

Вивчення зовнішнього фотоелефекту

В.П.Бригінець, О.О.Гусева, І.В. Лінчевський, Н.О.Якуніна

Мета роботи: експериментальна перевірка закономірностей зовнішнього фотоелефекту та визначення сталої Планка методом затримуючого потенціалу.

Прилади та обладнання: лампа розжарювання, монохроматор, вакуумний фотодіод, гальванометр, блок живлення.

Короткі теоретичні відомості

Одним із явищ, в яких виявляються квантові властивості електромагнітного випромінювання, є зовнішній фотоелефект – випускання електронів речовиною під дією світла. На практиці використовують зовнішній фотоелефект у металах.

Експериментальні дослідження дозволили встановити такі закономірності зовнішнього фотоелефекту:

1. При сталій частоті опромінюючого світла кількість електронів, що вириваються з металу (фотоелектронів) за одиницю часу, є прямо пропорційною до його інтенсивності.
2. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів при виході з металу лінійно залежить від частоти опромінюючого світла ν , при заданій частоті, не залежить від його інтенсивності.
3. Для кожної речовини існує своя *червона межа* фотоелефекту, тобто мінімальна частота ν_0 (максимальна довжина хвилі λ_0) опромінюючого світла, при якій ще можливий фотоелефект.
4. Фотоелефект є безінерційним, тобто фотоелектрони з'являються практично одночасно з початком опромінювання (час запізнення складає порядку 10^{-9} с).

Теоретичне пояснення фотоелефекту дав Ейнштейн на основі квантових уявлень. Згідно з Ейнштейном, у кожному елементарному акті фотоелефекту якийсь електрон металу поглинає квант світла (фотон) з енергією $h\nu$ і, за рахунок отриманої енергії, виходить за межі металу. При цьому електрон витрачає частину енергії на роботу виходу з металу A , тому, згідно із законом збереження енергії, на виході електрон має максимальну кінетичну енергію

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A \quad \text{або} \quad h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

де v – максимальна швидкість фотоелектрона; $h\nu$ – енергія поглинутого фотона ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка); A – робота виходу електрона з металу, котра дорівнює *найменшій* енергії, яку має витратити електрон, аби відірватися від поверхні металу.

З рівняння (1), яке називається *рівнянням Ейнштейна*, випливають усі перераховані вище закономірності фотоелектру. Зокрема, оскільки вихід електрона можливий лише за умови $h\nu \geq A$, очевидно, що існує червона межа фотоелектру, котра визначається, як

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (2)$$

Опис експерименту

Експериментальні дослідження закономірностей фотоелектру й перевірка рівняння Ейнштейна (1) зводиться до вивчення вольт-амперних характеристик (ВАХ) вакуумного фотоелемента при різних умовах опромінення. Вольт-амперною характеристикою будь-якого електричного чи електронного приладу називається залежність струму в приладі від поданої на нього напруги $i = i(U)$.

Принципова схема вимірювання ВАХ фотоелемента показана на рис. 1, а.

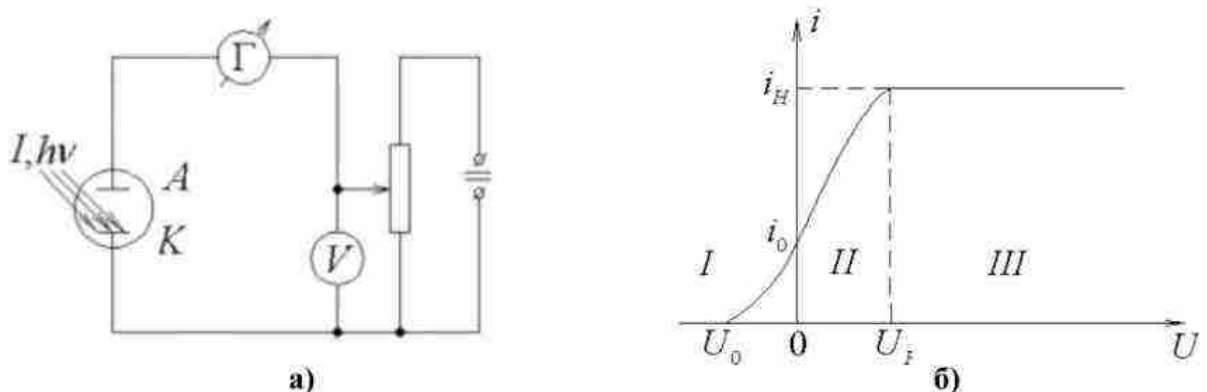


Рис. 1

Фотоелемент являє собою вакуумну двохелектродну лампу (діод), із катодом K із матеріалу, що має невелику роботу виходу ($A \sim 1$ еВ). Катод є світлочутливим елементом і називається *фотокатодом*. На фотоелемент від джерела подається напруга, величину та полярність якої можна змінювати на свій розсуд і вимірювати вольтметром.

Фотострум, який виникає при опроміненні фотокатода, вимірюється чутливим мікроамперметром (який на схемі позначено як Г-гальванометр).

Загальний вигляд ВАХ показаний на рис. 1, б. При збільшенні прямої напруги $U \geq 0$ (“+” на аноді і “-” на катоді) струм поступово зростає від значення i_0 при $U = 0$ до певної величини i_n , яка називається *струмом насичення* фотоелемента, і при подальшому збільшенні напруги практично не змінюється. При подаванні на фотоелемент зворотної (гальмівної) напруги $U < 0$ (“+” на катоді і “-” на аноді) струм поступово зменшується, аж до повного припинення. Значення зворотної напруги $|U| = U_0$, при якому у фотоелементі припиняється струм, називається *затримуючим потенціалом*.

Описаний вигляд ВАХ (характер залежності $i(U)$) пояснюється двома причинами. По-перше, фотони поглинаються електронами не тільки на поверхні металу, а й у приповерхневій зоні, котра має товщину порядку довжини хвилі опромінюючого світла і включає $\sim 10^3$ атомних шарів. Тому при виході з металу електрон, окрім роботи виходу A , витрачає додаткову енергію, внаслідок взаємодії з іншими електронами та кристалічною ґраткою металу на шляху до поверхні. Як наслідок, електрони вилітають із фотокатода в різних напрямках і з різними швидкостями – від 0 до максимального значення v , яке й фігурує в рівнянні (1). По-друге, у результаті неперервної втрати електронів під час опромінення світлом, фотокатод виявляється позитивно зарядженим, і навколо нього виникає локальне електричне поле, що перешкоджає вильоту фотоелектронів і повертає більшість із них назад на катод. Але ті фотоелектрони, що виходить із катода зі швидкостями, близькими до максимальної, мають достатню кінетичну енергію, аби перебороти “повертаюче” поле катода й “самотужки” дістатись анода. Такі електрони створюють деякий струм i_0 навіть за відсутності напруги на фотоелементі (рис. 1, б). При подаванні на фотоелемент зворотної напруги такі “швидкі” електрони для потрапляння на анод повинні долати не тільки локальне поле катода, а й гальмівне поле анода. Тому із збільшенням зворотної напруги кількість електронів, які потрапляють на анод, і струм фотоелемента поступово зменшуються. Це пояснює хід ВАХ в області $U < 0$. Зрозуміло, що фотоелектрон зможе потрапити на анод тільки за умови, що його початкова кінетична енергія буде достатньою для виконання роботи проти гальмівного поля анода: $(mv^2/2) \geq eU$ ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – елементарний заряд). Тому затримуючий потенціал визначається умовою:

$$eU_0 = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow U_0 = \frac{mv^2}{2e}. \quad (3)$$

Узявши до уваги ці вирази, рівняння (1) можна записати, як

$$eU_0 = h\nu - A.$$

Звідси випливає, що затримуючий потенціал визначається тільки матеріалом фотокатода (A) та частотою опромінюючого світла ν . При використанні видимого світла ($\lambda = 750 - 400$ нм) величина U_0 лежить у межах $0,1 - 2,5$ В.

При подаванні на фотоелемент прямої напруги ($U > 0$) для фотоелектронів створюється прискорююче поле, яке примушує їх рухатися до анода. Тому із збільшенням прямої напруги на анод потрапляє все більша кількість електронів, і струм зростає (область II ВАХ).

Сила струму фотоелемента визначається тільки кількістю електронів n' , що потрапляють на анод за одиницю часу: $i = en'$. Оскільки число n' не може бути більшим, ніж кількість фотоелектронів n , які вириваються світлом із катода за одиницю часу, на ВАХ спостерігається насичення струму: при певній напрузі U_H струм досягає граничного значення i_H (струму насичення), яке рівне

$$i_H = en, \quad (4)$$

де n – кількість електронів, які вилітають із катода за одиницю часу.

У режимі насичення $U > U_H$ (область III ВАХ) у фотоелементі створюється настільки сильне прискорююче поле, що всі фотоелектрони, незалежно від напрямку та величини швидкості вильоту, потрапляють на анод. Напруга насичення U_H залежить від речовини фотокатода та конструкції фотоелемента й звичайно складає кілька десятків вольтів.

Таким чином існує однозначний зв'язок між параметрами ВАХ фотоелемента U_0 і i_H , з одного боку, й фізичними характеристиками фотоелектронів $mv^2/2$ і n – з іншого (співвідношення (3), (4)). Тому, вимірюючи U_0 і i_H при різних інтенсивностях I та частотах ν опромінюючого світла, можна спостерігати й перевіряти основні закономірності фотоефекту: закон Столетова, згідно з яким: при сталій частоті опромінюючого світла струм насичення є прямо пропорційним його інтенсивності, та лінійну залежність затримуючого потенціалу (отже, й кінетичної енергії фотоелектронів) від частоти опромінюючого світла.

Відповідно до (1) – (3)

$$U_0(\nu) = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0). \quad (5)$$

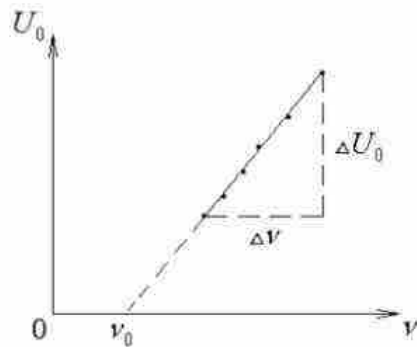


Рис. 2

Вигляд графіка залежності $U_0(\nu)$ показано на рис. 2. Згідно з (5), нахил графіка $k = h/e$. Тому, вимірявши значення U_0 при декількох частотах ν , і, побудувавши по експериментальних точках графік $U_0(\nu)$, можна визначити сталу Планка. Для цього треба спочатку обчислити величину

$$k = \frac{\Delta U_0}{\Delta \nu}, \quad (6)$$

а потім

$$h = ek. \quad (7)$$

Такий метод визначення h називається методом затримуючого потенціалу.

З (5) також випливає, що при $\nu = \nu_0$, $U_0 = 0$. Це дозволяє, у принципі, визначити із залежності $U_0(\nu)$ також червону межу фотоефекту ν_0 (а отже, й роботу виходу $A = h\nu_0$) для матеріалу фотокатода. рис. 2. Однак через наявність контактної різниці потенціалів між катодом і анодом фотоелемента, що співвимірні з U_0 і не може бути врахована, похибка експериментальна величини ν_0 виявляється занадто великою. Тому в даній роботі задача визначення ν_0 і A не ставиться. Точність визначення h в даній роботі теж невелика (похибка $\sim 20\%$), що пов'язано з особливостями ВАХ використаного в роботі промислового фотоелемента.

Експериментальна установка

На рис. 3 показана схема вимірювання ВАХ фотоелемента. Пучок світла від освітлювача O за допомогою конденсорної лінзи K фокусується на входну щілину монохроматора M .

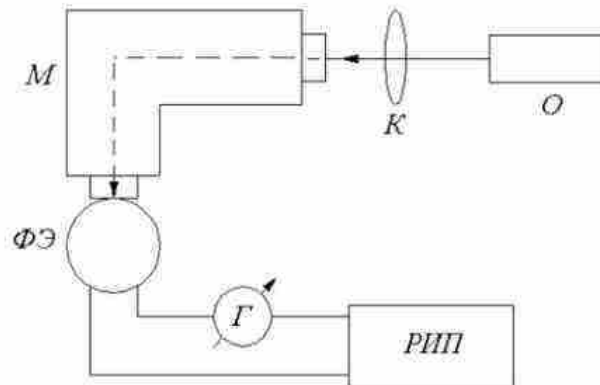


Рис. 3

Світловий пучок із заданою частотою, що виходить із монохроматора, потрапляє на катод фотоелемента $\Phi Э$, котрий вміщений у світлонепроникний кожух і закріплений на вихідній щілині монохроматора. Необхідні для проведення вимірів конкретні відомості про експериментальну установку є в інструкції на робочому місці.

Примітка. При складанні протоколу й підготовки до виконання роботи в обов'язковому порядку необхідно вивчити принцип дії й будову монохроматора УМ – 2, подані в Додатку 1.

Порядок виконання роботи

Перед початком вимірів необхідно вивчити інструкцію на робочому місці й діяти відповідно до поданих у ній вказівок.

Завдання 1. Зняття ВАХ фотоелемента

1. Увімкнути установку, переміщенням конденсора сфокусувати світловий пучок від освітлювача на входну щілину монохроматора й установити необхідну ширину входної та вихідної щілини монохроматора.

2. Установити барабан монохроматора в положенні, що відповідає зазначеній у робочій інструкції частоті (довжині хвилі) світла і вимірити залежність струму фотоелемента від напруги. (Діапазон і крок U ?) Результати вимірів занести до табл. 1.

Завдання 2. Вимірювання залежності $U_0(\nu)$

3. Для вказаних у робочій інструкції (чи заданих викладачем) частот ν_i розрахувати значення довжин хвиль λ_i . За допомогою градуовального графіка, який знаходиться на робочому місці, визначити поділки барабана монохроматора n_i , що відповідають отриманим значенням λ_i . Значення ν_i та n_i занести до табл. 2
4. Для кожного значення ν_i виконати 5 вимірів U_0 та занести результати до табл. 2.
5. Установивши на барабані монохроматора значення n_i , що відповідає максимальній величині струму насичення i_n , виміряти затримуючу напругу U_0 для чотирьох різних значень ширини вхідної щілини монохроматора d при незмінній довжині хвилі λ . Дані записати в табл. 3.

Завдання 3. Перевірка закону Столетова

6. Переміщенням конденсора домогтися рівномірної освітленості вхідної щілини монохроматора.
7. За даними табл. 1 (чи за вказівкою викладача) подати на фотоелемент напругу U_n і виміряти струм насичення i_n для п'яти різних значень ширини d вхідної щілини монохроматора. Результати занести до табл. 4.

Обробка результатів

1. За даними табл. 1 на міліметровці побудувати ВАХ фотоелемента, вказавши на графіку значення U_0 , U_n , i_n , ν .
2. За даними табл. 2 обчислити середню величину $\langle U_{0i} \rangle$ для кожного значення ν_i й занести її в табл. 2.
3. Використовуючи отримані середні значення $\langle U_{0i} \rangle$, побудувати графік залежності $U_0(\nu)$.
4. За допомогою графіка $U_0(\nu)$ по формулах (6) і (6а) визначити сталу Планка h .
5. Знайти відносну похибку отриманого результату, порівнюючи його з табличним значенням h .

6. За даними табл.3 розрахувати середню величину $\langle U_0 \rangle$ для кожного значення ширини щілини d й занести їх у табл.3. Зробити висновок про залежність U_0 від інтенсивності опромінюючого світла.

7. За даними табл. 4 побудувати графік залежності $i_H(d)$ і зробити висновок про виконання закону Столетова. У випадку помітного відхилення залежності $i_H(d)$ від лінійної, проаналізувати можливі причини порушення лінійності.

Частота світла $\nu =$

Таблиця 1

$i, \text{мкА}$								
$U, \text{В}$								

Таблиця 2

$\nu, 10^{14} \text{ Гц}$							
n							
$U_{0i}, \text{В}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
$\langle U_{0i} \rangle, \text{В}$							

Таблиця 3

$U, \text{В}$								$\langle U_0 \rangle$
$d, \text{мм}$								

Таблиця 4

$d, \text{мм}$				
$i, \text{мкА}$				

Контрольні запитання

1. Що таке зовнішній фотоефект? Запишіть і поясніть рівняння Ейнштейна.
2. Що свідчить про наявність у фотоелектронів початкової кінетичної енергії?
3. Чому фотоелектрони виходять із металу з різною швидкістю? Від чого і як залежить максимальна швидкість фотоелектронів?
4. Від чого і як залежить потік фотоелектронів, тобто кількість електронів, що вириваються світлом за одиницю часу?
5. Що таке червона межа фотоефекту і від чого вона залежить?
6. Запишіть рівняння Ейнштейна через частоту ν_0 (довжину хвилі λ_0) червоної межі фотоефекту.
7. Зобразіть загальний вигляд ВАХ фотоелемента та поясніть залежність $i(U)$ в області зворотних напруг ($U < 0$). Що таке затримуючий потенціал U_0 і чим він визначається?
8. Зобразіть сімейство ВАХ фотоелемента при опроміненні його світлом постійної інтенсивності I і з частотами $\nu_1 = \nu_0$; $\nu_2 = 2\nu_0$; $\nu_3 = 3\nu_0$. (ν_0 – частота червоної межі фотоефекту).
9. Запишіть вираз залежності $U_0(\lambda)$ для фотокатода з роботою виходу A .
10. Зобразіть графік залежності затримуючого потенціалу від частоти опромінюючого світла. Як по цьому графіку можна визначити сталу Планка h ?
11. Як за графіком залежності $U_0(\nu)$ можна довести, що при опроміненні металу світлом із частотою, меншою за червону межу, фотоефект неможливий?
12. Зобразіть загальний вигляд ВАХ фотоелемента та поясніть залежність $i(U)$ в області прямих напруг ($U \geq 0$). Чим визначається величина струму насичення i_H при заданій інтенсивності світла?
13. Зобразіть сімейство ВАХ фотоелемента при опроміненні світлом постійної частоти ν і з інтенсивностями $I_1 = I_0$; $I_2 = 2I_0$; $I_3 = 3I_0$.
14. Чи можна пояснити закономірності зовнішнього фотоефекту на основі хвильової теорії електромагнітного випромінювання? Відповідь обґрунтувати.

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., “Загальний курс фізики”, т. 3, § 9.1, 9.2, 9.3, “Техніка”, К, – 1999 .
2. Иродов И.Е., “КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. Основные законы., §§ 1.1, 1.2, “Физматлит”, М – СПб, 2002 , ISBN 5-93208-055-8
3. Савельев И.В., “Курс общей физики”, т. 3, § 9, “Наука”, М, – 1979 .

Додаток 1. Принцип дії та будова універсального монохроматора УМ-2

Призначення приладу. Прилад призначений для спектральних досліджень у видимій і ближній інфрачервоній областях спектра в діапазоні довжин хвиль від 3800 до 10000 Å.

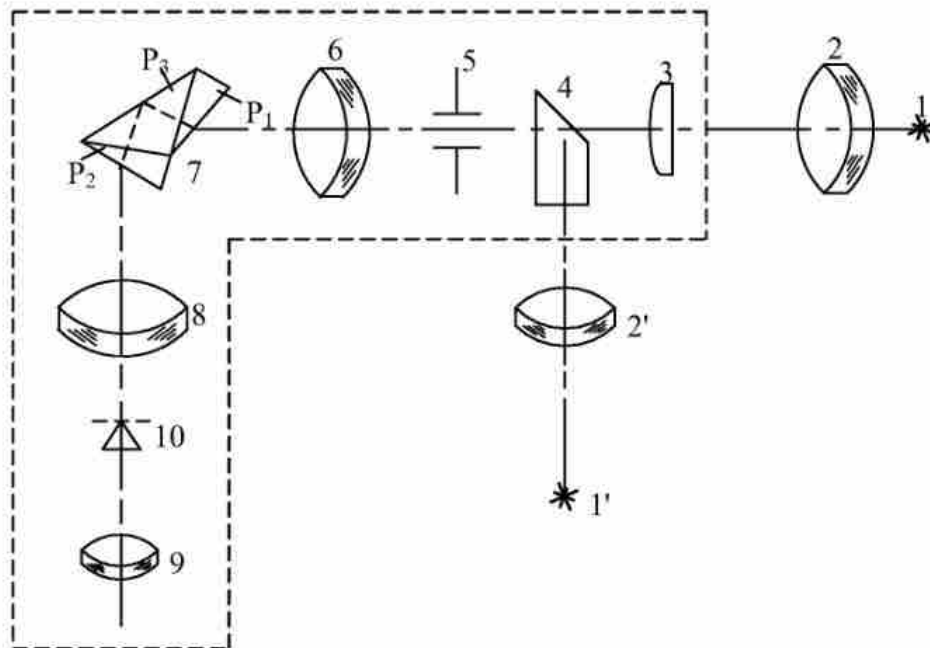


Рис. 3

Принцип дії. Оптична схема монохроматора показана на рис. 3, а конструкція на рис. 4. Зображення досліджуваного джерела спектра 1 за допомогою конденсорної лінзи 2 і лінзи 3 фокусується на входній щілині 5 приладу. Призма порівняння 4 дозволяє спостерігати разом зі спектром досліджуваного джерела також й еталонний спектр. Як джерело еталонного спектра 1' використовується ртутна лампа. Конденсорна лінза 2' дозволяє сфокусувати зображення еталонного джерела на входну щілину приладу. Грань призми порівняння, звернена до досліджуваного джерела спектра, є непрозорою. Внаслідок цього в полі зору окуляра еталонний і досліджуваний спектри не накладаються і розташовані один над одним. За допомогою коліматора, що складається з об'єктива 6 і входної щілини 5, розміщеної у фокальній площині об'єктива, формується паралельний пучок променів, який далі спрямовується на головний елемент приладу – диспергуючу призму 7 складної

конфігурації. Призма розкладає падаючий світловий пучок у спектр і повертає його в напрямку зорової труби, котра складається з об'єктива (лінза 8) і окуляра (лінза 9)¹. Диспергований світловий пучок збирається у фокальній площині об'єктива, створюючи зображення спектра, котре візуально спостерігається через окуляр. У фокальній площині об'єктива розміщений показчик 10 у вигляді вістря, котрий дозволяє вимірювати довжини хвилі спектральних ліній. Для цього призма 7 установлена на поворотному столику, котрий можна обертати навколо вертикальної осі за допомогою мікрометричного гвинта, облаштованого відліковим барабаном. Барабан має гвинтову доріжку з градусними поділками та ковзний показчик кута повороту барабана. Для вимірювання довжини хвилі столик із призмою за допомогою барабана повертають так, щоб потрібна спектральна лінія, що спостерігається, сумістилася з показчиком 10. Відтак знімають покази барабана, й за спеціальним градуювальним графіком визначають довжину хвилі. Зовнішній вигляд монохроматора з відкритим призмовим столиком зображено на рис. 4.

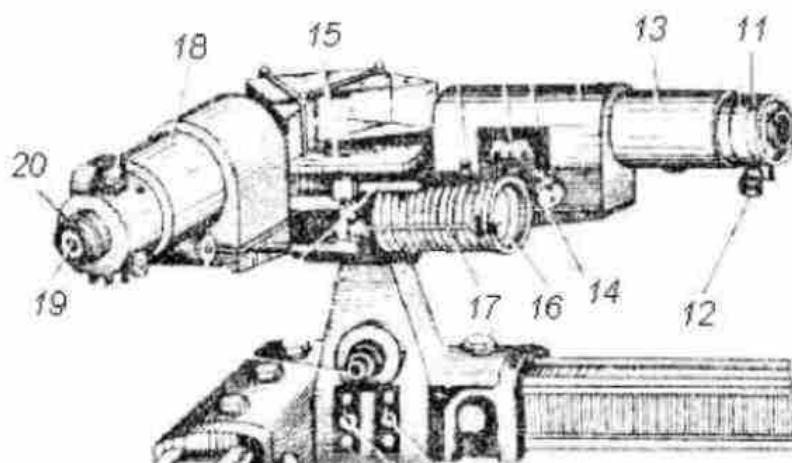


Рис. 4

Основні елементи конструкції монохроматора:

- 11 – входна щілина;
- 12 – барабан для регулювання ширини щілини в межах $0 \div 4$ мм з точністю 0,01 мм;
- 13 – коліматор;
- 14 – гвинт фокусування об'єктива коліматора ;
- 15 – призмовий столик з поворотним механізмом;
- 16 – барабан поворотного механізму;
- 17 – штанга з показчиком кута повороту барабана;

¹ Окуляр є знімним і може бути замінений на вихідну щілину. Це дозволяє при необхідності використовувати прилад як спектрофотометр або монохроматор.

- 18 – вихідна труба;
- 19 – окуляр;
- 20 – кільце переміщення окуляра.

Додаткове устаткування. Для градуювання приладу використовується ртутна лампа ДРШ-250, встановлена під кожухом, який можна переміщати по висоті обертанням накатаного кільця. Лампа ДРШ-250 – потужне джерело світла. Під час роботи в лампі розвивається тиск до 300 Н/см^2 , тому поводитися з нею треба обережно.

Нормальна робота ртутної лампи забезпечується пультом живлення ЕПС-111. Від цього ж пульта подається напруга живлення на лампочки освітлення шкал приладу. На передній панелі пульта живлення розташовані: вимикач мережі, вимикач лампи К-12, вимикач лампи ДРШ-250, пускова кнопка ртутної лампи.

Підготовка приладу до спостережень. Перед спостереженнями та вимірами необхідно домогтися, щоб у полі зору окуляра вістря покажчика 10 було сфокусованим, а спектральні лінії мали чіткі межі. Для цього спочатку, переміщуючи окуляр обертанням кільця 20 (рис. 4), слід отримати чітке зображення вістря покажчика 10. Потім за допомогою мікрометричного гвинта 14 коліматорного об'єктива треба отримати чітке зображення спектра. Для відліку положення спектральної лінії, обертаючи барабан 16, суміщають її центр із вістрям 10, й знімають покази індикатора кута 17. Для зменшення похибки вимірів установлюють ширину вхідної щілини $0,02 - 0,03 \text{ мм}$ (при спостереженні найслабших ліній щілину доводиться розширювати до $0,05 - 0,06 \text{ мм}$).

Градування. Для градуювання приладу необхідно:

- відцентрувати ртутну лампу 1' та конденсорну лінзу 2' (рис. 3), розташовані на рейці перед вхідною щілиною, так, щоб на призму порівняння 4 потрапляв сконцентрований пучок світла;
- підготувати прилад до спостереження, як описано вище;
- обертаючи барабан повороту призми монохроматора 16 (рис. 4) і спостерігаючи спектр через окуляр 19, по черзі підвести до вістря 10 добре видимі спектральні лінії ртуті, щоразу знімаючи покази N барабана й заносючи їх до таблиці 1 у протоколі роботи.

Туди ж занести довжину хвилі кожної лінії, взявши її з наведеної нижче таблиці. Найбільш інтенсивні лінії, по яких звичайно роблять градування, у таблиці підкреслені.

Довжини хвилі спектральних ліній атомів ртуті ($1 \text{ Å} = 0,1 \text{ нм}$)

Спектральна лінія	Довжина хвилі, Å
Темно-червона	6907
Червоно-помаранчева I	6234
Червоно-помаранчева II	6123
Помаранчева	6073
Жовта I	5791
Жовта II	5770
Яскраво-зелена	5461
Зелено-синя	4916
Яскраво-синя	4358
Синя середня	4348
Синя слаба	4339
Фіолетова слаба	4108
Фіолетова яскрава	4046
Фіолетова темна	3984

– за отриманими даними на аркуші міліметрового паперу формату А-5 по точках побудувати градууювальну криву – графік залежності $\lambda = f(N)$.

Зауваження. Градууювальний графік далі використовується для визначення довжин хвилі спектра водню. Тому криву $\lambda = f(N)$ треба проводити акуратно, добре загостреним м'яким олівцем і за допомогою лекала, слідкуючи за спряженістю окремих ділянок графіка.