

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

«ФІЗИКА»

ЧАСТИНА 3

(Оптика, атомна фізика, фізика твердого тіла)

для студентів усіх форм навчання

напрямів 6.040301 «Прикладна математика», 6.040302 «Інформатика», 6.040303 «Системний аналіз», 6.050101 «Комп'ютерні науки», 6.050102 «Комп'ютерна інженерія», 6.050103 «Програмна інженерія», 6.050201 «Системна інженерія», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 «Електронні пристрої та системи», 6.050803 «Акустотехніка», 6.050901 «Радіотехніка», 6.050902 «Радіоелектронні апарати», 6.050903 «Телекомунікації», 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології», 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація», 6.051004 «Опtotехніка», 6.051402 «Біомедична інженерія», 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа», 6.170101 «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», 6.170102 «Системи технічного захисту інформації», 6.170103 «Управління інформаційною безпекою»

Електронне видання

ЗАТВЕРДЖЕНО

кафедрою фізики.

Протокол № 6 від 30.12.2013 р.

ХАРКІВ 2014

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика» (Частина 3, «Оптика, атомна фізика та фізика твердого тіла») для студентів усіх форм навчання напрямів 6.040301 «Прикладна математика», 6.040302 «Інформатика», 6.040303 «Системний аналіз», 6.050101 «Комп'ютерні науки», 6.050102 «Комп'ютерна інженерія», 6.050103 «Програмна інженерія», 6.050201 «Системна інженерія», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 «Електронні пристрої та системи», 6.050803 «Акустотехніка», 6.050901 «Радіотехніка», 6.050902 «Радіоелектронні апарати», 6.050903 «Телекомунікації», 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології», 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація», 6.051004 «Опtotехніка», 6.051402 «Біомедична інженерія», 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа», 6.170101 «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», 6.170102 «Системи технічного захисту інформації», 6.170103 «Управління інформаційною безпекою» [Електронне видання] / Упоряд.: Стороженко В. О., Мешков С. М., Лазоренко О. В., Орел Р. П. – Харків: ХНУРЕ, 2014. – 52 с.

Упорядники: В. О. Стороженко,
С. М. Мешков,
О. В. Лазоренко,
Р. П. Орел.

Рецензент: О. М. Коваленко, канд. фіз.-мат. наук, доц. каф. фізики.

ЗМІСТ

Загальні положення	
1 Визначення кривини поверхні лінзи за допомогою кілець Ньютона.....	
2 Дослідження дифракції світла від щілини у досліді Фраунгофера.....	
3 Визначення параметрів дифракційної решітки по інтерференційній картині у досліді Юнга.....	
4 Дослідження теплового випромінювання нагрітих тіл	
5 Дослідження зовнішнього фотоефекту	
6 Визначення потенціалів збудження та іонізації атомів методом Франка і Герца	
7 Дослідження атомного спектра водню.....	
8 Дослідження оптичного квантового генератора (лазера)	
9 Дослідження температурної залежності електропровідності твердих тіл та визначення енергії активації напівпровідника	
Додаток	
Перелік посилань	

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Дане видання містить методичні вказівки до виконання робіт фізичного практикуму, створеного на кафедрі фізики університету. Воно призначене для студентів, що виконують лабораторні роботи з оптики, атомної фізики та фізики твердого тіла (третя частина курсу фізики).

Мета лабораторного практикуму:

- наочне підтвердження фізичних законів;
- набуття елементарних навичок наукового дослідження;
- ознайомлення студентів із сучасною вимірювальною апаратурою;
- освоєння студентами методів обробки і оцінки достовірності експериментальних результатів;
- забезпечення зв'язку практикуму з лекційним курсом і практичними заняттями з фізики.

Виконання лабораторного завдання складається із попередньої підготовки, проведення лабораторного експерименту і складання звіту про результати роботи.

Лабораторні роботи виконуються відповідно до семестрового графіка, який знаходиться на стенді в лабораторії, тому кожен студент має можливість підготуватися до них заздалегідь.

Підготовка до роботи має проводитися в наступній послідовності. Перш за все, потрібно ознайомитися з описом роботи і вивчити її теоретичний вступ, звернувши особливу увагу на виведення розрахункових формул. Для більш повного з'ясування деяких питань теорії слід звернутися до рекомендованої літератури, а також до конспекту лекцій.

Готовність кожного студента до виконання роботи перевіряється викладачем перед початком роботи опитуванням (письмово чи усно).

Під час роботи в лабораторії мають точно виконуватися правила внутрішнього розпорядку та техніки безпеки. Після отримання дозволу від викладача студенти проводять вимірювання і заносять їх до таблиць у лабораторному журналі. Потім на основі експериментальних даних виконують відповідні розрахунки.

Звіт за кожну лабораторну роботу оформлюється у відповідності з ДСТУ 3008-95 і має містити назву та мету роботи, схему (рисунок) лабораторної установки, результати вимірювань (у вигляді таблиць), робочу формулу та результати розрахунків у вигляді графіків (або таблиць), висновки з результатів, що одержані в роботі. Зразок оформлення звіту міститься на спеціальному стенді в лабораторії та наведений у Додатку. Студенти, що оформили звіти не за зразком, до захисту циклу лабораторних робіт не допускаються.

1 ВИЗНАЧЕННЯ КРИВИЗНИ ПОВЕРХНІ ЛІНЗИ ЗА ДОПОМОГОЮ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

1.1 Мета роботи

Застосувати на практиці знання законів інтерференції світла. Визначити кривизну поверхні лінзи за допомогою кілець Ньютона.

1.2 Вказівки з організації самостійної роботи студентів

При підготовці до виконання лабораторної роботи самостійно проробити теорію [1, с.307-308; 2, с.281-285].

У роботі використовується методика визначення радіуса R кривизни сферичної поверхні плоско-випуклої лінзи 1 (рис. 1.1) на підставі інтерференційної у вигляді концентричних світлих і темних кілець, які виникають при накладанні когерентних хвиль, відбитих від двох поверхонь повітряного зазору II між випуклою поверхнею лінзи I і плоскою поверхнею полірованої скляної пластини III.

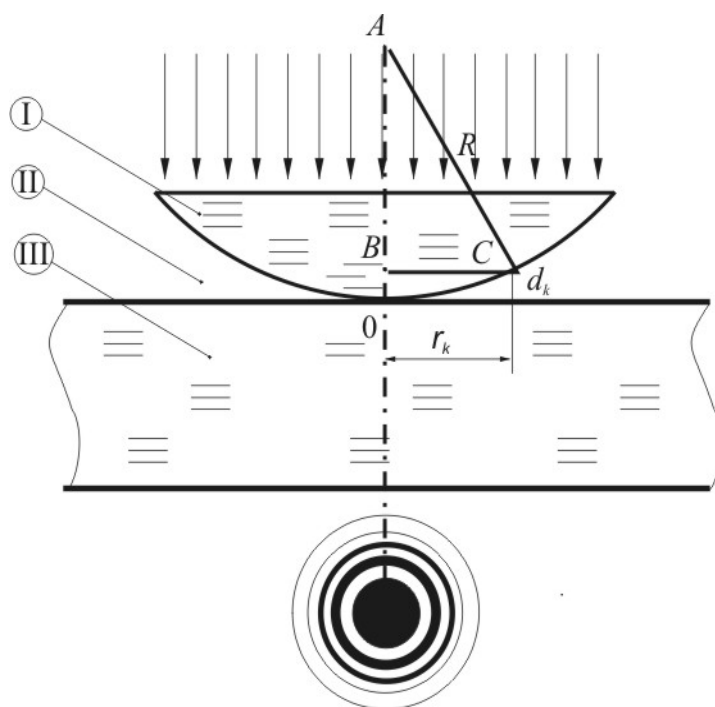


Рисунок 1.1

Паралельний пучок світла падає нормально на плоску поверхню лінзи (I) і частково відбивається від верхньої та нижньої поверхонь повітряного зазору (II) між лінзою та пластинною (III). При накладанні відбитих променів виникають смуги рівної товщини, які при нормальному падінні світла мають вигляд концентричних окружностей.

Особливості кільцевої інтерференційної картини обумовлені наступними факторами:

1. В точці А на рис. 1.1 припускається абсолютно повне прилягання лінзи до пластини, а отже, відсутність межі розподілу середовищ і відбитих світлових хвиль (темна пляма у центрі)

2. Повітряний зазор має форму кільця, а його перетин – має форму клина товщини d , яка міняється.

3. Різниця ходу Δ хвиль формується не тільки за рахунок двократного проходження однієї із хвиль повітряного зазору, а також і за рахунок різних умов відбиття від межі розподілу середовищ I – II (лінза – повітря) і II - III (повітря – пластини). Це обумовлено втратою півхвилі $\lambda/2$ при відбитті від межі розподілу із середовищем II, яке має більшу оптичну густину.

$$\Delta = 2d - \lambda/2. \quad (1.1)$$

Для отримання розрахункової формули будемо розглядати тільки світлі кільця, які відповідають умовам інтерференційних максимумів і для яких різниця ходу дорівнює парному числу півхвиль.

$$\Delta = 2k\lambda/2, \quad (1.2)$$

де $k=0,1,2,3,\dots$

Із порівняння формул (1.1) і (1.2) отримаємо:

$$2d_k = (2k + 1)\lambda/2. \quad (1.3)$$

Для прямокутного трикутника ΔABC можна записати:

$$R = (R - d_k)^2 + r_k^2.$$

Так як d_k є дуже малим, то значенням d_k^2 можна знехтувати і отримати:

$$r_k^2 = 2d_k \cdot R$$

або

$$r_k^2 = R(2k + 1)\lambda/2.$$

Для виводу розрахункової формули зручно порівнювати кільця з номерами « k », « m » таким чином:

$$r_k^2 - r_m^2 = R(k - m)\lambda.$$

Звідки отримуємо формулу для розрахунку радіусу кривизни сферичної поверхні лінзи:

$$R = \frac{(r_k + r_m)(r_k - r_m)}{(k - m)\lambda} \quad (1.4)$$

Рекомендація: Для більшої точності розрахунків треба дотримуватися таких умов: 1) $m > 3$; 2) $k/m > 1,5$.

1.3. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з мікроскопу, до якого входять освітлювач із світлофільтром, тест – об'єкту (лінза і плоскопаралельна плпстина в металевій оправці) і лінійки для визначення ціни поділки мікроскопу. Хода променів і картина кілець Ньютона, які спостерігаються у мікроскопі показани на рис.1.2.

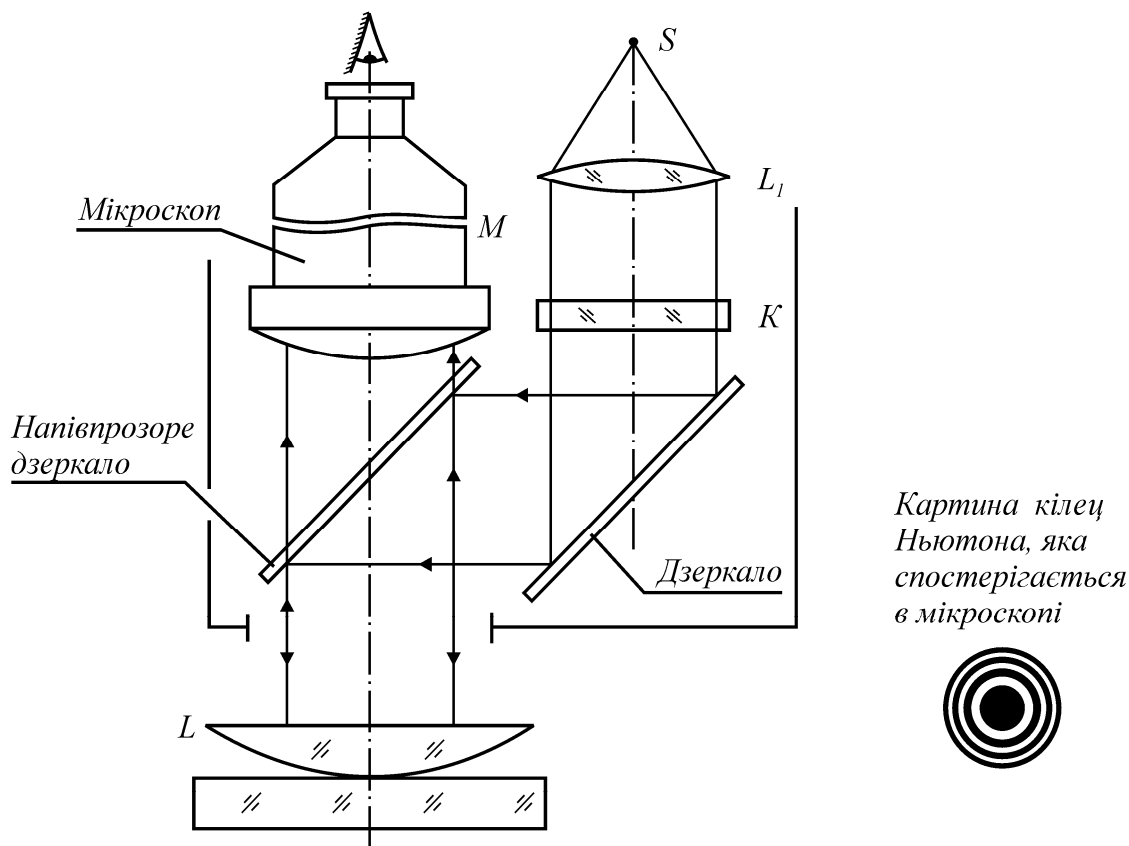


Рисунок 1.2

1.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки

Всі операції по налагоджуванню оптичної системи виконуються викладачем.

1. Включити освітлювальну систему мікроскопу. Для зеленого світлофільтра довжина хвилі монохроматичного $\lambda = 0,527 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

2. Обертом ручки револьверної системи мікроскопу вибрати об'єктив, який дає найбільше збільшення.

3. Визначити ціну найменшої поділки вимірювальної шкали мікроскопу. Для цього треба покласти лінійку з поділками на предметний стільчик мікроскопу і обертами ручки точної настройки навести на різкість. Визначити кількість поділок шкали мікроскопу, які укладаються в 1 мм лінійки.

4. Установити тест-об'єкт. Добитися чіткого зображення кілець шляхом пересування тубуса мікроскопу рукою точної настройки. Пересуванням тест-об'єкту по стільчику мікроскопу добитися суміщення перехрестя координатних осей з центром системи кілець Ньютона. По поділках на вимірювальній шкалі мікроскопа визначити розміри 10 – 12 кілець Ньютона. Зробити розрахунки за формулою (1.4). Результати вимірювань і розрахунків занести до таблиці.

Таблиця 1.1 – Експериментальні результати

Номер кільця, k, m	Діаметр кільця, поділок	Радіус кільця $r_{k,m}, \text{М}$	Радіус лінзи $R, \text{м}$	$\langle R \rangle, \text{м}$
1				
2				
·				
..				
11				
12				

Оцінити похибку експерименту.

1.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірювань 10-12 радіусів кілець ($r_{k,m}$); розрахунки 10 радіусів кривини лінзи (R), середнє значення $\langle R \rangle$, оцінку похибки експерименту і висновки.

1.6 Контрольні запитання і завдання

1. Чому інтерференційна картина у експерименті складається із світлих та темних кілець?

2. Вивести формулу $\frac{\Delta R}{R}$. Радіуси яких кілець треба виміряти, щоби похибка була найменшою?

3. В чому складаються умови максимумів і мінімумів світла при інтерференції когерентних променів?

4. Що можна спостерігати в центрі, якщо дослід проводити у світлі, що проходить?

5. Де більша густина розташування інтерференційних кілець – в центрі або на периферії? Чому?

6. Чому радіус кривизни R лінзи L повинен бути невеликим?

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФРАКЦІЇ СВІТЛА ВІД ЩІЛИНИ У ДОСЛІДІ ФРАУНГОФЕРА

2.1 Мета роботи

Дослідити дифракцію на протягнутій щілині у досліді Фраунгофера, встановити співвідношення між інтенсивностями дифракційних максимумів освітленості, визначити ширину щілини.

2.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Для вивчення явища дифракції слід проробити рекомендовану літературу [1, с. 320-323; 2, с.290-291].

Дифракцією хвиль називається явище огинання хвилями перешкод, відхилення хвиль від прямолінійного розповсюдження і заходу у область геометричної тіні.

При дифракції Фраунгофера на щілині дифраговані промені (промені, які дифрагували) після щілини йдуть паралельно. Тому результат такої дифракції плоскої світлової хвилі слід отримувати шляхом пропускання паралельних променів скрізь лінзу і фокусуванням їх на екрані, який розташований у фокальній площині лінзи (рис. 2.1).

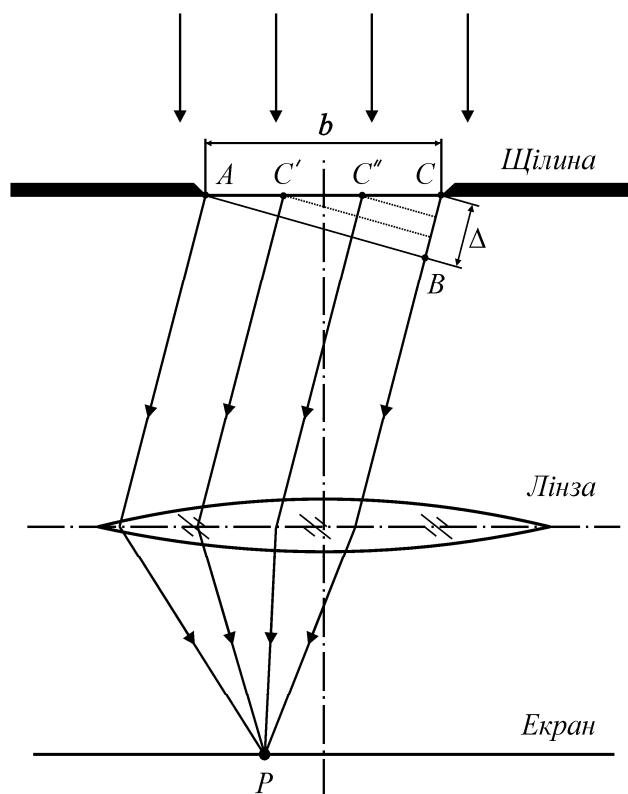


Рисунок 2.1

Починаючи з лінії АВ всі промені до точки Р на екрані будуть проходити однакові оптичні шляхи (будуть таутохронними). Френель запропонував метод, по якому у відповідності з принципом Гюйгенса точкові джерела вторинних сферичних хвиль на лінії щілини АС можна розбити на групи, які займають просторові зони: АС', С'С'' і т.д.

Зони відрізняються тим, що світлові хвилі, які розповсюджуються джерелами, що належать до однієї зони, потрапляють у точку Р з різницею по фазі від середини цієї зони у межах $\pi/2$. Таким чином, різниця ходу променів від суміжних зон до точки Р в середньому складає $\frac{\lambda}{2}$. Зона АС' відрізняється від суміжних зон довжиною оптичного шляху. Максимальна різниця цих шляхів для щілини шириною b дорівнює Δ :

$$\Delta = b \sin \varphi = CB$$

Від двох сумісних зон хвилі у точку Р потрапляють у різних фазах, таким чином вони взаємно гасять одна одну. Таким чином, якщо на розмірі щілини по відношенню до точки Р укладається парне число зон, то в точці Р спостерігається мінімум освітленості, що відповідає умові:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (2.1)$$

де $k=1,2,3\dots$

Звідки слідують умови максимуму:

$$b \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2}. \quad (2.2)$$

Якщо на різниці ходу вкладається непарна кількість півхвиль, то на екрані буде максимум освітленості, що відповідає умові

$$b \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (2.3)$$

де $k=0,1,2,3,4\dots$

Точніший розрахунок інтенсивності світла на екрані в залежності від кута φ при дифракції Фраунгофера на щілині, виконаний на підставі принципу Гюйгенса-Френеля приводить до формули:

$$I(\varphi) = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi \cdot b \sin \varphi}{\lambda} \right)}{\left(\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \sin \varphi \right)^2}, \quad (2.4)$$

де I_0 – інтенсивність в середині дифракційної картини ($\varphi=0$).

Якщо I_0 – інтенсивність максимуму нульового порядку, то $I_1 = \left(\frac{2}{3\pi}\right)^2$,

I_1 – інтенсивність першого максимуму, $I_2 = \left(\frac{2}{5\pi}\right)^2$, I_2 – другого і так далі.

У підсумку можна отримати співвідношення

$$I_0 : I_1 : I_2 : I_3 : \dots = 1 : \left(\frac{2}{3\pi}\right)^2 : \left(\frac{2}{5\pi}\right)^2 : \left(\frac{2}{7\pi}\right)^2 : \dots = 1 : 0,045 : 0,016 : 0,008 : \dots \quad (2.5)$$

2.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка включає оптичну лаву, на якій встановлений лазер ($\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}$), як джерело плоскої монохроматичної світлової хвилі, рейтер із щілиною, ширина якої регулюється, і фотодіодний цифровий вимірювач яскравості світла для визначення положення дифракційних мінімумів і максимумів. Наявність лінзи для фокусування необов'язкова

2.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки

1. Встановити на одному кінці оптичної лави лазер і рейтер із щілиною, а на іншому - координатний вимірювач інтенсивності світла.

2. Включити лазер і встановити деталі лави вздовж променя. Зафіксувати ширину “ b ” щілини 0,12 – 0,15 мм.

3. Виміряти відстань “ L ” між щілиною і екраном.

4. За допомогою фотодіодного вимірювача зробити виміри координат X_k і рівней освітленості I_k п'яти максимумів. Розрахувати кутове положення

$\varphi_k = \arctg\left(\frac{x_i}{L}\right)$ максимумів. Занести отримані результати у таблицю 2.1.

5. По формулі (2.3) розрахувати ширину “ b ” щілини і визначити похибку її вимірювання.

6. За допомогою фотодіодного цифрового вимірювача зробити вимірювання інтенсивності світла I_k у положеннях максимумів і занести результати до таблиці.

Таблиця 2.1 – Експериментальні результати

k	X_k	$\varphi_k = \arctg\left(\frac{x_i}{L}\right)$	I_k	I_k/I_{max}
0				
1				

2				
3				
4				
5				

7. Побудувати графік залежності відносної інтенсивності максимумів I_k/I_{max} від кута φ_k . Для порівняння результатів експерименту з теорією нанести на цей графік теоретичні значення освітленості, наведені у співвідношенні (2.4).

2.5 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи, схему лабораторної установки, таблицю з результатами вимірювань, графіки залежностей $I_k = f(\varphi_k)$, отримані експериментальним і теоретичним шляхом, оцінку похибок, висновки.

2.6 Контрольні запитання і завдання

1. Сформулювати принцип Гюйгенса.
2. Записати формулу, яка визначає сенс принципу Гюйгенса - Френеля.
3. Охарактеризувати дифракцію Фраунгофера на щілині.
4. Охарактеризувати дифракцію Френеля на круглому отворі.
5. Які промені називають таутохронними?
6. Яка хвиля називається плоскою?
7. Яка хвиля називається сферичною?
8. Яким умовам задовольняють просторові зони методу зон Френеля?
9. Записати умови максимумів для дифракції на щілині.
10. Записати умови мінімумів для дифракції на щілині.
11. Що таке оптична різниця ходу двох променів?
12. Що таке різниці фаз двох хвиль?

3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИФРАКЦІЙНОЇ РЕШІТКИ ПО ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНІЙ КАРТИНІ У ДОСЛІДІ ЮНГА.

3.1 Мета роботи

Зробити розрахунок відстані між двома щілинними джерелами монохроматичного світла і ширини щілини по інтерференційній картині світла.

3.2 Вказівки з організації самостійної роботи студентів

Для вивчення явища інтерференції світла, його отримання і використання, проробити рекомендовану літературу [1, с. 323-326; 2, с. 277-279].

Інтерференція спостерігається тільки при суперпозиції хвиль, які розповсюджуються від когерентних джерел. Когерентними зводяться джерела, від яких хвилі в кожному точку простору приходять з постійною різницею фаз. Вперше спостерігав інтерференцію світлових хвиль англійський фізик Т. Юнг у 1802 р.

Установка для досліду Юнга складалась з трьох екранів – I, II, III (рис. 3.1). Перший з них мав малий отвір S , на яке попадали плоскі хвилі від інтенсивного джерела світла. Згідно принципу Гюйгенса цей отвір являється новим джерелом півсферичних хвиль. Ці хвилі падають на два малих отвіри S_1 і S_2 на другому екрані, які в свою чергу стають джерелами двох систем хвиль однакової довжини і фази. За екраном II ці когерентні системи перекривають одна одну і здійснюють інтерференцію. В тих місцях, де світлові хвилі «гасять» одна другу різниця ходу складає

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.1)$$

Там же де світлові коливання підсилюються

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}. \quad (3.2)$$

Тому на екрані III спостерігається чергування світлих і темних смуг. Якщо у якості монохроматичного джерела S використати лазер, то смуги будуть мати однаковий колір.

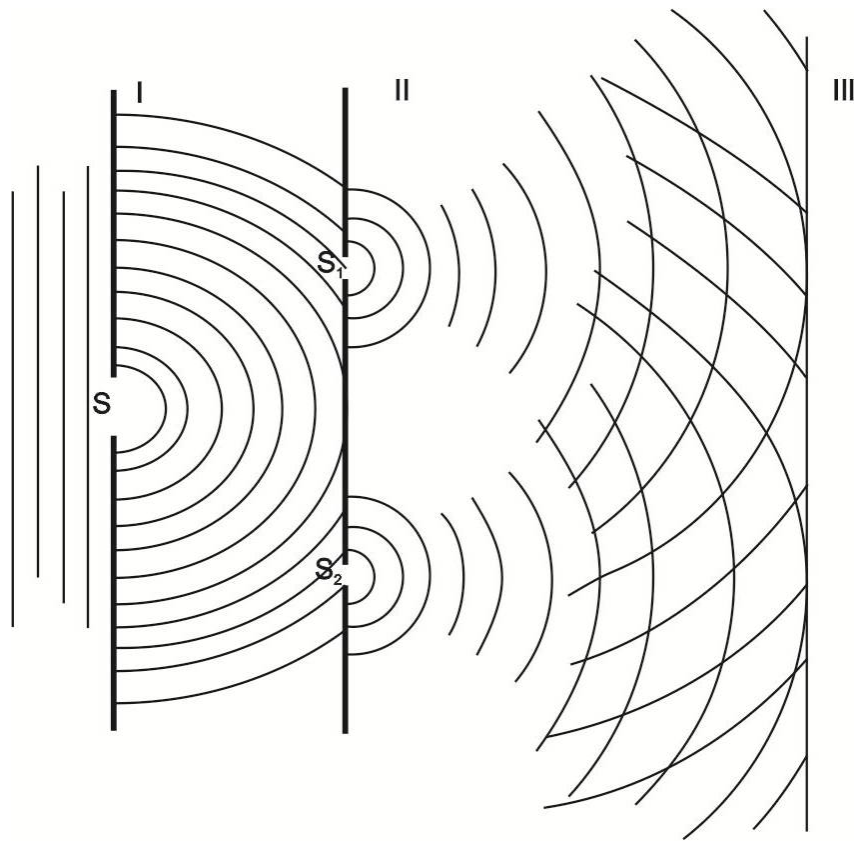


Рисунок 3.1

Якщо відома відстань L між екранами II і III, відстань між двома суміжними інтерференційними смугами і довжина хвиль, які інтерферують, то можна визначити відстань між щілинами d і ширину щілини b . Для виводу розрахункової формули скористаємось рис. 3.2.

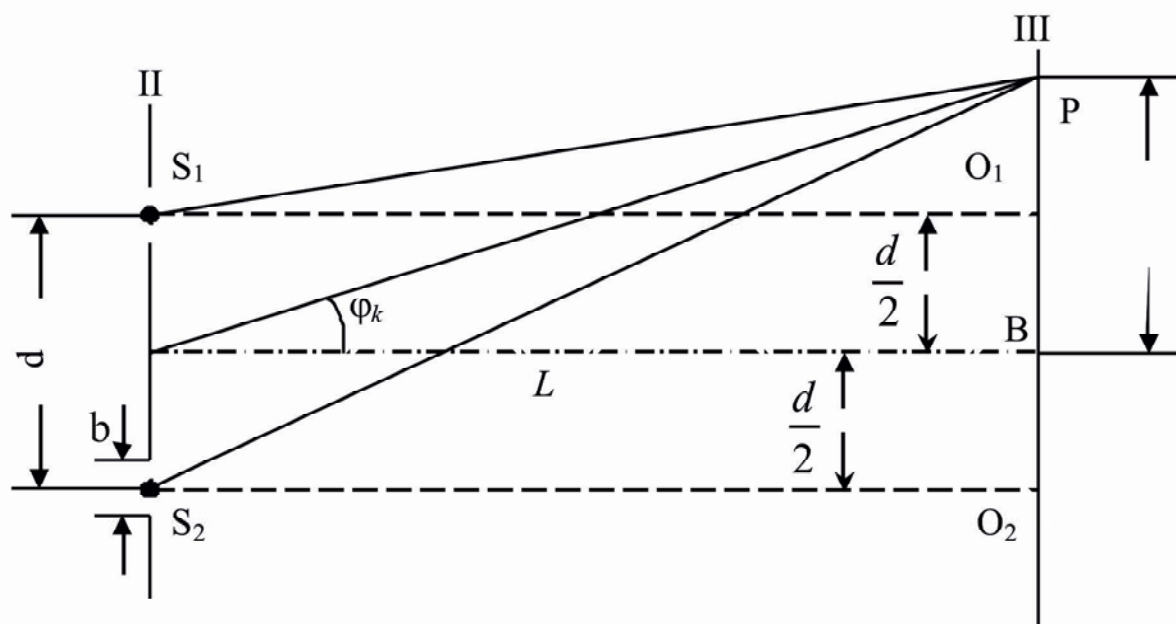


Рисунок 3.2

З рис.3.2 слідує, що в точці В, яка знаходиться на однакових відстанях від S_1 і S_2 , різниця ходу хвиль дорівнює нулю. Тут буде спостерігатися центральна біла смуга – центральний максимум освітленості.

В точці В, яка вільно вибрана на екрані ІІІ, різниця ходу буде складати

$$\Delta = S_2P - S_1P$$

Різницю ходу Δ можна визначити через L і d . Очевидно, що

$$S_2P^2 = S_2O_2^2 + PO_2^2,$$

але

$$S_2O_2 = L, \text{ а } PO_2 = x + \frac{d}{2},$$

тому

$$S_2P^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2.$$

Аналогічно

$$S_1P^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Якщо відняти від першого виразу другий, то отримаємо:

$$S_2P^2 - S_1P^2 = 2d \cdot x$$

або

$$(S_2P - S_1P)(S_2P + S_1P) = 2d \cdot x,$$

звідки

$$S_2P - S_1P = \frac{2d \cdot x}{S_2P + S_1P}.$$

Якщо x і d надто малі в порівнянні з L , то можна з достатнім ступенем точності вважати, що

$$S_2P + S_1P = 2L.$$

Ураховуючи, що $S_2P - S_1P = \Delta$, і Δ є різницею ходу в точці P, отримаємо:

$$\Delta = \frac{2d \cdot x}{2L}$$

або

$$\Delta = \frac{d \cdot x}{L}. \quad (3.3)$$

Згідно з формулою (3.2), в точці P буде спостерігатися максимум освітленості, якщо $\Delta = k\lambda$.

Таким чином:

$$\frac{d \cdot x_k}{L} = k\lambda,$$

звідки

$$x_k = \frac{k\lambda L}{d}.$$

Наступний максимум освітленості буде знаходитися на відстані

$$x_{k+1} = \frac{(k+1)\lambda L}{d}$$

від центрального максимуму (точки В)

Тому відстань b між двома суміжними світлими смугами буде дорівнювати $x_{k+1} - x_k$.

Таким чином

$$\Delta X = \frac{(k+1)\lambda L}{d} - \frac{k\lambda L}{d},$$

або

$$\Delta X = \lambda \frac{L}{d}. \quad (3.4)$$

З формули (3.4) слідує, що при постійних значеннях L і d ширина інтерференційних смуг залежить від довжини світлової хвилі. Якщо лазерне світло

замінити на біле, то ширина смуги пов'язана з кольором. Так, наприклад, у випадку червоного кольору смуги мають значно більшу ширину, ніж при синьому.

На рис.3.3 показано розподілення світла в максимумах при інтерференції від однієї і двох щілин

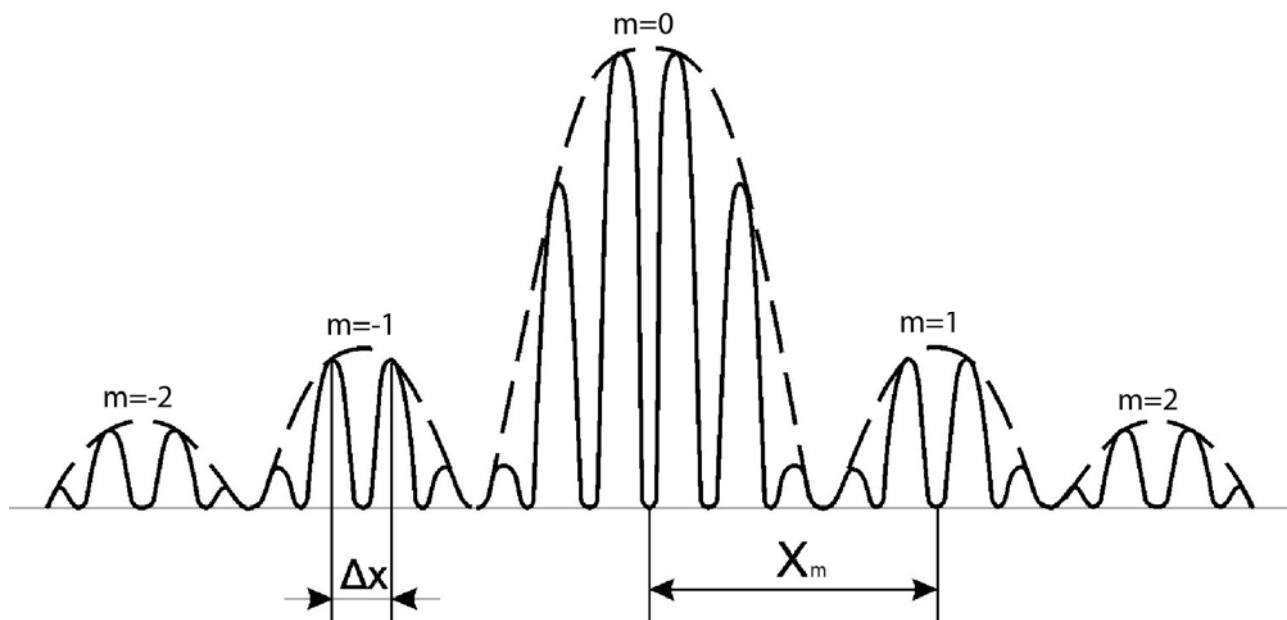


Рисунок 3.3

Відстань Δx між центрами двох суміжних інтерференційних смуг (безперервна лінія), дозволяє розрахувати відстань між щілинами по формулі

$$d = \frac{\lambda L}{\Delta x}. \quad (3.5)$$

Штрихова лінія на рис.3.3 відповідає інтерференційній картині, яка отримана від однієї щілини з шириною b . Положення x_m центра широкого інтерференційного максимуму визначається умовою:

$$b \sin \varphi_m = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{де } m = 0, 1, 2, \dots$$

звідки ширина щілини b визначається як

$$b = \frac{2m + 1}{2} \frac{\lambda}{\sin \varphi_m}.$$

В умовах інтерференції, коли кут φ_m малий ($\varphi_m \ll 1$), можна використати наближені формули:

$$\varphi_m \approx \sin \varphi_m \approx \operatorname{tg} \varphi_m \approx \frac{X_m}{L}.$$

У підсумку отримуємо ширину щілини

$$b \approx \frac{2m+1}{2} \frac{\lambda L}{X_m}. \quad (3.6)$$

3.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка включає оптичну лаву, джерело монохроматичного випромінювання (лазер), дифракційну решітку з двома щілинами, встановлений на рейтері вимірювальний екран з лінійками. Довжина хвилі лазера $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6}$ м.

3.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки по її виконанню

1. Встановити на оптичній лаві лазер, у центрі на рейтері – дифракційну решітку з двома щілинами, а з іншого боку – вимірювальний екран з лінійкою на рейтері.

2. Увімкнути лазер і отримати чітку інтерференційну картину на вимірювальному екрані.

3. Виконати вимірювання параметру Δx для отримання відстані між щілинами d по формулі (3.5).

4. Визначити відстань між щілинами і зробити оцінку похибки вимірювання цього показника.

Виконати вимірювання параметру x_m для отримання ширини щілини b по формулі (3.6) і оцінити похибку вимірювання.

3.5 Зміст звіту

Звіт повинен включати: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірювань Δx і x_m ; розрахунки параметрів d і b ; оцінювання похибок, висновок.

3.6 Контрольні запитання і завдання.

1. Яке випромінювання називають монохроматичним?
2. Які джерела хвиль називають когерентними?
3. Які хвилі називають когерентними?
4. Сформулювати принцип Гюйгенса.

5. У чому полягає явище інтерференції?
6. Записати закон інтерференції.
7. Як визначити інтенсивність світлової хвилі?
8. Сформулювати принцип Ферма.
9. Яка різниця між геометричним і оптичним шляхами променя?
10. Що є різниця фаз інтерферуючих променів?
11. Яка умова мінімуму у досліді Юнга?
12. Які умови інтерференції світла при відбитті від тонких шарів?

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НАГРІТИХ ТІЛ

4.1 Мета роботи

Експериментальне підтвердження законів теплового випромінювання, вивчення методу вимірювання високих температур, будови і принципу роботи оптичного пірометра.

4.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Всі нагріті тіла і рідини випромінюють електромагнітні хвилі в широкому суцільному спектральному діапазоні довжин хвиль [1, с. 362-371; 2, с. 317-324; 3, с. 4-14]. Розподіл енергії випромінювання в залежності від довжини хвилі для абсолютно чорного тіла (АЧТ) описується законом Планка:

$$M_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (4.1)$$

де $M_{\lambda,T}$ – спектральна густина випромінювальної здатності;

λ – довжина хвилі випромінювання;

h – стала Планка;

k – стала Больцмана;

c – швидкість світла;

T – абсолютна температура.

З рис (4.1) видно, що при різних температурах тіл максимум спектральної випромінювальної здатності приходиться на різні довжини хвиль.

На цих властивостях спектру випромінювання основані безконтактні методи вимірювання температури нагрітих тіл.

Для визначення температури АЧТ можна виміряти довжину хвилі, на якій спостерігається максимальна потужність випромінювання, і використати закон випромінювання Віна:

$$\lambda_m T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ (м} \cdot \text{К)}. \quad (4.2)$$

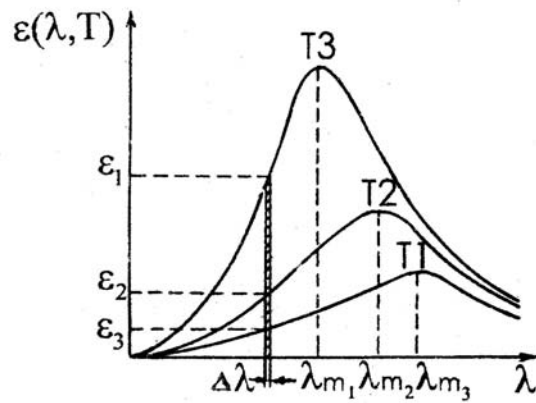


Рисунок 4.1

Температуру АЧТ можна визначити, використовуючи закон Стефана-Больцмана:

$$M_T = 5,7 \cdot 10^{-8} T^4 \left(\frac{Вт}{м^2} \right). \quad (4.3)$$

Для цього необхідно виміряти випромінювальну здатність M_T (спеціальним приймачем), а потім обчислити T .

Формула (4.1) дозволяє визначити температуру тіла за зміною інтенсивності випромінювання M_T в будь-якому вузькому спектральному діапазоні $\Delta\lambda$. На цій властивості базується робота оптичного пірметра, що використовується в макеті.

В оптичному пірметрі інтенсивність монохроматичного випромінювання (тобто на вузькому відрізку $\Delta\lambda$) не вимірюється безпосередньо, а візуально порівнюється зі світністю еталонного тіла (нитки пірметра). Температура еталонного тіла задається силою струму розжарення і легко змінюється. Зміною сили струму можна досягти рівності світностей двох тіл: досліджуваного і еталонного. У цьому випадку температура досліджуваного тіла дорівнює температурі еталонного, яка легко визначається.

Для реальних тіл, які звичайно не є АЧТ, істинна температура визначається по температурі, яка вимірюється пірметром, введенням поправок, що враховують їх випромінювальні властивості.

4.3 Опис лабораторної установки

Схема лабораторного макета для дослідження випромінювання нагрітих тіл наведена на рис. 4.2.

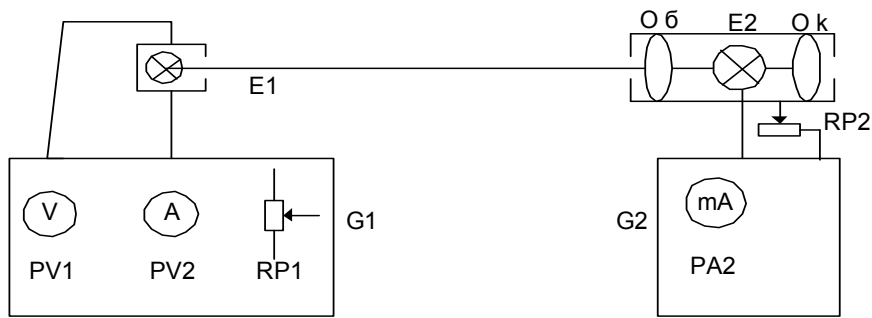


Рисунок 4.2

Лабораторна установка складається з двох незалежних блоків: досліджуваного тіла $E1$ (електролампи), температуру якого можна змінювати блоком живлення $G1$, і оптичного пірметра ЛОП-72 з блоком живлення $G2$.

Принцип дії пірметра наведений на рис. 4.3.

Всередині приладу, в полі зору окуляра Ok , знаходиться пірметрична лампа $E2$, температуру нитки якої можна змінювати силою струму розжарення. Сила струму в колі лампи $E2$ регулюється потенціометром $RP2$ і вимірюється амперметром $PA2$. Температуру нитки розжарення пірметричної лампи $E2$ визначають за допомогою градуовальної кривої, розташованої на робочому місці. Добором положення окуляра можна досягти різкого зображення нитки пірметричної лампи, а обертанням об'єктива пірметра досягається чіткість зображення досліджуваного тіла. Температура досліджуваного тіла $E1$ дорівнює температурі еталонного $E2$, якщо потенціометром $RP2$ можна досягти зникнення зображення нитки на фоні тіла.

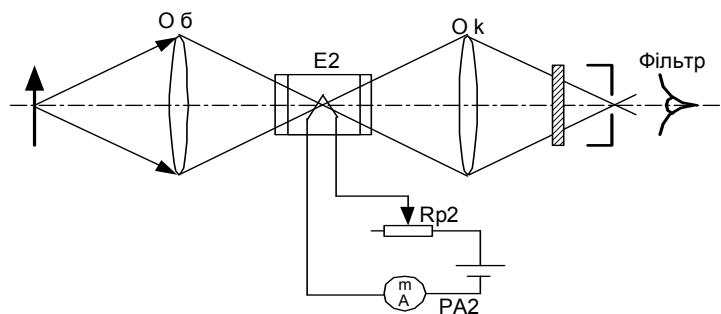


Рисунок 4.3

4.4 Порядок виконання роботи і вказівки з її виконання

4.4.1 Потенціометри $RP1$ і $RP2$ установіть у крайнє ліве положення (проти годинникової стрілки). Увімкніть блок живлення пірметра $G2$. Потенціометром $RP2$ і окуляром Ok отримайте чітке зображення світної нитки пірметричної лампи $E2$. Амперметром $PA2$ виміряйте силу струму і за допомогою граду-

ювальної кривої $T(I)$, що наведена на робочому місці, визначте температуру нитки пірометричної лампи $E2$. Визначте мінімальну температуру нитки, при якій тіло починає світитись. Змінюючи температуру нитки, спостерігайте за зміною яскравості нитки та її кольору. На основі цього досліду зробіть висновки.

4.4.2 За допомогою потенціометра $RP1$ встановіть довільний температурний режим (розжарення) досліджуваного тіла. Наведіть оптичний пірометр на світну частину тіла $E1$ і за допомогою об'єктива отримайте її чітке зображення. За допомогою потенціометра $RP2$, досягніть співпадання яскравості світності нитки пірометричної лампи і тіла.

Амперметром $PA2$ виміряйте силу струму і за допомогою градуовальної кривої визначте температуру тіла. За допомогою вольтметра $PV1$ і амперметра $PA1$ визначте потужність P , що витрачається на нагрівання тіла $E1$. Виміряйте температуру тіла при чотирьох – п'яти різних значеннях потужності нагріву. Результати вимірювань занесіть до таблиці за формою, наведеною в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

№	$U_{\text{тіла}}, \text{В}$	$I_{\text{тіла}}, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$I_{\text{піром}}, \text{мА}$	$T, \text{К}$	$\lg P, \text{Вт}$	$\lg T, \text{К}$
1							
2							
3							
4							
5							

4.4.3 Зробіть оцінку похибки вимірювань потужності за класом точності амперметра та вольтметра.

4.4.4 Побудуйте графік залежності потужності розжарення P від температури тіла T . Залежність M_T , що відповідає закону Стефана-Больцмана, має такий саме характер.

Побудуйте графік залежності $\lg P$ від $\lg T$. Тоді як залежність має степеневий характер, то експериментальні дані повинні створювати пряму лінію в координатах $\lg P$ від $\lg T$:

$$\lg P = n \lg T + \text{Const} . \quad (4.4)$$

За графіком обчисліть показник степені n в законі Стефана-Больцмана:

$$n = \frac{\lg P_2 - \lg P_1}{\lg T_2 - \lg T_1} = \frac{\Delta \lg P}{\Delta \lg T} . \quad (4.5)$$

Значення $\Delta \lg P$ або $\Delta \lg T$ можна вибрати довільно. Зручно вибрати $\Delta \lg T$ так, щоб ця величина була рівна цілому числу поділок масштабної сітки вздовж координати $\lg T$.

Зробіть висновок щодо залежності енергетичної світності вольфраму від температури. Порівняйте отримане експериментальним шляхом значення показник степені n із теоретичним.

Контрольні запитання та завдання

1. Які види випромінювання існують? Яке випромінювання є рівноважним?
2. Які характеристики теплового випромінювання ви знаєте?
3. Виведіть розмірності основних характеристик теплового випромінювання.
4. Сформулюйте закони теплового випромінювання.
5. Отримайте закони теплового випромінювання з формули Планка.
6. Яким чином з формули Планка можна визначити енергетичну світність?
7. Як можна знайти радіаційну, кольорову та ярісну температури?
8. Які переваги оптичного методу вимірювання температури порівняно з іншими методами?
9. Поясніть принцип вимірювання температури за допомогою пірометра із ниткою, що зникає.
10. Поясніть принцип дії і конструкцію ЛОП-72.
11. Які прямі вимірювання потрібно виконати в даній роботі?
12. Які обчислення потрібно виконати в роботі?

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ

5.1 Мета роботи

Експериментальна перевірка основних законів фотоелектричного ефекту; встановлення залежності максимальної кінетичної енергії фотоелектронів E_{\max} від частоти світла ν , визначення червоної межі фотоелектричного ефекту λ_0 , роботи виходу A та сталої Планка h .

5.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Вивчаючи теоретичний матеріал [1, с. 371-374; 2, с. 324-329; 3, с. 15-19], зверніть увагу на фізичну суть явища зовнішнього фотоелектричного ефекту та основне рівняння цього явища – рівняння Ейнштейна. Необхідно пояснити залежність сили струму від напруги (вольт-амперну характеристику) вакуумного фотоелемента та уяснити, які перетворення енергії відбуваються.

Явище зовнішнього фотоелектричного ефекту є одним з проявів квантової, корпускулярної природи світла і полягає у вириванні електронів з поверхні речовини під дією світла.

Світло – це потік квантів електромагнітного поля (фотонів). Фотони – неподільні елементарні частинки, вони можуть поглинатись та випромінюватись лише цілком. Енергія фотону дорівнює

$$E = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda},$$

де $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка, ν - частота світла, λ - довжина світлової хвилі, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - швидкість світла у вакуумі.

Зовнішній фотоелектричний ефект підпорядковується таким законам:

- фотострум насичення пропорційний освітленості фотокатода;
- енергія відбитих електронів і максимальна їх швидкість залежать лише від частоти світла, що падає; із збільшенням частоти енергія фотоелектронів лінійно падає;
- зовнішній фотоелектричний ефект – безінерційний;
- число фотоелектронів пропорційне інтенсивності світла.

Основні енергетичні перетворення встановлює рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту:

$$h \cdot \nu = E_{\max} + A, \tag{5.1}$$

де E_{\max} – максимальна кінетична енергія фотоелектронів, A – робота виходу електрона з поверхні металу.

В роботі використовують метод гальмівного потенціалу. Монохроматичним світлом певної частоти освітлюють фотокатод. За відсутності напруги між анодом та фотокатодом струм через фотоелемент не дорівнює нулю. Для припинення анодного струму необхідно створити електричне поле, яке гальмує електрони. Змінюючи гальмівну напругу між анодом та фотокатодом, домагаються припинення фотоструму. В цьому випадку електрони гальмуються електричним полем з потенціалом U_0 , а їх кінетична енергія дорівнює

$$E_{\max} = eU_0. \quad (5.2)$$

Із (5.1) та (5.2) одержимо:

$$eU_0 = E_{\max} = h\nu - A. \quad (5.3)$$

Залежність E_{\max} від ν (рис. 5.1) – пряма, яка перетинає вісь абсцис в точці ν_0 (найменша частота світла, яке спричиняє фотоелектричний ефект). За тангенсом кута нахилу цієї прямої можна визначити сталу Планка:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dE_{\max}}{d\nu} = h.$$

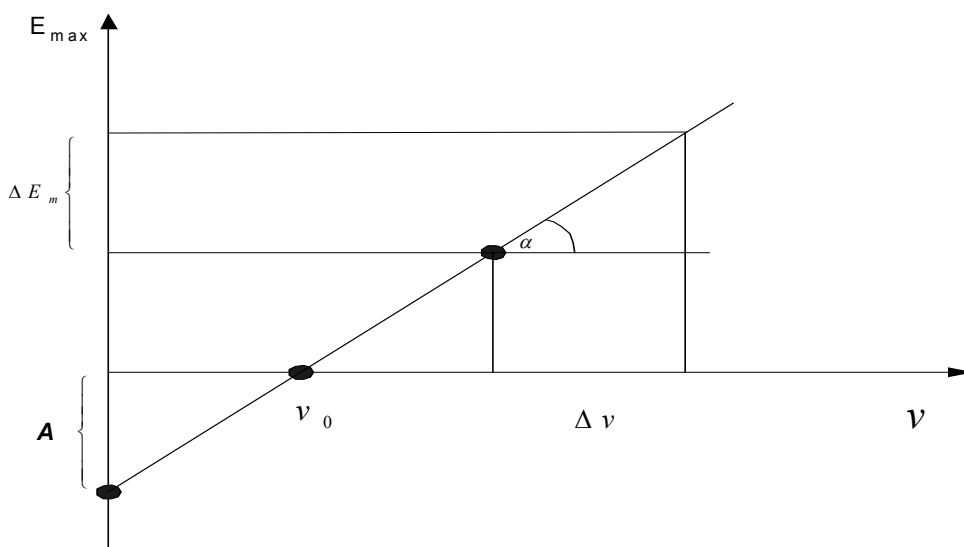


Рисунок 5.1

Продовживши пряму до перетину з віссю ординат можна знайти роботу виходу A .

5.3. Опис лабораторної установки

Обладнання: вакуумний фотоелемент, джерело регульовальної напруги, вольтметр, амперметр, набір світлофільтрів, лампа розжарення з джерелом живлення. Схема лабораторної установки наведена на рис. 5.2.

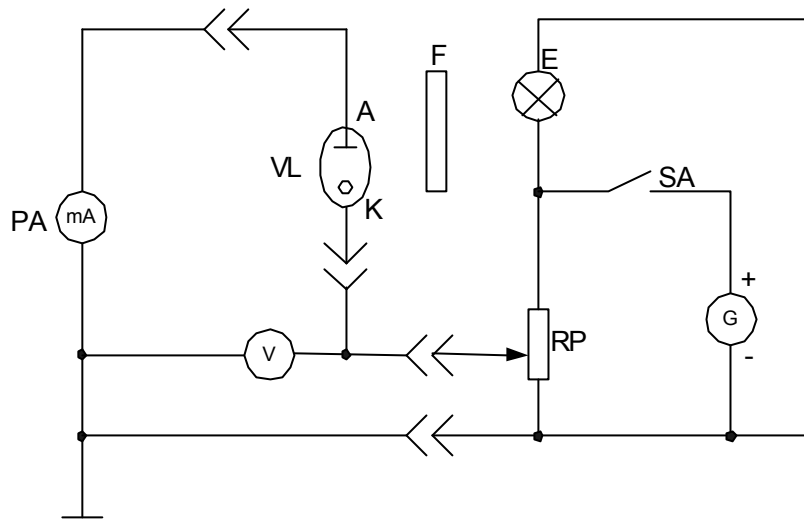


Рисунок 5.2

Світло від лампи розжарення E через світлофільтри F попадає на фотокатод вакуумного фотоелемента VL . Довжина хвилі світла змінюється із заміною світлофільтра.

Напругу на фотоелементі, яка подається від джерела G можна змінювати потенціометром RP та вимірювати вольтметром PV . Сила фотоструму вимірюється амперметром PA . Вмикання установки здійснюють тумблером SA .

5.4 Порядок виконання роботи і вказівки з її виконання

5.4.1 Перевірка закону Ейнштейна

- Увімкнути блок живлення фотоелемента та живлення лампи розжарення.
- Світлом певної довжини хвилі λ (довжина хвилі світлофільтра вказана на робочому місці; $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) освітлюють фотоелемент. Визначити та занести в таблицю частоту світла ν .
- Потенціометром RP зменшити фотострум до $I = 0$. Вольтметром виміряти гальмівний потенціал U_0 .
- Повторити вимірювання гальмівного потенціалу для різних світлофільтрів. Результати вимірювання гальмівного потенціалу та частоти занести в таблицю за формою табл. 5.1.
- Побудувати графік залежності $E_{\text{max}} = eU_0$ від частоти. Кінетичну енергію фотоелектронів зручно вимірювати в електрон-вольтах. В цьому випадку числові значення E_{max} та U_0 збігаються: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
- Зробити висновки про виконання закону Ейнштейна (5.1).

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань

№	Світлофільтр	Довжина хвилі $\lambda, \overset{o}{A}$	Частота $\nu, \text{Гц}$	Гальмівний потенціал $U_{\text{гальм}}, \text{В}$	Кінетична енергія, $E_{\text{max}}, \text{еВ}$
1	синій				
2	...				
3	...				
4	...				
5	...				
6	червоний				

5.4.2 Визначення червоної межі фотоефекту та роботи виходу електрона

– Провести пряму, яка проходить якомога ближче до експериментально визначених точок $E_{\text{max}}(\nu)$. Продовжити пряму до перетину з вісями абсцис та ординат.

– Визначити граничну частоту ν_0 за перетином прямої з віссю ν для $E_{\text{max}} = 0$ (рис. 5.1).

– Знайти червону межу фотоефекту $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$.

– Знайти роботу виходу електрона A за перетином прямої з віссю E_{max} (рис. 5.1).

5.4.3 Визначення сталої Планка

На графіку залежності $E_{\text{max}}(\nu)$ вибрати дві експериментальні точки, які лежать на прямій, визначити зміну кінетичної енергії $\Delta E_k = e\Delta U_0$ та зміну частоти $\Delta \nu$ для цих точок (рис. 5.1). Знайти сталу Планка за формулою

$$h = \frac{\Delta E_{\text{max}}}{\Delta \nu} = \frac{e\Delta U_0}{\Delta \nu}.$$

Контрольні запитання та завдання

1. В чому полягає явище зовнішнього фотоефекту?
2. Побудуйте залежність фотоструму від напруги (вольт-амперну характеристику) вакуумного фотоелемента та поясніть її.
3. Поясніть, чому сила струму через фотоелемент не дорівнює нулю, якщо прискорююча різниця потенціалів дорівнює нулю.
4. Чому потрібно затратити енергію для того, щоб електрон покинув поверхню металу? Від чого залежить робота виходу електрона?
5. Запишіть рівняння Ейнштейна та поясніть його фізичний зміст.

6. Опишіть метод гальмівного потенціалу. Які величини визначають в роботі цим методом?
7. Чи змінюється залежність $E_{\max}(\nu)$ для фотоелементів з різними матеріалами фотокатода? Відповідь пояснити.
8. Який фізичний смисл поняття “червона межа фотоефекту?” Як в даній роботі визначають червону межу фотоефекту?
9. Як пов’язані між собою робота виходу електрона та червона межа фотоефекту?

6 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ ЗБУДЖЕННЯ ТА ІОНІЗАЦІЇ АТОМІВ МЕТОДОМ ФРАНКА І ГЕРЦА

6.1 Мета роботи

Дослідне підтвердження дискретності рівнів енергії атомів, визначення їх потенціалів збудження та іонізації.

6.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Для підготовки до виконання лабораторної роботи треба ознайомитись з моделлю атома Бора [2, с. 337-338; 3, с. 47-49]

Основні положення теорії Бора заключені у двох постулатах.

1. З нескінченної кількості будь-яких електронних орбіт, можливих з точки зору класичної механіки, спостерігаються в дійсності тільки деякі стаціонарні орбіти, які відповідають умовам квантування: величина моменту імпульсу електрона на стаціонарній орбіті є кратною числу \hbar :

$$rmv = n\hbar,$$

де n – ціле $n=1,2,3,4,\dots$

2. Випромінювання або поглинання кванта світла спостерігається при переході електрона з однієї стаціонарної орбіти на іншу. Величина світлового кванту дорівнює різниці енергії тих стаціонарних станів, між якими відбувається квантовий перехід електрона:

$$E_2 - E_1 = \Delta E_{12} = \hbar\omega_{12} = h\nu_{12} = h \frac{c}{\lambda_{12}}. \quad (6.1)$$

Якщо атом перебуває в основному стані, коли $n=1$, то, незважаючи на те, що електрон рухається з прискоренням, він не випромінює і не поглинає електромагнітні хвилі.

Атом можна збудити, тобто перевести з основного стану ($n_1 = 1$) в стан з більшою енергією ($n_i > 1$), який називається збудженим. Енергія, необхідна для переведення атома в даний збуджений стан, називається енергією збудження $E_{зб}$, і визначається різницею енергій двох рівнів: основного і збудженого, тобто $E_{зб} = \Delta E_{1n}$. Мінімальна енергія збудження атома $E_{зб}^{\min}$ відповідає енергетичному проміжку між основним станом ($n = 1$) і найближчим до нього ($n = 2$) збудженим станом: $E_{зб}^{\min} = \Delta E_{12}$.

Так як енергія збуджених станів атома детермінована, то і частоти випромінювання або поглинання чітко визначені, а їх можливий набір створює ліній-

частий спектр, характерний для кожного атома: $\omega_{12} = \frac{\Delta E_{12}}{\hbar}$; $\omega_{13} = \frac{\Delta E_{13}}{\hbar}$; ...;
 $\omega_{1n} = \frac{\Delta E_{1n}}{\hbar}$.

Якщо атому передати енергію достатню, щоб перевести електрон на енергетичний рівень з $n \rightarrow \infty$, – енергію іонізації E_i , то відстань електрона від ядра атома теж нескінченно збільшиться. Атом, від якого відірвано один або більше електронів, стає позитивним іоном, відповідно одноразово, або багаторазово іонізованим.

Досліди Франка і Герца були яскравим експериментальним підтвердженням постулатів Бора.

Якщо атоми будь-якої речовини, що перебуває у газоподібному стані з одноатомними молекулами, опромінювати потоком електронів, між ними відбувається взаємодія. Вона може носити характер пружного або непружного ударів. Дж. Франк і Г. Герц довели, що коли енергія електронів менша за деяку критичну, то співударі між електронами і атомами відбуваються пружно. При такому співударі значення швидкості електрона практично не змінюється, може змінитися лише її напрям. Тобто атом при цьому зіткненні енергії не одержує, а електрон продовжує рухатися з початковою кінетичною енергією. При непружних співударах внаслідок того, що маса електрона значно менша за масу атома, він передає атому майже всю енергію. Атом переходить у збуджений енергетичний стан, а електрон різко зменшує швидкість до нуля. Виявилось, що непружні зіткнення електронів з атомами відбуваються при сувооо визначеному ряді значень кінетичної енергії електронів: ΔE_{12} ; ΔE_{13} ; ΔE_{14}

Розподіл швидкостей електронів після співударів з атомами досліджували за допомогою методу затримуючого потенціалу. Найпростішу принципову схему для досліду Франка і Герца зображено на рис. 6.1.

Балон лампи B наповнений газом (наприклад парами ртуті чи інертного газу) при низькому тиску (≈ 1 мм. рт.ст.). Гарячий катод (K) випромінює електрони.

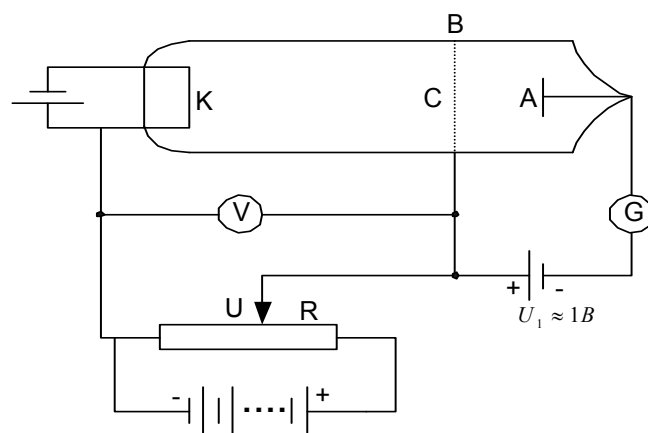


Рисунок 6.1

Між катодом (K) і анодом (A) прикладено прискорюючу різницю потенціалів U , яку можна змінювати за допомогою потенціометра R , що ділить напругу.

Змінюючи і вимірюючи величину прискорювальної напруги U_{KC} , можна вимірювати і контролювати кінетичну енергію електронів

$$E_e = \Delta E_{1n} = e \cdot U_{1n}.$$

Енергію електронів у цьому випадку зручно вимірювати в електронвольтах (eB). Енергію в $1eB = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж електрони отримують, якщо пройдуть різницю потенціалів в 1 В. Найменша різниця потенціалів, яку повинні пройти електрони в прискорюючому електричному полі, щоб їхня енергія була достатня для збудження (іонізації) атомів, називається потенціалом збудження $U_{зб}$ (іонізації U_i). Наприклад, перший потенціал збудження визначається формулою:

$$U_{12} = \frac{\Delta E_{12}}{e}.$$

Між сіткою і анодом було створено слабе електричне поле ($U_{CA} \approx 1B$) таке, що гальмувало рух електронів до анода.

Досліджувалась залежність сили струму I_A в анодному колі від напруги U_{KC} між катодом і сіткою.

При збільшенні напруги U_{KC} кінетична енергія електронів зростає. Пружний характер співударів електронів і атомів газу не призводить до зміни енергії електронів і вони досягають сітки з енергією $\frac{1}{2}mv^2 = eU_{KC}$.

Після проходження сітки електрони потрапляють у простір між сіткою і анодом, де гальмуюча дія поля дуже слабка і швидкість руху електронів v майже не зміниться. Тобто при пружному характері зіткнення з атомами газу у електронів дістає енергії, щоб подолати відстань «сітка-анод» та досягти аноду. При підвищенні напруги U_{KC} зросте швидкість v електронів і, відповідно, збільшиться анодний струм I_A (рис. 6.2, ділянка Оа).

А. Визначення потенціалу збудження.

Зростання сили струму на графіку вольт-амперної характеристики лампи $\Delta\varphi_{KC} = U_{KC}$ буде спостерігатись, доки різниця потенціалів між катодом і сіткою не досягне визначеної критичної величини 4,9В і тоді анодний струм різко зменшиться (ділянка кривої ab). (Для прикладу розглядається випадок, коли лампа наповнена парами ртуті).

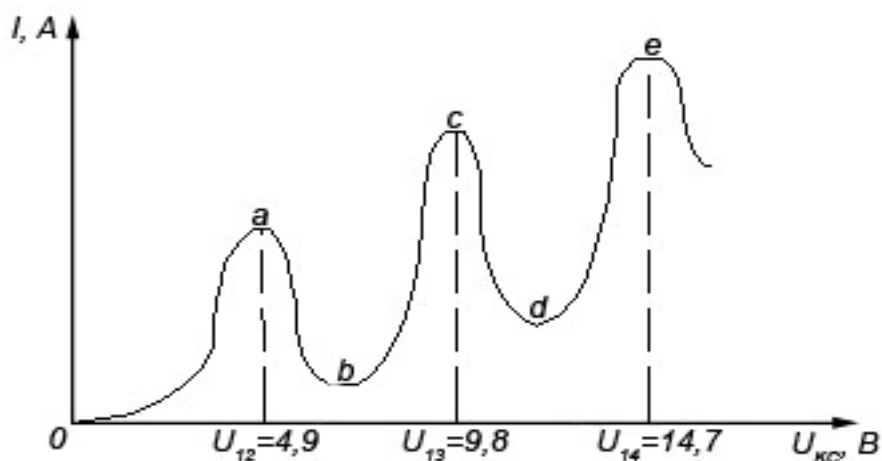


Рисунок 6.2

Це означає, що при потенціалі 4,9В зіткнення електронів з атомами ртуті стають непружними і при співударі електрони, віддаючи атомам ртуті всю свою енергію, не можуть подолати гальмуюче поле між сіткою і анодом, попадають на сітку, тобто не вносять вкладу у величину анодного струму.

При енергії електронів 9,8 еВ і 14,7 еВ електрони зазнають непружні співудари двічі або тричі, що дає другий і третій максимуми.

Такий хід кривої пояснюється тим, що внаслідок дискретності енергетичних рівнів атоми можуть сприймати енергію тільки порціями:

$$\Delta E_{12} = E_2 - E_1, \quad \text{або} \quad \Delta E_{13} = E_3 - E_1 \quad \text{та інші,}$$

де E_1, E_2, E_3 - енергія 1-го, 2-го, 3-го і т.д. стаціонарних станів.

Збуджені атоми газу через час порядку 10^{-8} с переходять у нормальний стан, а надлишок енергії випускають у вигляді резонансного випромінювання певної довжини хвилі, яку можна знайти за умови:

$$\Delta E_{12} = E_2 - E_1 = e \cdot (U_2 - U_1) = h \cdot \frac{c}{\lambda_{12}}, \quad (6.2)$$

$$\lambda_{12} = \frac{h \cdot c}{e \cdot (U_2 - U_1)},$$

де h – стала Планка, c - швидкість світла, e - заряд електрона, U_2, U_1 - потенціали, яким відповідають максимуми сили струму (рисунок 3.2, максимуми «с» і «а»).

Б. Визначення потенціалу іонізації.

У проміжку «сітка-анод» можна встановити велику напругу U_{CA} поля гальмівного для електронів і потік електронів до аноду зникне – вони будуть відводитись сіткою. Якщо при цьому збільшувати потенціал сітки U_{KC} , прискорені електрони зможуть отримати таку кінетичну енергію, що її буде достатньо для іонізації атомів в лампі, зіткнення з якими будуть траплятися побізу сітки. загальмовані і відірвані електрони потраплять на сітку, а позитивні іони будуть притягнуті до аноду, потенціал якого буде найбільш низьким. Виникне сполох анодного струму, обумовлений лише іонною складовою (рис. 6.3). Його напрямок буде протилежний відносно електронної складової. Напруга U_{KC} , що відповідає сполоху, дорівнює потенціалу іонізації U_i атомів газу.

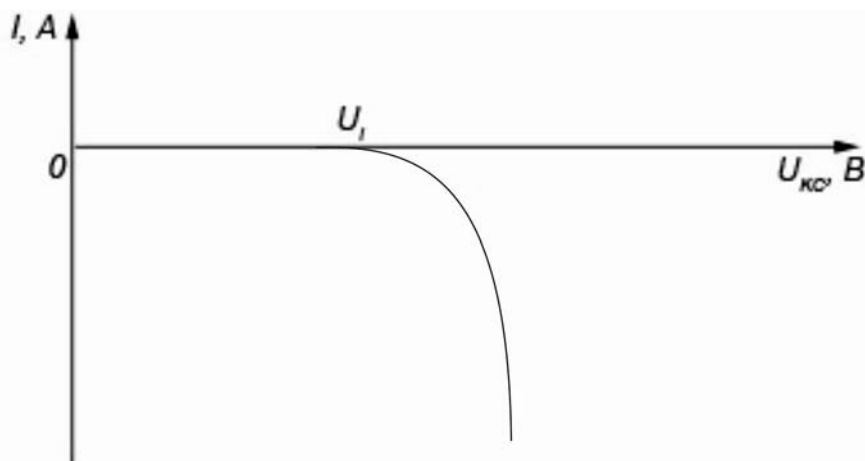


Рисунок 6.3

6.3 Опис лабораторної установки.

Схема установки для дослідження особливостей будови атомів наведена на рис. 6.4.

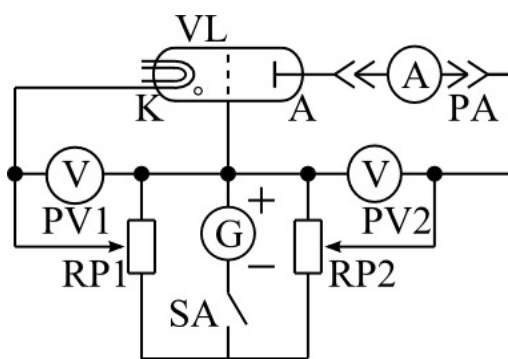


Рисунок 6.4

Атоми досліджуваного газу знаходяться в скляній колбі лампи, що має три електроди: катод K , сітку C , анод A .

Розжарений окремим електричним струмом катод K є джерелом електронів, що прискорюються в електричному полі між катодом і сіткою (U_{KC}) та га-

льмуються у полі між сіткою та анодом (U_{CA}). Енергія електронів залежить від напруги, що подається між сіткою C і катодом K . Величина напруги U_{KC} змінюється потенціометром $RP1$ і вимірюється вольтметром $PV1$.

Потенціометром $RP2$ і вольтметром $PV2$ змінюється і вимірюється величина напруги U_{CA} , що створює затримуюче поле між сіткою C і анодом A . Електрони, що пройшли крізь газ, або іони, створені в результаті взаємодії електронів з атомами, створюють струм у колі анода A , який вимірюється цифровим мікроамперметром PA .

Від джерела струму нагрівається нитка накалу катоду і подається напруга на електроди. Джерело вмикається тумблером.

6.4 Порядок виконання роботи і вказівки з її виконання

6.4.1 Визначення потенціалу збудження атомів $U_{зб}$

1. Підключіть цифровий амперметр PA до клем макета. Увімкніть макет і амперметр.

2. Потенціометром $RP2$ установіть гальмуючий потенціал $U_{CA} = (1 \div 2)V$ на вольтметрі $PV2$.

3. Потенціометром $RP1$ змінійте, а вольтметром $PV1$ вимірюйте напругу, що прискорює електрони. Для кожного значення напруги за допомогою PA виміряйте силу струму в колі анода (колектора). Результати вимірювань занесіть у таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати вимірювань для знаходження потенціалу збудження

U_{KC}, V	2	4	6	8	...	44	46	48
I, nA								

4. Побудуйте графік залежності сили струму I від енергії електронів $e \cdot U$ і по ньому зробіть висновок про характер взаємодії електронів з атомами. Визначте енергію і потенціал збудження $U_{зб}$ атомів.

5. За допомогою (6.2) обчисліть частоту і довжину хвилі випромінювання збуджених атомів. За цими даними визначте склад досліджуваного газу.

6.4.2 Визначення потенціалу іонізації атома

1. Потенціометром $RP2$ установіть затримуючий потенціал $U_{CA} = 20V$.

2. Змінюючи прискорюючу напругу і вимірюючи силу струму, з'ясуйте залежність іонної складової струму від енергії електронів. Результати вимірювань занесіть у таблицю 6.2.

Побудуйте графік I_i від $e \cdot U$.

Таблиця 6.2 – Результати вимірювань для знаходження потенціалу іонізації

$U, \text{В}$	2	4	6	8	...	44	46	48
$I, \text{нА}$								
$e \cdot U, \text{еВ}$								

3. Визначте потенціал іонізації й енергію, при якій з'являються іони. Те значення прискорюючої напруги, при якому сила струму різко збільшується, визначає потенціал іонізації атома U_i .

6.5 Зміст звіту

Результати вимірювань подайте у вигляді графіків $I(e \cdot U)$ і обчислених значень потенціалів збудження, іонізації, частоти резонансного випромінювання. За абсолютними значеннями похибок вимірювання струму і напруги оцініть похибку вимірювання потенціалів збудження і іонізації.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте постулати Бора.
2. Накресліть схему енергетичних рівнів атома.
3. Що таке енергія збудження, іонізації? Покажіть їх на схемі енергетичних рівнів.
4. В чому полягає суть досліду Франка-Герца?
5. Чому не рекомендується визначати резонансний потенціал за положенням першого максимуму на вольт-амперній характеристиці?
6. Чому мінімальне значення анодного струму не дорівнює нулю?
7. Як залежить форма вольт-амперної характеристики від тиску газу в балоні лампи?
8. Що таке резонансне випромінювання?
9. Яка роль сітки в балоні лампи з досліду Франка-Герца?
10. Яким чином з'являється іонна складова струму?
11. Як пояснюється світіння газу в електричному розряді?
12. При якому прискорюючому потенціалі спостерігатиметься різке падіння анодного струму в досліді Франка і Герца, якщо балон заповнити атомарним воднем?

7 ДОСЛІДЖЕННЯ АТОМНОГО СПЕКТРА

7.1 Мета роботи

Розрахувати значення енергії електрона в атомі водню і побудувати енергетичну діаграму.

Опанувати експериментальний метод визначення невідомих довжин хвиль у видимій області спектра. Встановити відповідність результатів розрахунків довжини хвиль випромінювання водню за узагальненою формулою Бальмера з експериментальними даними, що одержані за допомогою монохроматора.

7.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Спектри є характеристикою атомів і молекул. Розрізняють лінійчасті, смугасті і суцільні спектри. Атоми характеризуються лінійчастими спектрами, тобто енергетичний спектр атомів має дискретну структуру. Треба зауважити, що часто енергетичні рівні є виродженими і, крім того, існують правила відбору при переході з одного рівня на інший. [1, с. 386-387; 2, с. 338-340]

Борівська теорія атома підтверджується емпірично одержаною узагальненою формулою Бальмера для атома водню:

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), \text{ (м}^{-1}\text{)} \quad (7.1)$$

де R_{λ} – стала Рідберга, n_k, n_i – квантові числа ($n_k = 1, 2, 3, \dots$; $n_i = n_k + 1, n_k + 2, \dots$).

В спектрі випромінювання атома водню спостерігаються окремі групи ліній, які мають назву спектральних серій.

Серією називається сукупність спектральних ліній, хвильові числа яких описуються формулою Бальмера, при $n_k = const$. Кожна серія характеризується головною лінією ($n_i = n_k + 1$) і границею серії.

Спектр випромінювання атома водню складається з серій, які подані у таблиці 7.1

Фізичний зміст формула Бальмера одержала в результаті створення Шредінгером квантовомеханічної теорії атома водню. Кожній мікрочастинці зіставляється хвильова функція, яка характеризує її стан і знаходиться з розв'язання рівняння Шредінгера. Для електрона атома водню рівняння Шредінгера розв'язується при дискретних негативних значеннях повної енергії:

$$E_n = -\frac{m \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (\text{Дж}) \quad (7.2)$$

де m – маса електрона, e - заряд електрона, ϵ_0 - електрична стала, h - стала Планка, n - головне квантове число. Тобто атом водню може мати тільки квантовані значення енергії. Схема рівнів енергії зображена на рис. 7.1 (а).

Таблиця 7.1

Серія	Область спектра	Формула серії	Межа серії
Лаймана	Ультрафіолетова	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$ $n_i = 2, 3, 4, \dots$	$911,27 \text{ \AA}$
Бальмера	Видима	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$ $n_i = 3, 4, 5, \dots$	$3645,6 \text{ \AA}$
Пашена	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$ $n_i = 4, 5, 6, \dots$	$8201,4 \text{ \AA}$
Брекета	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$ $n_i = 5, 6, 7, \dots$	14580 \AA
Пфунда	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$ $n_i = 6, 7, 8, \dots$	22782 \AA

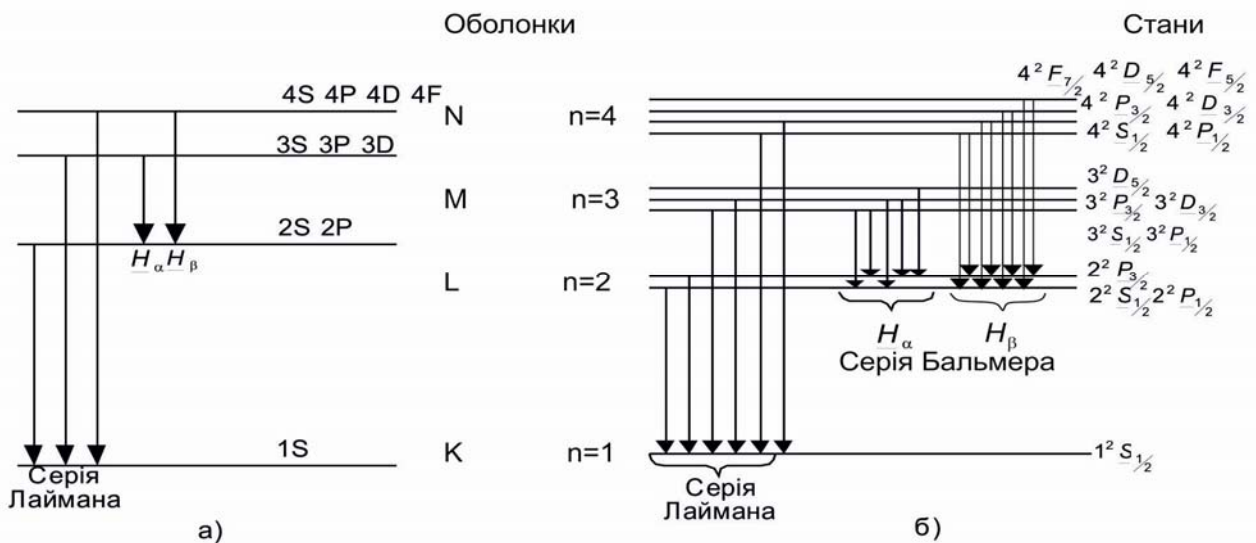


Рисунок 7.1

Згідно з постулатами Бора випромінювання кванта світла можливе при переході електрона з початкового стану з головним квантовим числом n_i і енергією E_i у нижчий стан з n_k і енергією E_k . Частота фотона, який випромінюється (з урахуванням (7.2)):

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_i - E_k}{h} = \frac{m \cdot e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right). \quad (7.3)$$

Порівнюючи (7.3) з (7.1) одержимо сталу Ридберга

$$R = \frac{m \cdot e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c}. \quad (7.4)$$

При вивченні спектра водню за допомогою приладу з високою роздільною здатністю виявилось, що лінії мають тонку структуру (рис. 7.1 (б)), що пояснюється, якщо взяти до уваги спін-орбітальну взаємодію. На рис. 7.1 (б) зображена тонка структура головної лінії серії Бальмера.

7.3 Порядок виконання роботи і вказівки з її виконання

7.3.1 Побудова енергетичної діаграми для атома водню

1. Увімкнути лабораторну установку та прогріти 3 хвилини. використовуючи шкалу б визначити довжину хвиль усіх ліній серії Бальмера.
2. Використовуючи формулу (8.4) розрахувати сталу Рідберга.
3. Розрахувати довжини хвиль серії Бальмера, виходячи з формули:

$$\frac{1}{\lambda} = R_\lambda \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), n_i = 3, 4, 5, \dots, 8.$$

4. Аналізуючи дані п.1 та п.3 визначити відповідність.
5. Використовуючи формулу (4.2), обчислити значення енергії електрона для $n = (1 - 8)$ і $n \rightarrow \infty$.
6. Побудувати в масштабі рівні енергії з зазначенням головного квантового числа (енергетичну діаграму). Енергію розрахувати у джоулях і електронвольтах.
7. Визначити з енергетичної діаграми енергію фотонів і їх довжини хвиль для серії Бальмера. Порівняти їх з результатами, одержаними в п. 2.

7.3.2 Опис лабораторної установки

Схема установки для дослідження спектра водню наведена на рис. 7.2.

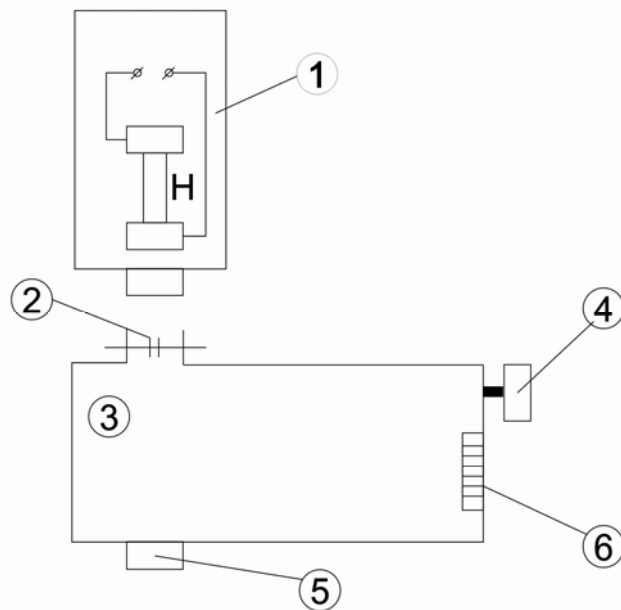


Рисунок 7.2

В експериментальній установці випромінювання водню одержують завдяки електричному розряду в газі водні в розрядному приладі 1, проходячи крізь калібровану щилину 2 промінь потрапляє на дисперсійну призму монохроматора 3, де розкладається в спектр. Повертаючи барабан 4 можна крізь окуляр 5 знайти будь-яку лінію видимого спектру (серія Бальмера) і за допомогою шкали 6 визначити довжину світлової хвилі, що відповідає цій лінії, у нанометрах.

Контрольні запитання та завдання

1. Які серіальні закономірності спостерігаються в спектрі атомарного водню?
2. Чим спектр атомарного водню буде відрізнятися від спектра молекулярного водню?
3. Що таке спектральна серія?
4. Якою формулою описується серія Бальмера?
5. Що таке енергія іонізації атома? Енергія збудження?
6. Поясніть зміст від'ємного значення енергії електрона в атомі?
7. Які ви знаєте квантові числа, який їх фізичний зміст?
8. Які стани називають виродженими? Які виродження можна зняти?
9. Чим обумовлена тонка структура ліній в спектрі водню?
10. Які види спектрів ви знаєте, і в яких випадках кожен з них спостерігається?
11. Сформулюйте постулати Бора.
12. Які правила відбору виконуються при переходах атомів з одних енергетичних рівнів на інші.

8 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА (ЛАЗЕРА)

8.1 Мета роботи

Вивчення принципу роботи і будови оптичного квантового генератора (ОКГ). Вимірювання параметрів і характеристик вимушеного випромінювання. Застосування лазера в оптичних дослідах.

8.2 Вказівки з організації самостійної роботи

Вивчити процеси випромінювання та поглинання випромінювання атомами речовини [1, с. 463-465; 2, с. 373-376; 3, с. 70-78]. Зверніть увагу на те, що інтенсивність спонтанного випромінювання не залежить, а вимушеного (стимульованого, індукованого) залежить від густини випромінювання.

Необхідно вміти визначати основні характеристики і параметри випромінювання [1, с. 461; 2, с.372].

Оптичний квантовий генератор являє собою прилад, в якому створені умови для отримання вимушеного випромінювання. Лазер обов'язково має три основні компоненти:

1. Активне середовище з інверсною заселеністю енергетичних рівнів.
2. Систему накопичування енергії.
3. Оптичний резонатор (пристрій, який формує світловий потік в заданому напрямку).

Система накачування (в твердотільних лазерах це лампа – спалах, в газових – газовий розряд) створює середовище з інверсною заселеністю рівнів. Первинні фотони, які рухаються уздовж осі, як і фотони ними індуковані, викликають лавиноподібне зростання фотонного потоку, чому сприяє відбиття потоку від дзеркал резонатора. Накладання відбитих від дзеркал і “прямих” фотонів утворює стоячу хвилю, яка виконує індукуючу дію. Частина індукованого випромінювання виходить назовні через напівпрозоре дзеркало.

Інтенсивності випромінювання $I_{21}^{СП}$, I_{21}^* і поглинання I_{12}^* одиниці об'єму збудженого середовища можуть бути розраховані за формулами:

$$I_{21}^{СП} = A_{21} \cdot N_2 \cdot h; \quad (8.1)$$

$$I_{21}^* = B_{21} \cdot N_2 \cdot U_\nu \cdot h \cdot \nu; \quad (8.2)$$

$$I_{12}^* = B_{12} \cdot N_1 \cdot U_\nu \cdot h \cdot \nu. \quad (8.3)$$

де A_{21} , B_{21} , B_{12} - коефіцієнти Ейнштейна, які визначають ймовірність спонтанного випромінювання, вимушеного випромінювання і вимушеного поглинання відповідно;

N_1, N_2 - густина частинок у станах з енергіями E_1, E_2 ;
 U_ν - густина енергії випромінювання на частоті переходу.

Щоб отримати потужне індуковане випромінювання необхідно створити інверсну заселеність рівнів ($N_2 > N_1$) і забезпечити в середовищі високу густину енергії U_ν на частоті ν , що відповідає переходу між цими рівнями. Висока об'ємна густина енергії випромінювання досягається розташуванням активного середовища в резонаторі.

Розглянемо процес створення активного середовища на прикладі гелій-неонового лазера (суміш гелію і неону з співвідношенням концентрацій 10:1 і тиском близько 1мм рт.ст.). Енергетичні рівні незбуджених атомів гелію і неону (1S - стан) практично однакові. Атоми гелію мають два близьких за енергіями підрівні 2S (рис. 8.1). Перехід $1S \rightarrow 2S$ відбувається за рахунок непружних співударянь частинок в газовому розряді (фотонний перехід $2S \rightarrow 1S$ заборонено правилом добору). При зіткненнях в газовому розряді енергія від атомів гелію переходить до атомів неону, частина яких опиняється в стані 4S, а гелію і неону (1S - стан) практично однакові. Атоми гелію мають два близьких за енергіями

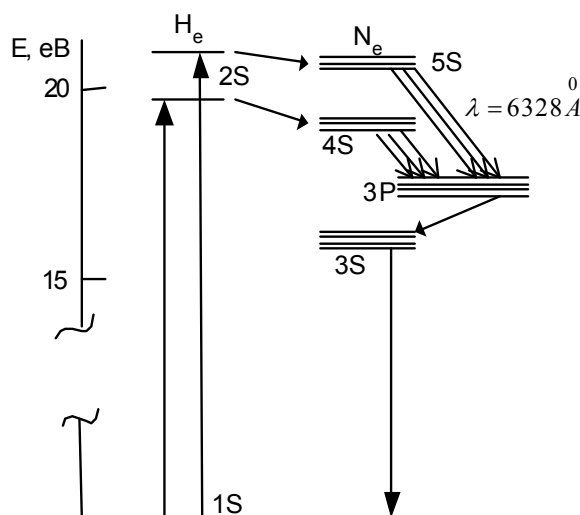


Рисунок 9.1

підрівні 2S (рис. 8.1). Перехід $1S \rightarrow 2S$ відбувається за рахунок непружних співударянь частинок в газовому розряді (фотонний перехід $2S \rightarrow 1S$ заборонено правилом добору). При зіткненнях в газовому розряді енергія від атомів гелію переходить до атомів неону, частина яких опиняється в стані 4S, а частина в стані 5S. Час життя атомів неону на рівнях 4S і 5S на два порядки більше, ніж на рівнях 3P, внаслідок чого в газовому розряді, при безперервній підкачці енергії, створюється інверсна заселеність рівнів неону 4S і 5S по відношенню до 3P. Перехід $5S \rightarrow 3P$ призводить до утворення індукованого червоного світла ($\lambda = 0,6328$ мкм), а перехід $3P \rightarrow 3S$ відіграє роль очисника рівнів 4S і 5S, що збільшує відносну інверсну заселеність рівнів 4S і 5S.

Інтенсивність вимушеного випромінювання дорівнює

$$I = I_{21}^* - I_{12}^* = B \cdot \Delta N \cdot U_\nu \cdot h \cdot V, \quad (8.4)$$

де $B = B_{21} = B_{12}$, $\Delta N = N_2 - N_1$.

З формули (8.4) видно, що інтенсивність лазерного випромінювання пропорційна U_ν і ΔN .

8.3 Опис лабораторної установки

Обладнання: газовий ОКГ з регульованим блоком живлення, монохроматор, аналізатор, екран, таблиці спектральних ліній.

Схема лабораторного макета наведена на рис. 8.2. Активне середовище (газ під низьким тиском) знаходиться в скляній трубці 1, закритій з торців вікнами 2, встановленими під кутом Брюстера. До двох електродів 3 підводиться високовольтна напруга. Під її дією в газі відбувається електричний розряд, що збуджує атоми газу. Трубка з газом розташована між дзеркалами 4 високодобротного відкритого резонатора (рис. 8.2). Одне з дзеркал резонатора напівпрозоре і через нього виходить випромінювання. Фотодіод VD разом з цифровим мікроамперметром $PA2$ дозволяє реєструвати зміну інтенсивності вимушеного випромінювання. За допомогою монохроматора M можна спостерігати спектр випромінювання активного середовища ОКГ, знайти в ньому лінію вимушеного випромінювання і визначити довжини хвиль. Таблиці спектральних ліній або зразкові спектри атомів знаходяться на робочому місці.

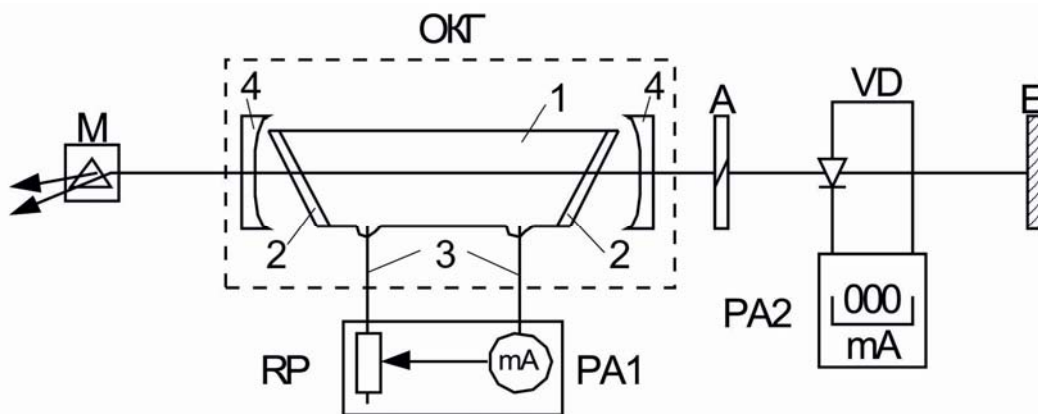


Рисунок 8.2

Поляризація вимушеного випромінювання визначається за допомогою аналізатора A і приймача променевої енергії VD . Шкала, нанесена на обійму аналізатора, дозволяє вимірювати кути повороту аналізатора навколо осі. Екран E дозволяє визначати кут розходження вимушеного випромінювання.

8.4 Порядок виконання роботи і вказівки з її виконання

8.4.1 Підготовка макета до роботи

Увімкніть блок живлення ОКГ. З випромінювача повинен з'явитися яскравий червоний промінь випромінювання.

8.4.2 Визначення складу активного середовища

Установіть ОКГ перед вхідною щілиною монохроматора M так, щоб в нього попадало випромінювання збудженого середовища. Підбором ширини вхідної щілини, фокусуванням окуляра досягніть чіткого зображення спектра. Обертаючи відрахунковий барабан монохроматора проскануйте спектр випромінювання. Для найбільше яскравих ліній зареєструйте показники по відрахунковому барабану. Використовуючи градувальну криву монохроматора, визначте довжини хвиль найбільш яскравих ліній випромінювання. Калібровку монохроматора проведіть по відомій довжині хвилі вимушеного випромінювання лазера 6328 \AA . Результати вимірювань занесить у таблицю 8.1.

Таблиця 8.1 - Визначення складу активного середовища

№	Колір лінії спектру	Показник	Довжина хвилі, λ , нм	Середовище
1	червоний			
...				
7				

Порівнюючи лінії випромінювання активного середовища з еталонною спектрограмою різних атомів, що знаходиться на монохроматорі, визначте склад активного середовища.

8.4.3 Визначення поляризації вимушеного випромінювання

Між ОКГ і приймачем випромінювання VD розташуйте оптичний аналізатор A . Повертаючи аналізатор навколо осі на 360° , виміряйте інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь аналізатор, при різних кутах повороту $I_B(\varphi)$. Результати занесить у таблицю 8.2.

Таблиця 8.2 – Залежність інтенсивності випромінювання від кута повороту аналізатора

φ , град	0	10	20	30	...	340	350	360
I_B , нА								

Побудуйте графік одержаної залежності і перевірте, чи виконується закон Малюса. Якщо закон Малюса не виконується, підрахуйте ступінь поляризації за формулою

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (8.5)$$

де I_{\max} і I_{\min} - максимальна і мінімальна інтенсивність випромінювання.

8.5 Зміст звіту

Результати вимірювань подайте у вигляді графіка залежності інтенсивності випромінювання від кута повороту аналізатора. Наведіть дані ступеня поляризації лазерного випромінювання.

Контрольні запитання та завдання

1. У чому суть вимушеного випромінювання?
2. Що таке принцип детальної рівноваги?
3. У чому полягає фізичний зміст коефіцієнтів Ейнштейна?
4. Що таке інверсна заселеність енергетичних рівнів?
5. Як в ОКГ отримується інверсна заселеність рівнів?
6. Що таке від'ємна абсолютна температура?
7. Які умови потрібні для отримання інтенсивного вимушеного випромінювання?
8. Назвіть основні елементи ОКГ.
9. Який принцип будови та роботи лазера?
10. Які властивості має випромінювання лазера? Що таке когерентність?
11. Які прямі вимірювання потрібно провести в роботі?
12. Сформулюйте закон Малюса.

9 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРО- ПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ НАПІВПРОВІДНИКА

9.1 Мета роботи

Експериментальне встановлення законів залежності питомої електропровідності металів та напівпровідників від температури, визначення енергії активації напівпровідника.

9.2 Вказівки до організації самостійної роботи студентів

Вивчаючи основні положення зонної теорії твердих тіл та теорії електропровідності [2, с. 385-393; 3, с. 95-102], зверніть особливу увагу на відмінність зонної структури та механізму електропровідності металів та напівпровідників; поняття валентної зони, зони провідності, забороненої зони. Уясніть механізм власної та домішкової провідності напівпровідників.

У даній роботі вимірюють питому електропровідність σ трьох зразків твердих тіл в залежності від температури T . Питома електропровідність металів, в яких носіями електричного струму є вільні електрони, дорівнює

$$\sigma = ne\mu, \quad (9.1)$$

де n – концентрація носіїв струму, e – заряд електрона, μ – рухливість носіїв струму.

Рухливість носіїв струму в твердих тілах μ – величина, що характеризує динамічні властивості носіїв струму, вона дорівнює відношенню середньої швидкості спрямованого руху носіїв струму (швидкості дрейфу) до напруженості електричного поля E , яке викликало появу цього руху. Рухливість μ носіїв струму не залежить від концентрації n . Величина μ визначається процесами розсіювання носіїв струму. Так, для металів із збільшенням температури μ зменшується внаслідок розсіювання електронів на теплових коливаннях кристалічної решітки (фотонах) обернено пропорційно температурі:

$$\mu \sim \frac{1}{T}.$$

Концентрація вільних електронів майже не залежить від температури і є сталою в широкому інтервалі температур. Тому із (9.1) витікає, що у металів питома електропровідність при збільшенні температури зменшується.

Для напівпровідників питома електропровідність визначається концентрацією n негативних носіїв струму (електронів) і їх рухливістю μ_n та концентрацією p позитивних носіїв струму (дірок) та їх рухливістю μ_p :

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p).$$

У власних напівпровідників $n \approx p$, а рухливість носіїв струму зменшується при зростанні температури за степеневим законом. Але концентрація носіїв струму зростає із збільшенням температури за експоненціальним законом:

$$n \sim \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right),$$

де ΔE - ширина забороненої зони, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ - стала Больцмана.

Тоді питома електропровідність власних напівпровідників визначається залежністю

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (9.2)$$

де σ_0 - питома електропровідність при $T \rightarrow \infty$. σ_0 дещо змінюється з температурою, але ця залежність набагато менша, ніж експоненціальна.

Для виникнення електропровідності необхідно затратити енергію, яка дорівнює ширині ΔE забороненої зони – енергію активації напівпровідника. За графіком залежності $\ln \sigma$ від $1/T$ (рис. 10.1) можна знайти енергію активації.

Якщо на залежності $\ln \sigma(1/T)$ взяти дві точки 1 та 2, то

$$\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1 = -\frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right); \quad (9.3)$$

$$\Delta E = 2k \cdot \frac{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = 2k \frac{\Delta(\ln \sigma)}{\Delta(1/T)}.$$

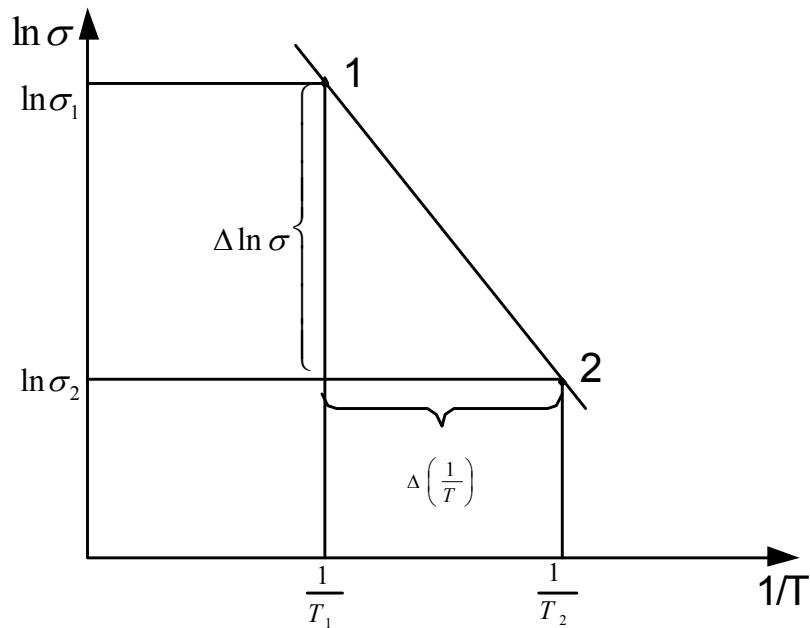


Рисунок 9.1

9.3 Опис лабораторної установки

Обладнання: регульоване джерело живлення, вольтметр, амперметр, термостат зі зразками, термометр.

Електропровідність зразків PK при їхньому нагріванні вимірюється за допомогою макета, схема якого наведена на рис. 9.2.

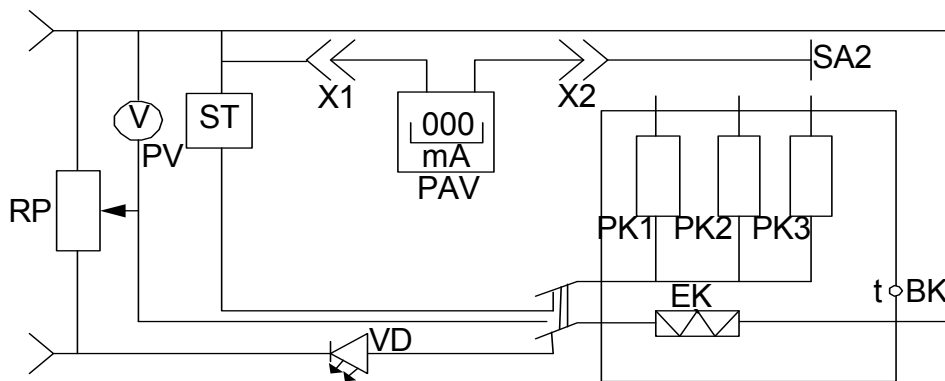


Рисунок 9.2

Досліджувані зразки $PK1$, $PK2$, $PK3$ поміщені до термостата з нагрівальним елементом EK і термометром BK . Перемикач $SA2$ дозволяє підключити їх до вимірної схеми по черзі.

Зміна електропровідності σ зразків визначається побічним (непрямим) методом: шляхом виміру сили струму при постійній величині напруги на зразку, або при зміні напруги при постійній величині струму.

Напруга на зразках у першому випадку (або сила струму в другому) підтримується постійним електронним стабілізатором ST .

Електронний стабілізатор і нагрівач E_k вмикаються тумблером $SA1$, про що сигналізує світлодіод VD . Вимірювальний прилад PVA підключається до схеми за допомогою клем $X1$ і $X2$.

При увімкненому нагрівачі зразки підключаються до потенціометра RP , який дозволяє вимірювати на них напругу для отримання вольт-амперної характеристики.

9.4 Порядок виконання роботи і вказівки з її виконання

1. Підключити до клем $X1$ та $X2$ амперметр або вольтметр. Тумблер $SA1$ вимкнути.

2. Увімкнути макет. Змінюючи напругу потенціометром RP , виміряти залежність сили I струму від напруги U для кожного із зразків при кімнатній температурі.

3. Побудувати графіки залежності $I(U)$ та визначити із графіків питому електропровідність $\sigma_k = \frac{\Delta I}{\Delta U}$ зразків при кімнатній температурі.

4. За час проведення експерименту можливо лише один раз провести вимірювання температурної залежності $\sigma(T)$, тому тумблер $SA1$ вмикайте тільки після того, як підготуєтесь до вимірювань.

Вимірювання $\sigma(T)$ здійснюються за визначеною залежністю сили струму $I(T)$ від температури для фіксованої напруги $U_k = 0,5V$.

Якщо $U = U_k$, то

$$\frac{\sigma}{\sigma_k} = \frac{IU_k}{I_k U} = \frac{I}{I_k}.$$

де I_k , U_k , σ_k - величини, виміряні при кімнатній температурі T_k .

5. Підготуйте таблицю для результатів вимірювань

6. Тумблером $SA1$ увімкніть нагрівач EK та електронний стабілізатор.

7. При підвищенні температури до $50^\circ C$ через $5^\circ C$ вимірювати залежність сили струму від температури. Для даної температури по черзі вмикати зразки за допомогою $PK1$, $PK2$ та $PK3$.

8. За виміряними залежностями визначити $\sigma(T)$ та побудувати графіки $\frac{\sigma}{\sigma_k}(T)$. Визначити яка з речовин є напівпровідником.

9. Для напівпровідника побудувати графік залежності $\ln(\sigma/\sigma_k)$ від $(1/T)$.

Таблиця 9.1

t, °C	I(U)			TK	$\frac{1}{T} K^{-1}$	$\frac{\sigma}{\sigma_k}$			$\ln \frac{\sigma}{\sigma_k}$
	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3			1	2	3	
t_k	$I_k(U_k)$	$I_k(U_k)$	$I_k(U_k)$						
20									
25									
30									
35									
40									
45									
50									

10. На графіку цієї залежності вибрати дві точки для яких визначити $\Delta \ln(\sigma / \sigma_k)$ та $\Delta(1/T)$ (рис. 9.1).

Використовуючи формулу (9.3), знайти енергію активації напівпровідника.

Контрольні запитання та завдання

1. Як відрізняються метали, діелектрики та напівпровідники за зонною теорією?
2. Що таке питома електропровідність?
3. Як питома електропровідність металів залежить від температури?
4. Як знайти питому електропровідність металу, використовуючи вольт-амперну характеристику металу (графічну залежність сили струму від напруги)?
5. Яка величина називається рухомістю носіїв струму? Від чого вона залежить?
6. Як змінюється концентрація носіїв струму із зміною температури в металах; в напівпровідниках?
7. Як вимірюється питома електропровідність речовин у даній роботі?
8. Що таке заборонена зона для власних напівпровідників? Як знайти енергію активації напівпровідника в даній роботі?
9. За яким законом змінюється питома електропровідність власних напівпровідників?
10. Поясніть фізичні причини такої залежності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики / Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. – К.: Кондор, 2008 – 524 с.
2. Трофимова Т.И. Курс фізики: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.
3. Квантова та ядерна фізика: Навч. Посібник / Упоряд. М.І. Українець, Т.Б. Ткаченко та ін.. – Харків: ХНУРЕ, 2005. – 124 с.

Додаткові джерела

4. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т.3. – 304 с.
 2. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике.– М.: Наука, 1983.–704 с.
 3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
 4. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т. 2. – 480 с.
 5. Кортнев А.В., Рубльов Ю.В., Куценко А.Н. Практикум з фізики. М., Вища школа, 1963.
-
1. Иверонова В.И. Физический практикум. Электричество и оптика. – М.: Наука, 1968. –815 с.
 2. Ищенко Е.Ф., Климов Ю.М. Оптические квантовые генераторы. – М.: Сов. Радио, 1968. – 472 с.
 3. Солоухин Р.И. Методы физических измерений. – Новосибирск: Наука, 1975. – 292 с.
 4. Шпольский Э.В. Атомная физика. – М.: Наука, 1974. Т.1. – 575 с.
 5. Шпольский Э.В. Атомная физика. – М.: Наука, 1974. Т.2. – 575 с.
 6. Герцберг Г.В. Электронные спектры и строение многоатомных молекул. – М.: Мир, 1969. – 772 с.
 7. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – М.: Атомиздат, 1974. – Т.1. – 584 с.
 8. Ершов В.С. Внедрение международной системы единиц. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 295 с.
 9. Государственный комитет СССР по стандартам. Методические указания (внедрение и применение ГОСТ 8.417-81 “ГСИ. Единицы физических величин” в области ионизирующих излучений. РД 50-454-84). – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 34 с.

Електронне навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт

з дисципліни

«ФІЗИКА»

Частина 3

(Оптика, атомна фізика та фізика твердого тіла)

для студентів усіх форм навчання

напрямів 6.040301 «Прикладна математика», 6.040302 «Інформатика», 6.040303 «Системний аналіз», 6.050101 «Комп'ютерні науки», 6.050102 «Комп'ютерна інженерія», 6.050103 «Програмна інженерія», 6.050201 «Системна інженерія», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 «Електронні пристрої та системи», 6.050803 «Акустотехніка», 6.050901 «Радіотехніка», 6.050902 «Радіоелектронні апарати», 6.050903 «Телекомунікації», 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології», 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація», 6.051004 «Оптотехніка», 6.051402 «Біомедична інженерія», 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа», 6.170101 «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», 6.170102 «Системи технічного захисту інформації», 6.170103 «Управління інформаційною безпекою»

Упорядники: СТОРОЖЕНКО Володимир Олександрович
 МЕШКОВ Сергій Миколайович
 ЛАЗОРЕНКО Олег Валерійович
 ОРЕЛ Роман Петрович

Відповідальний випусковий: О. В. Лазоренко

Авторська редакція