

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра фізики

КВАНТОВА ОПТИКА. ЯДЕРНА ФІЗИКА

Лабораторний практикум з фізики

Харків - 2014

Лабораторний практикум розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики 24 березня 2011 р., протокол № 8.

Лабораторний практикум містить опис передбачених навчальною програмою лабораторних робіт з квантової оптики і ядерної фізики, що виконуються студентами при вивченні курсу загальної фізики. У кожній лабораторній роботі наведені теоретичні відомості, перелік необхідних приладів і матеріалів, опис лабораторної установки, порядок виконання роботи і контрольні запитання для самоперевірки.

Укладачі:

проф. Р.В. Вовк,
доц. А.В. Попов, асист. К.А. Котвицька

Рецензент

доц. Н.В. Глейзер

КВАНТОВА ОПТИКА. ЯДЕРНА ФІЗИКА

Лабораторний практикум з фізики

Відповідальний за випуск Котвицька К.А.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 05.09.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ

*КВАНТОВА ОПТИКА
ЯДЕРНА ФІЗИКА*

Харків 2014

Лабораторний практикум розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики 24 березня 2011 р., протокол № 8.

Лабораторний практикум містить опис передбачених навчальною програмою лабораторних робіт з квантової оптики і ядерної фізики, що виконуються студентами при вивченні курсу загальної фізики. У кожній лабораторній роботі наведені теоретичні відомості, перелік необхідних приладів і матеріалів, опис лабораторної установки, порядок виконання роботи і контрольні запитання для самоперевірки.

Укладачі:

проф. Р.В. Вовк,
доц. А.В. Попов, асист. К.А. Котвицька

Рецензент

доц. Н.В. Глейзер

ЗМІСТ

КВАНТОВА ОПТИКА

Лабораторна робота 86/92	Градуювання шкали спектроскопа за спектром ртуті та визначення постійної Планка	4
Лабораторна робота 88	Визначення сталої Стефана-Больцмана за допомогою оптичного пірметра	13
Лабораторна робота 91	Визначення інтегральної чутливості фотоелемента	23

ЯДЕРНА ФІЗИКА

Лабораторна робота 96	Визначення довжини пробігу бета-частинок в алюмінії та їх максимальної енергії	31
--------------------------	---	----

Лабораторна робота 86/92

ГРАДУЮВАННЯ ШКАЛИ СПЕКТРОСКОПА ЗА СПЕКТРОМ РТУТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ПЛАНКА

Мета роботи: Ознайомлення з роботою спектроскопа та градуювання спектроскопа за спектром ртуті. Знаходження постійної Планка, використовуючи дисперсійну залежність $\lambda = f(\varphi)$.

Прилади і матеріали: спектроскоп (монохроматор), ртутна кварцова лампа ПРК-4, кюветка з розчином $K_2Cr_2O_7$, лампа розжарювання, трансформатор.

Теоретичні відомості

Розкладання білого світла на спектр при його проходженні через призму є наслідком дисперсії світла. *Дисперсія світла – це залежність показника заломлення речовини від довжини хвилі λ :*

$$n = f(\lambda). \quad (86.1)$$

Якщо спрямувати вузький пучок білого світла на одну з граней тригранної призми, то заломлюючись у призмі, промені виходять під різними кутами (рисунок 86.1). Найбільш відхиляються фіолетові промені, які мають найкоротшу довжину хвилі, а найменше – червоні промені, у яких довжина хвилі найбільша. Якщо на скляну призму спрямовувати вузький пучок білого світла, то на екрані виникає його спектр.

Існують три типи спектрів – лінійчасті, смугасті й суцільні.

Лінійчасті спектри випромінюються не взаємодіючими атомами простих речовин, тому їх ще називають *атомарними спектрами*. Вони складаються з окремих кольорових ліній. Лінійчасті спектри одержують коли атоми речовин шляхом розжарювання переводять у газовий стан (наприклад в електричній дузі).

Смугасті спектри, маючи вигляд окремих кольорових смуг, є спектрами випромінювання не взаємодіючих молекул даної речовини і тому називаються ще *молекулярними спектрами*.

Нагріті газу і пара породжують смугасті спектри, оскільки складаються з практично не взаємодіючих молекул.

Суцільні спектри складаються з різних кольорів, які змінюють один одного – від червоного до фіолетового. Ці спектри дають нагріті тверді тіла і рідини, а також газ під великим тиском.

Досліджування спектрів дозволяє встановити якісний склад речовини. Кількісний зміст певного елемента визначають, вимірюючи яскравість його спектральних ліній. Цей спектральний аналіз здійснюється за допомогою спеціальних приладів – спектрографів і спектрометрів.

Розглянемо будову найпростішого спектрального апарата – спектроскопа (рисунок 86.1).

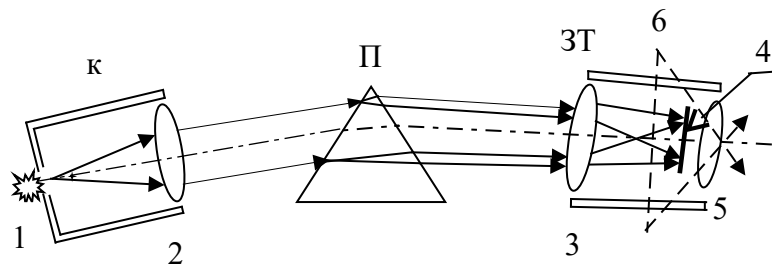


Рисунок 86.1

Він складається з трьох частин: коліматорної труби *K*, столика з призмою *П* і зорової труби *ЗТ*, що переміщується відносно призми мікрометричним гвинтом. Коліматор має щілину *1*, розміщену в головному фокусі лінзи *2*. Перед щілиною знаходиться джерело світла. Промені, які проходять крізь щілину і падають на лінзу, виходять з неї паралельним пучком і потрапляють далі на передню грань призми *П*, яка завдяки явищу дисперсії розкладає світло на спектр. Крізь об'єкти промені надходять у зорову трубу. За допомогою лінзи *3* паралельні пучки світла збираються в різних точках її фокальної площини *4*. За допомогою окуляра – лінзи *5* – ми бачимо збільшене зображення спектра *6*.

Для перетворення спектроскопа на спектрометр необхідно проградувати шкалу спектроскопа, тобто поставити у відповідність поділкам шкали спектроскопа відповідні значення

довжин хвиль. Для цього використовується у вигляді графіка залежність довжини хвилі від кута повороту барабана $\lambda = f(\varphi)$.

Для знаходження постійної Планка розглянемо природу світла. З теорії Максвелла відомо, що світло являє собою електромагнітні хвилі, які випромінюють атоми та молекули речовини. Хвильова теорія світла добре пояснювала низку таких явищ, пов'язаних з поширенням світла, як інтерференція, дифракція, поляризація та дисперсія. Однак закони теплового випромінювання – закони Стефана-Больцмана, Віна, Кірхгофа – електромагнітна теорія пояснити не змогла.

Намагаючись подолати ці труднощі німецький фізик Макс Планк у 1900 році висловив гіпотезу, що *випромінювання та поглинання світлової енергії електромагнітного поля відбувається не безперервно, а здійснюється окремими порціями – квантами світла, або фотонами.*

Енергія фотона пов'язана з його частотою ν рівнянням

$$W_{\phi} = h\nu, \quad (86.2)$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

Оскільки швидкість світла $c = \lambda \cdot \nu$, формулу (86.2) можна записати у вигляді $W_{\phi} = \frac{hc}{\lambda}$, звідки

$$h = \frac{W_{\phi}\lambda}{c}. \quad (86.3)$$

Отримання постійної Планка в цій роботі зводиться до визначення довжини хвилі λ_{\min} , яка відповідає червоній границі спектра поглинання двоокисного калію $K_2Cr_2O_7$. При цьому відбувається реакція, яка протікає з поглинанням енергії:



де W_{ϕ} – мінімальна (гранична) енергія фотона, яка необхідна для здійснення реакції (86.4). Досліди показують, що для даної речовини ця енергія дорівнює

$$W_{\phi} = 3,672 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}. \quad (86.5)$$

Довжина хвилі, котра відповідає граничній енергії, визначає границю спектра поглинання розчину двохромоокисного калію. Визначивши граничну довжину хвилі λ_{\min} , можна знайти постійну Планка h за формулою (86.3).

Експериментальна установка зображена на рисунку 86.2.

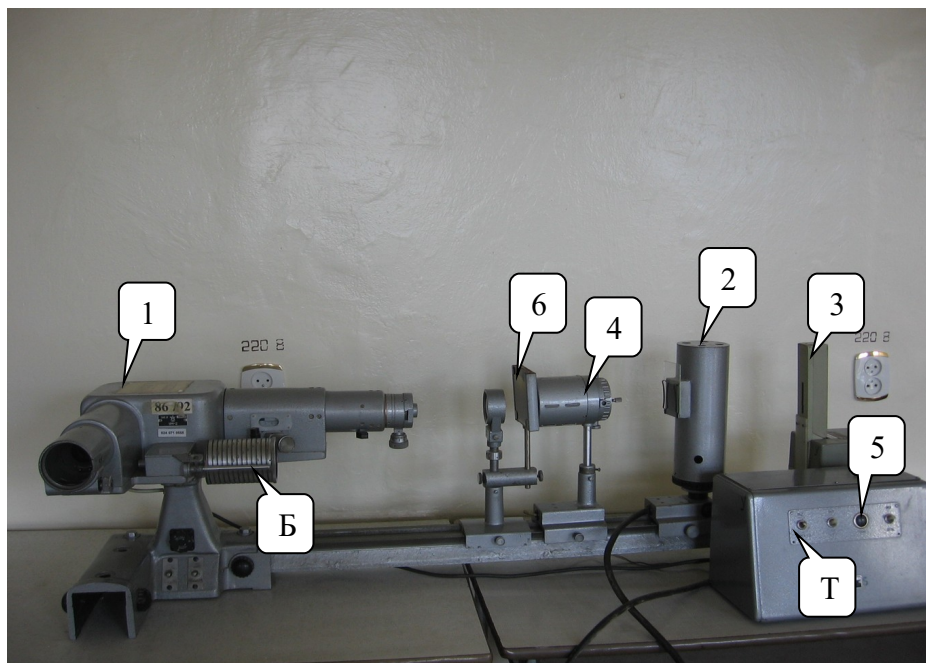


Рисунок 86.2

Вона складається з монохроматора 1, ртутної лампи 2, водневої газорозрядної трубки 3, неонові лампочки, яка знаходиться у захисному кожусі 4, блока живлення 5 та кюветки з розчином б.

Послідовність виконання роботи

А Градування спектроскопа

1 Накреслити таблицю вимірюваних величин за зразком, наведеним нижче (таблиця 86.1).

2 Розглянути будову спектроскопа. Ознайомитися з механізмами його управління.

3 Переключити тумблер T у положення ПРК-4 (дивись рисунок 86.2). Установити щілину коліматора перед вікном ртутної лампи 2. Налаштувати найкращу видимість спектра.

Добитись чіткого зображення візирного штиря за допомогою переміщення окуляра вихідного коліматора.

4 За допомогою відлікового пристрою спектроскопа для кожної лінії відомого спектра (значення довжини хвилі якої вказані у таблиці) визначити показання відлікового пристрою спектроскопа і занести їх у таблицю 86.1.

5 За даними таблиці накреслити на міліметровому папері графік залежності довжини хвилі від показання відлікового пристрою спектроскопа $\lambda = f(\varphi)$ – градуювальну криву спектроскопа.

Б Визначення постійної Планка

1 Знайти граничну довжину хвилі спектра поглинання розчину двоокисного калію $K_2Cr_2O_7$. Для цього:

– тумблер T перевести в положення $L-1$. Коліматор спектроскопа направити на нитку лампи розжарювання;

– за допомогою відлікового пристрою – барабана B (дивись рисунок 86.2) – знайти в полі зору окуляра суцільний спектр;

– розташувати кюветку з розчином $K_2Cr_2O_7$ так, щоб прозорі грані її були перпендикулярні коліматорній трубці. При цьому короткохвильова частина спектра буде поглинатися;

– за допомогою барабана B визначити положення границі області поглинання світла.

2 Використовуючи градуювальну криву спектроскопа, знайти відповідне до цієї границі значення λ_{\min} .

3 За формулою (86.3) визначити постійну Планка.

Звіт за виконану роботу

1 Робоча формула:

$$h = \frac{W_{\phi} \lambda_{\min}}{c} - \text{постійна Планка.}$$

Величини, що знаходяться за допомогою градуювальної кривої спектра:

λ_{\min} – граничне значення довжини хвилі, $[\lambda_{\min}] = \text{м.}$

Табличні величини:

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – швидкість світла у вакуумі;

$W_\phi = 3,672 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ – енергія фотона, яка необхідна для здійснення реакції.

Величини, що обчислюються:

h – постійна Планка, $[h] = \text{Дж} \cdot \text{с}$.

2 Результати експерименту.

Таблиця 86.1

	Колір лінії	Довжина хвилі λ , нм	Відлік за шкалою φ , поділки
1	Червона – 1	708	
2	Червона – 2	690	
3	Червона – 3	623	
4	Червона – 4	612	
5	Червона – 5	607	
6	Жовта – 1	579	
7	Жовта – 2	577	
8	Зелена	546	
9	Блакитна – 1	492	
10	Блакитна – 2	456	
11	Темно-блакитна – 1	436	
12	Фіолетова – 1	411	
13	Фіолетова – 2	408	

Контрольні питання

- 1 Що називається дисперсією світла? Навести приклади цього явища.
- 2 Що таке спектр випромінювання речовини?
- 3 Накреслити принципову схему спектроскопа. Пояснити хід променів у спектроскопі.
- 4 Що таке спектральний аналіз? Для чого він застосовується?
- 5 У чому полягає градування спектроскопа?
- 6 Які джерела світла використовуються в даній роботі? Які спектри вони дають? Чим вони відрізняються один від одного?
- 7 Сформулювати гіпотезу М.Планка.
- 8 Що таке фотон? Навести формулу для знаходження енергії фотона.
- 9 У чому полягає корпускулярно-хвильовий дуалізм властивостей світла?

Література [1]

Лабораторна робота 88

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА

Мета роботи: ознайомитися з будовою та принципом роботи оптичного пірометра, визначити за його допомогою постійну Стефана-Больцмана.

Прилади і матеріали: змонтоване на планшеті електричне коло, оптичний пірометр, кінолампа, лабораторне джерело живлення (ЛПП–1), реостат, вольтметр, амперметр; аркуш міліметрового паперу.

Теоретичні відомості

Тепловим називається електромагнітне випромінювання, яке відбувається за рахунок хаотичного, теплового руху молекул речовини. Фізична природа такого процесу полягає в перетворенні енергії теплового руху молекул і атомів речовини в енергію електромагнітного випромінювання.

Згідно із законом Стефана-Больцмана енергетична світність чорного тіла R_T прямо пропорційна четвертому степеню абсолютної температури тіла:

$$R_T = \sigma T^4, \quad (88.1)$$

де $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – стала Стефана-Больцмана.

Енергетична світність, або інтегральна випромінювальна здатність R_T , – це кількість енергії W , яка випромінюється з одиниці площі S за одиницю часу t хвилями всіх довжин:

$$R_T = \frac{W}{S \cdot t}, \quad (88.2)$$

$$[R] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Якщо випромінювання чорного тіла виникає в середовищі з температурою T_0 , то втрата тілом енергії внаслідок випромінювання буде дорівнювати

$$R_T = \sigma(T^4 - T_0^4). \quad (88.3)$$

Основними джерелами світла є розжарені тіла. Так як вони не є чорними, то для них у закон Стефана-Больцмана вводиться коефіцієнт k , числове значення якого визначається експериментально. Тобто

$$R_T = k\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (88.4)$$

де k – коефіцієнт, який визначається як відношення інтегральної випромінювальної здатності даного тіла R_T до інтегральної випромінювальної здатності чорного тіла R_T^* :

$$k = \frac{R_T}{R_T^*}.$$

Для вимірювання високих температур широко застосовуються оптичні методи, засновані на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Прилади, що служать для визначення температури на основі вимірювань теплового випромінювання, називаються *оптичними пірометрами*, а галузь експериментальної фізики, яка розробляє принципи вимірювання температури оптичними методами, носить назву *оптичної пірометрії*.

Теплове випромінювання нагрітих тіл може різними способами використовуватися для вимірювання їх температури. Один із способів, заснований на порівнянні яскравості нагрітого тіла з яскравістю чорного тіла в тому ж спектральному інтервалі, має найбільше технічне поширення. Такі пірометри називаються *пірометрами із зникаючою ниткою*.

Яскравістю джерела світла B_φ називається відношення потоку променистої енергії $d\Phi$, надісланої в даному напрямку φ одиницею поверхні цього джерела S всередину малого тілесного кута $d\Omega$, до величини цього тілесного кута (рисунок 88.1).

$$B_\varphi = \frac{d\Phi}{S \cos \varphi d\Omega}. \quad (88.5)$$

Припустимо, що ми маємо чорне тіло, яке нагріто до деякої температури, а на його фоні розташована нитка розжарення

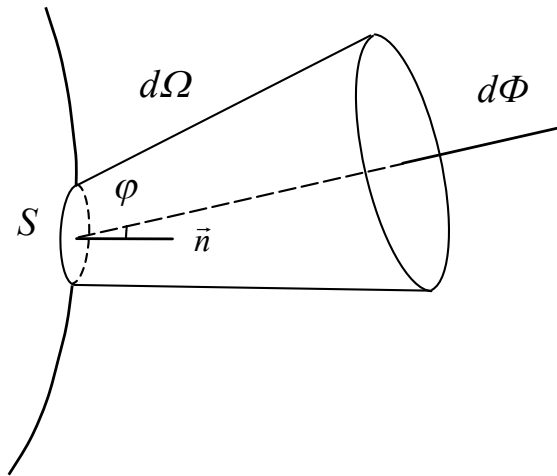


Рисунок 88.1

спеціальної пірометричної лампи. Ми розглядаємо нитку і тіло через світлофільтр, що виділяє із спектрів обох об'єктів випромінювання певної довжини хвилі (зазвичай це буває випромінювання з довжиною хвилі 660 нм). Регулюючи струм розжарення у нитці лампи, ми можемо досягти того, що нитка перестане бути

видимою – зникне на тлі розжареного чорного тіла. Це матиме місце, коли яскравості чорного тіла і нитки для використовуваної довжини світлової хвилі зрівняються. Знаходячи значення сили струму розжарення нитки за цих умов, а також вимірявши температуру чорного тіла яким-небудь іншим способом – за допомогою термометра опору, термопари і тому подібне – і виконавши цю операцію при різних температурах, ми прокалібруємо таким чином у шкалі температур яскравість нитки залежно від струму напруження. Після цього нитку лампи можна застосовувати у свою чергу як термометр.

Допустимо, що нам треба виміряти температуру якого-небудь нагрітого тіла. Помістимо прокалібровану нитку на тлі цього тіла та, змінюючи в ній струм розжарення I , будемо домагатися її зникання. Користуючись калібрувальним графіком, ми можемо знайти відповідну цьому струму температуру чорного тіла. Якщо випромінювання нашого тіла відрізняється від випромінювання чорного тіла, то знайдене значення температури потребує деякої поправки, оскільки воно відповідає не дійсній, а *яскравісній температурі*. Під нею розуміється *температура чорного тіла, яке для $\lambda = 600$ нм має ту ж саму яскравість, що і дане нам тіло за умов спостереження*.

Яскравісна температура тіла $T_{яскр}$ буде завжди нижча за його термодинамічну температуру T , оскільки згідно із законом

Кірхгофа будь-яке тіло випромінює при тій же температурі менше, ніж чорне тіло. Отже, довільне тіло, що має в даний момент однакову з чорним тілом яскравість (для певної довжини хвилі), має термодинамічну температуру, вищу за температуру чорного тіла, тобто вищу за ту температуру яскравості, яка визначається за допомогою пірометра.

Відмінність між температурами яскравісною й термодинамічною може бути значною. Зв'язок між ними встановлюється співвідношенням

$$T = T_{\text{яскр}} + \Delta T, \quad (88.6)$$

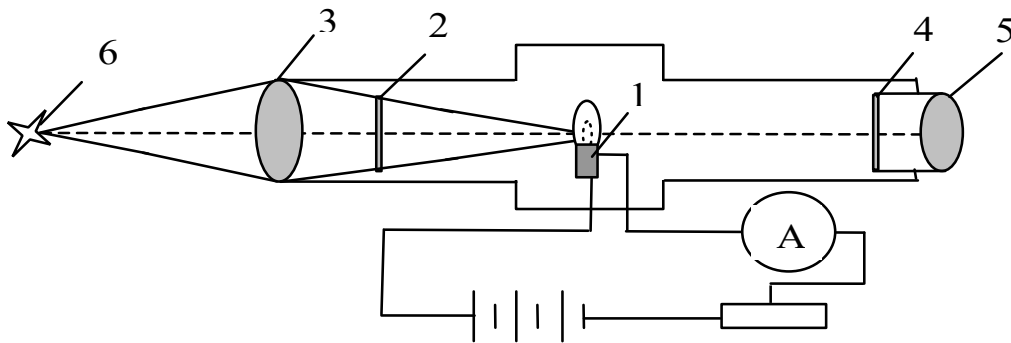
де

$$\Delta T = \alpha T_{\text{яскр}}^2. \quad (88.7)$$

Коефіцієнт пропорційності α залежить від природи випромінюючого тіла та визначається з досліду. Зокрема для вольфраму

$$\alpha = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Схема пірометра, описаного вище, наведена на рисунку 88.2. Об'єктив пірометра 3 проектує зображення досліджуваного тіла в площину розташування нитки напруження пірометричної лампи 1. Нитка напруження лампи має форму петлі або підкови. Нитка і зображення досліджуваного об'єкта, що дається об'єктивом, розглядаються спостерігачем через окуляр 5. У цьому ж окулярі розташований червоний світлофільтр 4, проникний для світла певної довжини хвилі $\lambda = 600$ нм. Цей світлофільтр може виводитися з поля зору обертанням рифленого кільця на окулярі пірометра для зручності фокусування об'єкта в білому світлі.



1 – еталонна лампочка; 2 – діафрагма; 3 – об’єктив;
4 – світлофільтр; 5 – окуляр; 6 – кінолампа

Рисунок 88.2

Окрім червоного світлофільтра, в пірометрі є ще один червонуватий світлофільтр 4, показаний на рисунку 88.2. Він призначений для попереднього ослаблення яскравості досліджуваних тіл, температура яких перевищує 1400°C , оскільки при таких температурах нитка лампи починає інтенсивно випаровуватися. При введеному захисному світлофільтрі за допомогою нашого пірометра можна вимірювати температуру тіл, нагрітих до 2000°C , для чого пірометр забезпечений другою шкалою температур, проградуєваною відповідним чином.

Описаний пірометр має різні конструктивні втілення. Одне з них – пірометр конструкції Гартмана і Брауна, показаний на рисунку 88.3.

У наукових дослідженнях застосовуються й інші види пірометрів – радіаційні, що вимірюють *радіаційну температуру*, пірометри, що вимірюють так звану *колірну температуру*. Усі вони набагато менш зручні для практичного використання і тому не знайшли широкого вживання.

Рисунок 88.3

Опис установки

Лабораторна установка подана на рисунку 88.4. Установка складається з оптичного пірометра 1 , кінолампи 2 , амперметра 3 , вольтметра 4 та реостата 5 . Ці елементи з'єднані в ланцюг, електрична схема якого наведена на рисунку 88.5.

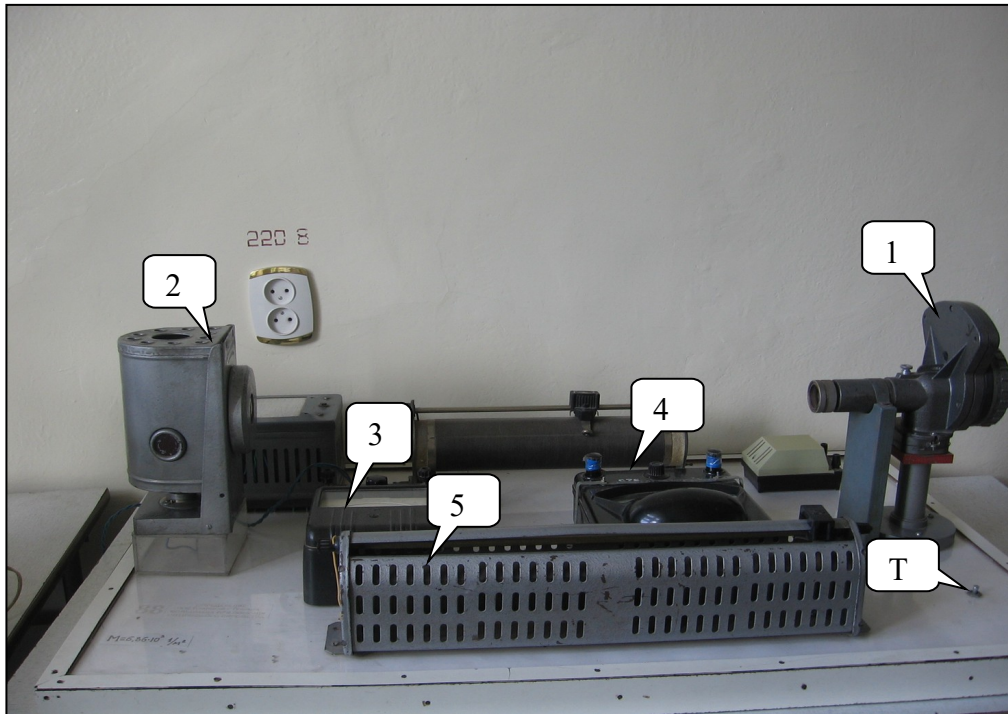


Рисунок 88.4

За допомогою амперметра A та вольтметра V знаходять силу струму I та напругу U на джерелі світла – кінолампи L , яка є досліджуваним тілом.

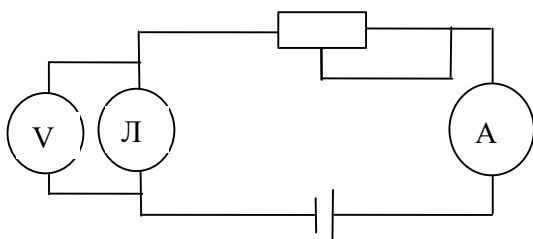


Рисунок 88.5

Відлік температури за шкалою пірометра роблять тоді, коли яскравості нитки розжарення еталонної лампочки пірометра і поверхні досліджуваного тіла будуть однаковими (рисунок 88.6).

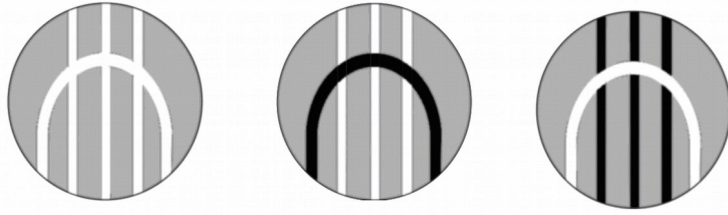


Рисунок 88.6

Якщо підведена енергія витрачається тільки на випромінювання, то потужність струму дорівнює

$$P = IU = \sigma(T^4 - T_0^4) \cdot S, \quad (88.8)$$

де T – температура спіралі лампи; T_0 – кімнатна температура;
 S – площа.

Оскільки спіраль не є чорним тілом, це враховується за допомогою коефіцієнта k . Підведена до лампи енергія випромінюється не повністю, тому (88.8) слід записати у вигляді

$$K' \cdot IU = k \sigma S(T^4 - T_0^4), \quad (88.9)$$

де K' – коефіцієнт, що показує, яка частка енергії іде на випромінювання. Коефіцієнти K' , k та площу S можливо замінити єдиним множником M :

$$M = \frac{K'}{kS}, \quad [M] = \text{м}^{-2}. \quad (88.10)$$

В області температур $\sim 1000 \text{ К}$ T_0^4 складає приблизно 0,25% від T^4 , тому ним можна знехтувати. Тоді з (88.9) та (88.10) отримуємо

$$M \cdot IU = \sigma T^4. \quad (88.11)$$

З цього співвідношення можливо знайти коефіцієнт Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{M \cdot IU}{T^4}, \quad [\sigma] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \quad (88.12)$$

Порядок виконання роботи

1 Підготувати пірометр до роботи. Для цього:

- при вимкненому живленні пірометра перевірити “0” стрілки пірометра, повернувши дисковий регулятор на пірометрі в крайнє ліве положення;
- перевести тумблер T у положення „вкл.”;
- встановити в пірометрі червоний (димчастий) світлофільтр.

2 Установити за допомогою реостата силу струму в кінолампі $I = 1\text{ А}$ та виміряти напругу U за допомогою вольтметра.

3 Регулятором пірометра встановлювати розжарення еталонної лампочки таким, щоб яскравість її нитки збігалася з яскравістю нитки кінолампки.

4 Знайти температуру t за шкалою пірометра та перерахувати її значення в температуру за Кельвіном T .

5 Результати вимірювань і розрахунків записати в таблицю 88.1.

6 Повторити пункти 2-3 для значення сили струму 1,1 А; 1,2 А; 1,3 А; 1,4 А.

7 За даними таблиці накреслити на міліметровому папері графік залежності добутку MIU від T^4 : $MIU = f(T^4)$.

8 За графіком знайти постійну Стефана-Больцмана. Визначити за формулою тангенс α кута нахилу прямої (рисунок 88.7):

$$\operatorname{tg} \alpha = \sigma = \frac{\Delta(M \cdot IU)}{\Delta(T^4)}. \quad (88.13)$$

9 Підготувати відповіді на контрольні питання.

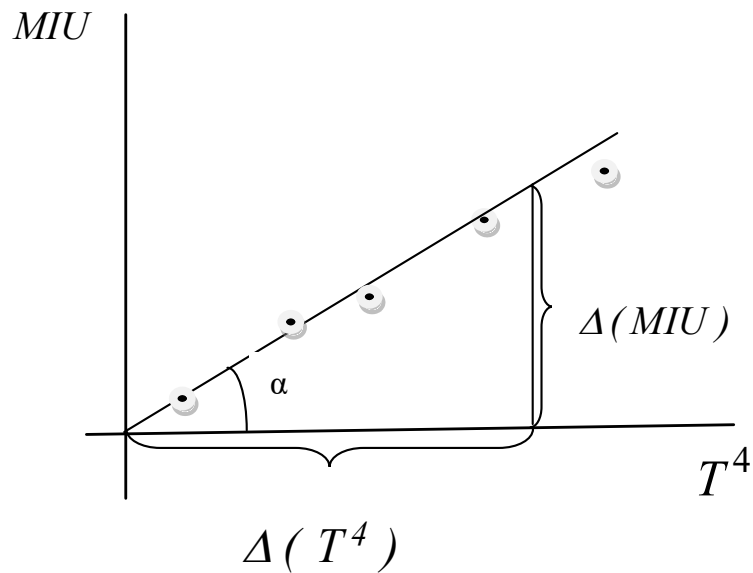


Рисунок 88.7

Звіт за виконану роботу

1 Робоча формула:

$$\sigma = \frac{\Delta(MIU)}{\Delta(T^4)}, \quad [\sigma] = \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}.$$

2 Величини, що вказані на установці:

$$M = 6,86 \cdot 10^3 м^{-2}.$$

3 Результати експерименту

Таблиця 88.1

дослід- номер	Сила струму кінолампи $I, А$	Різниця потенціалів $U, В$	Температура пірометра		MIU	T^4 $К^4$	Потійна Стефана- Больцмана $\sigma = \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$
			$t, ^\circ C$	$T, К$			
1							
2							
3							
4							
5							

Контрольні питання

1 Що таке люмінесценція? Які види люмінесценції вам відомі?

2 Чим відрізняється теплове випромінювання від люмінесценції?

3 Що називається енергетичною світністю тіла? Спектральною щільністю випромінювання? Нарисувати графік залежності спектральної щільності випромінювання тіла від довжини хвилі.

4 Сформулювати закон Кірхгофа. Що називається чорним тілом?

5 Навести формулювання закону Стефана-Больцмана.

6 Що стверджує закон зміщення Віна?

7 Записати формулу Релея-Джинса. При яких значеннях частоти вона збігається з експериментом?

8 Яку гіпотезу висунув М. Планк для пояснення ходу кривої спектральної щільності випромінювання чорного тіла?

9 Яке значення мало відкриття Планком дискретності випромінювання енергії для подальшого розвитку фізики мікросвіту?

10 Для чого призначені оптичні прилади, що називаються пірометрами, і який принцип їх дії?

11 Що називається яскравісною температурою тіла? Дати розгорнуту характеристику цьому поняттю.

Література [1]

Лабораторна робота 91

ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ФОТОЕЛЕМЕНТА

Мета роботи: вивчення принципу роботи фотоелемента та визначення його чутливості.

Прилади та матеріали: лабораторна установка для вивчення залежності фотоструму від освітленості, що включає в себе напівпровідниковий фотоелемент, лампочку розжарювання, джерело живлення (знижувальний трансформатор), стрілковий гальванометр, аркуш міліметрового паперу.

Теоретичні відомості

Фотоелемент – пристрій, у якому в результаті поглинання енергії падаючого на нього світла виникає ЕРС або електричний струм.

У фотоелементах використовується явище *фотоефекту*, яке полягає у вибиванні електронів з поверхні твердих тіл під дією падаючого випромінювання. Це явище називається *зовнішнім фотоефектом*.

Фотоефект називається *внутрішнім*, якщо електрони не покидають тверде тіло, а залишаються всередині нього як вільні заряди, які беруть участь у створенні в ньому електричного струму. Внутрішній фотоефект спостерігається в напівпровідниках. Енергія падаючого на напівпровідник світла витрачається на перенесення електронів з валентної зони в зону провідності (рисунок 91.1). Роль *виходу* електронів з тіла при зовнішньому фотоефекті відіграє тут *ширина* забороненої зони напівпровідника ΔW , яка визначає мінімальну частоту світла ν_{\min} , нижче

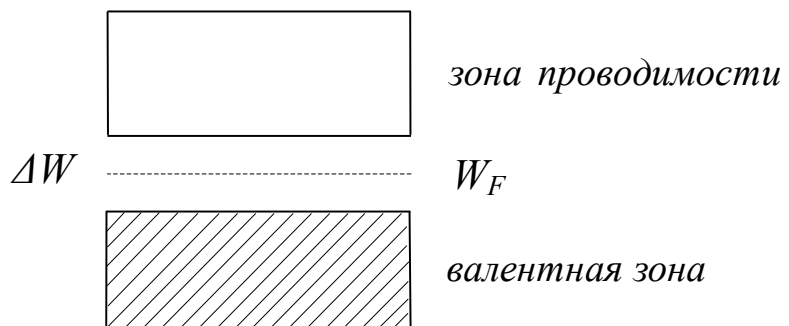


Рисунок 91.1

якої фотоелемент не спостерігається. Ця частота називається *червоною межею фотоелементу* і знаходиться з умови

$$h\nu_{\min} = \Delta W.$$

У даній лабораторній роботі досліджується сірчисто-срібний фотоелемент, схематично зображений на рисунку 91.2. Верхній напівпрозорий електрод 1 являє собою дуже тонкий шар провідника (металевого срібла), нанесений випаруванням у вакуумі на шар напівпровідника 3 (сірчистого срібла). Між провідником і напівпровідником утворюється проміжний шар 2, який називають *запінним шаром*. Запінний шар має властивість пропускати електрони тільки в одному напрямку (у нашому випадку від металу до напівпровідника), тобто є *електронним вентиляем*.

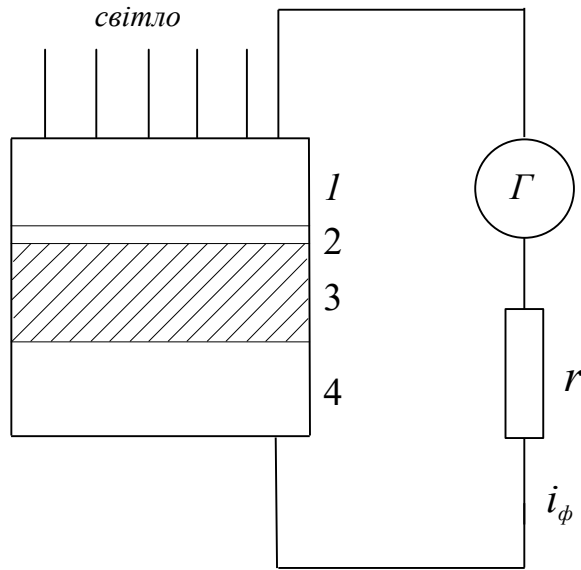


Рисунок 91.2

При освітленні фотоелемента світлова енергія частково поглинається електронами металевих напівпрозорих електродів, а частково – електронами напівпровідника.

Завдяки вентилювальним властивостям запінного шару енергетично збагачені електрони при своєму хаотичному русі частіше переходять з металу в напівпровідник, ніж у зворотному напрямку. Таким чином, падаюче на фотоелемент світло викликає рух електронів усередині фотоелемента від верхнього електрода 1 через запінний шар 2 до напівпровідника 3 та нижнього електрода 4. У результаті цього на верхньому електроді фотоелемента з'являється надлишковий позитивний, на нижньому електроді - надлишковий негативний заряд.

У замкненому ланцюзі, зображеному на рисунку 91.2, фотоелемент виступає в ролі джерела струму (фотоелементу), сила

якого i_{δ} залежить від освітленості поверхні фотоелемента – чим вона більша, тим більший фотострум. Кількісною характеристикою цієї залежності служить *чутливість фотоелемента* η . Вона показує швидкість зміни фотоструму зі зростанням інтенсивності світла і чисельно дорівнює відношенню приросту фотоструму Δi_{δ} до приросту світлового потоку $\Delta \Phi$, падаючого на фотоелемент:

$$\eta = \frac{\Delta i_{\delta}}{\Delta \Phi}. \quad (91.1)$$

Світловим потоком Φ через поверхню S називається енергія електромагнітного випромінювання W , що переноситься світлом через цю поверхню за одиницю часу:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}. \quad (91.2)$$

Світловий потік, який припадає на одиницю поверхні при нормальному падінні світла, називається *освітленістю* E цієї поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S_{\perp}}. \quad (91.3)$$

У свою чергу освітленість E виражається через силу світла I , що випускається джерелом світла:

$$E = \frac{I}{l^2}, \quad (91.4)$$

де l – відстань від джерела до освітлюваної ним поверхні.

Сила світла вимірюється в *канделах* *:

$$[I] = \text{кд};$$

* Одиниця сили світла – *кандела* – є однією з основних одиниць системи СІ. 1 кд – сила світла, що випускається з поверхні $S = 1/600000 \text{ м}^2$ повного випромінювача у напрямку нормалі при температурі плавлення платини $2046,6 \text{ К}$ і тиску 101325 Па .

освітленість – в люксах:

$$[E] = \text{лк};$$

світловий потік - в люменах:

$$[\Phi] = \text{лм}.$$

Згідно з (91.4), освітленість поверхні становить I лк, якщо джерело світла силою I кд знаходиться від неї на відстані 1 м:

$$I \text{ лк} = I \text{ кд} / 1\text{м}^2.$$

Така освітленість спостерігається у випадку, коли світловий потік в I лм падає нормально на поверхню площею 1 м²:

$$I \text{ лк} = I \text{ лм} / 1\text{м}^2.$$

Чутливість фотоелемента η (її середнє значення в деякому інтервалі освітленостей) можна знайти за графіком залежності сили фотоструму від світлового потоку $i_{\phi} = f(\Phi)$ (див. рисунок 91.3).

Чутливість вимірюється силою фотоструму i_{ϕ} , вираженою в амперах (А), обумовленою світловим потоком Φ в I лм. Одиниця її вимірювання

$$[\eta] = \text{А} / \text{лм}.$$

Опис установки

Експериментальна установка зображена на рисунку 91.4, а її електрична схема – на рисунку 91.5. Фотоелемент ΦE , захищений від зовнішнього освітлення металевією трубкою T , закріплений нерухомо на підставці. Клеми його з'єднані зі стрілковим гальванометром G . Тумблер $TБ$ служить для ввімкнення установки.

Усередині металевієї трубки може переміщуватись електрична лампочка (не показана на рисунку), закріплена в трубці меншого діаметра. Лампочка живиться від знижувального трансформатора TR .

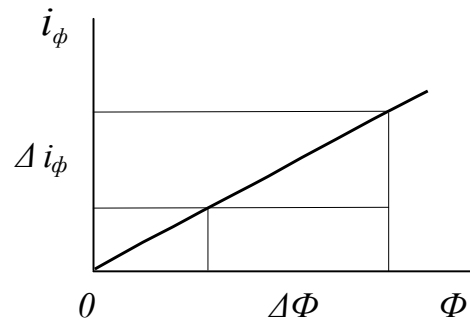


Рисунок 91.3

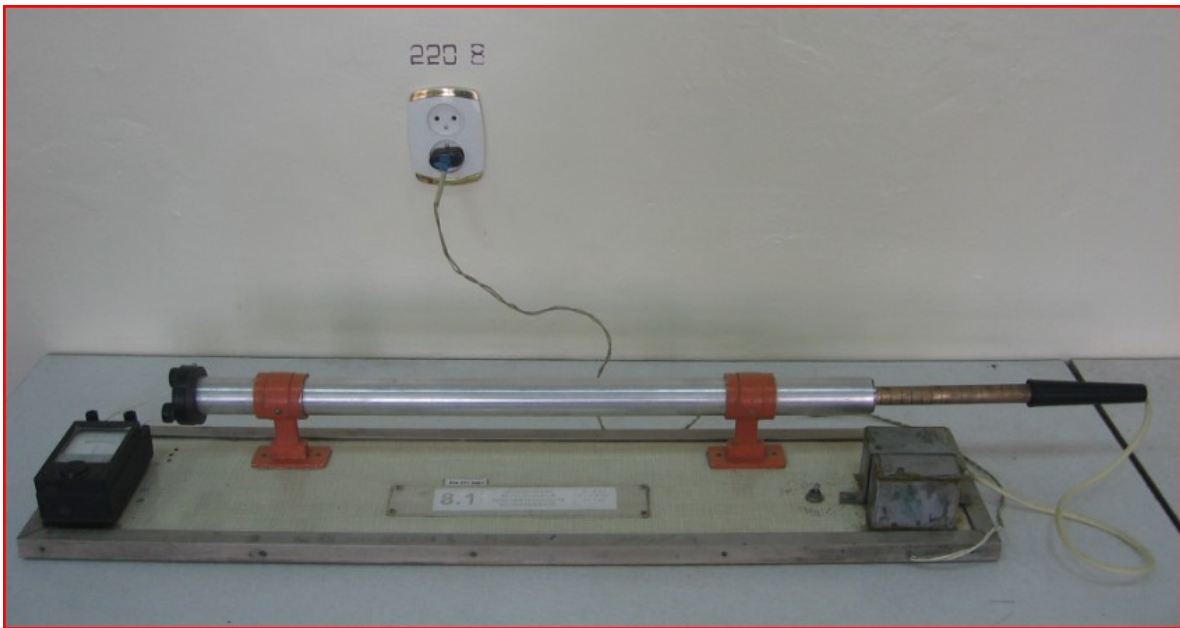


Рисунок 91.4

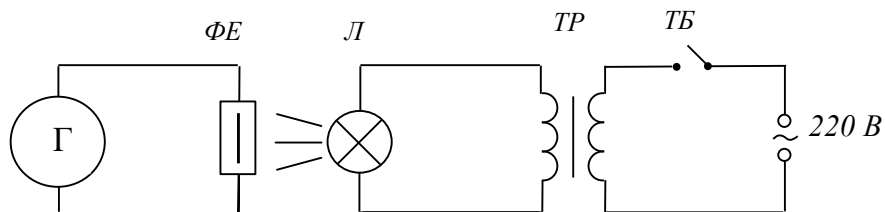


Рисунок 91.5

Переміщуючи тонку трубку уздовж своєї довжини, ми змінюємо освітленість фотоелемента. Записуючи показання гальванометра при різних положеннях лампочки, будуємо графік залежності $i_{\phi} = f(\Phi)$, схематично зображений на рисунку 91.3. На цьому

графіку вибираємо лінійну ділянку і будуємо прямокутний трикутник з катетами Δi_{ϕ} і $\Delta \Phi$. Значення довжин цих катетів підставляємо у формулу (91.1) і знаходимо числове значення інтегральної чутливості фотоелемента.

Порядок виконання роботи

1 За допомогою тумблера ТБ ввімкнути трансформатор, що живить лампочку і, переміщуючи трубку з лампочкою усередині трубки з фотоелементом, встановити таке значення фотоструму, щоб стрілка гальванометра вказувала на 20-ту поділку його шкали.

За допомогою міліметрової лінійки виміряти відстань x , на яку висунута трубка з лампочкою. Відстань l між лампочкою і фотоелементом знаходиться з умови

$$l = x + R,$$

де R – мінімальна відстань між ними (вказана на панелі установки).

Дані записати в таблицю 91.1.

2 Переміщуючи трубку з лампочкою, встановити стрілку гальванометра послідовно на 18, 16, ... 4-ту, 2-гу поділки його шкали, щоразу вимірюючи відстань l лампочки від фотоелемента.

3 Дані досліду занести до таблиці 91.1. Значення фотоструму у 2-му стовпці таблиці знаходять множенням показань гальванометра (числа поділок n , на яке вказує стрілка) на ціну однієї поділки його шкали C , яка на цій шкалі наведена. Тоді

$$i_{\phi} = n \cdot C, \quad [i_{\phi}] = A.$$

4 Використовуючи формули (91.4) і (91.3), обчислити значення освітленості E і світлового потоку Φ і занести їх до таблиці. (Числові значення площі поверхні фотоелемента S і сили світла I вказані на панелі установки).

5 Побудувати на міліметровому папері графік залежності $i_{\delta} = f(\Phi)$. Використовуючи лінійну ділянку кривої, побудувати трикутник, співвідношення катетів якого, згідно з (91.1), дорівнює інтегральній чутливості фотоелемента η .

6 Підготувати відповіді на наведені нижче контрольні питання.

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули для визначення освітленості E , світлового потоку Φ та інтегральної чутливості фотоелемента η :

$$E = \frac{I}{l^2}, \quad [E] = \text{кд/м}^2 = \text{лк};$$

$$\Phi = E \cdot S, \quad [\Phi] = \text{лм};$$

$$\eta = \frac{\Delta i_{\delta}}{\Delta \Phi}, \quad [\eta] = \text{А/лм}.$$

2 Дані, наведені на панелі установки:

мінімальна відстань від лампочки до фотоелемента

$$R = 8 \text{ см};$$

сила світла лампочки

$$I = 2 \text{ кд};$$

площа чутливої поверхні фотоелемента

$$S = 1,8 \text{ см}^2;$$

ціна поділки шкали гальванометра

$$C = 5 \cdot 10^{-8} \text{ А/поділ}.$$

3 Результати експерименту.

Таблиця 91.1

Показання гальванометр а n , поділки	Фото- струм $i_{\phi} = n \cdot C$, А	Відстань від лампочки до фотоелемента l , м	Освітленість $E = \frac{I}{l^2}$, лк	Світловий потік $\Phi = E \cdot S$, лм
20				
18				
16				
14				
12				
10				
8				
6				
4				
2				

Контрольні питання

- 1 У чому полягає явище фотоефекту?
- 2 Що таке внутрішній фотоефект?
- 3 Що таке червона межа фотоефекту?
- 4 Пояснити, у чому полягає відмінність між металами і напівпровідниками з точки зору зонної теорії електропровідності твердих тіл.
- 5 Яку властивість має контакт металу з напівпровідником? Що таке електронний вентиль?
- 6 Який пристрій називається фотоелементом? Яке практичне застосування знаходять фотоелементи?
- 7 Дати визначення світлового потоку, освітленості і сили світла. У яких одиницях вони вимірюються?
- 8 Що називається інтегральною чутливістю фотоелемента? Як її можна виміряти?

Література [1,2]

Лабораторна робота 96

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ПРОБІГУ БЕТА-ЧАСТИНОК В АЛЮМІНІЇ ТА ЇХ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

Мета роботи: ознайомитися з одним із методів вимірювання енергії β -частинок, що виникають при радіоактивному розпаді, і визначити дослідним шляхом довжину їх пробігу в алюмінії.

Прилади та матеріали: лабораторна установка для вивчення залежності інтенсивності потоку β -випромінювання від товщини поглинального шару металу, що включає в себе джерело β -частинок і лічильник Гейгера; набір алюмінієвих пластинок, штангенциркуль, електронний секундомір; аркуш міліметрового паперу.

Теоретичні відомості

Ядра атомів речовин складаються з протонів і нейтронів. Маса їх однакові і приблизно в 1840 разів перевищують масу електрона, яка становить $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Частинка протон має позитивний заряд, рівний за модулем заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Нейтрон – нейтральна частинка. Обидві вони називаються *нуклонами*.

Ядра атомів бувають стабільні (стійкі) і нестабільні. Нестабільні ядра через деякий час спонтанно (мимовільно) розпадаються, випускаючи елементарні частинки (електрони, позитрони, мюони, нуклони), α -частки (ядра атома гелію) або інші легкі ядра, і перетворюються в ядра інших елементів. *Властивість ядер атомів розпадатися називається радіоактивністю, а самі ядра – радіоактивними.*

Розрізняють природну радіоактивність ядер, які існують у природі, і радіоактивність штучну – розпад ізотопів, отриманих у лабораторних умовах. (*Ізотопами називаються ядра одного і того ж елемента, які мають у своєму складі різне число нейтронів*).

Розпад ядер з випусканням електронів (e^-) або позитронів (e^+) називається відповідно *електронним* або *позитронним β -розпадом*. (Позитрон – частинка, аналогічна електрону, заряд якої позитивний). Розпад ядер з випусканням ядер атома гелію називається *α -розпадом*. Інтенсивність α - і β -випромінювання може бути виміряна за допомогою лічильника Гейгера.

Лічильник Гейгера складається з датчика і лічильника числа частинок, які потрапляють у датчик. Датчик, що являє собою наповнений газом при невеликому тиску циліндричний конденсатор, зображений на рисунку 96.1. Однією обкладкою конденсатора служить циліндр C , а другою – тонкий металевий

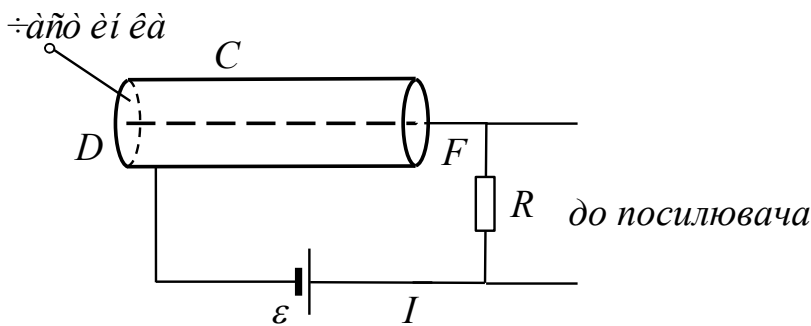


Рисунок 96.1

дріт DF , що проходить по осі циліндра. Між ниткою і циліндром за допомогою джерела ЕРС ε створюється електричне поле такої напруженості, при якій у газі може

виникнути електричний струм, тобто початися *самостійний розряд*. Струм виникає, якщо в просторі між електродами з'являються вільні заряди – *електрони і позитивні йони*, які утворюються в результаті іонізації молекул газу під дією швидкої зарядженої частинки. В електричному полі йони, що утворилися, рухаються прискорено і за час між двома послідовними зіткненнями з молекулами газу набувають енергії, достатньої для їх іонізації. При зіткненні йонів з молекулами виникають нові йони й електрони, які беруть участь у нових актах іонізації молекул.

Струм у ланцюзі I різко зростає, у результаті чого збільшується і напруга $U_R = IR$ на ввімкненому в ланцюг резисторі R . Оскільки сума напруг на резисторі U_R і циліндричному датчику $U_{\text{дгг}}$ постійна і дорівнює ЕРС джерела

$$\mathcal{E} = U_{\delta e e} + U_R,$$

зростання U_R веде до зменшення напруги $U_{\delta e e}$ між ниткою і циліндром датчика. При цьому самостійний розряд припиняється і лічильник готовий до прийому наступної зарядженої частинки. Стрибок напруги на резисторі R фіксується за допомогою лічильника числа частинок.

Процеси, які виникають при проходженні заряджених частинок через речовину, мають дуже важливе практичне значення. Без знання цих процесів не можна зрозуміти методи реєстрації ядерних частинок або, наприклад, розрахувати товщину бетонної стіни для радіаційного захисту прискорювача частинок від ядерних випромінювань.

Загальна картина проходження частинок високої енергії через речовину дуже складна. Частинки зіштовхуються з електронами атомів, розсіюються кулонівськими полями ядер.

За механізмом проходження через речовину частинки можна розділити на важкі та легкі заряджені частинки. До легких належать *електрони і позитрони*, до важких – всі інші: *мюони, протони, α -частинки, ядра атомів*.

Важка частинка, пролітаючи через речовину, "розштовхує" електрони атомів своїм кулонівським полем, поступово втрачає свою енергію і зупиняється. Маючи велику масу, вона мало відхиляється від свого шляху при зіткненні з електронами. Тому траєкторія важкої зарядженої частинки в речовині практично прямолінійна.

Однією з величин, що характеризують проходження частинок через речовину, є *повний пробіг R* . При цьому під R в ядерній фізиці розуміють добуток довжини пробігу частинки d на щільність ρ речовини, у якій вона рухається:

$$R = \rho \cdot d, \quad [R] = \text{г/см}^2. \quad (96.1)$$

Ця величина служить мірою товщини затримуючого шару речовини і виявляється приблизно однаковою для всіх речовин.

Для важких частинок основними є втрати за рахунок іонізації і збудження атомних електронів речовини. Ці втрати носять назву *іонізаційних*.

Проходження через речовину легких частинок - електронів і позитронів – через їхні невеликі маси приводить до значного відхилення їх від первісного напрямку руху, а при зіткненнях може породжувати кванти електромагнітного випромінювання. Це випромінювання називається *гальмівним*, а втрати енергії електрона на гальмівне випромінювання називаються *радіаційними*.

Інтенсивність гальмівного випромінювання, тобто кількість енергії, яка випромінюється за секунду, для частки, що рухається з прискоренням, зворотно пропорційна квадрату маси частинки. Звідси випливає, що радіаційні втрати важливі тільки для електронів, але не для важких частинок. Радіаційні втрати лінійно зростають з енергією і, починаючи з деякої критичної енергії $W_{\epsilon\delta}$, стають переважними. Ця енергія

$$W_{\epsilon\delta} \approx 800/Z \text{ MeV.} \quad (96.2)$$

(1 електронвольт – енергія $W = eU$, яку отримує електрон, що пройшов прискорюючу різницю потенціалів $U = 1 \text{ В}$: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Розглянемо тепер питання про шлях, який проходить заряджена частинка в речовині. На рисунках 96.2 і 96.3 зображена залежність числа частинок n , що пройшли через шар речовини за 1 хв, від товщини шару x .

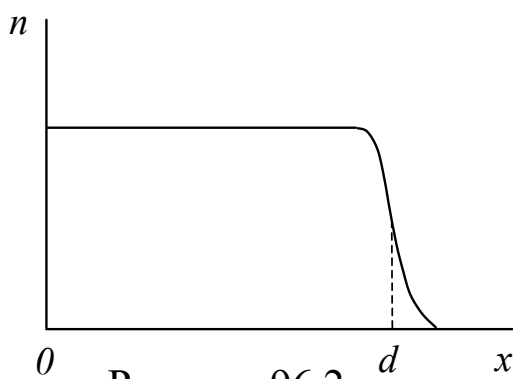


Рисунок 96.2

Рисунок 96.2

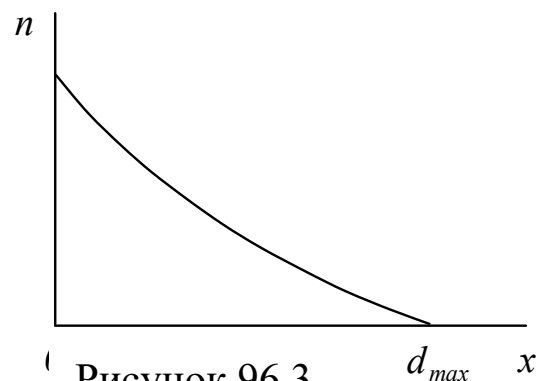


Рисунок 96.3

Рисунок 96.3

Для важких частинок (рисунок 96.2) крива цієї залежності спочатку йде горизонтально (всі частинки проходять шар

наскрізь), а при товщині d , що дорівнює пробігу, різко спадає до нуля. Для електронів ця крива із збільшенням товщини шару спадає до нуля плавно (рисунок 96.3), оскільки шлях електрона в речовині – ламана крива і чим товщій шар, тим складніше електрону пройти його по прямій лінії. Тому для електронів вводять поняття максимального пробігу.

Максимальним пробігом називається мінімальна товщина шару речовини, у якому затримуються всі електрони. Очевидно, що максимальний пробіг збігається з довжиною криволінійного шляху, який електрон проходить у речовині.

Теоретично розрахувати максимальний пробіг R_{max} важко. Тому для оцінок зазвичай користуються таблицями та напівемпіричними формулами. Для моноенергетичних електронів з енергією $W < W_{e\delta}$ добре діє проста формула

$$R_{max} = \rho \cdot d_{max} = 0,526 W_{max} - 0,24, \quad (96.3)$$

де енергія W виражена в мегаелектронвольтах (MeV), а R_{max} - в грамах на квадратний сантиметр (г/см^2); d_{max} – товщина шару речовини, яка повністю затримує потік електронів.

Звідси можна знайти максимальну енергію β -частинок:

$$W_{max} = (R_{max} + 0,24) / 0,526. \quad (96.4)$$

Числове значення d_{max} знаходять екстраполяцією до осі X графіка залежності числа частинок, які пройшли через шар речовини від товщини цього шару x (див. рисунок 96.3).

Опис установки

Експериментальна установка зображена на рисунку 96.4. Вона складається з масивного циліндричного захисного корпусу, всередині якого розташовуються джерело β -частинок і датчик лічильника Гейгера. Зліва від нього знаходиться перерахунковий прилад ПП-16 і електричний секундомір з цифровою шкалою. На передній панелі приладу є кнопки управління і скляні газонаповнені лампи із сегментами, які світяться і які показують кількість імпульсів. Права крайня показує одиниці імпульсів,

наступна, яка розташована лівіше, – десятки, наступна – сотні і т.д. Найлівіша показує сотні тисяч імпульсів. При відліку показань їх потрібно підсумовувати.

Захисний корпус установки можна переміщати по напрямних, відкриваючи і закриваючи джерело частинок і лічильник Гейгера.

При проведенні вимірювань вони повинні бути закриті.

Цифровий секундомір має кнопки "Пуск" (червона) і "Сброс", при натисканні на яку його показання обнуляються.



Рисунок 96.4

Порядок виконання роботи

1 Увімкнути в мережу з напругою 220 В перерахунковий прилад ПП-16 і електричний секундомір. На панелі приладу натиснути червону кнопку "Вкл".

2 Підготувати прилад для проведення вимірювань. Для цього:

- кнопкою "Сброс" обнулити показання лічильника;
- кнопки "Пуск", "Стоп", "Сброс", "Работа" привести у відтиснутий стан.

Кнопки "Вход": 1-ша - натиснута "1:1"
 2-га $\perp\perp$ – відтиснута
 3-тя \square – натиснута

3 Виміряти за допомогою штангенциркуля товщину d_1 однієї з тонких алюмінієвих пластинок, помістити її між джерелом β -частинок і датчиком лічильника Гейгера і засунути захисний корпус установки.

4 Натиснути кнопку "Пуск" і одночасно увімкнути секундомір, утримуючи його червону кнопку. Через 60 с натиснути кнопку "Стоп" і вимкнути секундомір, відпустивши

червону кнопку. Показання лічильника n і товщину пластинки d_1 занести в таблицю 96.1.

5 Кнопкою "Сброс" обнулити показання лічильника. Відповідною кнопкою обнулити показання секундоміра.

6 Виміряти товщину d_k ($k = 2, 3, 4, \dots$) ще однієї алюмінієвої пластинки і помістити її поряд з першою. Засунути захисний корпус установки.

7 Повторити дії, зазначені пунктах 4-6, використовуючи алюмінієві пластинки, які залишились. У кожному наступному рядку таблиці вказувати сумарну товщину шару алюмінієвих пластинок.

$$x = d_1 + d_2 + d_3 + \dots$$

8 Використовуючи дані таблиці 96.1, побудувати на міліметровому папері графік залежності n , імп/хв, від товщини шару алюмінію x , мм.

9 Екстраполювати криву залежності $n = f(x)$ до перетину з віссю абсцис. Точка перетину дасть значення d_{max} – товщини шару алюмінію, який повністю затримує β -частинки.

10 За формулою (96.3) обчислити довжину пробігу β -частинок, а за формулою (96.4) – максимальне значення їх енергії.

11 Вимкнути живлення приладів і витягти алюмінієві пластинки, які розміщені між джерелом β -частинок і датчиком лічильника Гейгера.

12 Підготувати відповіді на наведені нижче контрольні питання.

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули для визначення відповідно довжини пробігу β -частинок в алюмінії та їх максимальної енергії:

$$R_{max} = \rho \cdot d_{max}, \quad [R] = \text{г/см}^2;$$
$$W_{max} = (R_{max} + 0,24) / 0,526, \quad [W] = \text{МеВ}.$$

2 Довідкові дані:

густина алюмінію $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³.

3 Результати експерименту.

Таблиця 96.1

Номер досліду	Сумарна товщина шару алюмінію x , мм	Число імпульсів, відлічених лічильником за 1 хв n , імп/хв	Товщина шару алюмінію, яка повністю затримує потік β -частинок d_{max} , мм	Довжина пробігу β -частинок в алюмінії R_{max} , г/см ²
1				
2				
3				Максимальна енергія β -частинок W_{max} , МеВ
4				
5				
6				
7				
8				

Контрольні питання

- 1 Описати будову атома й атомного ядра. Що таке нуклони?
- 2 Що називається радіоактивністю? Що таке стабільні і нестабільні ядра?
- 3 Що називається ізотопами?
- 4 Що таке позитрон?
- 5 Які види радіоактивного розпаду вам відомі? Що таке період напіврозпаду ядер атомів?
- 6 Описати будову та принцип дії лічильника Гейгера.
- 7 Які фізичні величини характеризують проходження заряджених частинок через шар речовини?
- 8 Що таке іонізаційні і радіаційні втрати енергії частинок у речовині? Які з них переважають для важких і легких частинок?
- 9 Що називається максимальним пробігом електронів у речовині?

10 Дати визначення електронвольта – одиниці вимірювання енергії мікрочастинок.

Література [3, 4].

Список літератури

- 1 Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1989. – 760 с.
- 2 Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – СПб.; Минск; Краснодар: Лань, 2003. – 480 с.
- 3 Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. – М.: Наука, 1980. – 728 с.
- 4 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. – М.: Наука, 1989. – Ч.2. – 416 с.

