадку, коли відстань між джерелом випромінювання і приймачем становить 1 м.

Таблиця 2.1

| Напруга на виході пірометра, мВ | Температура випромінювача, °C | Значення $a_r \cdot S$ , м <sup>2</sup> |
|---------------------------------|-------------------------------|---|
| 0,41                            | 500                           | $2,5 \cdot 10^{-3}$                     |
| 0,82                            | 600                           | $2,7 \cdot 10^{-3}$                     |
| 1,56                            | 700                           | $2,9 \cdot 10^{-3}$                     |
| 2,79                            | 800                           | $3,3 \cdot 10^{-3}$                     |
| 4,58                            | 900                           | $3,5 \cdot 10^{-3}$                     |
| 7,05                            | 1000                          | $3,8 \cdot 10^{-3}$                     |

### Послідовність виконання роботи

1. Скласти електричну схему згідно рис.2.1, показати її для перевірки викладачеві.
2. Автотрансформатором встановити таку напругу на лампі, щоб її спіраль ледь жевріла.
3. Телескоп ТЕРА-50 встановити на відстані 1 м від лампи і відрегулювати його таким чином, щоб спіраль лампи потрапила у центр поля зору телескопа. Площина спіралі при цьому повинна бути паралельна об'єктиву телескопа.
4. Поступово збільшуючи автотрансформатором напругу на лампі, домогтися, щоб напруга на виході пірометра становила 0,41 мВ, що відповідає температурі спіралі лампи 500°С.
5. Зняти покази вольтметра та амперметра і за формулою (2.1) визначити сталу  $\sigma$ .
6. Подібним чином визначити сталу Стефана – Больцмана для решти температур, що вказані у таблиці 2.1.
7. Виконати математичну обробку одержаних результатів, провести їх аналіз і порівняти експериментально одержане значення  $\sigma$  з табличним.

### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 260 - 266.
2. Кучерук І.М., Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 281 - 291.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992.– 512 с., ст. 424 - 429
4. Душенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1984. – 256с., ст. 185 - 191.
5. Методична розробка до роботи.

### Завдання для самоконтролю:

1. Що таке теплове випромінювання?
2. Які особливості теплового випромінювання?
3. У чому полягає закон Стефана – Больцмана?
4. Які тіла можна вважати абсолютно чорними?
5. Який вигляд має закон Стефана – Больцмана для сірих тіл?
6. Що таке повна випромінювальна здатність тіла?
7. Який вигляд має крива розподілу енергії в спектрі чорного випромінювання?
8. Який фізичний зміст площі, обмеженої кривою розподілу енергії в спектрі чорного випромінювання?
9. Наведіть приклади моделей абсолютно чорного тіла.
10. Яка будова та принцип дії телескопа ТЕРА-50?

### Тестові завдання для вхідного контролю

1. Характерною ознакою теплового випромінювання є його:
  - а) хаотичність;
  - б) рівноважність;
  - в) ізотропність;
  - г) неполяризованість.



2. Яка з перелічених нижче здатностей не притаманна тепловому випромінюванню?
- випромінювальна;
  - поглинальна;
  - розсіювальна;
  - відбивна.
3. Для абсолютно чорного тіла дорівнює нулеві:
- поглинальна здатність;
  - поглинальна і відбивна здатність;
  - відбивна і пропускна здатність;
  - пропускна і поглинальна здатність.
4. Зв'язок між температурною шкалою Цельсія і температурною шкалою Кельвіна має вигляд:
- $t^{\circ}C = 273 - TK$ ;
  - $t^{\circ}C = TK - 273$ ;
  - $t^{\circ}C = 273 + TK$ ;
  - $t^{\circ}C = -TK - 273$ .
5. Характер випромінювання абсолютно чорного тіла залежить від:
- природи тіла;
  - стану поверхні тіла;
  - температури;
  - агрегатного стану.
6. Яке співвідношення між випромінювальними здатностями реального і абсолютно чорного тіла? Тіла мають однакову температуру.
- випромінювальні здатності однакові;
  - випромінювальна здатність більша у абсолютно чорного тіла;
  - реальне тіло має більшу випромінювальну здатність;
  - співвідношення може бути будь-яким.
7. Зв'язок між спектральною випромінювальною здатністю тіла  $E(\nu, T)$  і його повною випромінювальною здатністю  $E(T)$  має вигляд:
- $E(\nu, T) = \int_0^{\infty} E(T) d\nu$ ;
  - $E(T) = \int_0^{\infty} \frac{E(\nu, T)}{d\nu}$ ;
  - $E(\nu, T) = E(T)$ ;
  - $E(T) = \int_0^{\infty} E(\nu, T) d\nu$ .
8. Закон Стефана-Больцмана для абсолютно чорного тіла має вигляд:  
 $E(T) = \sigma T^3$ ;
- $E(T) = \sigma T^4$ ;
  - $E(T) = \sigma^4 T$ ;
  - $E(T) = (\sigma T)^4$ .
9. Стала Стефана-Больцмана  $\sigma$  має значення:
- $5,67 \cdot 10^{-8}$ ;
  - $2,89 \cdot 10^{-3}$ ;

- $1,38 \cdot 10^{-23}$ ;
  - $8,31 \cdot 10^3$ .
10. Стала Стефана-Больцмана у цій роботі визначається виразом:
- $\sigma = \frac{a_r \cdot S(T^4 - T_0^4)}{IU}$ ;
  - $\sigma = \frac{a_r \cdot S \cdot I \cdot U}{(T^4 - T_0^4)}$ ;
  - $\sigma = \frac{(T^4 - T_0^4)}{a_r \cdot S \cdot I \cdot U}$ ;
  - $\sigma = \frac{I \cdot U}{a_r \cdot S(T^4 - T_0^4)}$ .

*Тестові завдання для підсумкового контролю*

1. Яке з нижче наведення співвідношень між повною випромінювальною здатністю  $E(T)$ , спектральною випромінювальною здатністю  $E(\nu, T)$ , поглинальною здатністю  $a(\nu, T)$ , відбивною здатністю  $r(\nu, T)$ , пропускною здатністю  $D(\nu, T)$  тіла є вірними?
- $E(\nu, T) + a(\nu, T) + r(\nu, T) = 1$ ;
  - $r(\nu, T) + a(\nu, T) + D(\nu, T) = 1$ ;
  - $E(T) + D(\nu, T) + a(\nu, T) = 1$ ;
  - $E(\nu, T) + r(\nu, T) + D(\nu, T) = 1$ .
2. Закон Кірхгофа для теплового випромінювання має вигляд:
- $\frac{E(\nu, T)}{\varepsilon(\nu, T)} = a(\nu, T)$ ;
  - $\frac{a(\nu, T)}{E(\nu, T)} = \varepsilon(\nu, T)$ ;
  - $\frac{\varepsilon(\nu, T)}{a(\nu, T)} = E(\nu, T)$ ;
  - $\frac{E(\nu, T)}{a(\nu, T)} = \varepsilon(\nu, T)$ ,
- де  $E(\nu, T)$  і  $a(\nu, T)$  – спектральні випромінювальна і поглинальна здатності тіла,  $\varepsilon(\nu, T)$  – спектральна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла.
3. Від яких з нижче перелічених чинників залежить випромінювальна здатність реальних тіл: 1) температури, 2) хімічного складу, 3) фізичного стану, 4) чистоти поверхні?
- лише від першого;
  - від першого і другого;
  - лише від третього;
  - від усіх чотирьох.
4. При кімнатній температурі шматок кераміки має зелений колір. Який буде його колір у розжареному стані?
- зелений;
  - жовтогарячий;
  - лілово-фіолетовий;
  - червоно-оранжевий.



5. Закон зміщення Віна має вигляд:

- а)  $\lambda_{\max} \cdot T = b$ ;
- б)  $\lambda_{\max} \cdot T^2 = b$ ;
- в)  $\lambda_{\max} \cdot T^3 = b$ ;
- г)  $\lambda_{\max} \cdot T^4 = b$ .

6. Константа у законі зміщення Віна рівна:

- а)  $5,67 \cdot 10^{-8}$ ;
- б)  $2,9 \cdot 10^{-3}$ ;
- в)  $1,38 \cdot 10^{-23}$ ;
- г)  $8,31 \cdot 10^3$ .

7. У законі зміщення Віна  $\nu_{\max}$  це:

- а) максимальна частота, яку може випромінювати абсолютно чорне тіло;
- б) максимальна частота, яку випромінює нагріте до температури  $T$  тіло;
- в) частота, яка відповідає максимуму випромінювальної здатності тіла;
- г) частота, яка відповідає короткохвильовій межі випромінювання.

8. Формула Релея-Джинса для спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла має вигляд:

- а)  $\varepsilon(\nu, T) = \frac{kT}{2\pi} \left(\frac{\nu}{c}\right)^2$ ;
- б)  $\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi}{kT} \left(\frac{c}{\nu}\right)^2$ ;
- в)  $\varepsilon(\nu, T) = (2\pi \frac{\nu}{c})^2 \cdot kT$ ;
- г)  $\varepsilon(\nu, T) = \left(\frac{2\pi\nu^2}{c^2}\right) \cdot kT$ .

9. Формула Планка для випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла:

- а)  $\varepsilon(\nu, T) = 2\pi \left(\frac{\nu}{c}\right)^2 \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$ ;
- б)  $\varepsilon(\nu, T) = (2\pi \frac{\nu}{c})^2 \cdot \frac{kT}{\exp\left(\frac{kT}{h\nu}\right) - 1}$ ;
- в)  $\varepsilon(\nu, T) = \frac{h\nu}{2\pi} \left(\frac{\nu}{c}\right)^2 \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$ ;
- г)  $\varepsilon(\nu, T) = \left(\frac{c}{\nu}\right)^2 \cdot \frac{2\pi}{\exp\left(\frac{kT}{h\nu}\right) - 1}$ .

10. Реальні фізичні тіла, які існують у природі, можна вважати:

- а) чорними;
- б) сірими;
- в) білими;
- г) селективними.

### Лабораторна робота №3

#### Вивчення закономірностей у спектрі водню і визначення сталої Рідберга

*Мета роботи:* дослідження спектру випромінювання атомарного водню.

*Прилади і матеріали:* монохроматор УМ-2, ртутна лампа, воднева газорозрядна трубка, джерело високої напруги для живлення газорозрядної трубки, таблиця основних довжин хвиль парів ртуті.

*Завдання:* а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою, вивчити закономірності випромінювання атома водню;
- з фізичного практикуму записати хід роботи та будову і принцип дії необхідних приладів;
- зарисувати оптичну схему монохроматора УМ-2.

б) при виконання роботи:

- скласти електричну схему і показати її викладачеві для перевірки;
- за спектром випромінювання ртуті проградувати монохроматор;
- за спектром випромінювання водню визначити сталу Рідберга;
- виконати необхідні розрахунки з визначення шуканої величини та можливих похибок;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

*Правила техніки безпеки:*

- бережіться пошкодження очей, ні у якому разі не дивіться назустріч випромінюванню ртутної лампи;
- при складанні електричної схеми використовуйте провідники з непошкодженою ізоляцією;

*Теоретичні відомості та опис установки*

Досліджуючи спектральний склад випромінювання атомарного водню Й. Бальмер показав (1885 р.), що спектральні лінії у видимій області розташовані в строгому порядку. Пізніше (1913 р.) Н. Бор, виходячи з планетарної моделі атома Е. Резерфорда, для пояснення спектральних закономірностей водню постулює:

1. Атом може перебувати лише в певних станах, у яких він, у супереччя класичній електродинаміці, не випромінює світло. Ці стани називаються стаціонарними.
2. Випромінювання відбувається, по-перше, квантами  $h\nu$ , по-друге, під час переходу атома із стаціонарного стану з вищою енергією  $E_m$  у стаціонарний стан з меншою енергією  $E_n$ . Тобто

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (3.1)$$

3. Стаціонарними слід вважати тільки ті орбіти, момент кількості руху електрона на яких відповідає співвідношенню

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad (3.2)$$

де  $m_e$  – маса електрона,  $v$  і  $r$  – швидкість і радіус орбіти електрона,  $n$  – головне квантове число, яке може мати значення 1, 2, 3, 4...

Обертний рух електрона навколо ядра, згідно другого закону Ньютона, описується формулою

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3.3)$$

Розв'язуючи рівняння (3.2) і (3.3) відносно  $r$ , знаходимо

$$r = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m_e} n^2. \quad (3.4)$$

Приведені вище міркування справедливі не лише для атома водню, а й для воднеподібних іонів, заряд ядра яких  $Ze$ . Тоді рівняння (3.4) набуде вигляду:

$$r = \frac{h^2 \epsilon_0}{Z\pi e^2 m_e} n^2. \quad (3.5)$$

Визначимо енергію електрона, що обертається навколо ядра. Його повна енергія:

$$E = E_k + E_n = \frac{m_e v^2}{2} + \frac{Ze(-e)}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Підставивши в останнє рівняння значення  $m_e v^2$  з (3.3), одержимо

$$E = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r},$$

або з врахуванням (3.5):

$$E = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (3.6)$$

З (3.6) слідує, що енергія електрона в атомі квантована. Чим більше  $n$ , тобто чим далі електрон від ядра, тим більшу енергію має атом. Під час переходу атома із стаціонарного стану з вищою енергією  $E_m$  ( $m = n+1, n+2, n+3...$ ) у стаціонарний стан з нижчою енергією  $E_n$  відбувається випромінювання фотона  $h\nu$ . Тобто, на основі (3.1), одержуємо:

$$h\nu = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{m^2} - \left( -\frac{Z^2 e^4 m_e}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} \right), \text{ або}$$

$$h\nu = \frac{Z^2 e^4 m_e}{8h^2 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \text{ Звідки}$$

$$\nu = \frac{Z^2 e^4 m_e}{8h^3 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (3.7)$$

Коефіцієнт  $\frac{e^4 m_e}{8h^3 \epsilon_0^2} = 3,2896 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  одержав назву сталої Рідберга  $R$ .

Тоді

$$\nu = Z^2 R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Або

$$\lambda = \frac{c}{Z^2 R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}. \quad (3.8)$$

Якщо  $n$  взяти рівним одиниці, а значить  $m$  може мати значення 2, 3, 4, 5, то одержимо сукупність спектральних ліній, кожній з яких відповідає, згідно (3.8), своя довжина хвилі. Множину цих ліній називають спектральною серією. Комбінуючи подібним чином  $n$  і  $m$ , одержують набір серій, деякі характеристики яких наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

| Значення $n$ | Можливі значення $m$ | Довжина хвилі, нм |         | Спектральна область      | Назва серії |
|--------------|----------------------|-------------------|---------|--------------------------|-------------|
|              |                      | min               | max     |                          |             |
| 1            | 2,3,4...∞            | 91,2              | 121,6   | Ультрафіолетова          | Лаймана     |
| 2            | 3,4,5...∞            | 364,7             | 656,3   | Видима                   | Бальмера    |
| 3            | 4,5,6...∞            | 820,6             | 1875,1  | Близька інфрачервона     | Пашена      |
| 4            | 5,6,7...∞            | 1458,7            | 4052,0  | Інфрачервона             | Брекетта    |
| 5            | 6,7,8...∞            | 2279,3            | 7459,4  | Далека інфрачервона      | Пфунда      |
| 6            | 7,8,9...∞            | 3282,1            | 12371,1 | Дуже далека інфрачервона | Хемфрі      |

Дослідження наступних серій експериментально складне

Спостереження спектрів у даній роботі виконується за допомогою монохроматора УМ-2. Попередньо його необхідно проградувати, тобто встановити відповідність між поділками барабану монохроматора і довжиною хвилі. З цією метою використовують стандартні спектральні лінії ртуті, довжини хвиль для яких добре відомі. Вони зведені у таблицю 3.2. У цій таблиці наведені кольори спектральних ліній ртуті та відповідні їм довжини хвиль.

Таблиця 3.2

| Колір лінії ртуті    | Довжина хвилі, нм |
|----------------------|-------------------|
| Червоний             | 623,4             |
| Червоно - оранжевий  | 612,4             |
| Червоно - оранжевий  | 607,3             |
| Жовтий (ліва лінія)  | 579,1             |
| Жовтий (права лінія) | 577,0             |
| Жовто - зелений      | 546,1             |
| Зелений              | 491,6             |
| Синій                | 435,8             |
| Синій                | 433,9             |
| Синьо - фіолетовий   | 410,8             |
| Фіолетовий           | 407,7             |

Зовнішній вигляд та оптична схема універсального монохроматора УМ-2 зображені відповідно на рис.3.1 та 3.2.

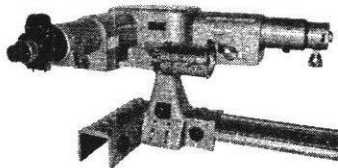


Рис.3.1

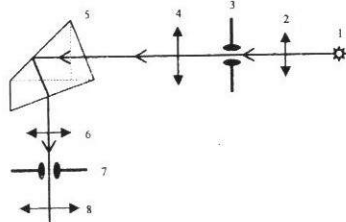


Рис.3.2

Світло від джерела 1 спрямовується на коліматорну вхідну лінзу 2, освітлює щілину 3, яка розташована у фокусі об'єктивної лінзи коліматора 4, і паралельним пучком потрапляє на збірну диспергуючу призму Аббе 5, яка розкладає світло у спектр. Об'єктив 6, щілина 7 і окуляр 8 утворюють зорову трубу.

Призма обертається механізмом, з'єднаним з барабаном, який має спіральну шкалу з поділками від 0 до 3500°. При повороті барабана на одну поділку система призми обертається на 20°.

#### Послідовність виконання роботи

1. На місце джерела світла встановити ртутну лампу. Домогтися рівномірного освітлення лінзи 2.
2. За допомогою щілини та окуляра домогтися чіткого і різкого зображення однієї із спектральних ліній ртуті.
3. Обертаючи барабан, послідовно, починаючи з червоної, встановити у поле зору всі наведені у таблиці 3.2 лінії і зняти відповідні покази

шкали відлікового барабану. Вимірювання повторити тричі, обчислити середні значення показів барабану для кожної лінії.

4. Користуючись таблицею 3.2, побудувати на міліметровому папері градувальну криву монохроматора.
5. Замінити ртутну лампу на водневу газорозрядну трубку.
6. Віднайти в спектрі водню принаймні чотири лінії.
7. Послідовно, сумішаючи кожну лінію з орієнтиром в окулярі, визначити відповідні покази на шкалі відлікового барабану. Вимірювання повторити тричі і знайти середні значення показів барабану для кожної лінії.
8. За градувальною кривою визначити для кожної спектральної лінії водню довжину хвилі.
9. Із формули (3.8), маючи на увазі, що для видимої спектральної області атомарного водню  $Z=1$  і  $n=2$ , визначити сталу Рідберга

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

10. Розрахунки провести для усіх довжин хвиль п.8, взявши  $m$  послідовно рівним 3, 4, 5 і 6. Визначити середні значення  $R$ , провести аналіз одержаного результату, порівняти його з табличним.

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 200 - 203.
2. Кучерук І.М., Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463., ст. 220 - 224.
3. Душенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1984. – 256с., ст. 207 - 211.
4. Методична розробка до роботи.

#### Запитання для самоконтролю:

1. Сформулюйте постулати Бора.
2. З'ясуйте фізичний зміст дослідів Франка і Герца.
3. Які існують типи спектрів?
4. Які спектральні серії атома водню Вам відомі?
5. Що таке потенціал збудження та іонізація атома?
6. Яким квантовим числом відповідає видима серія випромінювання атома водню?
7. Який вигляд має узагальнена формула Бальмера?
8. Який фізичний зміст константи Рідберга?
9. Чому відрізняються константи Рідберга для водню та воднеподібних іонів?
10. Назвіть основні елементи монохроматора УМ-2.

Тестові завдання для вхідного контролю

- Чи залежать розміри воднеподібних іонів від кількості протонів у ядрі?
  - не залежать;
  - існує лінійна залежність;
  - залежність пряма пропорційна;
  - залежність обернена пропорційна.
- Атом поглинув фотон з частотою, яка відповідає зеленому світлу. Яке світло може випромінювати атом?
  - зелене;
  - червоне;
  - синє;
  - будь-яке в діапазоні від зеленого до ніякого.
- Які з перелічених нижче умов необхідні для одержання лінійчастого спектра випромінювання: 1) висока температура, 2) високий тиск, 3) низька температура, 4) низький тиск, 5) атомарний стан речовини, 6) молекулярний стан речовини, 7) конденсований стан речовини?
  - достатньо першої;
  - третья, четверта, шоста;
  - перша, четверта та п'ята;
  - друга та шоста.
- Чи містить стала Рідберга певний фізичний зміст?
  - це найбільша частота, яку здатний випромінювати атом водню;
  - це найбільша енергія, яку здатний поглинути атом водню;
  - це потенціал іонізацій атома водню;
  - не містить.
- Чи однакова константа Рідберга для водню та воднеподібних іонів?
  - однакова;
  - для атома водню вона дещо більша;
  - вона більша для воднеподібних іонів;
  - для певних іонів вона більша, а для інших менша.
- Які досліді підтвердили теорію Бора?
  - Резерфорда;
  - Штерна і Герлаха;
  - Столетова;
  - Франка і Герца.
- До видимої області належить серія:
  - Лаймана;
  - Бальмера;
  - Пашена;
  - Брекетта.
- Під потенціалом збудження розуміють:
  - енергію, яким володіє одиничний заряд у полі ядра;
  - роботу, яку потрібно виконати, щоб відірвати електрон від ядра;
  - потенціал електричного поля у тій точці, де знаходиться електрон;
  - напругу електричного поля, за допомогою якої можна перевести електрон на вищий рівень.

9. Стала Рідберга визначається виразом:

- $\frac{e^4 m_e}{8h^3 \epsilon_0^2}$ ;
- $\frac{e^4 h}{4\pi \epsilon_0}$ ;
- $\frac{h^3 \epsilon_0^2}{8e^3 m_e}$ ;
- $\frac{4\pi \epsilon_0}{h^2 m_e}$ .

10. Робочою формулою у цій роботі є вираз:

- $R = \frac{\lambda}{c \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$ ;
- $R = \frac{1}{2^2} \frac{1}{c \lambda} \frac{1}{m^2}$ ;
- $R = \frac{1}{\lambda \cdot c \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$ ;
- $R = \frac{c}{\lambda \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$ .

Тестові завдання для підсумкового контролю

- Чи залежать розміри атомів від кількості електронів у них?
  - не залежать;
  - існує лінійна залежність;
  - залежність пряма пропорційна;
  - залежність обернено пропорційна.
- У даній роботі досліджується спектр:
  - емісійний;
  - абсорбційний;
  - комбінаційний;
  - люмінесцентний.
- Чи існує залежність сталої Рідберга від характеристик ядра атома – його заряду та маси?
  - у межах ізотопів одного елемента вона однакова;
  - залежить лише від числа нуклонів у ядрі;
  - залежить як від заряду ядра так і від його маси;
  - стала Рідберга однакова для всіх воднеподібних іонів.
- Яке співвідношення між сталою Рідберга  $R$  та сталою Больцмана  $B$ ?
  - $R = \frac{4}{B}$ ;
  - $R = 4B$ ;
  - $R = 2B$ ;
  - $\frac{2}{B}$ .

5. Спектральний терм визначається виразом:

а)  $\frac{R}{\lambda}$ ;      б)  $\frac{R}{\nu}$ ;      в)  $\frac{n}{R}$ ;      г)  $\frac{R}{n^2}$ .

6. Потенціал іонізації це:

- а) енергія, яка потрібна для утворення іона;  
б) напруга, під дією якої електрон залишає атом;  
в) потенціал електричного поля іонізованого атома;  
г) потенціал електричного поля атома у тій точці, де знаходиться валентний електрон.

7. Найменша довжина хвилі, яку може випромінювати атом водню знаходиться в межах:

- а) від 0 до 50 нм;      б) від 50 до 100 нм;  
в) від 100 до 200 нм;      г) від 200 до 400 нм.

8. Умова квантування орбіт має вигляд:

а)  $\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = n \frac{h}{2\pi}$ ;      б)  $\frac{mv^2}{2} = nh$ ;  
в)  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$ ;      г)  $\frac{mv^2}{4\pi\epsilon_0 r} = n \frac{h}{2\pi}$ .

9. Радіус  $n$ -ї орбіти електрона визначається формулою:

а)  $r_n = \frac{nh^2 \epsilon_0}{\pi Z m^2 e^2}$ ;      б)  $r_n = \frac{Ze^2 m^2}{4\pi\epsilon_0 n^2}$ ;  
в)  $r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m Z e^2}$ ;      г)  $r_n = \frac{Z^2 m \epsilon_0}{\pi e^2 n^2}$ .

10. Формула Бальмера має вигляд:

а)  $\nu = Z^2 R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ ;      б)  $\nu = \frac{Z^2 c}{\left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$ ;  
в)  $\nu = \frac{\left( \frac{1}{n^2} + \frac{1}{m^2} \right)}{Z^2 R}$ ;      г)  $\nu = hZ^2 \left( \frac{1}{n^2} + \frac{1}{m^2} \right)$ .

#### Лабораторна робота №4

#### Якісний спектральний аналіз сплавів

**Мета роботи:** визначення хімічного складу сталі за її лінійчастим спектром.

**Прилади і матеріали:** стилоскоп, досліджувані зразки, атлас спектральних ліній для кварцевого спектрографа.

**Завдання:** а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою, вивчити закономірності атомарних спектрів випромінювання;
- ознайомитись з методами проведення якісного та кількісного спектрального аналізу;
- зарисувати оптичну схему стилоскопа.

б) при виконанні роботи:

- у якості невідомого зразка використати свердло, закріпити його на стилоскопі;
- ввімкнути стилоскоп у режимі дуги;
- порівняти у видимій частині спектра випромінювання наявні лінії з лініями атласу, віднайти домішки;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

**Правила техніки безпеки:**

- бережіть очі, уникайте потрапляння в них випромінювання електричної дуги;
- при зміні зразків дочекайтеся їх охолодження.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Спектральний аналіз – фізичний метод визначення хімічного складу речовини на основі вивчення його спектрів.

Спектральний аналіз можна провести шляхом дослідження спектрів:

- випромінювання (емісійний аналіз);
- поглинання (абсорбційний аналіз);
- комбінаційного розсіювання;
- люмінесценції;
- рентгенівського випромінювання.

Крім того, спектральний аналіз поділяють на якісний та кількісний. Якісний аналіз полягає у виявленні та ототожненні в спектрі досліджуваної речовини спектральних ліній, які належать шуканому елементу. Здійснюють це за допомогою атласів спектральних ліній елементів. Кількісний аналіз ґрунтується на зв'язку між інтенсивністю спектральної лінії і концентрацією відповідного хімічного елемента у досліджуваній речовині.

Завданням даної роботи є проведення якісного спектрального аналізу легуваних сталей на основі вивчення їх емісійних спектрів. Одержують і досліджують лінійчасті спектри випромінювання зразків за допомогою стилоскопа СЛ-11А, який призначений для швидкого візуального якісного і



напівкількісного спектрального аналізу сталі та кольорових сплавів у видимій частині спектра.

Стилоскоп застосовується для швидких аналізів, до точності яких не висувають високих вимог. Тривалість аналізу одного зразка по всіх елементах – 2-3 хвилини. Аналіз на стилоскопі не супроводжується пошкодженням зразка, що дозволяє перевіряти готові деталі.

Дослідження за допомогою стилоскопа полягає в наступному: між зразком, що аналізується, і електродом запалюється електрична дуга, її випромінювання за допомогою трьохлінзової освітлювача спрямовується на щілину стилоскопа; спостерігач розглядає в окуляр спектр сплаву, що аналізується. Діапазон вимірювань – 390-700 нм.

Пристрій побудований за автоколімаційною схемою з горизонтальним розташуванням елементів.

Оптична схема пристрою зображена на рис.4.1

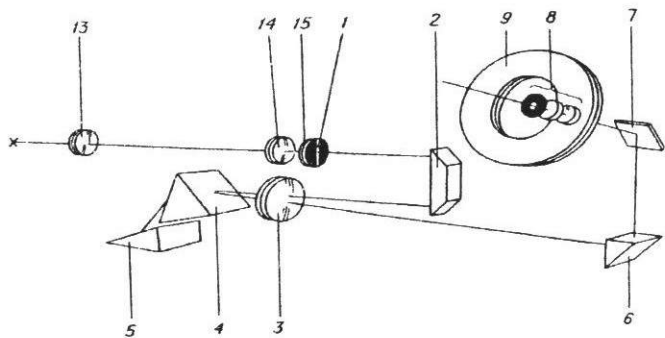


Рис. 4.1

Світло від дуги за допомогою трьохлінзової системи рівномірно заповнює щілину 1, відбиваюча призма 2 направляє пучок на об'єктив 3, в фокусі якого розташована щілина; отриманий паралельний пучок попадає на дисперсійні призми 4 і 5. Нижня частина призми 5, з кутом заломлення  $30^\circ$ , покрита сріблом, тому промені відбиваються від неї, проходять у зворотньому напрямку і потрапляють на прямокутну призму 6 і дзеркало 7, які направляють їх в окуляр 8.

У фокальній площині окуляра розташований фотометричний клин 9.

Конструктивно стилоскоп складається із таких основних частин: освітлюючої системи, щілини з об'єктивом, окулярної головки, диспергуючої системи, відбивної призми. Всі частини розташовані в середині корпусу 10 (рис. 4.2). На основі 11 змонтований столик 12 для розміщення зразків.

Освітлююча система, що складається з конденсорів 13, 14, 15 (рис. 4.1) з фокусною відстанню відповідно 70, 50, 60 мм, змонтована на кронштейні і фланці, які з'єднані між собою світлозахисною трубкою.

Диспергуюча система складається з двох призм: одна, з кутом заломлення  $60^\circ$ , закріплена на містку нерухомо, друга, з кутом заломлення

$30^\circ$ , разом зі своїм містком може повертатися, в результаті чого спектр переміщується в полі зору окуляра.

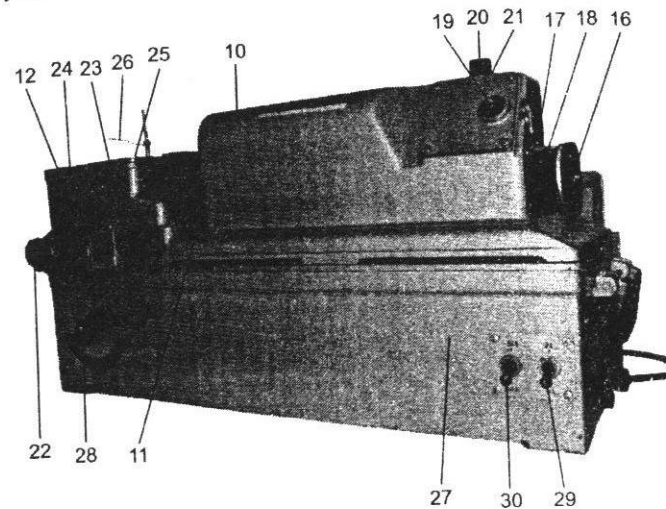


Рис.4.2

Поверот призми здійснюється маховичком 16 (рис. 4.2), що з'єднаний з барабаном, на якому нанесена рівномірна шкала 17 з ціною поділки 2 і шкала 18 з символами хімічних елементів. Символами позначені групи спектральних ліній, що використовуються для аналізу сталі на відповідні домішки. При суміщенні символу з відліковим штрихом барабана в полі зору окуляра з'являється відповідна група ліній.

При обертанні маховичка 16 відбувається перефокусування об'єктиву, а відповідно, і спектру, що спостерігається в полі зору окуляра, так як при повороті призми повертається кулачок, що штовхає тубус об'єктива, встановлюючи об'єктив у відповідне положення.

На кронштейні окулярної головки розташована прямокутна призма дзеркало, фотометричний клин зі шкалою і окуляр 19 в оправі.

Фотометричний клин розміщений в площині зображення спектра і розташований вздовж спектральних ліній у вигляді вузької смуги в центрі поля зору. Переміщення клину здійснюється маховичком і відраховується по шкалі, що спостерігається в полі зору окуляра. У тих випадках, коли потрібно працювати без фотометричного клина, слід маховичком привести в поле зору діафрагму, що відповідає встановленому окуляру. Для цього необхідно встановити крапку, що нанесена на маховичку, напроти відповідного позначення ( $13.5^x$  або  $20^x$ ) на шкалі 21.

На основі 11 розміщений також тримач електродів, який можна переміщувати по висоті маховичком 22 і в напрямку, перпендикулярному



оптичній вісі, – маховичком 23. Маховичком 24 можна обернути навколо власної вісі дисковий електрод. Досліджуваний зразок закріплюють на столику 25 пружинним притискувачем 26. Відстань між зразком і електродом встановлюють біля 3 мм. Джерелом збудження спектра слугує спеціальний генератор 27, який перемикачем 28 можна перевести в режим дуги або іскри. Напруга від генератора до електрода підводиться високовольтним проводом через контакт на кронштейні тримача, а до зразка, встановленого на столику, через заземлений корпус приладу.

Досліджуваний зразок слід очистити від фарби, жухелиці, іржі тощо. Зразком може бути, наприклад, свердло для металу.

#### Послідовність виконання роботи

1. Закріпити зразок на столику.
2. Користуючись шаблоном та маховичками 22 і 23, встановити відстань між зразком і дисковим електродом близько 3 мм.
3. Перемикач 28 перевести в положення «іскра», тумблер 29 – у положення «2А».
4. Після перевірки заземлення генератора, перемикач 30 перевести в положення «Вкл».
5. Переміщуючи окуляр 19, досягти максимальної чіткості спектральних ліній.
6. Із атласа спектральних ліній вибрати картку певного видимого діапазону і, спостерігаючи в окуляр та обертаючи маховичок 16, встановити в поле зору ту область спектра, яка відповідає картці атласа.
7. Зіставити спостережувані спектральні лінії з лініями картки і оцінити вміст елементів у досліджуваному зразку.
8. Дії пунктів 6 і 7 повторити для інших спектральних областей.
9. Експерименти провести у різних режимах роботи генератора.

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 200 - 203.
2. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 220 -224.
3. Дущенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1984. – 256с., ст. 207 - 211.
4. Методична розробка до роботи.

#### Запитання для самоконтролю:

1. Які існують типи спектрів?
2. Який внутрішній механізм випромінювання світла атомами речовини?
3. Які фізичні основи розкладання випромінювання світла в спектр?
4. Що таке спектральна лінія? Від чого залежить її ширина?
5. Чим відрізняються лінійчасті спектри випромінювання і поглинання?
6. У чому суть якісного і кількісного спектрального аналізу?
7. Чим відрізняється абсорбційний аналіз від емісійного?

8. Які домішки можна виявити у сплавах заліза?
9. Які спектральні серії атому водню Вам відомі?
10. Яка будова і принцип дії стилоскопа?

#### Тестові завдання для вхідного контролю

1. В основі спектрального аналізу знаходиться явище:
  - а) інтерференції;
  - б) дифракції;
  - в) дисперсії;
  - г) поляризації.
2. У даній роботі дослідження проводиться за допомогою:
  - а) спектроскопа;
  - б) спектрографа;
  - в) спектрометра;
  - г) спектрофотометра.
3. За допомогою стилоскопа СЛ-11А можна проводити дослідження в областях (-і) спектра:
  - а) інфрачервоної;
  - б) видимій;
  - в) ультрафіолетвій;
  - г) інфрачервоної, видимій, ультрафіолетвій.
4. Аналіз у цій роботі проводиться на основі дослідження:
  - а) лінійчастого спектра емісії;
  - б) лінійчастого спектра абсорбції;
  - в) смугастого спектра поглинання;
  - г) суцільного спектра випромінювання.
5. Лінійчастий спектр поглинання дають:
  - а) атоми при їх нагріванні;
  - б) молекули при їх збудженні;
  - в) атоми при звичайних температурах;
  - г) гази при високому тиску.
6. При якісному спектральному аналізі наявність у речовині певних домішок визначається:
  - а) за шириною спектральних ліній;
  - б) за яскравістю спектральних ліній;
  - в) за кількістю спектральних ліній;
  - г) за допомогою спектральних атласів.
7. За допомогою спектрального аналізу можна виявити наявність домішок, концентрація яких не перевищує:
  - а)  $10^{-6}\%$ ;
  - б)  $10^{-4}\%$ ;
  - в)  $10^{-2}\%$ ;
  - г)  $10^{-1}\%$ .
8. Роздільна здатність  $R$  спектрального приладу визначається виразом:
  - а)  $R = \lambda \cdot \delta\lambda$ ;
  - б)  $R = \lambda + \delta\lambda$ ;
  - в)  $R = \frac{\delta\lambda}{\lambda}$ ;
  - г)  $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$ .
9. Роздільна здатність у сучасних спектральних приладах має порядок:
  - а)  $10^{-5}$ ;
  - б)  $10^{-3}$ ;
  - в)  $10^3$ ;
  - г)  $10^5$ .
10. Диспергуюча система стилоскопа СЛ-11А складається з:
  - а) однієї призми;
  - б) двох призм;
  - в) трьох призм;
  - г) чотирьох призм.

Тестові завдання для підсумкового контролю

- Метою спектрального аналізу є:
  - визначення міжатомних відстаней у речовині;
  - визначення складу речовини;
  - вимірювання розмірів атомів та молекул речовини;
  - вивчення випромінювальної здатності речовини.
- У даній роботі досліджується спектр:
  - емісійний;
  - абсорбційний;
  - комбінаційний;
  - рентгенівський.
- У спектральних приладах основними елементами є:
  - щілини;
  - лінзи;
  - призми;
  - фотопластинки.
- Стилоскоп СЛ-11А належить до:
  - спектрометрів;
  - монохроматорів;
  - спектрографів;
  - спектроскопів.
- Лінійчатий спектр випромінювання можна одержати:
  - при нагріванні будь-якої речовини не залежно від її агрегатного стану;
  - від нагрітих атомів;
  - при нагріванні молекул;
  - від нагрітих атомів при високому тиску.
- Оптичні елементи у стилоскопі СЛ-11А виготовлені із:
  - кварцу;
  - скла;
  - органічного скла;
  - лужно-галоїдних монокристалів.
- Які з нижче перелічених характеристик оптичних систем притаманні спектральним приладам: 1) кутова дисперсія, 2) лінійна дисперсія, 3) збільшення, 4) оптична сила, 5) світлосила, 6) роздільна здатність, 7) відносний отвір?
  - всі сім;
  - перша, друга, п'ята та шоста;
  - всі перелічені, крім третьої;
  - третья, четверта та сьома.
- Кількість певної речовини у досліджуваному зразку на основі спектрального аналізу можна оцінити за:
  - допомогою спеціальних таблиць і атласів;
  - шириною спектральних ліній;
  - кількістю спектральних ліній;
  - інтенсивністю ліній.
- Кутовою дисперсією призми  $D$  є:
  - $D = \frac{d\lambda}{d\varphi}$ ;
  - $D = d\lambda \cdot d\varphi$ ;
  - $D = \frac{d\varphi}{d\lambda}$ ;
  - $D = \frac{\varphi}{d\varphi}$ .
- Діапазон вимірювань стилоскопа СЛ-11А становить:
  - 380 – 760 нм;
  - 390 – 700 нм;
  - 400 – 710 нм;
  - 410 – 740 нм.

Лабораторна робота №5

Дослідження спектрального складу люмінесценції кристалофосфору

Мета роботи: опанування методикою люмінесцентних досліджень.

Прилади і матеріали: монохроматор УМ-2, ртутна лампа, блок живлення ртутної лампи, фотопомножувач, блок живлення фотопомножувача, мікроамперметр.

Завдання: а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою, вивчити основні закономірності люмінесценції;
- з методичної розробки до роботи описати у робочому зошиті установку, метод приготування люмінофору, оптичну схему монохроматора;
- вивчити будову і принцип дії фотопомножувача.

б) при виконанні роботи:

- скласти електричну схему і показати її викладачеві для перевірки;
- приготувати кристалофосфор;
- дослідити залежність інтенсивності люмінесценції кристалофосфору від довжини хвилі;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

Правила техніки безпеки:

- під час приготування кристалофосфору бережіться опіків;
- бережіть очі від випромінювання ртутної лампи;
- будьте уважні при використанні блоків живлення фотопомножувача (напруга близько 1 кВ) та ртутної лампи (напруга 220 В).

Теоретичні відомості та опис установки

Люмінесценція – випромінювання, що являє собою надлишок над тепловим випромінюванням тіла при даній температурі і яке має тривалість, що значно перевищує період світлових коливань.

Ознака протяжності світіння однозначно відрізняє люмінесценцію не лише від рівноважного теплового випромінювання, а й від інших – нерівноважних процесів. Ця ознака дає можливість надійного експериментального розмежування люмінесценції від інших видів випромінювання. Незважаючи на достатньо широкий часовий інтервал тривалості люмінесценції (для різних тіл від  $10^{-9}$ с до  $10^6$ с), вона все ж протікає значно довше, ніж період власного коливання молекули, що світиться ( $10^{-14}$  –  $10^{-15}$ с).

Умовно розрізняють два типи люмінесценції: флуоресценцію і фосфоресценцію. Тривалість післясвічення (часу повного припинення

свічення після припинення збудження) у першому випадку  $10^{-8}$ с –  $10^{-5}$ с, у другому від  $10^{-4}$ с до декількох діб.

Для виникнення люмінесценції речовині попередньо потрібно надати енергію – збудити свічення. Існують різні методи такого збудження: ультрафіолетовим і видимим світлом (фотолюмінесценція), за рахунок протікання хімічних реакцій (хемілюмінесценція), гама-випромінюванням (радіолюмінесценція), рентгенівським промінням (рентгенолюмінесценція), нагріванням (термолюмінесценція), ударом (триболюмінесценція), бомбардуванням електронами (катодолюмінесценція), електричним розрядом (електролюмінесценція) та ін. У даній роботі збудження люмінофорів здійснюється ультрафіолетовим світлом (фотолюмінесценція), яке випромінює ртутна лампа.

Хоча до цього часу все ще немає повної теоретичної ясності в трактуванні явищ люмінесценції конденсованих систем (твердих тіл і рідин), та все ж зрозуміло, що світло, яке здатне викликати люмінесценцію деякої речовини, має поглинатись цією речовиною. Довжина хвилі збуджуючого світла повинна знаходитись близько середини смуги абсорбції. Так як остання для рідин і твердих тіл достатньо широка, то в межах смуги абсорбції можна значно варіювати довжину хвилі збуджуючого світла. При цьому, як показали дослідження, спектральний склад люмінесценції не змінюється.

Колір виникаючого свічення є характерною ознакою люмінесценції. Він відрізняється від кольору збуджуючого світла, за рахунок чого полегшується спостереження люмінесценції. Джорджем Стоксом у 1852 році встановлено правило, згідно якого світло люмінесценції характеризується більшою довжиною хвилі, ніж поглинуте тілом світло, яке викликає люмінесценцію. На правилі Стокса базується метод поліпшення умов спостереження люмінесценції, суть якого полягає в тому, що збудження здійснюється невидимим ультрафіолетовим світлом, люмінофор же випромінює видиме світло.

Багаточисельні досліди показали, що чисті речовини не люмінесціюють. Для одержання люмінофорів необхідно в речовину ввести певні домішки. Із збільшенням концентрації домішок інтенсивність свічення спочатку зростає, а потім починає падати, наступає так зване концентраційне гасіння. У зв'язку з цим, при приготуванні люмінофора необхідно строго дотримуватись встановленої рецептури.

Склад люмінесцентного випромінювання залежить як від роду домішок, так і від основної речовини. На цій особливості базується люмінесцентний аналіз – визначення складу речовини за спектром його випромінювання. Тверді і рідкі тіла дають смугасті спектри люмінесценції. Для їх одержання вимірюють залежність інтенсивності люмінесценції від довжини хвилі. Метою цієї роботи і є знаходження такої залежності.

Не вся поглинута речовиною енергія випромінюється потім у вигляді енергії люмінесценції. Енергетичним виходом люмінесценції прийнято називати відношення енергії, що випромінюється, до енергії, що

поглинається люмінесціюючою речовиною. Ця величина для даного люмінофору, при інших рівних умовах, залежить від температури. При досягненні певного значення температури енергетичний вихід починає зменшуватись, має місце температурне гасіння.

Для значного числа люмінофорів люмінесценція спостерігається тільки при низьких температурах. У цій роботі досліджуються речовини, що люмінесціюють і при кімнатній температурі. Їх готують за наступним рецептом:

10 грам цукру розчинити у 10 грамах води. До розчину додати 2 мг фарбника (флуоресцеїну) і добре перемішати розчин. Потім воду необхідно випарувати і довести температуру суміші слабим рівномірним нагріванням до  $145^{\circ}\text{C}$ . При досягненні вказаної температури, цукровий сироп виливають на металеву плиту, де він швидко затвердіває в льодяник. Температуру необхідно витримувати точно, оскільки при більш високій температурі цукор зазвичай розкладається і буріє. При менших температурах замість льодяника отримується тягуча маса. В обох випадках інтенсивність люмінесценції різко знижується. Швидке охолодження сприяє виникненню свічення, тому сироп і виливають на масивну металеву плиту. Виготовлений таким чином люмінофор може існувати декілька діб, по закінченню цього терміну цукор кристалізується і люмінесценція зникає. Кристалізація прискорюється, якщо під час виливання в сироп потрапляють кристалики цукру, який не розчинився, або пилу. Тому необхідно прийняти міри, що запобігають такому попаданню.

Схема установки, яка використовується для дослідження спектрального складу люмінесцентного випромінювання, зображена на рис.5.1. Зразок люмінофору 1, який розташовується на тримачі 2, збуджується випромінюванням ртутної лампи СВД-120А 5, яка живиться змінним струмом від блоку 6. Значення струму не повинно перевищувати 1,2 А. Його регулювання здійснюється трансформатором блоку живлення. Ртутна лампа, що являє собою газорозрядну трубку, дає лінійчастий спектр випромінювання парів ртуті. За допомогою світлофільтра УФС-6 4 з цього спектру виділяється лінія 365 нм. Ультрафіолетове світло кварцевою лінзою 3 фокусується на зразок і збуджує його свічення. Люмінесцентне випромінювання фокусується конденсором 7 на вхідну щілину монохроматора УМ-2 8. Прилад УМ-2 являє собою спектральний монохроматор, призначений для різних дослідних робіт і вирішення ряду аналітичних задач. Область його спектральної чутливості поширюється від 380 нм до 1000 нм. Оптична схема монохроматора зображена на рис.5.2. Люмінесціююче світло через захисне скло 1 та вхідну щілину 2 потрапляє на об'єктив коліматора 3 і паралельним пучком проходить через диспергуючу призму 4. Під кутом  $90^{\circ}$  градусів до падаючого пучка світла розміщується вихідна труба монохроматора, яка складається із об'єктива 5, щілини 6 і захисного скла 7.

Повертаючи за допомогою вимірного барабана призмийний столик на різні кути відносно падаючого пучка світла, одержуємо у вихідній щілині

світло різної довжини хвилі, яке проходить через призму в мінімумі відхилення. Після проходження монохроматора, дисперговане люмінесцентне випромінювання падає на фотокатод фотоелектричного помножувача ФЕУ-84 9 (рис.5.1). У фотопомножувачі світловий сигнал перетворюється в електричний. Чим більша інтенсивність падаючого на фотокатод світлового потоку, тим більший струм фіксує мікроамперметр 11, тому покази мікроамперметра будуть пропорційні інтенсивності люмінесценції.

Фотопомножувач живиться постійним струмом високої напруги від блоку 10. У зв'язку з цим при виконанні роботи слід строго виконувати правила техніки безпеки.

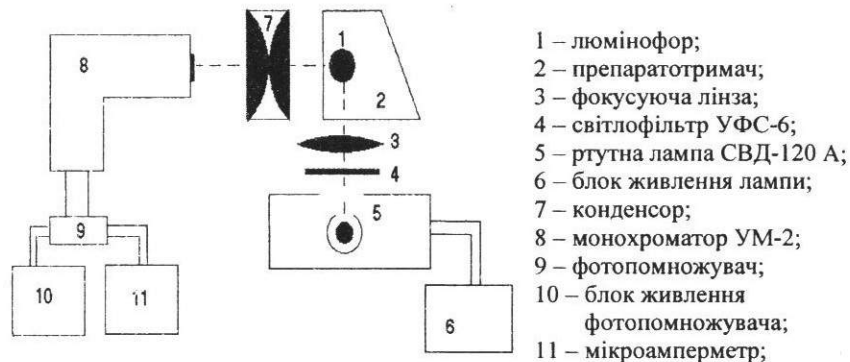


Рис.5.1

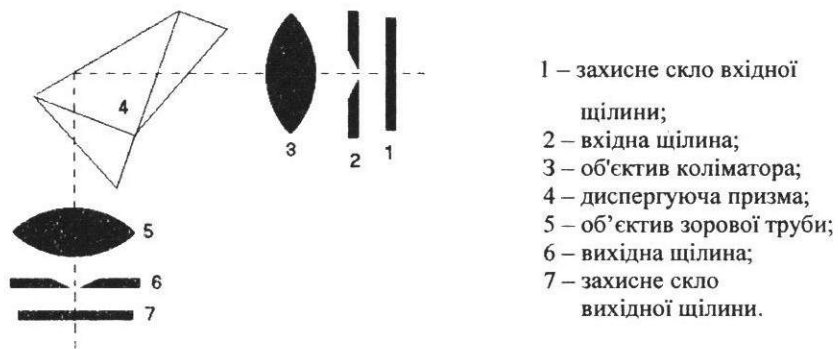


Рис.5.2

### Послідовність виконання роботи

1. Приготувати люмінофор.
2. Виготовити з люмінофору зразок розміром 5x5x3 мм і розмістити його на препаратотримачі під кутом 45° до вісі монохроматора і до вісі ртутної лампи.
3. Рукоятку на трансформаторі ртутної лампи поставити в положення "0", ввімкнути трансформатор в мережу і, збільшуючи напругу на трубі ртутної лампи, досягти її запалювання. Рукояткою трансформатора встановити струм через лампу 1,2 А. При цьому слід мати на увазі, що по мірі прогрівання лампи струм, який протікає через неї, зменшується і лампа може згаснути. У зв'язку з цим, струм, що протікає через лампу, слід регулювати до повного її прогрівання.
4. Повністю закрити вхідну щілину.
5. За допомогою вимірювального барабану, на основі градуювальної таблиці 5.1, встановити довжину хвилі, на яку припадає максимум в спектрі випромінювання (для виготовленого люмінофору вона дорівнює 520 нм, для стандартного 540 нм).
6. Ввімкнути в мережу блок живлення фотопомножувача і подати високу напругу на фотопомножувач. Вона повинна становити 900 В.
7. Ввімкнути в мережу мікроамперметр.
8. Повільним розкриттям вхідної щілини встановити світловий "зайчик" мікроамперметра на поділку 90.
9. Вимірювальний барабан встановити на позначку, що відповідає довжині хвилі 380 нм і зняти покази мікроамперметра. Збільшуючи довжину хвилі, проводити вимірювання через кожні 10 нм до 700 нм.

**УВАГА!** Для запобігання пошкодження фотопомножувача категорично забороняється:

- а) регулювати: вихідну щілину монохроматора, діафрагму ртутної лампи, напругу на фотопомножувачі;
- б) переключати діапазони виміру мікроамперметра;
- в) проводити зміну люмінофору при ввімкнутій високій напрузі на фотопомножувачі.

10. Вимкнути високу напругу на фотопомножувачі. Замінити виготовлений зразок на стандартний і повторити вимірювання відповідно пунктів 4, 5, 6, 8 і 9.
11. По закінченню роботи вимкнути із мережі блоки живлення фотопомножувача, ртутної лампи, мікроамперметра.
12. Знайти середнє значення струму для кожної довжини хвилі і побудувати графіки залежності інтенсивності люмінесценції від довжини хвилі для обох зразків.



Таблиця 5.1

| нм  | град | нм  | град |
|-----|------|-----|------|
| 380 | 290  | 550 | 2200 |
| 390 | 445  | 560 | 2255 |
| 400 | 590  | 570 | 2305 |
| 410 | 745  | 580 | 2360 |
| 420 | 885  | 590 | 2420 |
| 430 | 1030 | 600 | 2470 |
| 440 | 1120 | 610 | 2510 |
| 450 | 1295 | 620 | 2555 |
| 460 | 1410 | 630 | 2590 |
| 470 | 1520 | 640 | 2630 |
| 480 | 1625 | 650 | 2665 |
| 490 | 1720 | 660 | 2705 |
| 500 | 1810 | 670 | 2735 |
| 510 | 1900 | 680 | 2765 |
| 520 | 1975 | 690 | 2790 |
| 530 | 2055 | 700 | 2820 |
| 540 | 2125 | 710 | 2840 |

## Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 327 - 330.
2. Кучерук І.М., Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 340 - 342.
3. Хмелюк К.Д., Цициліано Д.Д. Фізика атома і твердого тіла. – К.: Вища школа, 1974. – 231с., ст. 201 - 207.
4. Методична розробка до роботи.

## Запитання для самоконтролю:

1. Дайте означення люмінесценції.
2. Перелічіть методи збудження люмінесценції.
3. Сформулюйте правило Стокса.
4. Сформулюйте закон Вавилова.
5. Де застосовується люмінесцентний аналіз?
6. Як змінюється інтенсивність люмінесценції з температурою?
7. При яких умовах відбувається концентраційне гасіння?
8. Зобразіть зонну схему кристалофосфору?
9. Чому одержані спектри люмінесценції смугасті?
10. Яка будова фотопомножувача?

## Тестові завдання для вхідного контролю

1. Під кристалофосфорами розуміють:
  - а) будь-які тверді тіла;
  - б) будь-які кристалічні речовини;
  - в) неорганічні кристалічні речовини;
  - г) органічні кристалічні речовини.
2. Люмінесценцію можна викликати:
  - а) ударом;
  - б) охолодженням;
  - в) освітленням;
  - г) хімічною реакцією.
 Яке з цих тверджень хибне?
3. Фосфоресценція притаманна:
  - а) виключно газам;
  - б) лише рідинам;
  - в) переважно твердим тілам;
  - г) усім агрегатним станам.
4. При флуоресценції і фосфоресценції тривалість післясвічення:
  - а) приблизно однакова;
  - б) може бути як більшою, так і меншою;
  - в) для флуоресценції менша;
  - г) для фосфоресценції менша.
5. Із правила Стокса слідує наступне співвідношення між довжиною хвилі  $\lambda_{\text{вх}}$ , що відповідає максимуму у смугі люмінесценції, і довжиною хвилі  $\lambda_{\text{зб}}$ , що відповідає максимуму у смугі збудження:
  - а)  $\lambda_{\text{вх}} = \lambda_{\text{зб}}$ ;
  - б)  $\lambda_{\text{вх}} > \lambda_{\text{зб}}$ ;
  - в)  $\lambda_{\text{вх}} < \lambda_{\text{зб}}$ ;
  - г) у залежності від умов спостереження може бути як  $\lambda_{\text{вх}} < \lambda_{\text{зб}}$ , так і  $\lambda_{\text{вх}} > \lambda_{\text{зб}}$ .
6. Причиною антистоксового свічення є:
  - а) порушення закону збереження енергії у люмінесцентних явищах;
  - б) двофотонне збудження (енергії двох налітаючих на люмінофор фотонів складаються);
  - в) додавання до енергії збуджуючого фотона теплової енергії люмінесцюючої речовини;
  - г) невідомі дотепер явища.
7. Після припинення збудження кристалофосфора інтенсивність його свічення згасає з часом:
  - а) за експоненціальним законом;
  - б) за гіперболічним законом;
  - в) лінійно;
  - г) за параболічним законом.
8. Чи впливають на люмінесценцію кристалів домішки?
  - а) суттєво не впливають;
  - б) наявність домішок у будь-якій концентрації гасить світіння;
  - в) введення домішок завжди підсилює люмінесценцію;

- г) при малих концентраціях домішок яскравість люмінесценції зростає, а при значних – зменшується аж до повного гасіння.
9. Якщо кристалофосфор охолоджувати, то інтенсивність його люмінесценції:
- суттєво не змінюватиметься;
  - буде швидко зменшуватися;
  - спочатку буде зменшуватися, а при досягненні певної температури почне збільшуватися;
  - буде зростати.
10. У даній роботі фотопомножувач живиться напругою, порядок якої
- 10 В;
  - 100 В;
  - 1000 В;
  - 10000 В.

*Тестові завдання для підсумкового контролю*

1. При люмінесценції:
- $t = T$ ;
  - $t > T$ ;
  - $t < T$ ;
  - $t \approx T$ ,
- де  $t$  – тривалість люмінесценції,  $T$  – період власних коливань молекули, що світиться.
2. Флуоресценція спостерігається у:
- газах;
  - виключно у твердих тілах;
  - лише в рідинах;
  - переважно у газах і рідинах.
3. Світло, яке здатне викликати люмінесценцію деякої речовини, повинно:
- поглинатися цією речовиною;
  - проходити через цю речовину;
  - розсіюватися цією речовиною;
  - відбиватися від цієї речовини.
4. Який з нижче наведених законів збереження енергії відповідає правилу Стокса?
- $h\nu = A + \frac{m\theta^2}{2}$ ;
  - $\frac{m\theta^2}{2} = Q + h\nu$ ;
  - $h\nu + m_0c^2 = h\nu_1 + mc^2$ ;
  - $h\nu = A + h\nu_1$ .
5. Закон Стокса-Ломмеля формулюється так:
- спектр люмінесценції і його максимум зміщені в бік довших хвиль порівняно зі спектром поглинання і його максимумом;
  - спектр люмінесценції і його максимум зміщенні в бік коротших хвиль порівняно зі спектром поглинання і його максимумом;
  - спектр люмінесценції і його максимум співпадають зі спектром поглинання і його максимумом;
  - спектр люмінесценції і його максимум не залежать від спектру поглинання і його максимуму.
6. Чи змінюються інтенсивності стоксового і антистоксового випромінювання зі зміною температури кристалофосфора?
- температурна залежність відсутня;
  - зі зменшенням температури зростає лише стоксове випромінювання,

- інтенсивність антистоксового не змінюється;
- інтенсивність обох випромінювань при збільшенні температури зростає;
  - з підвищенням температури інтенсивність стоксового випромінювання зменшується, а антистоксового збільшується.
7. Які з нижче перелічених елементарних процесів притаманні люмінесценції: 1) резонансний, 2) спонтанний, 3) вимушений, 4) рекомбінаційний?
- лише останній;
  - третій і четвертий;
  - перший, другий і третій;
  - всі чотири.
8. Для переважної більшості люмінофорів закон згасання люмінесцентного світіння після припинення збудження має вигляд:
- $I = I_0 \exp(-\frac{t}{\tau})$ ;
  - $\frac{I_0}{I} = \exp(\frac{t}{\tau})$ ;
  - $I_0 = I \exp(-\frac{t}{\tau})$ ;
  - $I = I_0 \exp(\frac{t}{\tau})$ ,
- де  $I_0$  – інтенсивність випромінювання при збудженні,  
 $I$  – інтенсивність випромінювання через час  $t$  після припинення збудження,  
 $\tau$  – середній час перебування молекули люмінофора у збудженому стані.
9. Квантовий вихід люмінесценції  $\eta$  визначається виразом:
- $\eta = \frac{N_{\pi}}{N_{\lambda}}$ ;
  - $\eta = \frac{N_{\lambda}}{N_{\pi}}$ ;
  - $\eta = \frac{E_{\lambda}}{E_{\pi}}$ ;
  - $\eta = \frac{E_{\pi}}{E_{\lambda}}$ ,
- $N_{\pi}$  – кількість фотонів, поглинутих люмінофором;  
 $N_{\lambda}$  – кількість фотонів люмінесцентного світла;  
 $E_{\pi}$  – енергія поглинутого світла;  
 $E_{\lambda}$  – енергія, яку випромінює за той же час люмінофор.
10. Квантовий вихід люмінесценції:
- завжди менший одиниці;
  - завжди рівний одиниці;
  - може бути більшим одиниці;
  - може бути меншим одиниці, рівним одиниці і більшим одиниці.



**Визначення коефіцієнтів пропускання скляних світлофільтрів**

**Мета роботи:** вивчення властивостей речовин за їх спектрами пропускання.  
**Прилади і матеріали:** універсальний об'єктивний фотометр типу ФОУ, набір світлофільтрів.

**Завдання:** а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою, ознайомитись з типами світлофільтрів та їх характеристиками;
- записати у робочій зошит порядок виконання роботи;
- зарисувати оптичну схему приладу.

б) при виконанні роботи:

- у присутності викладача ввімкнути прилад в електричну мережу;
- побудувати спектри пропускання трьох світлофільтрів і порівняти їх з паспортними;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

**Правила техніки безпеки:**

- бережіться пошкодження очей;
- розташуйте прилади таким чином, щоб уникнути їх падіння;
- не торкайтесь пальцями світлофільтрів. Пальці залишають сліди, що ускладнює виконання роботи.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Світловий потік, спрямований на речовину з деякою прозорістю, частково відбивається від неї, певна частина його поглинається речовиною, решта проходить крізь неї.

Відбивання, поглинання і пропускання характеризується відповідними коефіцієнтами, які, згідно з електронною теорією дисперсії, залежать від частоти падаючого світла. Зокрема, під коефіцієнтом пропускання  $\tau$  розуміють відношення потоку випромінювання  $\Phi$ , що пройшов через шар речовини, до потоку  $\Phi_0$ , що падає на вхідну поверхню. Зазвичай коефіцієнт пропускання визначають як функцію довжини хвилі  $\lambda$ . Тоді

$$\tau = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)} \quad (6.1)$$

Об'єктом дослідження у даній роботі є забарвлені скляні пластинки – абсорбційні світлофільтри. В оптиці, у загальному розумінні, світлофільтрами вважаються оптичні пристрої, що володіють вибірковою спектральною пропусканням і які використовують для ослаблення світла у бажаних інтервалах довжин хвиль. Найчастіше їх застосовують для монохроматизації випромінювань і у цьому випадку називають зональними фільтрами. До цього класу належать абсорбційні, інтерференційні та дисперсійні світлофільтри. У лабораторних умовах переважно користуються абсорбційними фільтрами, дія яких основана на вибіркового (селективного)

поглинанні світла. Саме цим пояснюється різний колір поглинаючих середовищ. Звідси слідує висновок: якщо речовина селективно поглинає, то вона і селективно пропускає падаюче на неї випромінювання. Тому здатність світлофільтра пропускати слід визначати для різних довжин хвиль, і на основі виконаних вимірювань побудувати графік залежності  $\tau$  від  $\lambda$ , що і є одним із завдань даної роботи. Для реалізації цієї мети універсальний об'єктивний фотометр ФОУ обладнаний вісьмома селективними поглиначами, характеристики яких зведені у таблицю 6.1.

Таблиця 6.1

| Номер на рукоятці | Маркування поглинача | Приблизне значення довжини хвилі, що відповідає максимальному пропусканню поглинача, нм |
|-------------------|----------------------|---|
| 1                 | 1                    | 400   |
| 2                 | 2                    | 457   |
| 3                 | 3                    | 495   |
| 4                 | 4                    | 540   |
| 5                 | 5                    | 585   |
| 6                 | 6                    | 640   |
| 7                 | 7                    | 700   |
| 8                 | 8                    | 750   |

Таким чином, для досліджуваного світлофільтра є можливість визначити вісім значень  $\tau$ , що відповідають різним довжинам хвиль.

В основу вимірювань на фотометрі ФОУ покладено принцип порівняння двох світлових потоків шляхом зміни одного з них за допомогою вимірювальної діафрагми із змінним отвором.

Зовнішній вигляд приладу ілюструє рис.6.1.

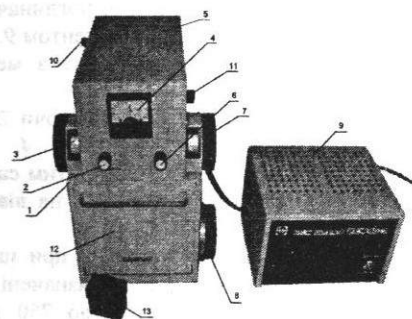


Рис.6.1

- 1 – оптичний блок;
- 2 – регулятор чутливості;
- 3 – показчик вимірювальної величини;
- 4 – мікроамперметр;
- 5 – головка оптична;
- 6 – ручка установки електричного нуля;
- 7 – барабан вимірний;
- 8 – барабан повороту предметного столика;
- 9 – блок живлення;
- 10 – ручка збільшення чутливості;
- 11 – ручка для встановлення селективного поглинача;
- 12 – кюветне відділення;
- 13 – набір світлофільтрів.

На вимірювальних барабанах, зв'язаних з діафрагмами, нанесено відношення (у процентах) площі отвору діафрагми при даному її відкритті до площі при максимальному розкритті.

Вимірювання коефіцієнта пропускання полягає в тому, що на фотоелементи, які включені за диференціальною схемою, направляється почергово спочатку повний світловий потік, а потім потік, пропущений через досліджуване середовище. Так як світловий потік рівномірного пучка світла який проходить крізь діафрагму, пропорційний площі її розкриття, то відношення площ отворів відповідає відношенню потоків.

Оптична схема фотометра ФОУ зображена на рис.6.2.

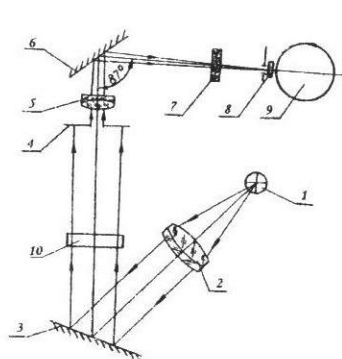


Рис.6.2

- 1 – джерело світла;
- 2 – конденсор;
- 3 – поворотне дзеркало;
- 4 – діафрагма;
- 5 – об'єктив;
- 6 – поворотне дзеркало;
- 7 – селективний поглинач;
- 8 – матове скло;
- 9 – фотоелемент;
- 10 – досліджуваний світлофільтр.

Світловий пучок від джерела 1 (рис.6.2) розділяється дзеркалами (на схемі не показані) на дві частини, спрямовується на конденсор 2 паралельним пучком потрапляє на дзеркало 3 і потім проходить крізь досліджуваний зразок, вимірювальну діафрагму 4, об'єктив 5, відбивається від дзеркала 6, проходить через один із змінних селективних поглиначів і фокусується на матовому склі 8, яке розміщене перед фотоелементом 9.

Дзеркала 3 і 6 призначені для повертання пучків світла з метою зменшення розмірів фотометра.

Дзеркало 3 повертає пучки променів на кут  $45^\circ$ , направляючи їх на вимірювальні діафрагми 4. Розсувні вимірювальні діафрагми 4, при повертанні зв'язаних з ними барабанів, змінюють площу отвору і тим самим змінюють інтенсивність світлових потоків, падаючих відповідно на лівий і правий фотоелементи.

Дзеркала 6 направляють два пучки крізь один поглинач, при цьому пучки перетинаються під кутом  $46^\circ$ . Вибіркові поглиначі призначені для виділення спектральних ділянок в області спектру від 400 до 750 нм і вводяться в оптичну схему в залежності від вимірів на фотометрі.

На барабані 7 (рис.б.1) нанесено дві шкали. Одна шкала має чорний колір, вона називається шкалою пропускання, на ній показані відношення

$\frac{S}{S_0}$  у процентах, де  $S$  – площа розкриття діафрагми при вимірюванні,  $S_0$  – площа максимального розкриття діафрагми.

Інша шкала – червона – відповідає оптичній густині зразка, під якою розуміють десятковий логарифм величини, оберненої до коефіцієнта пропускання. Тобто  $D = -\lg \tau$ . Якщо, наприклад,  $\tau = 0,10$  (10%), то  $D = 1$ .

З правого боку оптичної головки знаходиться ручка 11, якою почергово вводять у хід променів той чи той поглинач. Цифри на шкалі вказують номер поглинача. Положення кожного поглинача фіксується.

З лівого боку оптичної головки розміщена ручка 10, поворотом якої можна збільшити чутливість приладу приблизно у 1,10,100,1000 і у 10000 разів. Цифра «1» відповідає мінімальній чутливості, цифра «5» – максимальній. Плавно змінювати чутливість можна ручкою 2.

#### Послідовність виконання роботи

1. Ввімкнути в мережу блок живлення. Час його прогрівання не менше 15 хвилин. Діафрагми вимірювальних барабанів при цьому повинні бути повністю відкритими.
2. Ручку чутливості встановити у положення «1» (груба чутливість).
3. Після закінчення прогрівання закрити діафрагми і встановити стрілку мікроамперметра в нульове положення.  
**УВАГА!** При вимірюванні коефіцієнтів пропускання категорично забороняється обертати барабан 8 (рис.6.1).
4. Правий барабан встановити на поділку «100» чорної шкали, а досліджуваний зразок помістити у правий пучок світла. Повертанням лівого барабана встановити положення фотоелектричної рівноваги («0» на мікроамперметрі). Після цього зразок вийняти і знову встановити фотоелектричну рівновагу шляхом повертання правого барабана. Відлік, взятий по чорній шкалі цього барабана, дасть коефіцієнт пропускання даного зразка, а по червоній – його оптичну густину.

Слід відмітити, що фотометр являє собою симетричну оптичну систему і порядок вимірювань може бути змінений у тому розумінні, що там, де згадується про правий вимірювальний барабан (чи діафрагму), можна мати на увазі лівий барабан (чи діафрагму) і навпаки.

*Примітка.* Під час вимірювання може статись, що при встановленні правого барабана на поділку «100» лівим барабаном не вдається досягнути «0» на мікроамперметрі. Це відбувається через різну чутливість фотоелементів.

У такому разі на поділку «100» слід встановити шкалу лівого барабана, досліджуваний зразок помістити у ліве плече фотометра, а правим барабаном виконати встановлення електричного нуля.

5. Для одержання спектральної характеристики світлофільтра в оптичну схему послідовно ввести селективні поглиначі і

- виміряти, згідно п. 4, коефіцієнти пропускання з кожним поглиначем. На міліметровому папері побудувати графік-характеристику пропускнуої здатності світлофільтра, відкладаючи довжини хвиль на горизонтальній вісі, а значення  $\tau$  – на вертикальній. Одержаний результат порівняти з паспортним, проаналізувати можливі розходження.
6. Побудувати графічну залежність  $\tau = f(\lambda)$  щонайменше для трьох світлофільтрів.

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 101 - 102, 203 - 204.
2. Кучерук І.М, Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 58 - 60, 206 - 215, 224 - 227.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992.– 512 с., ст. 450 - 453.
4. Методична розробка до роботи.

#### Запитання для самоконтролю:

1. Які світлофільтри відносяться до зональних?
2. Які фільтри називаються інтерференційними, яка їх будова?
3. Де застосовуються світлофільтри?
4. Що таке коефіцієнт пропускання?
5. Що таке оптична густина напівпрозорого тіла?
6. У чому полягає вимірювання коефіцієнтів пропускання відносним та абсолютним методами?
7. Яку роль відіграють селективні поглиначі?
8. У якому діапазоні довжин хвиль працює фотометр ФОУ?
9. Які основні блоки фотометрів типу ФОУ?
10. Поясніть оптичну схему приладу?

#### Тестові завдання для вхідного контролю

1. Під світлофільтром розуміють прилад, який пропускає лише фотони, певною мірою узгодження за:
  - а) фазою;
  - б) амплітудою;
  - в) частотою;
  - г) орієнтацією у просторі.
2. В основу дії світлофільтра може бути покладене:
  - а) селективне поглинання речовиною світла;
  - б) вибіркоче відбивання світла речовиною;
  - в) розсіювання світла речовиною;
  - г) інтерференція світла.

Яке з цих тверджень хибне?

3. Прозорість речовини залежить від її здатності:
  - а) поглинати світло;
  - б) розсіювати світло;
  - в) відбивати світло;
  - г) поглинати, розсіювати та відбивати світло.
4. Прозорість білого паперу близька до:
  - а) 0;
  - б) 1;
  - в) 0,25;
  - г) 0,75.
5. Чи тотожні між собою значення прозорості та коефіцієнта пропускання світла речовиною?
  - а) тотожні;
  - б) прозорість більша коефіцієнта пропускання;
  - в) прозорість менша коефіцієнта пропускання;
  - г) прозорість може бути як більшою, так і меншою коефіцієнта пропускання.
6. Чи залежить спектральна ширина смуги пропускання від типу світлофільтра?
  - а) не залежить;
  - б) вона вужча в інтерференційних фільтрах;
  - в) ширина смуги пропускання найвужча в абсорбційних фільтрах;
  - г) найменшу ширину смуги пропускання дають дисперсійні світлофільтри.
7. Сучасні світлофільтри мають ширину смуги пропускання:
  - а) 10 нм;
  - б) 1 нм;
  - в) 0,1 нм;
  - г) 0,01 нм.
8. Коефіцієнт пропускання  $\tau$  визначається виразом:
  - а)  $\tau = \lg\left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right)$ ;
  - б)  $\tau = \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right)$ ;
  - в)  $\tau = \frac{\Phi_0}{\Phi}$ ;
  - г)  $\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0}$ .
9. Фотометр ФОУ працює у такому діапазоні довжин хвиль:
  - а) 380 – 760 нм;
  - б) 400 – 750 нм;
  - в) 420 – 740 нм;
  - г) 440 – 730 нм.
10. На аркуші паперу зроблено написи червоним, зеленим і синім фломастером. Який вони матимуть вигляд, якщо їх розглядати через червоний світлофільтр?
  - а) всі написи здаватимуться чорними;
  - б) червоного напису не буде видно, а зелений і синій будуть чорними;
  - в) буде видно лише червоний напис;
  - г) всі написи здаватимуться червоними.

1. Світлофільтри – оптичні пристрої, дія яких ґрунтується на селективному:
  - а) пропусканні світла;
  - б) відбиванні світла;
  - в) пропусканні або відбиванні світла;
  - г) відбиванні або розсіюванні світла.
2. Досліджувані у даній роботі світлофільтри відносяться до:
  - а) абсорбційних;
  - б) інтерференційних;
  - в) дисперсійних;
  - г) емісійних.
3. До зональних світлофільтрів належать:
  - а) лише інтерференційні фільтри;
  - б) виключно дисперсійні фільтри;
  - в) дисперсійні і абсорбційні фільтри;
  - г) абсорбційні, дисперсійні та інтерференційні фільтри.
4. Абсолютно прозорим є середовище, яке:
  - а) не відбиває світло;
  - б) не розсіює світло;
  - в) не поглинає світло;
  - г) має показник заломлення, рівний 1.
5. Поглинання світла прозорим середовищем підпорядковане закону, який має вигляд:
  - а)  $I = I_0 \exp(\alpha x)$ ;
  - б)  $\frac{I_0}{I} = \exp(\alpha x)$ ;
  - в)  $\frac{I_0}{I} = \exp(-\alpha x)$ ;
  - г)  $I = I_0 \exp\left(\frac{\alpha}{x}\right)$ .

де  $I_0$  – інтенсивність падаючого світла;  $I$  – інтенсивність світла, яке пройшло шар поглинання  $x$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання.
6. Коефіцієнт поглинання середовища  $\alpha$  залежить:
  - а) лише від хімічної природи середовища;
  - б) від частоти падаючого світла та його інтенсивності;
  - в) від товщини шару поглинання та інтенсивності падаючого світла;
  - г) від хімічного складу середовища та довжини падаючої хвилі.
7. Які з нижче перелічених величин належать до основних характеристик світлофільтрів: 1) хімічна природа середовища, 2) агрегатний стан, 3) спектральна ширина, 4) прозорість, 5) довжина хвилі  $\lambda_{\text{вих}}$ , 6) оптична густина?
  - а) перша, третя і шоста;

- б) друга, четверта та п'ята;
  - в) третя, четверта, п'ята та шоста;
  - г) всі шість.
8. Із яких нижче перелічених речовин виготовляють світлофільтри для видимої області: 1) кварц, 2) скло, 3) желатин, 4) пластмаса, 5) кристали, 6) рідини?
    - а) кварц, скло, кристали, рідини;
    - б) скло, желатин, рідини, кристали;
    - в) скло, желатин, пластмаса, рідини;
    - г) рідини, кристали, кварц, желатин.
  9. Оптична густина речовини  $D$  визначається формулою:
    - а)  $D = \frac{I_0}{I}$ ;
    - б)  $D = \frac{I}{I_0}$ ;
    - в)  $D = \ln \frac{I}{I_0}$ ;
    - г)  $D = \lg \frac{I_0}{I}$ ,

де  $I_0$  – інтенсивність падаючого світла;  $I$  – інтенсивність світла, яке пройшло через речовину.
  10. Для яких світлофільтрів оптична густина не залежить від довжини хвилі?
    - а) абсорбційних;
    - б) дисперсійних;
    - в) інтерференційних;
    - г) нейтральних.



### Вивчення будови та принципу дії газових квантових генераторів

**Мета роботи:** вивчення фізичних принципів роботи квантових генераторів.  
**Прилади і матеріали:** оптична лава, гелій-неоновий лазер, дифракційна ґратка, міліметровий папір, рулетка, поляроїд, екран з короткофокусною лінзою, скляна плоскопаралельна пластинка.

**Завдання:** а) при домашній підготовці:

- ознайомитись з фізичними основами будови та принципу дії оптичних квантових генераторів;
- згідно з рекомендаціями до роботи виготовити комп'ютерним способом на прозорій плівці декілька дифракційних решіток з різним періодом;

б) при виконанні роботи:

- дослідити лазерне випромінювання на поляризованість;
- визначити сталу досліджуваної решітки;
- визначити час когерентності лазерного випромінювання;
- визначити плоский кут розходження лазерного випромінювання.

**Правила техніки безпеки:**

- не вмикати і не вимикати лазер самостійно – висока напруга!;
- ні в якому разі не дивіться назустріч лазерному променю – можете пошкодити очі.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Оптичний квантовий генератор (лазер) – прилад, у якому здійснюється генерація монохроматичних електромагнітних хвиль оптичного діапазону в результаті індукованого випромінювання. Слово «лазер» складено із початкових літер англійських слів Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Оптичні квантові генератори – це унікальні, штучно створені, принципово нові джерела світла, які володіють високою когерентністю і монохроматичністю. Крім того, випромінювання лазера поляризоване. Ще однією важливою характеристикою цих приладів є вузька спрямованість їх випромінювання. Із-за дифракції кут розходження променів не може бути меншим  $\frac{\lambda}{d}$ , де  $d$  – ширина пучка. У лазерах ця гранична межа майже досягнута.

Перші квантові генератори були створені М. Г. Басовим і О. М. Прохоровим та незалежно від них Ч. Таунсом у 1955 році (Нобелівська премія 1964 р.). Фізичні принципи їх роботи ґрунтовані на квантових закономірностях. Із них слідує, що кожному стану системи відповідає певна

енергія. Якщо квантова система не піддається зовнішньому впливу, то вона знаходиться у стаціонарному стані з найменшою енергією  $E_1$ . За рахунок певних зовнішніх чинників систему можна перевести у збуджений стан з енергією  $E_2$ . Такий стан є нестійким, його тривалість не перевищує  $10^{-8}$  с, без будь-якого зовнішнього впливу система здійснить перехід у стан з меншою енергією  $E_1$ , випромінюючи при цьому фотон з частотою  $\nu$ :  $h\nu = E_2 - E_1$ .

Такий самодовільний (спонтанний) перехід, а, отже, і випромінювання, має випадковий, ймовірносний характер, передбачити, коли він відбудеться, принципово неможливо. Це означає, що атоми випромінюють незалежно і неодноразово, фази випромінюваних ними електромагнітних хвиль не узгоджені між собою. Випадковими є не лише моменти випромінювання фотонів, а й напрямки їх поширення і поляризації. Так випромінюють звичайні джерела світла, таке випромінювання неполяризоване, некогерентне і неспрямоване.

У 1916 році А. Ейнштейн теоретично показав, що за певних умов процесом переходу атома з рівня  $E_2$  на рівень  $E_1$  все ж таки можна керувати. Такий керований (індукований) перехід можна здійснити за допомогою електромагнітної хвилі, частота якої рівна, або достатньо близька до частоти  $\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$ . У цьому випадку зовнішній фотон, який стимулює збуджену

систему до випромінювання, і фотони, що цією системою випромінюються, будуть абсолютно тотожні – вони матимуть однакову частоту і фазу коливань, той же напрям поширення і ту ж поляризацію.

Для реалізації такого механізму підсилення світла необхідно, щоб число індукованих переходів з випромінюванням фотонів було більшим числа переходів з поглинанням фотонів тієї ж частоти, а для цього потрібно, щоб число атомів у збудженому стані, у стані з більшою енергією було б більшим числа атомів з меншою енергією. Таке положення системи не є природним, воно одержало назву інверсного (лат. inversio – перестановка), термодинамічно такий стан нестабільний (стан з від'ємною температурою). Проте за певних умов система у такому стані може перебувати достатньо довго, значно довше, ніж  $10^{-8}$  с. Середовище з інверсним заселенням енергетичних рівнів називають активним. Одержати активне середовище можна кількома способами: у твердотільних лазерах – це оптичне підкачування, у газових – електричний розряд, у напівпровідникових – інжекція носіїв тощо.

Активною квантова система буде лише тоді, коли вона матиме метастабільний рівень – рівень, на якому електрони можуть перебувати значний час. Цей час у  $10^8$  разів більший, ніж час перебування електронів на інших рівнях збудженого атома. Утворюється метастабільний рівень за рахунок введення в основну робочу речовину спеціально підібраних домішок. У рубіновому лазері – це атоми хрому, у гелій-неоновому – атоми гелію. Важливою умовою добору пари основа-домішка є розміщення метастабільного рівня дещо нижче енергетичних рівнів збуджених атомів

основи. У результаті такого розташування утворюється система, спрощений вигляд якої зображений на рис.7.1. У цій схемі метастабільним є рівень 2. За рахунок підкачування частину електронів переводять з нижнього енергетичного рівня 1 на рівень 3. При цьому, поряд з оберненим переходом  $3 \rightarrow 1$ , без випромінювання відбувається перехід  $3 \rightarrow 2$ . Оскільки час життя електронів на рівні 2 значний (до  $10^{-3}$  с), то підкачуванням можна домогтися такого стану, коли заселення енергетичного рівня 2 перевищуватиме заселення енергетичного рівня 1 – станеться інверсія заселеності рівня 2 по відношенню до рівня 1. Незначна зовнішня дія (фотон з частотою  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ ) спричинить значну кількість вимушених (з випромінюванням) переходів  $2 \rightarrow 1$  – відбудеться підсилення світла.



Рис. 7.1

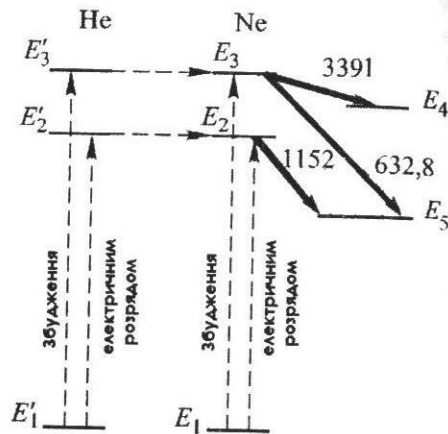


Рис. 7.2

У реальних оптичних генераторах кількість рівнів, зазвичай, більша, ніж три, проте суть процесів, що мають при цьому місце, однакова – метод трьох рівнів універсальний. Розглянемо, наприклад, принцип дії гелій-неонового лазера. Схема енергетичних рівнів для нього зображена на рис.7.2. Гелій має два метастабільні рівні  $E_2^1$  і  $E_3^1$ , на яких електрони перебувають значний час –  $10^{-3}$  с, тому концентрація збуджених атомів гелію у електричному розряді дуже велика. Принциповою особливістю енергетичних рівнів атомів гелію і неону є дуже близьке розташування метастабільних рівнів  $E_2^1$  і  $E_3^1$  гелію та відповідно рівні  $E_2$  і  $E_3$  атомів неону. Тому при зіткненні таких атомів відбувається резонансна передача енергії від гелію до неону. У результаті число атомів неону на рівнях  $E_2$  і  $E_3$  різко збільшується, що призводить до інверсної заселеності рівнів  $E_2$  і  $E_3$  по відношенню до рівнів  $E_4$  і  $E_5$ . Індуковані переходи  $E_3 \rightarrow E_4$ ,  $E_3 \rightarrow E_5$  і  $E_2 \rightarrow E_5$  дають випромінювання з

довжиною хвилі відповідно 3391 нм, 632,8 нм та 1152 нм. Підбираючи склад нанесеного на дзеркала відбиваючого шару, одержують лазерне випромінювання однієї з перелічених довжин хвиль, зазвичай, це 632,8 нм. Дзеркала виготовляють з багатошаровим діелектричним покриттям, що має коефіцієнт відбивання 99%.

Значення дзеркал не обмежується виділенням однієї з трьох довжин хвиль. Вони виконують ще одну важливу функцію – слугують оптичним резонатором, який забезпечує позитивний обернений зв'язок. Завдання резонатора – спрямувати частину одержаного випромінювання знову у систему, щоб воно викликало появу нових фотонів, тобто привело до додаткового збільшення інтенсивності світла. З цієї метою газорозрядну трубку з сумішшю гелію і неону розміщують між дзеркалами (рис.7.3). Одне дзеркало виготовляють сферичним, друге – плоским. Прозорість одного близько 2%, іншого менше 1%. За допомогою спеціальних пристроїв дзеркала встановлюють так, щоб оптична вісь сферичного дзеркала була строго перпендикулярна плоскому дзеркалу.

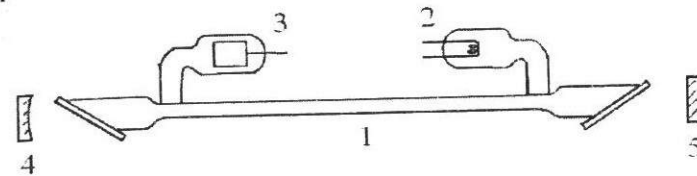


Рис. 7.3

Окрім забезпечення оберненого зв'язку, дзеркала ще роблять випромінювання направленим, оскільки фотони, які не рухаються вздовж вісі дзеркала, виходять з активного середовища через бокову поверхню, практично без підсилення.

Торці газорозрядної трубки скошені під кутом Брюстера і закриті скляними чи кварцовими вікнами, що забезпечує поляризацію лазерного випромінювання.

У кварцовій газорозрядній трубці 1 знаходиться суміш газів: гелій під тиском 1 мм рт.ст., та неон, який створює тиск 0,1 мм рт.ст. Трубка має підігрівний катод 2 та анод 3, між якими прикладається напруга 1-2,5 кВ. Потужність гелій-неонових лазерів не перевищує десятків мВт. Розходження пучка біля 20".

Перший лазер безперервної дії на суміші газів гелію і неону був розроблений у 1961 році. У цьому лазері неон є робочою речовиною, а гелій слугує резервуаром збуджень, які резонансно передаються атомам неону.

#### Послідовність виконання роботи

1. На оптичній лаві послідовно розташувати лазер, поляроїд і екран. Обертаючи поляроїд, переконайтесь у зміні освітленості на екрані. Це свідчить про лінійну поляризацію випромінюваного лазером світла.



2. На оптичній лаві замість поляроїда встановити саморобну дифракційну решітку. Екран із закріпленим на ньому міліметровим папером розмістити якомога далі від решітки. Користуючись формулою  $d \sin \varphi = m\lambda$  та маючи на увазі, що при малих  $\varphi$   $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{l}$ , визначити сталу решітки

$$d = m \cdot \frac{l}{a} \cdot \lambda,$$

де  $l$  – відстань від решітки до екрану,  $a$  – відстань між центральним і  $m$ -ним максимумами.

Вимірювання виконати декілька разів для різних  $m$ , виконати обробку та аналіз результатів.

3. Встановити на оптичній лаві екран, у центрі якого закріпити короткофокусну лінзу від об'єктива мікроскопа. Одержаний розбіжний пучок спрямувати на розміщену по інший бік екрану, паралельно до нього, товсту (близько 10 мм) скляну плоскопаралельну пластинку. На екрані, у відбитому від пластинки світлі, будуть спостерігатися інтерференційні кільця, що свідчать про можливість спостереження інтерференції не лише від тонких плівок. Наявність інтерференційної картини у товстому склі вказує на значний час когерентності лазерного випромінювання. У даному випадку його слід оцінити за різницею ходу променів, що інтерферують. Це промені, які відбиваються від задньої і передньої поверхні скла. Їх різниця ходу  $\Delta \approx 2dn$ , де  $d$  і  $n$  – відповідно товщина і показник заломлення скла. Тоді час когерентності  $\tau \geq \frac{\Delta}{c} = \frac{2dn}{c}$  ( $c$  – швидкість світла).
4. Спрямувати лазерний промінь спочатку на розташований на оптичній лаві екран, а потім на віддалену стіну. За допомогою міліметрового паперу визначити діаметри плям та виміряти рулеткою відстані від них до лазера. Виходячи з рис.7.4, за формулою  $\varphi = \frac{(D-d)}{(L-l)}$  визначити кут розходження пучка.

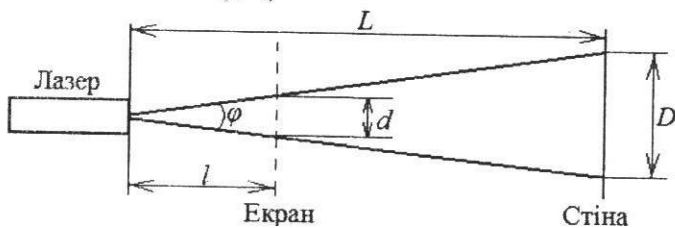


Рис. 7.4

5. Експерименти повторити при різних  $L$  і  $l$ . Визначити середнє значення кута  $\varphi$ .

### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 330 – 337.
2. Кучерук І.М, Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 342 – 347.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992.– 512 с., ст. 442 – 447.
4. Душенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1984. – 256с., ст. 145 – 146.
5. Методична розробка до роботи.

### Завдання для самоконтролю:

1. У чому суть спонтанного та індуктивного випромінювання?
2. Яка будова та принцип дії газового лазера?
3. Яка будова оптичного резонатора?
4. Яку роль відіграють домішки гелію?
5. Яка роль атомів неону?
6. При яких умовах відбувається генерація світла в активному середовищі?
7. За рахунок чого лазерне випромінювання поляризоване?
8. Який механізм дії трирівневої системи?
9. Які типи оптичних квантових генераторів Вам відомі?
10. Що таке довжина та час когерентності?

### Тестові завдання для вхідного контролю

1. Які з нижче перелічених властивостей випромінювання притаманні лазеру: 1) монохроматичність, 2) когерентність, 3) поляризованість, 4) вузька спрямованість, 5) висока проникна здатність, 6) дуже добре поглинання речовинами?
- а) перша, четверта і п'ята;
  - б) друга, третя і шоста;
  - в) всі шість;
  - г) перші чотири.
2. Час перебування атома у збудженому стані має порядок:
- а)  $10^{-3}c$ ;
  - б)  $10^{-4}c$ ;
  - в)  $10^{-6}c$ ;
  - г)  $10^{-8}c$ .
3. Метастабільні рівні:
- а) існують у будь-якій речовині;
  - б) утворюються лише в очищених речовинах;
  - в) з'являються за рахунок введення в речовину певних домішок;
  - г) утворюються при наявності власних дефектів у речовині.
4. У гелій-неоновому лазері концентрації гелію і неону:
- а) приблизно однакові;
  - б) гелію значно більше;
  - в) неону на порядок більше;
  - г) співвідношення концентрацій може бути будь-яким.

5. Активним називають середовище:
- атоми якого знаходяться у збудженому стані;
  - яке випромінює світло;
  - у якому існують енергетичні рівні з інверсним заселенням;
  - яке здатне збудити інше середовище.
6. Лазери бувають: 1) твердотільні, 2) рідинні, 3) напівпровідникові, 4) газові. Чи всі ці твердження вірні?
- вірні 1 і 4 твердження;
  - рідинні лазери не існують;
  - вірні 1, 2 і 4 твердження;
  - існують всі перелічені типи лазерів.
7. Гелій-неоновий лазер випромінює світло з довжиною хвилі:
- 589нм;
  - 623,2нм;
  - 632,8нм;
  - 656,3нм.
8. Потужність випромінювання гелій-неонових лазерів складає порядок:
- $10^1 \text{ Вт}$ ;
  - $10 \text{ Вт}$ ;
  - $10^{-2} \text{ Вт}$ ;
  - $10^{-5} \text{ Вт}$ .
9. Лазерне випромінювання: 1) когерентне, 2) синфазне, 3) монохроматичне, 4) лінійно поляризоване, 5) вузько спрямоване. Для одержання якої (яких) з цих ознак лазерний генератор повинен мати, крім основних, ще додаткові конструктивні елементи?
- другої та п'ятої;
  - лише третьої;
  - лише четвертої;
  - першої та третьої.
10. У сучасних газових лазерах час когерентності може досягати:
- $10^{-8} \text{ с}$ ;
  - $10^{-6} \text{ с}$ ;
  - $10^{-4} \text{ с}$ ;
  - $10^{-2} \text{ с}$ .

*Тестові завдання для підсумкового контролю*

1. Лазерне випромінювання: спонтанне, індуковане, вимушене, наведене. Яке (-і) з цих тверджень хибне (-і)?
- перше;
  - перше і четверте;
  - четверте;
  - всі твердження вірні.
2. Час життя електрона на метастабільному рівні складає близько:
- $10^{-3} \text{ с}$ ;
  - $10^{-1} \text{ с}$ ;
  - $10^2 \text{ с}$ ;
  - $10^3 \text{ с}$ .
3. У гелій-неоновому лазері метастабільні рівні утворюються за рахунок:
- атомів гелію;
  - атомів неону;
  - атомів хрому;
  - незначної кількості атомів повітря.
4. Для утворення інверсної заселеності енергетичних рівнів необхідно, щоб:
- метастабільні рівні розташовувалися дещо вище рівнів робочої речовини;
  - метастабільні рівні знаходилися значно вище рівнів робочої речовини;
  - ті рівні, переходи з яких відбуваються з випромінюванням, знаходилися вище метастабільних рівнів;
  - кількість рівнів, переходи з яких дають випромінювання, перевищувала кількість метастабільних рівнів.

5. Для здійснення індукованого випромінювання необхідно задіяти наступну кількість енергетичних рівнів:
- достатньо двох;
  - як мінімум чотири;
  - не менше трьох;
  - будь-яку.
6. Збудження активного середовища можна здійснити за рахунок:
- оптичного підкачування;
  - електричного розряду;
  - інжекції носіїв заряду;
  - нагрівання.
- Яке з цих тверджень хибне?
7. Найхарактернішою відмінністю лазерного випромінювання від випромінювань інших джерел є його:
- монохроматичність;
  - когерентність;
  - поляризованість;
  - синфазність.
8. Яку(-і) з перелічених нижче функцій оптичний резонатор не здійснює:
- позитивний обернений зв'язок;
  - направленість випромінювання;
  - підсилення світлового потоку в активному середовищі;
  - поляризацію світла;
  - монохроматизацію світла?
- другу і п'яту;
  - першу і третю;
  - четверту;
  - п'яту.
9. Під часом когерентності розуміють:
- час випромінювання атомом цугу хвиль;
  - час перебування атома у збудженому стані;
  - час переходу атома із збудженого стану в стаціонарний;
  - час, необхідний для інтерференції світлових хвиль.
10. Довжина когерентності  $L$  визначається виразом:
- $L = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$ ;
  - $L = \frac{\delta\lambda}{\lambda^2}$ ;
  - $L = \lambda \cdot \delta\lambda$ ;
  - $L = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda}$ .

## Перевірка співвідношень невизначеностей для фотонів

**Мета роботи:** засвоєння принципу невизначеностей та експериментальна перевірка співвідношення  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ .

**Прилади і матеріали:** оптична лава, лазер, щілина з мікрометричним гвинтом, екран з міліметровим папером, рулетка.

**Завдання:** а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою, вивчити питання стосовно співвідношень невизначеностей Гейзенберга;
- у робочий зошит записати мету та завдання роботи, теоретичні відомості та опис установки, зарисувати схему досліду.

б) при виконанні роботи:

- перевірити співвідношення  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ ;
- побудувати графік залежності  $D$  від  $\Delta x$ ;
- виконати аналіз одержаних результатів, оформити звіт і подати його викладачеві.

**Правила техніки безпеки:**

- бережіть очі від попадання прямого та відбитого лазерного випромінювання.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Одним із фундаментальних положень квантової теорії є принцип невизначеностей, який стверджує, що не існують такі стани фізичної системи, в яких дві канонічно спряжені динамічні змінні мають одночасно цілком певні значення. Жоден експеримент не зможе привести до одночасного точного вимірювання таких величин, притому неточність у вимірюваннях не пов'язана з недосконалістю експериментальної техніки – це об'єктивна властивість досліджуваної системи.

Канонічно спряженими величинами є, наприклад, координата і відповідна їй проекція імпульсу, енергія і час тощо. У класичній механіці ці величини визначаються одночасно і з будь-якою точністю.

У квантовій механіці має місце корпускулярно-хвильовий дуалізм – кожній мікрочастинці приписується певна хвиля, довжина якої визначається з формули де Бройля:  $\lambda = \frac{h}{p}$ , де  $p$  – імпульс частинки. Тоді визначення місця

знаходження мікрочастинки в будь-який момент часу втрачає фізичний зміст, оскільки хвиля, як протяжний об'єкт, не може бути зосереджена в одній точці з певною координатою. У свою чергу імпульс визначається через довжину хвилі ( $p = \frac{h}{\lambda}$ ), тому координата з певним імпульсом цілком невизначена. З іншого боку, якщо координата частинки точно відома, то її

імпульс повністю невизначений. У 1927 році В. Гейзенберг показав, що між невизначеністю координати  $\Delta x$  і невизначеністю проекції імпульса на вісь  $x$   $\Delta p_x$  існує співвідношення

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar.$$

Із нього слідує, що чим точніше визначати координату, чим меншим буде значення  $\Delta x$ , тим більшою буде невизначеність імпульсу  $\Delta p_x$ , і, навпаки, чим точніше визначено імпульс, чим меншим буде  $\Delta p_x$ , тим більшою виявляється невизначеність координати. Це, в свою чергу, означає, що поняття координати і імпульсу в класичному розумінні не можуть бути застосовані до мікроскопічних об'єктів.

Розглянемо з позицій вище викладеного проходження фотонів через щілину шириною  $\Delta x$  (рис 8.1). Фотони падають на щілину паралельно вісі  $y$ .

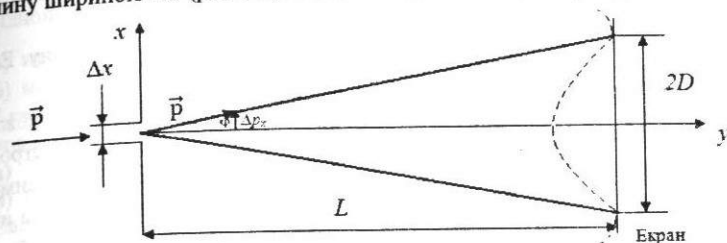


Рис.8.1

До щілини певний фотон мав імпульс  $\vec{p}$ , вектор якого точно співпадав з віссю  $y$ . Тобто проекція імпульсу цього фотона на вісь  $x$   $p_x = 0$ , а значить і  $\Delta p_x = 0$ . Відмітимо також, що до щілини значення імпульсу було цілком визначеним – воно становило  $p = \frac{h}{\lambda}$ , проте координата фотона мала повну невизначеність. За допомогою щілини невизначеність координати можна зменшити, тепер вона має конкретну величину, яка рівна ширині щілини, тобто  $\Delta x$ . Натомість імпульс фотона при проходженні ним щілини одержить невизначеність, що становить щонайменше  $\Delta p_x$  (рис 8.1). Причиною цього є явище дифракції – після проходження щілини фотони відхиляються від вісі  $y$  на певні кути. Найбільша їх кількість (близько 80%) потрапляє у сектор, обмежений кутом  $2\varphi$ , і утворює центральний дифракційний максимум. Значення цього кута визначається умовою мінімуму при дифракції на щілині  $\Delta x \sin \varphi = \lambda$ . Звідки  $\sin \varphi = \frac{\lambda}{\Delta x}$ .

Із рисунка 8.1 слідує, що  $\Delta p_x = p \sin \varphi$ , або  $\Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi = \frac{h}{\Delta x}$ . Тобто, маємо

$$\Delta p_x \cdot \Delta x = h.$$

Якщо врахувати, що частина фотонів відхиляється від вісі  $y$  і на більші кути, ніж  $\varphi$ , утворюючи максимуми вищих порядків, то невизначеність  $\Delta p_x$  буде ще більшою. Тоді останнє співвідношення набуває вигляду

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq h.$$

Враховуючи, що  $h = 2\pi\hbar$ , остаточно одержимо:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x > \hbar. \quad (8.1)$$

З останньої нерівності слідує: при звуженні щілини зростає невизначеність  $\Delta p_x$ , що призводить до розширення дифракційного максимуму, до збільшення  $D$ , і, навпаки, збільшення  $\Delta x$  викликає зменшення  $D$ . Тому вираз (8.1) можна записати так:

$$\Delta x \cdot D > const.$$

Це і є робоча формула.

#### Послідовність виконання роботи

1. На оптичній лаві розташувати гелій-неоновий лазер і щілину. Екран розмістити на відстані 2-3 м від щілини.
2. Змінювати ширину щілини через 0,02 – 0,04 мм і для кожного значення ширини вимірювати на екрані за допомогою міліметрового паперу ширину  $2D$  центрального дифракційного максимуму. Вимірювання провести тричі, спочатку розкриваючи щілину, а потім зменшуючи її ширину. Для кожного значення  $\Delta x$  усереднити  $D$ .
3. Побудувати графік залежності  $D$  від  $\Delta x$  і проаналізувати його.
4. Дії пунктів 2 і 3 виконати при відстанях  $L$ , рівних 2, 2,5 і 3 м, результати проаналізувати.
5. Переконатися, що при різних  $L$  добуток  $L \cdot \lambda$  дорівнює добутку  $\Delta x \cdot D$ .

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 277 - 287.
2. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 298 -303.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992. – 509с., ст. 465-467.

#### Затання для самоконтролю:

1. Які співвідношення невизначеностей Вам відомі?
2. Який фізичний зміст співвідношень невизначеностей?
3. Які фізичні явища знаходять своє пояснення на основі співвідношень невизначеностей?
4. Чому для виконання даної роботи доцільно використовувати лазер?
5. Світло якої довжини хвилі випромінює гелій-неоновий лазер?

6. На основі співвідношення невизначеностей оцініть енергію електрона в атомі водню в основному стані. Порівняйте її з тим, що дає теорія Бора.
7. З якою точністю вимірюється ширина щілини у даній роботі?
8. Чому у даній роботі обмежуються вимірюванням ширини лише центрального максимуму?
9. Яким світлом при виконанні цієї роботи – червоним чи синім – слід освітлювати щілину, щоб одержати точніші результати?
10. Запишіть формулу для визначення довжини хвилі де Бройля.

#### Тестові завдання для вхідного контролю

1. Відношення  $\frac{h\nu}{c}$  є:

- |                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| а) момент імпульсу фотона; | в) енергія фотона; |
| б) маса фотона;            | г) імпульс фотона. |

2. У квантовій фізиці кожній мікрочастинці приписується певна хвиля, довжина якої визначається співвідношенням:

- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| а) Гейзенберга; | в) де Бройля;  |
| б) Планка;      | г) Шредінгера. |

3. Маса фотона дорівнює:

- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| а) $\frac{h\nu}{c^2}$ ;     | в) $\frac{h}{\lambda}$ ; |
| б) $\frac{h\nu}{\lambda}$ ; | г) $\frac{\lambda}{h}$ . |

4. Імпульс фотона визначається виразом:

- |                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| а) $\frac{h\nu}{c^2}$ ; | в) $\frac{h\nu}{\lambda}$ ; |
| б) $\frac{h\nu}{c}$ ;   | г) $\frac{h}{\nu}$ .        |

5. Співвідношення між сталими  $h$  і  $\hbar$  має вигляд:

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| а) $\hbar = 2\pi h$ ;         | в) $h = 2\pi\hbar$ ;          |
| б) $h = \frac{\hbar}{2\pi}$ ; | г) $\hbar = \frac{2\pi}{h}$ . |

6. Для випадку, коли частинка рухається вздовж вісі  $x$ , співвідношення невизначеностей Гейзенберга має вигляд:

- |  |  |
|--|--|
| а) $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{2\pi}{\lambda}$ ; | в) $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$ ; |
| б) $\Delta y \cdot \Delta p_y \leq \frac{h}{2\pi}$ ;       | г) $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$ . |

7. Неможливість одночасного точного визначення координати та імпульсу мікрочастинки зумовлена:

- а) недостатньою точністю вимірювальних приладів;
- б) самою природою мікрочастинки;
- в) проведенням експериментів саме на щілині;
- г) релятивістськими ефектами.

8. Чому у даній роботі доцільно використовувати саме лазер, а не інші джерела світла?
- лазер дає високомонохроматичне випромінювання;
  - випромінювання лазера поляризоване;
  - лазерне випромінювання вузькоспрямоване;
  - інтенсивність лазерного випромінювання значно перевищує інтенсивність інших джерел.
9. Яким світлом слід освітлювати у цій роботі щілину, щоб одержати точніші результати?
- синім;
  - зеленим;
  - червоним;
  - точність результатів від довжини хвилі не залежить.
10. У даній роботі перевіряється рівність:
- $\frac{\Delta x}{L} = \frac{\lambda}{D}$ ;
  - $\Delta x \cdot \lambda = L \cdot D$ ;
  - $\Delta x \cdot L = \lambda \cdot D$ ;
  - $\frac{\Delta x}{D} = \frac{\lambda}{L}$ .

*Тестові завдання для підсумкового контролю*

1. Довжина хвилі де Бройля визначається виразом:
- $\lambda = \frac{m\vartheta}{h}$ ;
  - $\lambda = \frac{h}{p}$ ;
  - $\lambda = \frac{p}{h}$ ;
  - $\lambda = \frac{h}{v}$ .
2. Який з наведених нижче виразів є співвідношенням невизначеностей?
- $\Delta x \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$ ;
  - $\Delta x \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2\pi}$ ;
  - $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$ ;
  - $\Delta t \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$ .
3. Принцип невизначеностей зумовлений:
- об'єктивною властивістю частинок;
  - межами нашого пізнання;
  - методами вимірювань – визначення координати частинки робить неможливим виміряти її швидкість;
  - взаємодією приладів з мікрооб'єктами.
4. Чому у даній роботі обмежуються вимірюванням ширини лише центрального максимуму?
- співвідношення невизначеностей виконується лише для центрального максимуму;
  - у центральний максимум потрапляє більшість фотонів після проходження щілини;

- дослідження лише центрального максимуму спрощує розрахунки;
  - співвідношення невизначеностей для максимумів вищих порядків виконується ще в більшій мірі, ніж для центрального;
5. Яке з наведених нижче співвідношень є вірним?
- $\Delta x \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{2\pi}$ ;
  - $\Delta x \cdot \Delta p_y = 1$ ;
  - $\Delta x \cdot \Delta p_y = 0$ ;
  - $\Delta x \cdot \Delta y \geq \frac{h}{2\pi}$ .

6. Чи має фізичний зміст рівність  $\Delta x \cdot \Delta t = 0$ ?
- у такій рівності фізичний зміст відсутній;
  - фізичний зміст мала б рівність  $\Delta x \cdot \Delta t = \hbar$ ;
  - наведена рівність стверджує, що можливе точне визначення координати мікрочастинки у заданий момент часу;
  - рівність вказує на неможливість одночасного точного визначення координати і часу.

7. Рівняння Шредінгера для стаціонарного стану має вигляд:

- $\psi + \frac{2m}{\hbar}(E+U)\psi = 0$ ;
- $\frac{d^2\psi}{dx^2} + (E-U)\psi = 0$ ;
- $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{\hbar^2}(E-U)\psi = 0$ ;
- $\frac{d\psi}{dx} + \frac{2m}{\hbar^2}(E+U)\psi = 0$ .

8. Рівняння Шредінгера справджується:

- лише в нерелятивістській квантовій механіці;
- тільки в релятивістській квантовій механіці;
- як у нерелятивістській, так і в релятивістській квантовій механіці;
- як у квантовій, так і в класичній механіці.

9. Хвильова  $\psi$ -функція обов'язково повинна бути:

- позитивною;
- скінченною;
- однозначною;
- неперервною.

Яка з цих вимог є зайвою?

10. За допомогою хвильової  $\psi$ -функції визначається ймовірність мікрочастинки:

- мати певну енергію;
- знаходитись у певній точці простору;
- мати конкретний імпульс;
- мати ту чи ту швидкість.



**Вивчення випромінювання світла напівпровідниками**

**Мета роботи:** вивчення механізму випромінювання світлодіода.

**Прилади і матеріали:** монохроматор УМ-2, світлодіод, джерело постійного струму, потенціометр, міліамперметр, вольтметр, ртутна лампа з джерелом живлення.

**Завдання:** а) при домашній підготовці:

- вивчити принципи генерації світла напівпровідниками;
- у робочій зошит записати основні теоретичні відомості;
- розглянути електричну схему ввімкнення світлодіода, зарисувати її у робочий зошит;
- ознайомитись з порядком виконання роботи, записати його у зошит.

б) при виконанні роботи:

- зібрати електричну схему і показати її викладачеві для перевірки;
- за спектром випромінювання ртуті проградуювати монохроматор;
- побудувати вольт-амперну характеристику для світлодіода;
- визначити сталу Планка;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

**Правила техніки безпеки:**

- при складанні електричної схеми і при виконанні роботи остерігайтеся ураження електричним струмом;
- бережіть очі від ртутного випромінювання.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Із теорії Бора слідує, що в ізольованому атомі електрони, згідно принципу Паулі та мінімуму енергії, розташовуються на цілком певних енергетичних рівнях.

При утворенні твердого тіла окремі атоми зближаються, між ними виникає взаємодія, результатом якої є розщеплення енергетичних рівнів з утворенням енергетичних смуг. Найширші смуги виникають при взаємодії валентних електронів. Для внутрішніх електронів така взаємодія проявляється слабше, ширина смуг для них вужча. Найвужчі смуги дають електрони, розташовані найближче до ядра.

Таким чином, при утворенні кристала вузькі енергетичні рівні атомів породжують таку кількість смуг (вони одержали назву енергетичних зон), яка відповідає числу рівнів. Енергетичні зони розділені проміжками енергій (заборонені зони), які кристал мати не може. Ширина цих проміжків різна, для деяких речовин сусідні дозволені зони можуть дотикатись одна до одної, або навіть перекриватися одна з одною. Над найширшою (валентною) зоною розміщена зона провідності, потрапивши в яку електрон втрачає зв'язок зі

своїм атомом, стає вільним. Зона провідності зверху не обмежена. За шириною забороненої зони, яка відділяє валентну зону від зони провідності, тверді тіла розділяють на два класи – ті, у яких ця ширина більша нуля, і ті, у яких вона рівна нулю, тобто відсутня. Перший клас тіл одержав назву діелектрики, другий – провідники. Із класу діелектриків виокремлюють підклас кристалів з дуже малою (до  $3\text{ eV}$ ) шириною забороненої зони. Такі речовини одержали назву напівпровідники. Їх власна провідність незначна. Її можна значно підвищити введенням у кристал спеціально підібраних домішок. Концентрація домішкових атомів складає, зазвичай,  $10^{-2} \div 10^{-3}\%$ . Електрони цих атомів утворюють лише вузькі енергетичні рівні. Домішки добирають таким чином, щоб енергетичні рівні валентних електронів їх атомів розташовувалися у забороненій зоні, причому або поблизу верхнього рівня валентної зони, або ж поблизу нижнього рівня зони провідності. На цих метастабільних рівнях можуть осідати електрони або дірки, утворені в кристалі за рахунок внутрішнього фотоефекту. Крім того, до добору домішок висувається ще одна важлива умова – валентність домішки повинна бути або на одиницю більшою валентності основи, або на одиницю меншою. У першому випадку у кристалі утворюються вільні електрони, у другому – дірки.

Атоми домішок, які постачають електрони провідності, називають донорами. Напівпровідники з такою провідністю одержали назву напівпровідники *n*-типу. Вони мають електронну провідність. Ті ж домішки, валентність яких менша основи, називають акцепторними. Вони утворюють діркову провідність. Напівпровідники з такою провідністю – це напівпровідники *p*-типу. Введення домішок збільшує провідність на декілька порядків.

Надзвичайно важливим є випадок, коли одну частину монокристала збагачують донорною домішкою, а сусідню – акцепторною, провідність однієї частини буде *n*-типу, а іншої – *p*-типу. Контакт таких двох домішкових напівпровідників називають електронно-дірковим переходом або *p-n*-переходом. У результаті дифузії електронів у *p*-область з послідуною рекомбінацією їх з дірками цієї області, а дірок у *n*-область з рекомбінацією з електронами, у місці контакту виникає смуга, в якій відсутні носії заряду. Ширина цієї смуги досить значна, вона становить декілька тисяч міжатомних відстаней, що суттєво перевищує довжину вільного пробігу зарядів у кристалі. За таких обставин смуга чинить дуже великий опір електричному струмові, вона одержала назву запертого шару. З енергетичної точки зору це означає, що у місці *p-n*-переходу утворюється потенціальний бар'єр. Його поява зумовлена наступними фізичними процесами. Після переходу електронів з *n*-області у *p*-область у *n*-напівпровіднику поблизу внутрішньої межі з'явиться некомпенсований позитивний заряд. Такий же, але негативний, заряд одночасно виникає у *p*-напівпровіднику внаслідок переходу дірок з *p*-області у *n*-область. Утвориться, таким чином, подвійний електричний шар, локалізований на ділянці *p-n*-переходу. Напруженість електричного поля такого шару направлена від *n*-напівпровідника до *p*-

напівпровідника, що ускладнює подальший перехід електрона у  $p$ -область, а дірок – у  $n$ -область. Тобто на межі  $p$  –  $n$ -переходу виникають потенціальні бар'єри як для електронів, так і для дірок.

Висотою потенціальних бар'єрів можна керувати. Їх можна збільшити, приклавши додатній потенціал до  $n$ -області, а від'ємний – до  $p$ -області. Запірний шар при цьому розшириться, його опір збільшиться, потенціальний бар'єр зросте. Якщо полярність прикладеної різниці потенціалів поміняти, товщина запирного шару і його опір зменшаться. При достатній напруженості зовнішнього електричного поля потенціальний бар'єр взагалі можна скомпенсувати до нуля. У цьому разі  $p$  –  $n$ -перехід пропускатиме струм у напрямі від  $p$ -області до  $n$ -області. Такий напрям електричного поля називають прямим або пропускним. У першому ж випадку поле одержало назву зворотнього або запирного. Звідси висновок:  $p$  –  $n$ -перехід має односторонню провідність, що використовується, зокрема, для випрямлення змінного струму.

Описаний вище пристрій називають діодом (від грец. di(s) – двічі).

З точки зору зонної теорії протікання струму через  $p$  –  $n$ -перехід під впливом прямої різниці потенціалів означає, що електронам надали енергію  $eU$ , достатню для подолання забороненої зони шириною  $\Delta E$ , тобто для переведення їх з валентної зони у зону провідності. Рекомбінація ж електронів і дірок свідчить, що електрони здійснили обернений перехід із зони провідності у валентну зону. Під рекомбінацією якраз і розуміють процес захоплення електроном зони провідності вільного енергетичного рівня в атомі. Під час протікання цього процесу атом виділяє зайву енергію, яка пропорційна ширині забороненої зони. Зазвичай ця енергія незначна, вона достатня лише для збільшення теплового руху атомів. Проте можна створити напівпровідник з досить широкою забороненою зоною. У цьому випадку при рекомбінації електрона з діркою буде випромінюватися світло.

Напівпровідниковий діод, що випромінює світло при проходженні струму через  $p$  –  $n$ -перехід у прямому напрямі, називають світлодіодом. Основою його роботи є процес інжекції (від лат. injecto – вводить, вкидаю) неосновних носіїв заряду в активну область  $p$  –  $n$ -структури та послідувальною рекомбінацією їх з випромінюванням у видимому діапазоні спектру. Добираючи напівпровідники з різною шириною забороненої зони можна змінювати колір випромінювання.

Конструктивно світлодіод являє собою активний елемент із напівпровідникового монокристалу, який містить  $p$  –  $n$ -перехід, і омичні контакти. Активний елемент («чип») зазвичай має розміри  $0.3 \times 0.3 \times 0.25$  мм.

Особливістю випромінювання світлодіода є його висока яскравість (тисячі  $\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ ) при силі світла до десятків  $\text{кд}$ . Живиться світлодіод напругою 1,5–4 В. Він надійний в експлуатації, має значний термін роботи – до  $10^5$  годин. Світлодіод, на відміну від лазера, не є джерелом монохроматичного світла, проте смуга його випромінювання порівняно вузька – біля  $50 \text{ нм}$ .

Виготовляють світлодіоди в інтервалі довжин хвиль, на які припадають максимуми випромінювання, від  $300 \text{ нм}$  до  $1500 \text{ нм}$ . Деякі види світлодіодів наведені у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1

| Колір      | Довжина хвилі, нм | Випромінююча структура і підкладка |
|------------|-------------------|------------------------------------|
| Червоний   | 670               | InGaAlP, GaP, GaAsP                |
| Оранжевий  | 620               | InGaAlP, GaAsP: N/GaP              |
| Жовтий     | 585               | InGaAlP, GaP                       |
| Зелений    | 540               | InGaN, GaP                         |
| Блакитний  | 470               | InGaN, SiC/SiC – 6H                |
| Синій      | 450               | InGaN,                             |
| Фіолетовий | 420               | InGaN, SiC/SiC – 4H                |

Оскільки енергія кванта світла  $h\nu$ , що випромінюється при рекомбінації електрона і дірки, дорівнює ширині забороненої зони  $\Delta E$ , а остання, у свою чергу, долається прямою різницею потенціалів  $U$ , то

$$h\nu = eU.$$

Ця рівність відкриває можливість експериментального визначення сталої Планка  $h$ :

$$h = \frac{eU}{\nu} = \frac{e}{c} \cdot U \cdot \lambda.$$

Значення довжини хвилі, на яку припадає максимум випромінювання світлодіода, визначається за допомогою монохроматора УМ-2. Прямую напругу  $U$  можна оцінити, виходячи із специфіки залежності струму через  $p$  –  $n$ -перехід від прикладеної до нього різниці потенціалів. Така залежність одержала назву вольт-амперної характеристики світлодіода (рис. 9.1). Різке

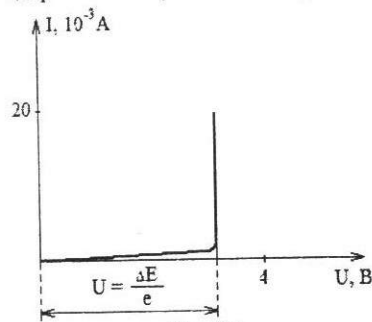


Рис. 9.1

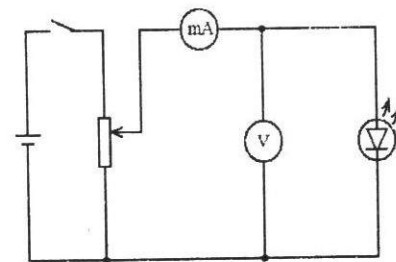


Рис. 9.2

збільшення прямого струму через світлодіод настає саме при рівності  $U$  величині потенціального бар'єру  $\frac{\Delta E}{e}$ .

Електрична схема, що містить світлодіод, зображена на рис. 9.2. Вона змонтована на окремій панелі, яка закріплюється перед вхідною щілиною монохроматора.

#### Послідовність виконання роботи

1. За спектром випромінювання ртуті проградувати монохроматор УМ-2 (дивись лабораторну роботу №3).
2. Ввімкнути електричну схему. За допомогою потенціометра домогтися різкого зростання прямого струму через світлодіод. Заміряти напругу. Значення струму не повинно перевищувати 10 мА, інакше світлодіод буде перегріватися.
3. За допомогою монохроматора визначити довжину хвилі, на яку припадає максимум випромінювання світлодіода.
4. За формулою  $h = \frac{eU}{\nu} = \frac{e}{c} \cdot U \cdot \lambda$  знайти сталу Планка, порівняти її з табличною величиною і проаналізувати можливі відхилення.
5. Вимірювання виконати декілька разів. Провести математичну обробку одержаних результатів.

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: Т.2.: Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 1999. – 452с., ст. 156-168, 182-188.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 341 - 348.
3. Бурсиан Э.В. Физические приборы. – М.: Просвещение, 1984. – 271с., ст. 195-196.
4. Гершензон Е.М., Малов Н.Н. Лабораторный практикум по общей физике. – М.: Просвещение, 1985. – 351с., ст. 338-340.
5. Физическая энциклопедия: Т.4. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 704с., ст. 465-468.
6. Методична розробка до роботи.

#### Запитання для самоконтролю:

1. Які хімічні елементи належать до напівпровідників?
2. Який механізм утворення енергетичних зон у кристалах?
3. Який порядок ширини забороненої зони у напівпровідниках?
4. Як утворюється напівпровідник *p*-типу, *n*-типу?
5. Що являє собою *p* – *n*-перехід? Які його властивості?
6. Які особливості зонної структури світлодіодів?
7. Який механізм випромінювання світла світлодіодом?
8. Який вигляд має вольт-амперна характеристика світлодіода?
9. Які характеристики світла, що випромінює світлодіод?
10. Де використовуються світлодіоди?

#### Тестові завдання для вхідного контролю

1. До напівпровідників належать:
  - а) лише тверді тіла;
  - б) тверді тіла і рідини;
  - в) тверді тіла і гази;
  - г) тверді тіла, рідини і гази.
2. Від чого залежать ширини енергетичних зон у кристалі?
  - а) від кількості в атомі у кристалі;
  - б) від кількості електронів у речовині;
  - в) від розмірів кристала;
  - г) від ступеня взаємодії електронів сусідніх атомів.
3. Енергетичні зони утворюються:
  - а) у будь-якому твердому тілі;
  - б) лише в кристалах;
  - в) винятково у монокристалах;
  - г) у кристалах, які складаються з однакових атомів.
4. Відношення мас двох монокристалів кремнію дорівнює 2. Яке відношення кількості зон у цих монокристалах?
  - а) 1;
  - б)  $\sqrt{2}$ ;
  - в) 2;
  - г) 4.
5. Ширина забороненої зони у напівпровідниках не перевищує:
  - а) 0,3eВ;                      б) 1eВ;                      в) 3eВ;                      г) 10eВ.
6. У чотиривалентний напівпровідник помістили тривалентну домішку. Де розташуються домішкові енергетичні рівні?
  - а) будь-де у забороненій зоні;
  - б) посередині забороненої зони;
  - в) поблизу дна зони провідності;
  - г) вище від верхнього рівня валентної зони.
7. Який порядок товщини запірного шару?
  - а)  $10^{-10}$  м;                      б)  $10^{-8}$  м;                      в)  $10^{-6}$  м;                      г)  $10^{-4}$  м.
8. Колір випромінювання світлодіода залежить від:
  - а) специфічних барвників, що вводяться у монокристал;
  - б) прикладеної до *p* – *n*-переходу напруги;
  - в) товщини запірного шару;
  - г) ширини забороненої зони.
9. Який порядок напруги, яку в даній роботі можна подавати на світлодіод?
  - а) десятки частки вольтга;
  - б) одиниці вольт;
  - в) десятки вольт;
  - г) сотні вольт.
10. Робоча формула для визначення сталої Планка у цій роботі має вигляд:
  - а)  $h = \frac{U\lambda}{ce}$ ;                      б)  $h = \frac{eU\lambda}{c}$ ;                      в)  $h = \frac{eU}{c\lambda}$ ;                      г)  $h = \frac{e\lambda}{cU}$ .

*Тестові завдання для підсумкового контролю*

1. Які з нижче перелічених хімічних елементів належать до напівпровідників: Be, B, C, N, F, Mg, P, V, Sr, Cr, In, I, Ba, W, Tl, Bi?

- а) Be, N, Cr, Tl; б) B, C, P, I; в) F, V, Sr, Bi; г) Mg, In, Ba, W.

2. Яка причина утворення енергетичних зон?

- а) взаємодія атомів;  
б) значна кількість електронів в атомі;  
в) відсутність носіїв зарядів у речовині;  
г) наявність ковалентного зв'язку між атомами.

3. Кількість енергетичних зон у твердому тілі залежить від:

- а) кількості атомів у речовині;  
б) кількості валентних електронів в атомах, з яких складається речовина;  
в) кількості енергетичних рівнів окремого атома;  
г) кількості сусідніх атомів.

4. У чотиривалентний напівпровідник ввели п'ятивалентну домішку. Чи призведе це до утворення додаткових носіїв заряду?

- а) не призведе;  
б) з'являться додаткові електрони;  
в) утворюються нові дірки;  
г) в однаковій мірі зросте кількість електронів і дірок.

5. Ширина забороненої зони у світлодіодів має порядок:

- а)  $10^{-2} \text{ eB}$ ; б)  $10^{-1} \text{ eB}$ ; в)  $1 \text{ eB}$ ; г)  $10 \text{ eB}$ .

6. Який механізм випромінювання світла світлодіодом?

- а) це спонтанне теплове випромінювання, яке виникає внаслідок нагрівання напівпровідника електричним струмом;  
б) це індуковане випромінювання, механізм якого схожий на випромінювання лазера;  
в) спонтанний, люмінесцентний;  
г) інжекторний, рекомбінаційний.

7. У світлодіоді електрони переводяться у зону провідності за рахунок:

- а) пробою  $p - n$ -переходу;  
б) внутрішнього фотоефекту;  
в) уприскування їх із валентної зони;  
г) теплового руху.

8. Граничні струми, які можна пропускати через світлодіод, мають порядок:

- а)  $10^{-6} \text{ A}$ ; б)  $10^{-3} \text{ A}$ ; в)  $10 \text{ A}$ ; г)  $10^3 \text{ A}$ .

9. Світлодіоди виготовляють з:

- а) германію з домішками індію і фосфору;  
б) силіцію з домішками бору та арсену;  
в) галію з домішками фосфору та індію;  
г) двоатомних кристалів типу CdS, CdSe, ZnS.

10. Термін роботи світлодіода близько:

- а) 100 годин; б) 1 року; в) 10 років; г) 100 років.

Лабораторна робота №10

**Вивчення роботи радіометричної установки та визначення коефіцієнтів поглинання радіоактивного випромінювання**

*Мета роботи:* вивчення методів та приладів для реєстрації радіоактивного випромінювання.

*Прилади і матеріали:* лічильник Гейгера-Мюллера, радіоактивні препарати у свинцевому контейнері, секундомір, алюмінієві пластинки різної товщини.

*Завдання:* а) при домашній підготовці:

- користуючись рекомендованою літературою вивчити будову та принцип дії лічильника Гейгера-Мюллера;
- у робочому зошиті описати прилади та порядок виконання роботи;
- ознайомитись з методами визначення лінійних та масових коефіцієнтів поглинання.

б) при виконанні роботи:

- перевірити електричну схему і у присутності викладача увімкнути прилад в електричну мережу;
- визначити залежність інтенсивності випромінювання від товщини захисного шару;
- визначити лінійний та масовий коефіцієнт поглинання для алюмінію;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

*Правила техніки безпеки:*

- при підключенні приладів до мережі напруги користуйтеся провідниками з непошкодженою ізоляцією;
- зберігайте радіоактивні препарати виключно у свинцевому контейнері.

*Теоретичні відомості та опис установки*

Вивчаючи дію різних люмінесціюючих речовин на фотографічні матеріали, французький фізик А.А. Беккерель виявив (1896 р.), що уранілові солі випускають невідомі промені явно не люмінесцентного походження. Це явище одержало назву радіоактивності. Під ним розуміють таке спонтанне перетворення атомних ядер, при якому у ядрі змінюється лише заряд  $Z$ , або ж заряд  $Z$  і масове число  $A$  одночасно. Такі ядерні процеси достатньо повільні, час їх протікання більший, ніж  $10^{-12}$  с. До них відносять:

- $\alpha$ -розпад;
- три види  $\beta$ -розпаду ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ,  $K$ -захоплення);
- спонтанний поділ ядер;
- однопротонний розпад;
- двопротонний розпад.



Відбуваються такі процеси за рахунок внутрішніх причин, самодовільно, жодним зовнішнім чинником (тиском, температурою, зміною агрегатного стану, електричним чи магнітним полем тощо) вплинути на їх протікання неможливо.

Під час радіоактивності строго виконуються закони збереження заряду  $Z$  і масового числа  $A$ . Розпад ядер описується закономірністю

$$N = N_0 \exp(-\lambda t).$$

Цей вираз носить назву закону радіоактивного розпаду. Тут

$N_0$  – початкова кількість ядер радіоактивної речовини;

$N$  – кількість ядер, що залишилися через час  $t$ ;

$\lambda$  – стала розпаду.

Стала розпаду зв'язана з періодом піврозпаду  $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$  та середнім часом життя ядер  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ .

Характеристикою радіоактивних речовин є їх активність  $\alpha = \frac{dN}{dt} = \lambda N$ .

Оскільки радіоактивне випромінювання має значну проникну здатність і згубно діє на живі організми, постає питання захисту від нього. Радіоактивні препарати потрібно певним чином ізолювати від навколишнього середовища. Механізм такого захисту ґрунтується на здатності ізоляційних матеріалів ефективно поглинати радіоактивні промені за рахунок їх взаємодії з атомами поглинача. Ступінь такої взаємодії визначається, по-перше, властивостями самого випромінювання і, по-друге, характеристиками поглинача – його густиною, розмірами атомів тощо.

Аналіз різних видів радіоактивного випромінювання приводить до висновку – найбільшою проникною здатністю володіють  $\gamma$ -промені. Із-за наявності заряду проникна здатність  $\alpha$ - та  $\beta$ -частинок значно поступається  $\gamma$ -променям, у яких заряд відсутній і до того ж, на відміну від нейтронів, у них нульова маса спокою. Так, наприклад, для захисту від  $\alpha$ -частинок достатньо шару повітря, товщиною близько 10 см, для захисту від  $\beta$ -частинок потрібно вже шар скла у декілька сантиметрів, надійний захист від  $\gamma$ -променів створює шар свинцю такої ж товщини.

У залежності від енергії  $\gamma$ -квантів можливі три механізми їх взаємодії з речовиною:

- внутрішній чи зовнішній фотоэффект (незначні енергії);
- ефект Комптона (середні енергії);
- утворення електрон-позитивних пар (значні енергії  $\gamma$ -квантів).

Кінцевим результатом усіх трьох механізмів є поява електронів із значною енергією. Ці електрони, як  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинки, викликають іонізацію атомів, що і є основою всіх методів їх детектування.

При вимірюванні глибини проникнення частинок у захисний шар слід мати на увазі, що їх взаємодія з поглиначем має статистичний характер. Для

одержання результату, наближеного до достовірного, необхідно щоб або активність препарату була значною, або ж, при малій активності, збільшувати час спостереження. В умовах даної лабораторної роботи оптимальним є час близько трьох хвилин.

Що стосується залежності проникної здатності частинок від характеристик поглинача, то у першому наближенні вона описується формулою:

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1)$$

де  $I_0$  – інтенсивність падаючого на поглинач потоку;

$I$  – інтенсивність потоку після проходження шару поглинач товщиною  $x$ ;

$\mu$  – лінійний коефіцієнт поглинання.

Коефіцієнт  $\mu$  залежить (для даного виду частинок) від густини  $\rho$  поглинача, тому іноді доцільно користуватися масовим коефіцієнтом поглинання  $\mu_M$ . Зв'язок лінійного і масового коефіцієнта визначається виразом  $\mu = \rho \mu_M$ .

Із формули (1) слідує, що інтенсивність радіоактивного випромінювання зменшується з товщиною захисного шару за експоненціальним законом. Одним із завдань даної роботи є перевірка цієї залежності.

Для визначення лінійного коефіцієнта поглинання зручно скористатися графічною залежністю  $\ln \frac{I_0}{I}$  від  $x$ . Побудувавши такий графік, визначають

$\mu$  як тангенс кута нахилу одержаної прямої до вісі  $X$ .

Виявляють мікрочастинки та вивчають їх характеристики приладами, які носять узагальнюючу назву «детектори». До них належать трекові камери (Вільсона, Лангсдорфа, Глезера), лічильники (Гейгера-Мюллера, Черенкова, сцинтиляційні), мас-аналізатори (Томсона, Бейнбріджа, Астона). У даній роботі реєстрацію і лічбу частинок здійснюють за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера. Це несамогасний газорозрядний пристрій у формі циліндричного металевого чи скляного балона, наповненого сумішшю певних газів. Найчастіше це може бути аргон чи неон з добавками галогенів. Тиск газів у балоні становить 100-200 мм рт.ст. Лічильник має два електроди. Катодом є сам металевий корпус або тонкий шар металу, нанесений на внутрішню поверхню скляного балона. Анод виготовляють у вигляді тонкої (діаметром 0,05 – 0,10 мм) металеві нитки і розміщують уздовж вісі циліндра (рис. 10.1). Між електродами прикладається напруга у 500 – 1000 В. Така конструкція забезпечує велику напруженість електричного поля біля нитки, її максимальне значення зростає при зменшенні радіуса нитки. Якщо в такий газовий простір потрапляє заряджена частинка, то вона набуває, за рахунок прискорюючого поля, енергію, достатню для іонізації газу. Утворені при цьому електрони також зазнають прискорення і в свою чергу іонізують нові атоми газу – виникає самостійний розряд, конденсатор  $C_1$  (рис. 10.2) заряджається і при досягненні на ньому певного потенціалу відбувається розряд на опорі  $R$ . Тривалість такого акту близько  $10^{-7}$  с.





Рис. 10.1

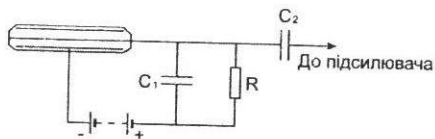


Рис. 10.2

Потім самостійний розряд слід погасити. Здійснюють це за рахунок досить значного опору ( $10^8 - 10^{10}$  Ом) резистора  $R$ . При протіканні через  $R$  розрядного струму спад напруги на ньому значно зростає, напруга ж між катодом і анодом лічильника різко зменшується, розряд згасає. Крім того, необхідно нейтралізувати позитивні іони, які утворилися в об'ємі лічильника. Час, потрібний на ці операції, називається «мертвим». Він залежить від характеристик лічильника, зокрема від  $R$  і  $C_1$ , і становить близько  $10^{-4}$  с. Після цього лічильник готовий до реєстрації наступної частинки. Отже, проникнення в лічильник кожної нової частинки буде викликати появу змінного за величиною короткочасного, але достатньо значного струму, який через конденсатор  $C_2$  спрямовується на підсилення. Для постійної складової струму конденсатор  $C_2$  є непроникним.

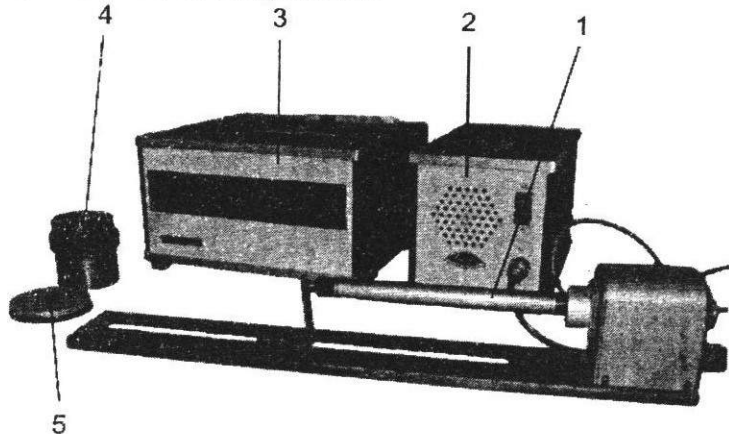


Рис. 10.3

Важливе значення для успішної роботи лічильника має товщина його стінки – вона повинна бути меншою довжини вільного пробігу частинки у речовині стінки. З огляду на це, лічильник Гейгера-Мюллера добре фіксує

$\beta$ -частинки високої енергії, космічне випромінювання та  $\gamma$ -кванти. Для реєстрації ж частинок з малим пробігом у герметичному корпусі циліндра лічильника повинно бути тоньке віконце, проникне, наприклад, для  $\alpha$ -частинок.

Крім лічильника 1 (рис. 10.3), до складу установки входять блок живлення 2, перелічувальний прилад 3 на основі декатронного блоку, контейнер 4 з радіоактивними препаратами та алюмінієві пластинки 5 різної товщини.

#### Послідовність виконання роботи

1. Увімкнути прилад у мережу і дати можливість йому прогрітися протягом 5 – 10 хвилин.
2. Виміряти фон радіоактивного випромінювання. У подальшому кількість імпульсів, яку дає фон, необхідно віднімати від числа імпульсів інших вимірювань. Усі вимірювання виконувати за один і той же час (3 хвилини).
3. Розташувати радіоактивний препарат біля лічильника, виміряти  $I_0$ , яке входить у вираз (1).
4. Прикрити препарат алюмінієвою пластинкою, товщиною  $x_1$  і визначити  $I_1$ . Поступово збільшуючи товщину захисного шару, вимірювати нові значення  $I$ . Досліди продовжувати до значень  $I$ , рівних щонайменше  $0,1I_0$ .
5. Побудувати графік залежності  $I$  від  $x$ .

6. Побудувати графік залежності  $\ln \frac{I_0}{I}$  від товщини захисного шару  $x$ .

Користуючись одержаним графіком, визначити лінійний коефіцієнт поглинання  $\mu$  як тангенс кута нахилу прямої до горизонтальної осі  $X$ .

7. Визначити масовий коефіцієнт поглинання  $\mu_M$ .
8. Одержані результати порівняти з табличними і проаналізувати можливі відхилення.

#### Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006. – 518с., ст. 257 – 259, 421 – 429.
2. Кучерук І.М., Душенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1991. – 463с., ст. 277 – 278, 381 – 385.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992. – 512 с., ст. 467 – 471.
4. Душенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1984. – 256с., ст. 229 – 233.
5. Методична розробка до роботи.

#### Затитання для самоконтролю:

1. Дайте означення радіоактивності.
2. Які види радіоактивності Вам відомі?
3. Що таке стала розпаду та період піврозпаду?
4. Які Ви знаєте радіоактивні ряди?

- Сформулюйте закон поглинання речовинами радіоактивного випромінювання.
- Яка будова та принцип дії лічильника Гейгера-Мюллера?
- Що таке лінійний коефіцієнт поглинання?
- Який вигляд має закон радіоактивного розпаду?
- Який зв'язок між лінійним і масовим коефіцієнтами поглинання?
- Які правила зберігання радіоактивних препаратів?

*Тестові завдання для вхідного контролю*

- Лічильник Гейгера-Мюллера заповнений :
  - розрідженим повітрям;
  - водяною парою;
  - інертним газом;
  - вакуумом.
- Чому анод у лічильнику Гейгера-Мюллера виготовляють у вигляді тонкої металеві нитки?
  - заради конструктивної доцільності;
  - для збільшення напруженості електричного поля;
  - з метою збільшення об'ємної густини заряду;
  - щоб збільшити різницю потенціалів між електродами.
- До видів радіоактивності не відноситься:
  - $\alpha$ -радіоактивність;
  - $\beta$ -радіоактивність;
  - $\gamma$ -радіоактивність;
  - поділ ядер.
- Радіоактивний розпад можна прискорити за рахунок:
  - зовнішнього тиску і температури;
  - електричних і магнітних полів;
  - зміною агрегатного стану радіоактивної речовини;
  - вірна відповідь відсутня.
- Якого радіоактивного сімейства у природі вже не існує?
  - торію  ${}_{90}\text{Th}^{232}$ ;
  - актиноурану  ${}_{92}\text{U}^{235}$ ;
  - урану  ${}_{92}\text{U}^{238}$ ;
  - нептунію  ${}_{93}\text{Np}^{237}$ .
- Який процес у природі не спостерігається?
  - $\alpha$ -розпад;
  - $\beta^+$ -розпад;
  - $n$ -розпад;
  - $2p$ -розпад.
- $\beta^+$ -розпад відбувається за схемою:
  - ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^{A-1} + {}_0 n^1 + \beta^0$ ;
  - ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + {}_{+1} \beta^0 + \bar{\nu}_e$ ;
  - ${}_Z X^A \rightarrow {}_Z X^A + {}_{+1} \beta^0 + {}_{+1} \beta^0$ ;
  - ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + {}_{+1} \beta^0 + \nu_e$ .
- Стала розпаду вимірюється:
  - герцами;
  - секундами;
  - метрами;
  - кількістю розпадів за секунду.
- Який з нижче наведених законів збереження не застосовується при розгляді процесів радіоактивного розпаду атомних ядер?
  - моменту кількості руху;
  - кількості нуклонів;
  - електричного заряду;
  - маси-енергії.
- Інтенсивність потоку  $\beta$ -частинок змінюється з товщиною захисного шару:
  - лінійно;
  - експоненціально;
  - гіперболічно;
  - параболічно.

*Тестові завдання для підсумкового контролю*

- Лічильник Гейгера-Мюллера працює в режимі:
    - насичення;
    - несамостійного розряду;
    - самостійного розряду;
    - усі відповіді вірні.
  - Тиск газу у балоні лічильника Гейгера-Мюллера має порядок:
    - декілька атмосфер;
    - рівний атмосферному;
    - кілька часток атмосфери;
    - $10^{-3} + 10^{-4}$  атмосфери.
  - Яке з нижче наведених означень радіоактивності є повним? Під радіоактивністю розуміють процес, при якому у ядрі змінюється:
    - число нуклонів  $A$ ;
    - число протонів  $Z$ ;
    - число нейтронів  $N$ ;
    - або  $Z$ , або  $A$  і  $Z$  одночасно.
  - Лічильник Гейгера-Мюллера звичайної конструкції реєструє:
    - лише  $\beta$ -частинки;
    - тільки  $\gamma$ -кванти;
    - винятково космічне випромінювання;
    - як  $\beta$ -частинки, так і гама- та космічні промені.
  - Зв'язок сталої розпаду  $\lambda$  і періоду напіврозпаду  $T$  має вигляд:
    - $\lambda = T \cdot \ln 2$ ;
    - $\lambda = \frac{T}{\ln 2}$ ;
    - $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ ;
    - $\lambda = \frac{1}{T \cdot \ln 2}$ .
  - Яка з нижче наведених формул, що визначає активність  $A$  препарату, є хибною?
    - $A = A_0 e^{-\lambda t}$ ;
    - $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ ;
    - $A = \lambda N$ ;
    -
- $A = \frac{\lambda T}{\ln 2}$ ,  
де  $N_0$  – число ядер у початковий момент,  $N$  – число ядер, що залишились через час  $t$ ,  $\lambda$  – стала розпаду,  $T$  – період піврозпаду,  $A_0$  – початкова активність.
- У законі радіоактивного розпаду  $N = N_0 \exp(-\lambda t)$  величина  $N$  це:
    - число ядер, що розпалися;
    - число ядер, що поглинулися;
    - початкова кількість ядер;
    - число ядер, що залишилися.
  - Лінійний коефіцієнт поглинання  $\mu$  залежить від товщини  $x$  поглинаючого шару слідує чинном:
    - $\mu = x / \ln \frac{I_0}{I}$ ;
    - $\mu = x \ln \frac{I_0}{I}$ ;
    - $\mu = \ln \frac{I_0}{I} / x$ ;
    - $\mu = x \ln \frac{I_0}{I}$ .
  - Масовий коефіцієнт поглинання потоку  $\beta$ -частинок  $\mu_m$  і лінійний коефіцієнт поглинання  $\mu$  зв'язані між собою співвідношенням:
    - $\mu_m = m\mu$ ;
    - $\mu_m = \frac{\mu}{M}$ ;
    - $\mu_m = \rho\mu$ ;
    - $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ ,
 де  $m$ ,  $\rho$ ,  $M$  – маса поглинач, його густина і молярна маса відповідно.
  - При однаковій товщині шару кращі захисні властивості від радіації має:
    - алюміній;
    - графіт;
    - залізо;
    - мідь.

12. Додатки  
12.1. Фізичні константи

| № п/п | Назва   | Значення константи в одиницях СІ, формула   |
|-------|---|---|
| 1     | Швидкість світла у вакуумі  | $c=2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с} \pm 5 \cdot 10^2 \text{ м/с} = (299792,5 \pm 0,5) \text{ км/с}$  |
| 2     | Гравітаційна стала  | $G=6,67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$   |
| 3     | Стала Планка  | $h=6,6260755(40) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$<br>$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05457266(63) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  |
| 4     | Абсолютний нуль температур  | $0 \text{ К} = -273,15^\circ \text{ С}$   |
| 5     | Відношення відносної атомної маси по кисневій фізичній шкалі до відносної атомної маси по кисневій хімічній шкалі | $\frac{A_{ф.ш.}}{A_{х.ш.}} = 1,000275 \pm 0,000003$   |
| 6     | Відношення відносної атомної маси по кисневій хімічній шкалі до відносної атомної маси по вуглецевій шкалі        | $\frac{A_{х.ш.}}{A_{е.ш.}} = 1,000043 \pm 0,000003$<br>$\frac{A_{е.ш.}}{A_{х.ш.}} = 0,999957 \pm 0,000003$  |
| 7     | Відношення відносної атомної маси по кисневій фізичній шкалі до відносної атомної маси по вуглецевій шкалі        | $\frac{A_{ф.ш.}}{A_{е.ш.}} = 1,000319 \pm 0,000003$<br>$\frac{A_{е.ш.}}{A_{ф.ш.}} = 0,999681 \pm 0,000003$  |
| 8     | Універсальна газова стала   | $R_{0 \text{ х.ш.}} = (8314,67 \pm 0,34) \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$<br>$R_{0 \text{ ф.ш.}} = 8316,96 \pm 0,34 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$<br>$R_{0 \text{ в.ш.}} = (8314,31 \pm 0,31) \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$ |
| 9     | Число (стала) Авогадро  | $N_{\text{х.ш.}} = (6,02322 \pm 0,00016) \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$<br>$N_{\text{ф.ш.}} = (6,02486 \pm 0,00016) \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$<br>$N_{\text{в.ш.}} = (6,02296 \pm 0,00016) \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$                                |
| 10    | Стала Больцмана   | $k = \frac{R_0}{N} = (1,380658(12) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К})$  |

Продовження табл. 12.1

| № п/п | Назва   | Значення константи в одиницях СІ, формула  |
|-------|---|--|
| 11    | Стала Стефана - Больцмана   | $\sigma = \frac{\pi^2}{60} \frac{k^4}{h^3 c^2} = 5,67051(19) \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$   |
| 12    | Перша константа випромінювання                                      | $C_1 = 8\pi h c = (4,9918 \pm 0,0002) \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{м}$<br>$C'_1 = hc^2 = (5,944 \pm 0,0002) \cdot 10^{-17} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$                                 |
| 13    | Друга константа випромінювання                                      | $C_2 = \frac{hc}{k} = (1,43880 \pm 0,00007) \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  |
| 14    | Стала Віна  | $\lambda_{\text{макс}} \cdot T = C_2/4,96511423 = (0,289782 \pm 0,000013) \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  |
| 15    | Заряд електрона   | $e = 1,60217733(49) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$   |
| 16    | Маса спокою:<br>-електрона<br>-протона<br>-нейтрона                 | $m_e = 9,1093897(54) \cdot 10^{-31} \text{ кг}$<br>$m_p = 1,6726231(10) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$<br>$m_n = 1,6749286(10) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  |
| 17    | Співвідношення мас:<br>-протона і електрона<br><br>-водню і протона | $\frac{m_p}{m_e} = 1836,152701(37)$<br><br>$\frac{m_H}{m_p} = 1,00054461$  |
| 18    | Питомий заряд електрона   | $\frac{e}{m_e} = -1,75881962(53) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$  |
| 19    | Стала Рідберга:<br>-для нескінченної маси<br>-для легких ядер       | $R_\infty = (10973730,9 \pm 1,2) \text{ м}^{-1}$<br>$R_H = (10967759,6 \pm 1,2) \text{ м}^{-1}$<br>$R_D = (10970741,9 \pm 1,2) \text{ м}^{-1}$<br>$R_{He} = (10972226,6 \pm 1,2) \text{ м}^{-1}$ |
| 20    | Електрична стала  | $\epsilon_0 = 8,854187817 \dots \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} = 8,854304 \text{ пФ/м}$  |
| 21    | Магнітна стала  | $\mu_0 = 1,2566370614 \dots \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$  |
| 22    | Класичний радіус електрона  | $r_0 = \frac{\alpha^3}{4\pi R_\infty} = 2,81794092(38) \cdot 10^{-15} \text{ м}$<br>$r_0^2 = 7,94079103 \cdot 10^{-30} \text{ м}^2$  |

Продовження табл. 12.1

| № п/п | Назва   | Значення константи в одиницях СІ, формула   |
|-------|---|---|
| 23    | Магнітний момент:<br>-електрона<br>-протона                                   | $\mu_e = 928,47701(31) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл<br>$\mu_p = 1,41060761(17) \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл   |
| 24    | Перший борівський радіус  | $\alpha_0 = \frac{\alpha}{4\pi R_\infty} =$<br>$= (5,29172 \pm 0,00002) \cdot 10^{-11}$ м   |
| 25    | Радіус електронної орбіти $H^1$ в нормальному стані, віднесений до центру мас | $\alpha^1_0 = \alpha_0 (1 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}} =$<br>$= (5,29158 \pm 0,00002) \cdot 10^{-11}$ м  |
| 26    | Відстань між протоном і електроном в нормальному стані $H^1$                  | $\alpha^{11}_0 = \alpha^1_0 \frac{R_\infty}{R_H} =$<br>$= (5,29446 \pm 0,00002) \cdot 10^{-11}$ м   |
| 27    | Комптонівська довжина хвилі:<br>-електрона<br><br>-протона<br><br>-нейтрона   | $\lambda_{ce} = \frac{h}{m_e c} =$<br>$= (24,2626 \pm 0,00002) \cdot 10^{-13}$ м<br>$\lambda_{ce} = \frac{\lambda_{ce}}{2\pi} =$<br>$= (3,86151 \pm 0,00004) \cdot 10^{-13}$ м<br>$\lambda_{cp} = \frac{h}{m_p c} =$<br>$= (13,2141 \pm 0,0002) \cdot 10^{-16}$ м<br>$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{cp}}{2\pi} =$<br>$= 2,10308 \pm 0,00003) \cdot 10^{-16}$ м<br>$\lambda_{cn} = \frac{h}{m_n c} =$<br>$= (13,1959 \pm 0,0002) \cdot 10^{-16}$ м<br>$\lambda_{cn} = \frac{\lambda_{cn}}{2\pi} =$<br>$= (2,10019 \pm 0,00003) \cdot 10^{-16}$ м |
| 28    | Магнетон Бора   | $\mu_0 = \frac{he}{4\pi \cdot mc} =$<br>$= 0,92740154(31) \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл   |

Продовження табл. 12.1

| № п/п | Назва          | Значення константи в одиницях СІ, формула                       |
|-------|----------------|---|
| 29    | Довжина Планка | $L_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = 1,61605(10) \cdot 10^{-35}$ м |
| 30    | Маса Планка    | $m_{Pl} = \sqrt{\frac{hc}{G}} = 2,17671(14) \cdot 10^{-8}$ кг   |
| 31    | Час Планка     | $t_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = 5,39056(34) \cdot 10^{-44}$ с |

## 12.2. Латинська та грецька абетки

| Латинська абетка |         |    |          |
|------------------|---------|----|----------|
| Aa               | a       | Nn | en       |
| Bb               | be      | Oo | o        |
| Cc               | ce      | Pp | pe       |
| Dd               | de      | Qq | qu       |
| Ee               | e       | Rr | er       |
| Ff               | ef      | Ss | es       |
| Gg               | ge(же)  | Tt | te       |
| Hh               | ha(аш)  | Uu | u        |
| Ii               | i       | Vv | ve       |
| Jj               | йот(жи) | Ww | дубль-ве |
| Kk               | ка      | Xx | ікс      |
| Ll               | ель     | Yy | ігрик    |
| Mm               | ем      | Zz | зет      |

| Грецька абетка |         |    |         |
|----------------|---------|----|---------|
| Aα             | альфа   | Nν | ню      |
| Bβ             | бета    | Ξξ | ксі     |
| Γγ             | гамма   | Oο | омікрон |
| Δδ             | дельта  | Ππ | пі      |
| Eε             | епсілон | Ρρ | ро      |
| Zζ             | дзета   | Σσ | сігма   |
| Hη             | ета     | Ττ | тау     |
| Θθ(θ)          | тета    | Φφ | фі      |
| Iι             | іота    | Χχ | хі      |
| Kκ             | каппа   | Υυ | іпсілон |
| Λλ             | ламбда  | Ψψ | псі     |
| Mμ             | мю      | Ωω | омега   |

## 12.3. Множники для утворення кратних і часткових одиниць

| Найменування | Множник    | Позначення |            |
|--------------|------------|------------|------------|
|              |            | українське | міжнародне |
| екса         | $10^{18}$  | Е          | E          |
| пета         | $10^{15}$  | П          | P          |
| тера         | $10^{12}$  | Т          | T          |
| гіга         | $10^9$     | Г          | G          |
| мега         | $10^6$     | М          | M          |
| кіло         | $10^3$     | к          | k          |
| гекто        | $10^2$     | г          | h          |
| дека         | 10         | да         | da         |
| деци         | $10^{-1}$  | д          | d          |
| санти        | $10^{-2}$  | с          | c          |
| мілі         | $10^{-3}$  | м          | m          |
| мікро        | $10^{-6}$  | мк         | $\mu$      |
| нано         | $10^{-9}$  | н          | n          |
| піко         | $10^{-12}$ | п          | p          |
| фемто        | $10^{-15}$ | ф          | f          |
| атто         | $10^{-18}$ | а          | a          |

## 12.4. Деякі математичні сталі

|                            |                          |                                   |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| $\pi = 3,141593$           | $\sqrt{\pi} = 1,772454$  | $1 \text{ рад} = 57,295780^\circ$ |
| $2\pi = 6,283186$          | $\sqrt{2} = 1,414214$    | $1^\circ = 0,017453 \text{ рад}$  |
| $4\pi = 12,566372$         | $\sqrt{3} = 1,732051$    | $1' = 0,000291 \text{ рад}$       |
| $\pi^2 = 9,869607$         | $\sqrt{e} = 1,648721$    | $1'' = 0,0000048 \text{ рад}$     |
| $\frac{\pi}{2} = 1,570796$ | $e = 2,718282$           | $\ln 2 = 0,693147$                |
| $\frac{1}{\pi} = 0,318310$ | $\frac{1}{e} = 0,367879$ | $\ln \pi = 1,44730$               |
| $\frac{2}{\pi} = 0,636620$ | $\lg e = 0,434294$       | $\ln 10 = 2,302585$               |

## 12.5. Значення синусів і тангенсів

| Градуси | Синуси | Тангенси | Градуси | Синуси | Тангенси |
|---------|--------|----------|---------|--------|----------|
| 0       | 0,0000 | 0,0000   | 8       | 0,1392 | 0,1405   |
| 1       | 0,0175 | 0,0175   | 9       | 0,1564 | 0,1584   |
| 2       | 0,0349 | 0,0349   | 10      | 0,1736 | 0,1763   |
| 3       | 0,0523 | 0,0524   | 11      | 0,1908 | 0,1944   |
| 4       | 0,0698 | 0,0699   | 12      | 0,2079 | 0,2126   |
| 5       | 0,0872 | 0,0875   | 13      | 0,2250 | 0,2309   |
| 6       | 0,1045 | 0,1051   | 14      | 0,2419 | 0,2493   |
| 7       | 0,1219 | 0,1228   | 15      | 0,2588 | 0,2679   |

| Градуси | Синуси | Тангенси | Градуси | Синуси | Тангенси |
|---------|--------|----------|---------|--------|----------|
| 16      | 0,2756 | 0,2867   | 58      | 0,8480 | 1,600    |
| 17      | 0,2924 | 0,3057   | 59      | 0,8572 | 1,664    |
| 18      | 0,3090 | 0,3249   | 60      | 0,8660 | 1,732    |
| 19      | 0,3256 | 0,3443   | 61      | 0,8746 | 1,804    |
| 20      | 0,3420 | 0,3640   | 62      | 0,8829 | 1,881    |
| 21      | 0,3584 | 0,3839   | 63      | 0,8910 | 1,963    |
| 22      | 0,3746 | 0,4040   | 64      | 0,8988 | 2,050    |
| 23      | 0,3907 | 0,4245   | 65      | 0,9063 | 2,145    |
| 24      | 0,4067 | 0,4452   | 66      | 0,9135 | 2,246    |
| 25      | 0,4226 | 0,4663   | 67      | 0,9205 | 2,356    |
| 26      | 0,4384 | 0,4877   | 68      | 0,9272 | 2,475    |
| 27      | 0,4510 | 0,5095   | 69      | 0,9336 | 2,605    |
| 28      | 0,4695 | 0,5317   | 70      | 0,9397 | 2,747    |
| 29      | 0,4818 | 0,5543   | 71      | 0,9455 | 2,904    |
| 30      | 0,5000 | 0,5574   | 72      | 0,9511 | 3,078    |
| 31      | 0,5150 | 0,6009   | 73      | 0,9563 | 3,271    |
| 32      | 0,5299 | 0,6249   | 74      | 0,9613 | 3,487    |
| 33      | 0,5446 | 0,6494   | 75      | 0,9659 | 3,732    |
| 34      | 0,5592 | 0,6745   | 76      | 0,9703 | 4,011    |
| 35      | 0,5736 | 0,7002   | 77      | 0,9744 | 4,331    |
| 36      | 0,5878 | 0,7256   | 78      | 0,9781 | 4,705    |
| 37      | 0,6018 | 0,7536   | 79      | 0,9816 | 5,145    |
| 38      | 0,6157 | 0,7813   | 80      | 0,9848 | 5,671    |
| 39      | 0,6293 | 0,8098   | 81      | 0,9877 | 6,314    |
| 40      | 0,6428 | 0,8391   | 82      | 0,9903 | 7,115    |
| 41      | 0,6561 | 0,8693   | 83      | 0,9925 | 8,114    |
| 42      | 0,6691 | 0,9004   | 84      | 0,9945 | 9,514    |
| 43      | 0,6820 | 0,9325   | 85      | 0,9962 | 11,34    |
| 44      | 0,6947 | 0,9657   | 86      | 0,9976 | 14,30    |
| 45      | 0,7071 | 1,0000   | 87      | 0,9986 | 19,08    |
| 46      | 0,7193 | 1,036    | 88      | 0,9994 | 28,64    |
| 47      | 0,7314 | 1,072    | 89      | 0,9998 | 57,29    |
| 48      | 0,7431 | 1,111    | 90      | 1,000  | $\infty$ |
| 49      | 0,7547 | 1,150    |         |        |          |
| 50      | 0,7660 | 1,192    |         |        |          |
| 51      | 0,7771 | 1,235    |         |        |          |
| 52      | 0,7880 | 1,280    |         |        |          |
| 53      | 0,7986 | 1,327    |         |        |          |
| 54      | 0,8090 | 1,376    |         |        |          |
| 55      | 0,8192 | 1,428    |         |        |          |
| 56      | 0,8290 | 1,483    |         |        |          |
| 57      | 0,8387 | 1,540    |         |        |          |



12.6. Показникові функції

| $x$  | $e^x$  | $e^{-x}$ | $x$  | $e^x$   | $e^{-x}$ |
|------|--------|----------|------|---------|----------|
| 0,00 | 1,0000 | 1,0000   | 2,10 | 3,1582  | 0,3166   |
| 0,05 | 1,0513 | 0,9512   | 2,15 | 3,3201  | 0,3012   |
| 0,10 | 1,1052 | 0,9048   | 2,20 | 3,4903  | 0,2865   |
| 0,15 | 1,1618 | 0,8607   | 2,25 | 3,6693  | 0,2725   |
| 0,20 | 1,2214 | 0,8187   | 2,30 | 3,8574  | 0,2592   |
| 0,25 | 1,2840 | 0,7788   | 2,35 | 4,0552  | 0,2466   |
| 0,30 | 1,3499 | 0,7408   | 2,40 | 4,2631  | 0,2346   |
| 0,35 | 1,4191 | 0,7047   | 2,45 | 4,4817  | 0,2231   |
| 0,40 | 1,4918 | 0,6703   | 2,50 | 4,7115  | 0,2123   |
| 0,45 | 1,5683 | 0,6376   | 2,55 | 4,9530  | 0,2019   |
| 0,50 | 1,6487 | 0,6065   | 2,60 | 5,2070  | 0,1921   |
| 0,55 | 1,7333 | 0,5770   | 2,65 | 5,4739  | 0,1827   |
| 0,60 | 1,8221 | 0,5488   | 2,70 | 5,7546  | 0,1738   |
| 0,65 | 1,9155 | 0,5221   | 2,75 | 6,0496  | 0,1653   |
| 0,70 | 2,0138 | 0,4966   | 2,80 | 6,3598  | 0,1572   |
| 0,75 | 2,1170 | 0,4724   | 2,85 | 6,6859  | 0,1496   |
| 0,80 | 2,2255 | 0,4493   | 2,90 | 7,0287  | 0,1423   |
| 0,85 | 2,3396 | 0,4274   | 2,95 | 7,3891  | 0,1353   |
| 0,90 | 2,4596 | 0,4066   | 3,00 | 7,7679  | 0,1287   |
| 0,95 | 2,5857 | 0,3876   | 3,05 | 8,1662  | 0,1225   |
| 1,00 | 2,7183 | 0,3679   | 3,10 | 8,5849  | 0,1165   |
| 1,05 | 2,8577 | 0,3499   | 3,20 | 9,0250  | 0,1108   |
| 1,10 | 3,0042 | 0,3329   | 3,30 | 9,4877  | 0,1054   |
| 1,15 | 3,1574 | 0,3170   | 3,40 | 9,9730  | 0,1003   |
| 1,20 | 3,3181 | 0,3020   | 3,50 | 10,4810 | 0,0953   |
| 1,25 | 3,4861 | 0,2878   | 3,60 | 11,0120 | 0,0907   |
| 1,30 | 3,6621 | 0,2744   | 3,70 | 11,5670 | 0,0865   |
| 1,35 | 3,8469 | 0,2617   | 3,80 | 12,1470 | 0,0826   |
| 1,40 | 4,0404 | 0,2497   | 3,90 | 12,7530 | 0,0790   |
| 1,45 | 4,2425 | 0,2383   | 4,00 | 13,3870 | 0,0756   |
| 1,50 | 4,4532 | 0,2275   | 4,10 | 14,0490 | 0,0724   |
| 1,55 | 4,6725 | 0,2173   | 4,20 | 14,7410 | 0,0693   |
| 1,60 | 4,9004 | 0,2077   | 4,30 | 15,4640 | 0,0664   |
| 1,65 | 5,1370 | 0,1986   | 4,40 | 16,2190 | 0,0636   |
| 1,70 | 5,3823 | 0,1899   | 4,50 | 17,0070 | 0,0609   |
| 1,75 | 5,6364 | 0,1817   | 4,60 | 17,8290 | 0,0583   |
| 1,80 | 5,8994 | 0,1739   | 4,70 | 18,6870 | 0,0558   |
| 1,85 | 6,1714 | 0,1665   | 4,80 | 19,5820 | 0,0534   |
| 1,90 | 6,4526 | 0,1594   | 4,90 | 20,5160 | 0,0511   |
| 1,95 | 6,7431 | 0,1526   | 5,00 | 21,4910 | 0,0489   |
| 2,00 | 7,0431 | 0,1461   | 5,10 | 22,5100 | 0,0468   |
| 2,05 | 7,3528 | 0,1398   | 5,20 | 23,5750 | 0,0448   |
|      |        |          | 5,30 | 24,6890 | 0,0429   |
|      |        |          | 5,40 | 25,8540 | 0,0411   |
|      |        |          | 5,50 | 27,0730 | 0,0393   |
|      |        |          | 5,60 | 28,3490 | 0,0376   |
|      |        |          | 5,70 | 29,6850 | 0,0360   |
|      |        |          | 5,80 | 31,0840 | 0,0344   |
|      |        |          | 5,90 | 32,5490 | 0,0329   |
|      |        |          | 6,00 | 34,0840 | 0,0314   |
|      |        |          | 6,10 | 35,6930 | 0,0300   |
|      |        |          | 6,20 | 37,3790 | 0,0286   |
|      |        |          | 6,30 | 39,1470 | 0,0273   |
|      |        |          | 6,40 | 40,9920 | 0,0260   |
|      |        |          | 6,50 | 42,9190 | 0,0248   |
|      |        |          | 6,60 | 44,9330 | 0,0236   |
|      |        |          | 6,70 | 47,0400 | 0,0225   |
|      |        |          | 6,80 | 49,2450 | 0,0214   |
|      |        |          | 6,90 | 51,5540 | 0,0204   |
|      |        |          | 7,00 | 53,9730 | 0,0194   |
|      |        |          | 7,10 | 56,5080 | 0,0184   |
|      |        |          | 7,20 | 59,1650 | 0,0175   |
|      |        |          | 7,30 | 61,9490 | 0,0166   |
|      |        |          | 7,40 | 64,8670 | 0,0157   |
|      |        |          | 7,50 | 67,9250 | 0,0148   |
|      |        |          | 7,60 | 71,1300 | 0,0140   |
|      |        |          | 7,70 | 74,4880 | 0,0132   |
|      |        |          | 7,80 | 78,0060 | 0,0124   |
|      |        |          | 7,90 | 81,6810 | 0,0116   |
|      |        |          | 8,00 | 85,5210 | 0,0109   |

Продовження табл. 12.6

| $x$  | $e^x$  | $e^{-x}$ | $x$  | $e^x$  | $e^{-x}$ |
|------|--------|----------|------|--------|----------|
| 3,35 | 11,023 | 0,09072  | 4,65 | 104,58 | 0,00956  |
| 3,40 | 11,588 | 0,08629  | 4,70 | 109,95 | 0,00910  |
| 3,45 | 12,182 | 0,08208  | 4,75 | 115,58 | 0,00865  |
| 3,50 | 12,807 | 0,07808  | 4,80 | 121,51 | 0,00823  |
| 3,55 | 13,464 | 0,07427  | 4,85 | 127,74 | 0,00783  |
| 3,60 | 14,154 | 0,07065  | 4,90 | 134,29 | 0,00745  |
| 3,65 | 14,880 | 0,06721  | 4,95 | 141,17 | 0,00708  |
| 3,70 | 15,643 | 0,06393  | 5,00 | 148,41 | 0,00674  |
| 3,75 | 16,445 | 0,06081  | 5,05 | 156,02 | 0,00641  |
| 3,80 | 17,288 | 0,05784  | 5,10 | 164,02 | 0,00610  |
| 3,85 | 18,174 | 0,05502  | 5,15 | 172,43 | 0,00580  |
| 3,90 | 19,106 | 0,05234  | 5,20 | 181,27 | 0,00552  |
| 3,95 | 20,086 | 0,04979  | 5,25 | 190,57 | 0,00525  |
| 4,00 | 21,115 | 0,04736  | 5,30 | 200,34 | 0,00499  |
| 4,05 | 22,198 | 0,04505  | 5,35 | 210,61 | 0,00475  |
| 4,10 | 23,336 | 0,04285  | 5,40 | 221,41 | 0,00452  |
| 4,15 | 24,533 | 0,04076  | 5,45 | 232,76 | 0,00430  |
| 4,20 | 25,790 | 0,03877  | 5,50 | 244,69 | 0,00409  |
| 4,25 | 27,113 | 0,03688  | 5,55 | 257,24 | 0,00389  |
| 4,30 | 28,503 | 0,03508  | 5,60 | 270,43 | 0,00370  |
| 4,35 | 29,964 | 0,03337  | 5,65 | 284,29 | 0,00352  |
| 4,40 | 31,500 | 0,03175  | 5,70 | 298,87 | 0,00335  |
| 4,45 | 33,115 | 0,03020  | 5,75 | 314,19 | 0,00318  |
| 4,50 | 34,813 | 0,02872  | 5,80 | 330,30 | 0,00303  |
| 4,55 | 36,598 | 0,02732  | 5,85 | 347,23 | 0,00288  |
| 4,60 | 38,475 | 0,02599  | 5,90 | 365,04 | 0,00274  |
| 4,65 | 40,447 | 0,02472  | 5,95 | 383,75 | 0,00261  |
| 4,70 | 42,521 | 0,02352  | 6,0  | 403,43 | 0,00248  |
| 4,75 | 44,701 | 0,02237  | 6,1  | 445,86 | 0,00224  |
| 4,80 | 46,993 | 0,02024  | 6,2  | 492,75 | 0,00203  |
| 4,85 | 49,402 | 0,01925  | 6,3  | 544,57 | 0,00184  |
| 4,90 | 51,953 | 0,01925  | 6,4  | 601,85 | 0,00166  |
| 4,95 | 54,598 | 0,01832  | 6,5  | 665,14 | 0,001503 |
| 4,95 | 57,334 | 0,01746  | 6,6  | 735,10 | 0,001360 |
| 4,95 | 60,166 | 0,01666  | 6,7  | 812,41 | 0,001231 |
| 4,95 | 63,099 | 0,01591  | 6,8  | 897,85 | 0,001114 |
| 4,95 | 66,138 | 0,01521  | 6,9  | 992,27 | 0,001008 |
| 4,95 | 69,288 | 0,01456  | 7,0  | 1096,6 | 0,000912 |
| 4,95 | 72,554 | 0,01395  | 7,1  | 1212,2 | 0,000825 |
| 4,95 | 75,941 | 0,01338  | 7,2  | 1339,4 | 0,000747 |
| 4,95 | 79,454 | 0,01285  | 7,3  | 1480,5 | 0,000676 |
| 4,95 | 83,098 | 0,01235  | 7,4  | 1636,0 | 0,000611 |
| 4,95 | 86,878 | 0,01188  | 7,5  | 1808,0 | 0,000553 |

Продовження табл. 12.6

| $x$ | $e^x$  | $e^{-x}$ | $x$  | $e^x$  | $e^{-x}$ |
|-----|--------|----------|------|--------|----------|
| 7,6 | 1998,2 | 0,000500 | 8,9  | 7332,0 | 0,000136 |
| 7,7 | 2208,3 | 0,000453 | 9,0  | 8103,1 | 0,000123 |
| 7,8 | 2440,6 | 0,000410 | 9,1  | 8955,3 | 0,000112 |
| 7,9 | 2697,3 | 0,000371 | 9,2  | 9897,1 | 0,000101 |
| 8,0 | 2981,0 | 0,000335 | 9,3  | 10938  | 0,000091 |
| 8,1 | 3294,5 | 0,000304 | 9,4  | 12088  | 0,000083 |
| 8,2 | 3641,0 | 0,000275 | 9,5  | 13360  | 0,000075 |
| 8,3 | 4023,9 | 0,000249 | 9,6  | 14765  | 0,000068 |
| 8,4 | 4447,1 | 0,000225 | 9,7  | 16318  | 0,000061 |
| 8,5 | 4914,8 | 0,000203 | 9,8  | 18034  | 0,000055 |
| 8,6 | 5431,7 | 0,000184 | 9,9  | 19930  | 0,000050 |
| 8,7 | 6002,9 | 0,000167 | 10,0 | 22026  | 0,000045 |
| 8,8 | 6634,2 | 0,000151 |      |        |          |

12.7. Радіуси атомів,  $10^{-10} \text{ м}$ 

| Атомний номер | Хімічний символ | Атомний радіус | Атомний номер | Хімічний символ | Атомний радіус |
|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|
| 1             | H               | 0,53           | 25            | Y               | 1,81           |
| 2             | He              | 1,22           | 26            | Zr              | 1,60           |
| 3             | Li              | 1,55           | 27            | Nb              | 1,45           |
| 4             | Be              | 1,13           | 28            | Mo              | 1,39           |
| 5             | B               | 0,91           | 29            | Tc              | 1,36           |
| 6             | C               | 0,77           | 30            | Mn              | 1,30           |
| 7             | N               | 0,71           | 31            | Fe              | 1,26           |
| 8             | O               | 0,56           | 32            | Co              | 1,25           |
| 9             | F               | 0,53           | 33            | Ni              | 1,24           |
| 10            | Ne              | 1,60           | 34            | Cu              | 1,28           |
| 11            | Na              | 1,89           | 35            | Zn              | 1,39           |
| 12            | Mg              | 1,60           | 36            | Ga              | 1,39           |
| 13            | Al              | 1,43           | 37            | Ge              | 1,39           |
| 14            | Si              | 1,34           | 38            | As              | 1,48           |
| 15            | P               | 1,30           | 39            | Se              | 1,60           |
| 16            | S               | 0,95           | 40            | Br              | 1,05           |
| 17            | Cl              | 0,89           | 41            | Kr              | 1,98           |
| 18            | Ar              | 1,92           | 42            | Rb              | 2,48           |
| 19            | K               | 2,36           | 43            | Sr              | 2,15           |
| 20            | Ca              | 1,97           | 44            | Ru              | 1,34           |
| 21            | Sc              | 1,64           | 45            | Rh              | 1,34           |
| 22            | Ti              | 1,46           | 46            | Pd              | 1,37           |
| 23            | V               | 1,34           | 47            | Ag              | 1,44           |
| 24            | Cr              | 1,27           | 48            | Cd              | 1,56           |

Продовження табл. 12.7

| Атомний номер | Хімічний символ | Атомний радіус | Атомний номер | Хімічний символ | Атомний радіус |
|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|
| 49            | In              | 1,66           | 71            | Lu              | 1,74           |
| 50            | Sn              | 1,58           | 72            | Hf              | 1,59           |
| 51            | Sb              | 1,61           | 73            | Ta              | 1,46           |
| 52            | Te              | 1,70           | 74            | W               | 1,40           |
| 53            | I               | 1,24           | 75            | Re              | 1,37           |
| 54            | Xe              | 2,18           | 76            | Os              | 1,35           |
| 55            | Cs              | 2,68           | 77            | Ir              | 1,35           |
| 56            | Ba              | 2,21           | 78            | Pt              | 1,38           |
| 57            | La              | 1,87           | 79            | Au              | 1,44           |
| 58            | Ce              | 1,83           | 80            | Hg              | 1,60           |
| 59            | Pr              | 1,82           | 81            | Tl              | 1,71           |
| 60            | Nd              | 1,82           | 82            | Pb              | 1,75           |
| 62            | Sm              | 1,81           | 83            | Bi              | 1,82           |
| 63            | Eu              | 2,02           | 87            | Fr              | 2,80           |
| 64            | Gd              | 1,79           | 88            | Ra              | 2,35           |
| 65            | Tb              | 1,77           | 89            | Ac              | 2,03           |
| 66            | Dy              | 1,77           | 90            | Th              | 1,80           |
| 67            | Ho              | 1,76           | 91            | Pa              | 1,62           |
| 68            | Er              | 1,75           | 92            | U               | 1,53           |
| 69            | Tm              | 1,74           | 93            | Np              | 1,80           |
| 70            | Yb              | 1,93           | 94            | Pu              | 1,62           |

12.8. Діаметри деяких молекул,  $10^{-10} \text{ м}$ 

| Молекула             | Діаметр | Молекула             | Діаметр |
|----------------------|---------|----------------------|---------|
| $\text{N}_2$         | 3,70    | $\text{CH}_4$        | 4,44    |
| $\text{NH}_3$        | 3,00    | $\text{Ne}_2$        | 3,54    |
| $\text{Ar}_2$        | 3,60    | $\text{N}_2\text{O}$ | 4,00    |
| $\text{H}_2\text{O}$ | 3,50    | NO                   | 3,40    |
| $\text{H}_2$         | 2,50    | CO                   | 3,70    |
| $\text{He}_2$        | 2,15    | $\text{CO}_2$        | 4,54    |
| $\text{O}_2$         | 3,56    | $\text{Hg}_2$        | 3,00    |
| $\text{Kr}_2$        | 3,14    | $\text{Cl}_2$        | 5,44    |
| $\text{Xe}_2$        | 4,00    |                      |         |

12.9. Перші потенціали іонізації атомів, В

| Атомний номер | Хімічний символ | $U_1$   | Атомний номер | Хімічний символ | $U_1$   | Атомний номер | Хімічний символ | $U_1$   |
|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|---------|
| 1             | H               | 13, 595 | 32            | Ge              | 7, 880  | 63            | Eu              | 5, 670  |
| 2             | He              | 24, 580 | 33            | As              | 9, 810  | 64            | Gd              | 6, 160  |
| 3             | Li              | 5, 390  | 34            | Se              | 9, 750  | 65            | Tb              | 6, 740  |
| 4             | Be              | 9, 320  | 35            | Br              | 11, 840 | 66            | Dy              | 6, 820  |
| 5             | B               | 8, 296  | 36            | Kr              | 13, 996 | 67            | Ho              | -       |
| 6             | C               | 11, 264 | 37            | Rb              | 4, 176  | 68            | Er              | 6, 080  |
| 7             | N               | 14, 540 | 38            | Sr              | 5, 692  | 69            | Tm              | 6, 140  |
| 8             | O               | 13, 614 | 39            | Y               | 6, 380  | 70            | Yb              | 6, 260  |
| 9             | F               | 17, 418 | 40            | Zr              | 6, 835  | 71            | Lu              | 6, 150  |
| 10            | Ne              | 21, 559 | 41            | Nb              | 6, 880  | 72            | Hf              | 5, 500  |
| 11            | Na              | 5, 138  | 42            | Mo              | 7, 131  | 73            | Ta              | 7, 880  |
| 12            | Mg              | 7, 644  | 43            | Tc              | 7, 230  | 74            | W               | 7, 980  |
| 13            | Al              | 5, 984  | 44            | Ru              | 7, 360  | 75            | Re              | 7, 870  |
| 14            | Si              | 8, 149  | 45            | Rh              | 7, 460  | 76            | Os              | 8, 700  |
| 15            | P               | 10, 550 | 46            | Pd              | 8, 330  | 77            | Ir              | 9, 200  |
| 16            | S               | 10, 357 | 47            | Ag              | 7, 574  | 78            | Pt              | 8, 960  |
| 17            | Cl              | 13, 010 | 48            | Cd              | 8, 991  | 79            | Au              | 9, 223  |
| 18            | Ar              | 15, 755 | 49            | In              | 5, 785  | 80            | Hg              | 10, 434 |
| 19            | K               | 4, 339  | 50            | Sn              | 7, 332  | 81            | Ti              | 3, 106  |
| 20            | Ca              | 6, 111  | 51            | Sb              | 8, 640  | 82            | Pb              | 7, 415  |
| 21            | Sc              | 6, 560  | 52            | Te              | 9, 010  | 83            | Bi              | 7, 287  |
| 22            | Ti              | 6, 830  | 53            | I               | 10, 440 | 84            | Po              | 8, 20   |
| 23            | V               | 6, 740  | 54            | Xe              | 12, 127 | 85            | At              | 9, 20   |
| 24            | Cr              | 6, 764  | 55            | Cs              | 3, 893  | 86            | Rn              | 10, 745 |
| 25            | Mn              | 7, 432  | 56            | Ba              | 5, 210  | 87            | Fr              | 3, 980  |
| 26            | Fe              | 7, 896  | 57            | La              | 5, 610  | 88            | Ra              | 5, 277  |
| 27            | Co              | 7, 860  | 58            | Ce              | 6, 910  | 89            | As              | 6, 890  |
| 28            | Ni              | 7, 633  | 59            | Pr              | 5, 760  | 90            | Th              | 6, 950  |
| 29            | Cu              | 7, 724  | 60            | Nd              | 6, 310  | 91            | Pa              | -       |
| 30            | Zn              | 9, 391  | 61            | Pm              | -       | 92            | U               | 6, 200  |
| 31            | Ga              | 6, 000  | 62            | Sm              | 5, 600  |               |                 |         |

12.10. Робота виходу електронів та червона межа фотоелектру

| Елемент  | A, eV | $\lambda_0$ , нм | Елемент  | A, eV | $\lambda_0$ , нм |
|----------|-------|------------------|----------|-------|------------------|
| Літій    | 2, 38 | 521, 34          | Молибден | 4, 30 | 288, 56          |
| Берилій  | 3, 92 | 316, 53          | Рутеній  | 4, 60 | 269, 74          |
| Бор      | 4, 5  | 275, 73          | Родій    | 4, 75 | 261, 22          |
| Карбон   | 4, 7  | 264, 00          | Паладій  | 4, 80 | 258, 50          |
| Натрій   | 2, 35 | 528, 00          | Аргентум | 4, 47 | 277, 58          |
| Магній   | 3, 64 | 340, 88          | Кадмій   | 4, 10 | 302, 64          |
| Алюміній | 4, 25 | 291, 95          | Індій    | 3, 80 | 326, 53          |
| Силіцій  | 4, 80 | 258, 50          | Станум   | 4, 38 | 283, 29          |
| Калій    | 2, 22 | 558, 92          | Стибій   | 4, 08 | 304, 12          |
| Кальцій  | 2, 80 | 443, 14          | Телур    | 4, 73 | 262, 33          |
| Скандій  | 3, 30 | 376, 00          | Цезій    | 1, 97 | 629, 85          |
| Титан    | 3, 95 | 314, 13          | Барій    | 2, 49 | 498, 31          |
| Ванадій  | 4, 12 | 301, 17          | Лантан   | 3, 30 | 376, 00          |
| Хром     | 4, 58 | 370, 91          | Церій    | 2, 70 | 459, 55          |
| Манган   | 3, 83 | 323, 97          | Гафній   | 3, 53 | 351, 50          |
| Ферум    | 4, 47 | 277, 58          | Тантал   | 4, 12 | 301, 17          |
| Кобальт  | 4, 41 | 281, 36          | Вольфрам | 4, 54 | 273, 50          |
| Нікель   | 5, 00 | 275, 73          | Реній    | 5, 00 | 248, 16          |
| Купрум   | 4, 40 | 282, 00          | Осьмій   | 4, 70 | 264, 00          |
| Цинк     | 4, 00 | 310, 20          | Іридій   | 4, 70 | 264, 00          |
| Галій    | 3, 96 | 313, 33          | Платина  | 5, 32 | 233, 33          |
| Германій | 4, 76 | 260, 67          | Аурум    | 4, 68 | 265, 13          |
| Арсен    | 4, 72 | 262, 88          | Меркурій | 4, 52 | 274, 51          |
| Селен    | 4, 72 | 262, 88          | Талій    | 3, 70 | 335, 35          |
| Рубідій  | 2, 16 | 574, 44          | Плюмбум  | 4, 00 | 310, 20          |
| Стронцій | 2, 35 | 528, 00          | Бісмут   | 4, 40 | 282, 00          |
| Ітрій    | 3, 30 | 376, 00          | Торій    | 3, 30 | 376, 00          |
| Цирконій | 3, 90 | 318, 15          | Уран     | 3, 30 | 376, 00          |
| Ніобій   | 3, 99 | 310, 98          |          |       |                  |

12.11. Заповнення електронних оболонок атомів

| Оболонки | Підоболонки | Квантові числа |   |    |           | Максимальне число електронів |   |
|----------|-------------|----------------|---|----|-----------|------------------------------|---|
|          |             | n              | l | m  | s         |                              |   |
| K        | 1s          | 1              | 0 | 0  | $\pm 1/2$ | 2                            | 2 |
|          | 2s          |                | 0 | 0  | $\pm 1/2$ | 2                            |   |
| L        | 2p          | 2              |   | -1 | $\pm 1/2$ | 6                            | 8 |
|          |             |                |   | 0  | $\pm 1/2$ |                              |   |
|          |             |                |   | +1 | $\pm 1/2$ |                              |   |

Продовження табл. 12.11

| Оболонки | Підоболонки | Квантові числа |   |                                       |  | Максимальне число електронів |    |
|----------|-------------|----------------|---|---------------------------------------|--|------------------------------|----|
|          |             | n              | l | m                                     | s  |                              |    |
| M        | 3s          | 3              | 0 | 0                                     | ±1/2   | 2                            | 18 |
|          | 3p          |                | 1 | -1<br>0<br>+1                         | ±1/2<br>±1/2<br>±1/2                                 | 6                            |    |
|          | 3d          |                | 2 | -2<br>-1<br>0<br>+1<br>+2             | ±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2                 | 10                           |    |
| N        | 4s          | 4              | 0 | 0                                     | ±1/2   | 2                            | 32 |
|          | 4p          |                | 1 | -1<br>0<br>+1                         | ±1/2<br>±1/2<br>±1/2                                 | 6                            |    |
|          | 4d          |                | 2 | -2<br>-1<br>0<br>+1<br>+2             | ±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2                 | 10                           |    |
|          | 4f          |                | 3 | -3<br>-2<br>-1<br>0<br>+1<br>+2<br>+3 | ±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2<br>±1/2 | 14                           |    |

12.12. Спектри випромінювання ( $\lambda$ , нм)  
(Видима область)  
12.12.1. Гази

| Азот   | Аргон   | Гідроген | Гелій   | Оксиген | Неон    |
|--------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 575, 4 | 383, 47 | 410, 170 | 388, 86 | 520, 0  | 442, 25 |
| 580, 3 | 394, 75 | 434, 040 | 402, 62 | 530, 0  | 442, 48 |
| 585, 3 | 394, 90 | 434, 050 | 412, 08 | (смуга) | 453, 78 |
| 590, 4 | 404, 44 | 486, 128 | 501, 57 | 555, 0  | 457, 59 |
| 595, 7 | 415, 86 | 486, 136 | 587, 56 | 564, 0  | 470, 44 |
| 601, 2 | 416, 42 | 656, 271 | 667, 81 | (смуга) | 470, 89 |
| 606, 8 | 418, 19 | 656, 285 | 706, 52 |         | 471, 53 |
| 632, 1 | 419, 00 |          |         |         | 478, 89 |
| 639, 3 | 419, 10 |          |         |         | 482, 73 |
| 646, 7 | 420, 07 |          |         |         | 488, 49 |
| 654, 3 | 425, 12 |          |         |         | 495, 70 |
| 662, 2 | 425, 94 |          |         |         | 533, 08 |
| 670, 3 | 426, 63 |          |         |         | 535, 80 |
| 678, 7 | 427, 22 |          |         |         | 540, 06 |
|        | 430, 01 |          |         |         | 576, 44 |
|        | 433, 36 |          |         |         | 585, 25 |
|        | 433, 54 |          |         |         | 588, 19 |
|        | 434, 52 |          |         |         | 596, 54 |
|        | 451, 07 |          |         |         | 603, 00 |
|        | 452, 23 |          |         |         | 607, 43 |
|        | 459, 61 |          |         |         | 609, 62 |
|        | 462, 84 |          |         |         | 614, 31 |
|        | 470, 23 |          |         |         | 616, 36 |
|        | 518, 78 |          |         |         | 621, 73 |
|        | 549, 59 |          |         |         | 626, 65 |
|        | 565, 07 |          |         |         | 638, 30 |
|        | 573, 95 |          |         |         | 640, 22 |
|        | 591, 21 |          |         |         | 650, 65 |
|        | 614, 54 |          |         |         | 667, 83 |
|        | 666, 41 |          |         |         | 703, 24 |
|        | 696, 54 |          |         |         | 717, 39 |
|        | 706, 72 |          |         |         | 724, 52 |
|        | 738, 40 |          |         |         | 743, 89 |
|        | 750, 39 |          |         |         |         |
|        | 751, 47 |          |         |         |         |
|        | 763, 51 |          |         |         |         |

### 12.12.2. Метали

| Алюміній<br>(дуга) | Мідь<br>(дуга у<br>вакуумі) | Ртуть<br>(ртутна<br>лампа) | Натрій<br>(у<br>полум'ї) | Кадмій<br>(дуга) | Цинк<br>(дуга у<br>вакуумі) |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------|
| 394, 40            | 402, 30                     | 312, 60                    | 588, 99                  | 398, 20          | 468, 00                     |
| 396, 20            | 406, 30                     | 313, 10                    | 589, 59                  | 441, 30          | 472, 20                     |
| 466, 30            | 510, 55                     | 365, 00                    |                          | 467, 80          | 481, 10                     |
| 505, 70            | 515, 33                     | 404, 68                    |                          | 479, 99          | 491, 20                     |
| 569, 60            | 521, 82                     | 435, 83                    |                          | 508, 58          | 492, 50                     |
| 572, 30            | 570, 00                     | 491, 64                    |                          | 533, 80          | 610, 30                     |
|                    | 578, 21                     | 495, 97                    |                          | 537, 90          | 536, 20                     |
|                    | 578, 22                     | 546, 07                    |                          | 643, 85          |                             |
|                    |                             | 576, 96                    |                          |                  |                             |
|                    |                             | 579, 07                    |                          |                  |                             |
|                    |                             | 615, 20                    |                          |                  |                             |
|                    |                             | 623, 20                    |                          |                  |                             |

### 12.13. Коефіцієнти поглинання рентгенівського випромінювання, $см^2/Г$

| Довжина<br>хвилі, нм | Елементи |        |        |       |       |       |      |      |
|----------------------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|
|                      | C        | N      | O      | Al    | Fe    | Cu    | Ag   | Pb   |
| 0, 02                | 0, 167   | 0, 177 | 0, 183 | 0, 27 | 1, 06 | 1, 45 | 5, 4 | 4, 6 |
| 0, 04                | 0, 243   | 0, 340 | 0, 336 | 1, 05 | 7, 10 | 10    | 37   | 33   |
| 0, 06                | 0, 400   | 0, 730 | 0, 730 | 3, 30 | 23, 5 | 32    | 17   | 77   |
| 0, 08                | 0, 800   | 1, 510 | 1, 530 | 7, 30 | 50, 7 | 71    | 39   | 147  |
| 0, 10                | 1, 400   | 2, 600 | —      | 14    | 95    | 134   | 71   | 77   |
| 0, 12                | 2, 500   | —      | —      | 24    | 170   | 218   | 120  | 128  |
| 0, 14                | 3, 900   | —      | —      | 36    | 270   | 42    | 174  | 180  |
| 0, 16                | 5, 800   | —      | —      | 55    | 390   | 60    | 250  | 258  |
| 0, 18                | 7, 900   | —      | —      | 79    | 61    | 85    | 354  | 300  |
| 0,20                 | 10, 00   | —      | —      | 106   | 78    | 119   | 436  | —    |

### 13. Термінологічний словник

| №        | Термін, назва          | Поняття, об'єкт,<br>явище, процес  | Походження терміну                                    | Ким, коли<br>введений   |
|----------|------------------------|--|---|-------------------------|
| <b>А</b> |                        |  |   |                         |
| 1        | Аналіз                 | процес   | грец. analysis –<br>розкладання                       |                         |
| 2        | Атом                   | об'єкт   | грец. ατομος –<br>неподільне                          | до н. е.                |
| <b>В</b> |                        |  |   |                         |
| 3        | Вакансія               | вузол кристал.<br>гратки твердого<br>тіла, не зайнятий<br>атомом або іоном | фр. vacance від лат.<br>vacans – вільний              |                         |
| 4        | Візуалізація           | процес   | лат. visualis –<br>зоровий, видимий                   |                         |
| <b>Г</b> |                        |  |   |                         |
| 5        | Голографія             | явище, процес,<br>область<br>практичного<br>застосування                   | грец. γλος – весь,<br>грец. γραφισω – пишу            | Д. Габор,<br>1948р.     |
| <b>Д</b> |                        |  |   |                         |
| 6        | Детектор               | прилад   | лат. detector – той, що<br>відкриває, знаходить       | початок<br>XX ст.       |
| 7        | Дисперсія              | поняття, явище   | лат. dispersion –<br>розсіяння, розкидання            | І. Ньютон,<br>1684 р.   |
| 8        | Діапазон               | поняття  | грец. dia rason – крізь<br>усі, обсяг, смуга          |                         |
| 9        | Діод                   | прилад   | грец. di(s) –<br>двічі, прилад з двома<br>електродами | початок<br>XX ст.       |
| 10       | Дублети<br>спектральні | об'єкти  | фр. doublet –<br>подвійний                            |                         |
| <b>Е</b> |                        |  |   |                         |
| 11       | Екситон                | об'єкт, поняття  | лат. excito – збуджую                                 | Я. Френ-<br>кель, 1931р |
| 12       | Електрон               | елементарна<br>частинка  | грец. ηλεκτρον – янтар,<br>бурштин                    |                         |
| <b>І</b> |                        |  |   |                         |
| 13       | Інжекція               | процес   | лат. injecto – вводжу,<br>вкидаю                      |                         |
| 14       | Інфрачервоний          | явище  | лат. infra – нижче, під<br>+ червоний                 | Н. Ріттер,<br>1801 р.   |



| К  |                        |   |  |                         |
|----|------------------------|---|--|-------------------------|
| 15 | Квант                  | поняття, термін                           | нім. quantum – кількість, лат. quantum – скільки   | М. Планк, 1900р.        |
| 16 | Константа              | постійна величина                         | лат. constans – постійна   | до н.е.                 |
| 17 | Корпускула             | об'єкт, поняття                           | лат. corpusculum – тільце  | Ньютон, кінець XVII ст. |
| Л  |                        |   |  |                         |
| 18 | Лазер                  | пристрій                                  | амер. термін: laser – акронім назви light amplification by stimulated emission of radiation – підсилювач світла з індуктивним випусканням випромінювання | Шавлов і Таунс, 1958р.  |
| М  |                        |   |  |                         |
| 19 | Маса                   | поняття (фундаментальне)                  | лат. massa – брила   | до н. е.                |
| 20 | Матерія                | поняття, глобальне, філософська категорія | лат. materia – речовина  | до н. е.                |
| 21 | Монохроматор           | прилад                                    | грец. monos – один + грец. chroma – колір  |                         |
| О  |                        |   |  |                         |
| 22 | Орбіта                 | поняття                                   | лат. orbita – колія, дорога  |                         |
| 23 | Осцилятор              | система, об'єкт                           | від лат. oscillo – качаюся   |                         |
| П  |                        |   |  |                         |
| 24 | Період                 | поняття                                   | грец. περίοδος – обхід, коловорот  |                         |
| 25 | Пірометр               | прилад                                    | грец. πῦρ – вогонь, μέτρον – вимірюю   | серед XIXст.            |
| С  |                        |   |  |                         |
| 26 | Селекція (селективний) | процес                                    | лат. selectio – відбір (відібраний)  |                         |
| 27 | Синглети               | об'єкти, поняття                          | подвійне походження: грец. συν – разом, англ.  |                         |

| 28 | Спектр              | поняття                            | single і лат. singulus – одиничний лат. spectrum – уявлення, образ, очевидне                             | близько 1640 р.              |
|----|---------------------|------------------------------------|--|------------------------------|
| 29 | Спектральний аналіз | поняття                            | лат. spectrum – уявлення, образ  | Р. Бунзе, Г. Кірхгоф, 1859р. |
| 30 | Спектрограф         | прилад                             | лат. spectrum – очевидне + грец. grapho – пишу, креслю   |                              |
| 31 | Стилоскоп           | прилад                             | англ. steel – сталь + грец. σῦλοπῶν – дивлюсь  |                              |
| Т  |                     |                                    |  |                              |
| 32 | Терми               | енергетичні, квантові рівні        | лат. terminus – границя  |                              |
| 33 | Триплети            | поняття 3-х спектральних підрівнів | фр. tripler – від лат. triplex – потрійний   | друга пол. XIX ст.           |
| У  |                     |                                    |  |                              |
| 34 | Ультрафіолет        | явище                              | лат. ultra – далі, більше, понад + фр. violette – фіалка   | Н. Ріттер, 1801 р.           |
| Ф  |                     |                                    |  |                              |
| 35 | Фізика              | наука складної структури           | грец. φυσική (від φύσις – природа) – наука про природу   | Г. Галілей, XVIIст.          |
| 36 | Філософія           | поняття, наука                     | грец. φιλέω – люблю, σοφία – мудрість  | до н.е.                      |
| 37 | Фільтр              | пристрій                           | лат. filtrum – повсть, очишувач  |                              |
| 38 | Фотон               | поняття, об'єкт                    | грец. φως – частинка, квант світла   | перша половина XX ст.        |
| Ч  |                     |                                    |  |                              |
| 39 | Чіп                 | пристрій                           | англ. chip – інтегрована схема, яка виконана в одному корпусі, як правило, на тонкій пластинці з кремнію | друга половина XX ст.        |

Навчально-методичне видання

**Богатирьов Олег Іванович**

## **Лабораторний практикум з фізики атома**

Навчально-методичний посібник для студентів  
фізичних спеціальностей вищих закладів освіти

Редактор: *О. І. Богатирьов*  
Коректор: *А. В. Ткаченко*  
Комп'ютерний набір та верстка:  
*І. О. Ворона, Є. В. Костін*

Підписано до друку 07.12.2010. Формат 60x84/16. Гарнітура Таймс.  
Папір офсет. Ум. друк. арк. 3,8. Тираж 300 пр. Зам. № 3595.

Видавець і виготівник – видавничий відділ  
Черкаського національного університету  
імені Богдана Хмельницького.  
Адреса: 18000, м.Черкаси, бул. Шевченка, 81, кімн. 117,  
Тел. (0472) 37-13-16, факс (0472) 37-22-33,  
e-mail: [vydav@cdu.edu.ua](mailto:vydav@cdu.edu.ua), <http://www.cdu.edu.ua>.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
суб'єктів видавничої справи ДК № 3427 від 17.03.2009 р.