

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторного практикуму з загального курсу

«ТЕХНІКА ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРЕМЕНТУ»

для студентів III курсу фізичного факультету

УЖГОРОД - 2006

ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторна робота №1.....	4
Вимірювання вакууму термодинамічним та іонізаційним манометрами.	
Лабораторна робота №2.....	9
Дослідження характеристик оптичних фільтрів.	
Лабораторна робота №3.....	14
Вивчення характеристик фотоелектронних приладів.	
Лабораторна робота №4.....	19
Методика виділення слабких світлових сигналів.	
Лабораторна робота №5.....	25
Розрахунок та юстування призматичного спектрографа.	
Лабораторна робота №6.....	38
Розрахунок та юстування спектрографа з плоскою дифракційною ґраткою.	

доктор фізико-математичних наук, професор
Шимон Людвик Людвикович

Автори: - доктор фізико-математичних наук, професор Шимон Людвик Людвикович

- кандидат фізико - математичних наук, доцент Семенюк Ярослав Миколайович

- кандидат фізико - математичних наук, доцент Скубенич Василь Васильович

- кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Дащенко Аркадій Йосипович

Лабораторна робота № 1

ВИМІРЮВАННЯ ВАКУУМУ ТЕРМОПАРНИМ ТА ІОНІЗАЦІЙНИМ МАНОМЕТРАМИ

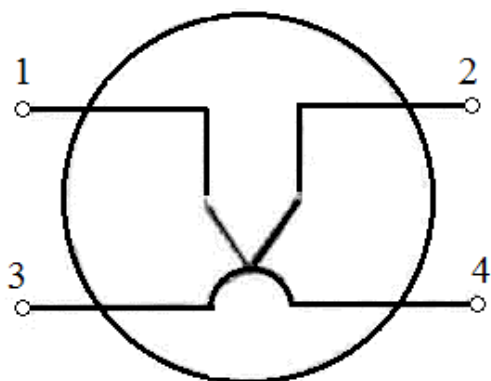
Мета роботи: ознайомлення з роботою вакуумметрів, вимірювання вакууму в лабораторній установці.

Теоретичні відомості

Термопарний манометр. Для вимірювання вакууму використовується залежність електрорушійної сили термопару від теплопровідності газу. Як відомо, е.р.с. термопару визначається температурою її нагрівника та теплообміном з навколишнім середовищем. Якщо струм розжарення термопару підтримувати постійним, то її е.р.с. буде визначатися тиском газу, з яким, в свою чергу, зв'язана теплопровідність газу. Таким чином, зміна тиску приводить до оберненої зміни термо-е.р.с, вимірюючи яку можна визначити ступінь розрідження, якщо відома залежність між тиском і е.р.с. Така залежність має вигляд градувальної кривої, яка в конкретному випадку залежить від конструктивних особливостей термопарного манометра (див. опис ламп ПМТ-2 і ПМТ-4М).

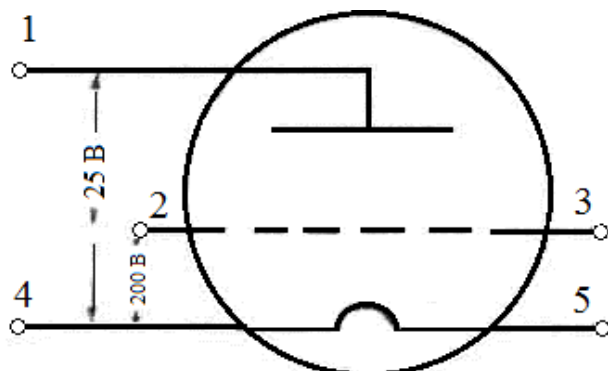
Іонізаційний манометр. Для вимірювання вакууму використовується іонізація залишкового газу електронами. Як відомо, при непружній взаємодії з атомами і молекулами газу електронів достатньої енергії утворюються позитивні іони. Реєструючи іонний струм,

величина якого, при постійній енергії та концентрації електронів, пропорційна лише концентрації (тиску) газу, визначають ступінь розрідження. Якщо при цьому відома чутливість даного іонізаційного манометра, то амперметр підсилювача іонного струму градуують безпосередньо в одиницях тиску згідно формули Мюллера: $I_i / k = P \cdot I_e$, де I, I_e - відповідно іонний та електронний струми, k - чутливість манометра в $(\text{мм.рт.ст.})^{-1}$, P - тиск газу в мм.рт.ст. Конструктивно іонізаційний манометр є триодом (див. опис ПМИ-2).



Термопарний манометр:

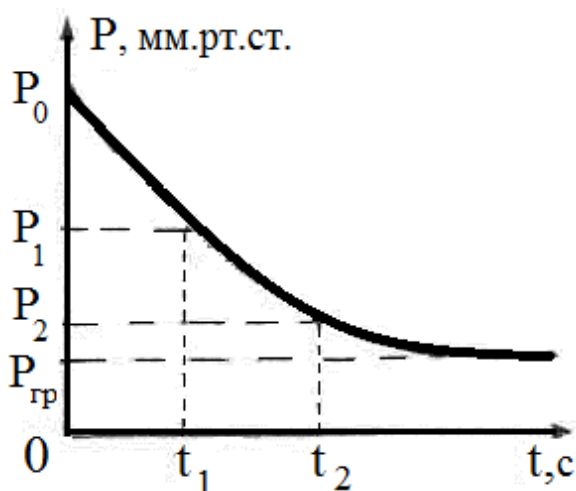
1, 2 - термопара,
3, 4 - нагрівник.



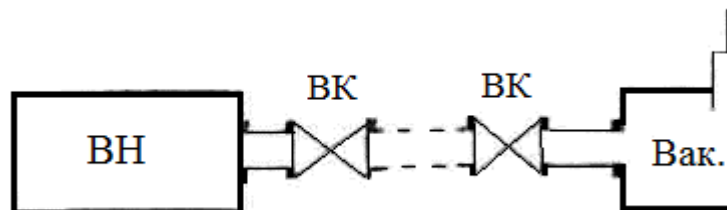
Іонізаційний манометр:

1 - колектор іонів (анод),
2, 3 - колектор електронів (сітка),
4, 5 - емітер електронів (катод).

Мал 1.1. До пояснення принципу роботи вакуумних манометрів.



$S_{\text{эф}}$ - швидкість відкачки ($\text{м}^3/\text{с}$),
 $P_{\text{гр}}$ - граничний тиск (мм.рт.ст.),
 t - час відкачки (с).



Мал. 1.2. Блок-схема експериментальної установки (до завдання 2):

ВН, ВК - вакуумний насос і вакуумні крани,
ПМТ-4М - термопарний манометр, ВИТ - ІА - вакуумметр.

$$S_{\text{эф}} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{P_1 - P_{\text{гр}}}{P_2 - P_{\text{гр}}} \right)$$

Мал 1.3. До визначення ефективної швидкості відкачки S_{ef} об'єму V по залежності $P = f(t)$ в завданні 2 і завданні 3.

Завдання і методика виконання роботи

Перед виконанням роботи ознайомитися з описом іонізаційно-термопарного вакуумметра типу ВИТ-ІА та лабораторною установкою!

Завдання 1 Вимірювання вакууму термопарною частиною ВИТ-ІА.

1. Під'єднати термопарну лампу ПМТ-2 до ВИТ-ІА згідно опису.
2. Ввімкнути тумблер "сеть 220" (загорається сигнальна лампочка).
Перемкнути тумблер "нагрев термопары" в верхнє положення.
3. Виміряти вакуум у відпаяній лампі ПМТ-2 при різних струмах розжарення, для чого:
-перевести тумблер "ток накала-измерение" в положення "ток накала" і регулятором "регулировка тока накала" встановити струм розжарення в межах 70-120 мА по нижній шкалі термопарного вакуумметра;
-перемкнувши тумблер в положення "измерение" визначити термо- е.р.с. по верхній шкалі;
-по градусувальній кривій ПМТ-2 визначити тиск в лампі.
4. Визначити величину робочого струму розжарення, при якому е.р.с. рівна 10 мВ. Це значення встановлюється при вимірюваннях вакууму данною лампою в лабораторній установці до 10^{-3} мм.рт.ст.

Завдання 2. Вимірювання вакууму в лабораторній установці.

1. Вакуумно з'єднати лампу ПМТ- 4М з установкою (мал. 1.2). Форвакуумним насосом попередньо відкачати установку і закрити її.
2. Визначити вакуум в закритій установці. При цьому робоча величина струму розжарення ПМТ-4М вказана на цоколі лампи, а ступінь розрідження визначається по верхній шкалі термопарного вакуумметра безпосередньо в одиницях тиску (мм.рт.ст.).
3. Відкрити вакуумний кран установки і, відкачуючи її протягом 30-40 хвилин, фіксувати зміну тиску збільшуючи інтервал між спостереженнями. По графіку $P = f(t)$ визначити граничний тиск в установці і швидкість її відкачки (три значення).

Завдання 3. Вимірювання вакууму іонізаційною частиною ВИТ-ІА.

Перед початком роботи з іонізаційним манометром (лампа ПМІ-2) встановити перемикачі іонізаційної частини ВИТ-ІА в положення:

- "накал" в нижньому; "прогрев -измерение", "установка нуля -измерение" і "эмиссия-измерение" НЕ ЗНАХОДЯТЬСЯ в положенні "измерение"!!;
- потенціометр "регулятор эмиссии" повернути проти годинникової стрілки до кінця, перемикач "множитель шкалы" в положенні " 10^{-4} ".

1. Під'єднати лампу ПМІ-2 до ВИТ-ІА згідно опису. Ввімкнути "накал" (загорається сигнальна лампочка) і прогріти сітку іонізаційної лампи протягом 5 хвилин.

2. Встановити постійний струм емісії електронів в лампі для чого: -тумблер "нагрев-измерение" перемкнути в "измерение";

-регулятором "регулировка эмиссии" встановити стрілку приладу на риску з індексом "А", що відповідає електронному струму 5 мА. НЕ РЕГУЛЮВАТИ ЕМІСІЮ ПРИ ПРОГРІВАННІ СІТКИ (режим "прогрев")!!

3. Провести калібрівку підсилювача іонного струму:

- перемикач "эмиссия-измерение" в положенні "измерение";
- при положенні перемикача шкал "калибровка" регулятором "калибровка" встановити стрілку на шкалі приладу в положення "10" (кінець шкали), перемикач перевести в положення "10⁻⁴";
- встановити нуль вибраної шкали потенціометром "регул. нуля", перемкнути "установка нуля - измерение" в положення "измерение". Прилад готовий для вимірювання вакууму в лампі (або установці).

4. Виміряти вакуум у відпаяній лампі ПМИ-2. Для цього перемикач шкал встановлюється в таке положення (починаючи з "10⁻⁴"), при якому стрілка знаходиться між "1" і "10". Вакуум в лампі (або установці) рівний відліку по шкалі помноженому на відповідний коефіцієнт (множник шкали).

5. Фіксувати зміну вакууму в лампі протягом 30-40 хвилин.

По графіку $P = f(t)$ визначити швидкість відкачки лампи як іонного насоса, прийнявши за граничний тиск найменше його значення.

ПРИМІТКА. Під час вимірів електронний струм повинен бути постійним (5 мА), і тому періодично його необхідно контролювати і при необхідності калібрувати шкали приладу (див. п.2 і п.3).

6. Визначити чутливість іонізаційного манометра по формулі

$$K = \frac{6,4 \cdot 10^{-2} \left(160 - (U_c - U_i + 160) \exp \left(-\frac{U_c - U_i}{160} \right) \right)}{\lambda_0 (U_c - U_a)}, \text{ де}$$

U_c, U_a - потенціали відповідно сітки та аноду (див. опис ВИТ-ІА);

U_i - потенціал іонізації молекул азоту (залишковий газ);

$\lambda_0=35,8$ нм - довжина пробігу електронів в азоті при норм.ум.

7. Оформити звіт в якому привести графіки зміни тиску та відповідні їм швидкості відкачки для термопарного та іонізаційного манометрів, а також величину робочого струму розжарення для ПМТ 2 і коефіцієнт чутливості для ПМИ-2 манометрів.

Контрольні запитання

1. Швидкість відкачки і методи її знаходження.
2. Методи вимірювання вакууму.
3. Принцип роботи іонізаційного манометра.
4. Принцип роботи термопарного манометра.

Література

1. Г.Левин. Основы вакуумной техники. М. Энергия, 1969, 240 с.
2. Т.А.Ворончев, В.Д.Соболев. Физические основы электровакуумной техники. М..ВШ 1967, 320 с.

3. А.И. Липко и др. Оборудование для откачки вакуумных приборов. М., Энергия, 1965, 460 с.
4. Інструкції до вакуумметра ВИТ-1А та манометрів ПМТ-2 і ПМИ-2.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

Мета роботи: ознайомитися з методикою визначення характеристик оптичних фільтрів; визначити спектральні криві пропускання абсорбційного та інтерференційного фільтрів та їх коефіцієнти пропускання.

Теоретичні відомості

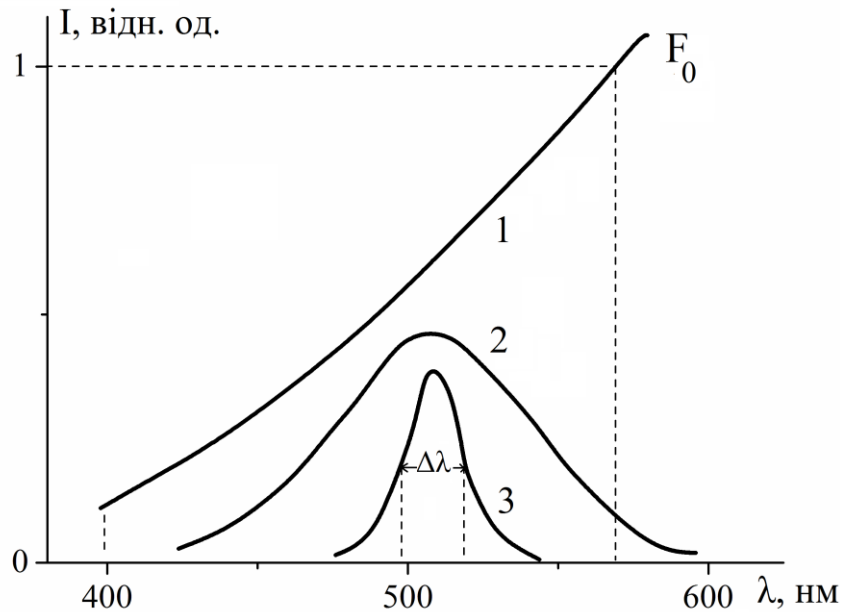
Світлофільтри використовуються для виділення певних спектральних участків випромінювання. В ряді випадків, зокрема при їх використанні з джерелами випромінювання з лінійчастим спектром, світлофільтри можуть цілком замінити монохроматор і при цьому, за рахунок великих полів зору, забезпечують велику світлосилу. Основними характеристиками оптичних фільтрів є інтегральний коефіцієнт пропускання та спектральна крива пропускання. Інтегральний коефіцієнт важливо знати для визначення ступеню послаблення променистого потоку при проходженні через фільтр. Цей коефіцієнт обраховується за формулою

$$T = \frac{F}{F_0} = \frac{\int_0^{\infty} E_{\lambda} V_{\lambda} T_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda},$$

де F_0 , F - відповідно падаючий і прохідний потоки, E_{λ} - розподіл, енергії в спектрі джерела світла, V_{λ} - спектральна чутливість приймача (фотоелемента або фотопомножувача), T_{λ} - прозорість (спектральний коефіцієнт пропускання).

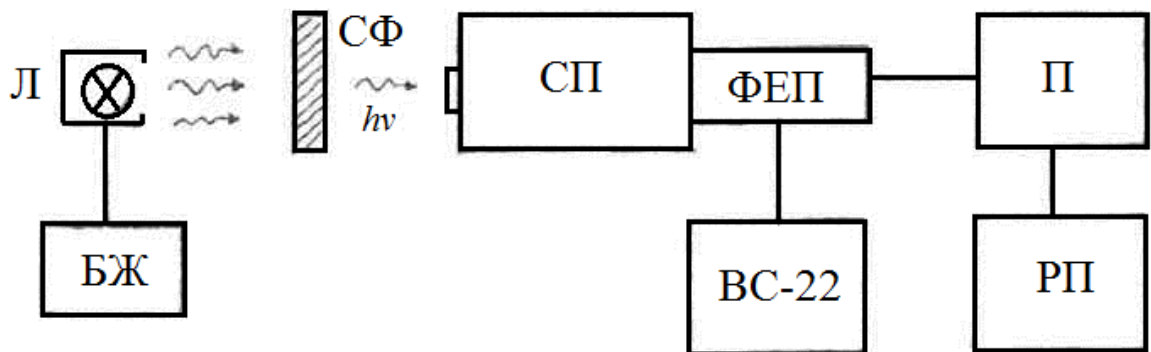
Інтегральний коефіцієнт можна знайти графічно - як відношення площ, обмежених спектральними кривими, що характеризують падаючий і прохідний світлові потоки (див. мал. 2.1).

Спектральна крива пропускання оптичного фільтру дозволяє визначити область найбільш ефективного застосування фільтру по напівширині спектральної кривої (ширина на половині висоти максимуму),



Мал.2.1. До визначення інтегрального коефіцієнта поглинання:

1. спектральна крива випромінювання лампи;
2. спектральна крива пропускання абсорбційного фільтру;
3. спектральна крива пропускання інтерференційного фільтру ($\Delta\lambda$ - напівширина кривої).



Мал.2.2. Блок-схема лабораторної установки:

- Л, БЖ - еталонна лампа і блок живлення лампи (Б5-46);
- СФ - світлофільтр (абсорбційний або інтерференційний);
- СП - спектральний прилад (ЗМР-3, призмовий);
- ФЕП - фотопомножувач; ВС-22 - блок живлення ФЕП;
- П- підсилювач (У9-5); РП - реєструючий прилад (В7-20).

а також коефіцієнт пропускання в максимумі та крутизну фільтра. Останню потрібно знати для випадків, коли необхідно розділити певні області спектру. При цьому важливо, щоб спадаючі краї спектральної кривої фільтра (одного або в наборі) йшли максимально круто.

Розрізняють наступні основні типи оптичних фільтрів:

- абсорбційні (поглинаючі середовища: розчини, скла, пластмаси);
- інтерференційні (багатопробієві інтерферометри типу Фабрі- Перо);
- дисперсійні (використовується явище хроматичної аберації).

Особливе використання інтерференційних фільтрів, які можуть застосовуватися як для прохідного, так і для відбитого світла, відповідно для виділення або для "вирізання" з спектру випромінювання вузьких (шириною до 5 нм) областей (див. мал. 2.1). Конструктивно - це багатошарові діелектричні системи, в яких послідовно з'єднані декілька тонких інтерферометрів тину Фабрі-Перо, і теорія цих фільтрів аналогічна теорії інтерферометрів (див. наприклад [1] стор. 191-203). Інтерференційні оптичні фільтри встановлюються в порівняно вузьких паралельних променях перпендикулярно до оптичної осі, оскільки положення їх спектральної смуги пропускання залежить від кута нахилу падаючого проміння і для кутів більших 10° зміщення смуги стає значним.

Завдання і методика виконання роботи

Перед виконанням завдань ознайомитися з схемою установки (мал. 2.2), і правилами експлуатації окремих приладів. Зібрати лабораторну установку згідно схеми.

1. Ввести установку в робочий режим, для чого:

- ввімкнути блок живлення фотопомножувача (ВС-22), дати йому прогрітися, після чого ввімкнути тумблер високої напруги;
- ввімкнути підсилювач постійного струму (У 5-9) та реєструючий прилад (В7-20). Регулятором нуля підсилювача встановити нуль на індикаторі В7-20;
- ввімкнути блок живлення лампи (джерела світла) і впевнитися в наявності сигналу.

2. Записати спектр випромінювання лампи для чого:

- провести градування монохроматора (ЗМР -3) в межах 400 -800 нм;
- встановити барабан на короткохвильовій межі (поділка 202) і повертаючи його руками фіксувати значення сигналу через кожні 10 нм.

3. Закріпити на держачах лампи абсорбційний фільтр і записати спектральну криву пропускання, аналогічно попереднім вимірюванням (п.2). Дослід провести для двох різних фільтрів.

4. Зняти абсорбційний фільтр і на вхідній щілині монохроматора встановити інтерференційний фільтр. Встановити барабан на поділку 218 і добитися максимального сигналу змінюючи живлення фотопомножувача, після чого вимкнути живлення лампи і встановити нуль на індикаторі В7-20. Ввімкнути живлення лампи.

5. Повертаючи барабан грубо визначити межі області пропускання інтерференційного фільтру і записати його спектральну криву пропускання через 0.5 нм. Зняти фільтр і в цій же області записати спектр випромінювання лампи з таким же кроком (0.5 нм).

6. Виміряні криві пропускання фільтрів привести до одиниці падаючого на фільтр світлового потоку, щоб врахувати залежність інтенсивності випромінювання лампи від довжини хвилі. Для цього величину сигналу, відповідну пропусканню фільтра на певній довжині хвилі, розділити на сигнал, відповідний інтенсивності випромінювання лампи на цій же довжині хвилі.

7. Результати представити на одному малюнку: відповідні приведені спектральні криві пропускання фільтрів. Визначити напівширину кривих, довжину хвилі і коефіцієнт пропускання в максимумі.

Контрольні запитання

1. Спектральні прилади, їх призначення і основні частини.
2. Основні типи оптичних фільтрів і їх застосування.
3. Характеристики оптичних фільтрів.

Література

1. А.А.Шишловский. Прикладная физическая оптика. М, Физматгиз, 1961, 814 с.
2. А.Н.Зайдель, П.Б.Островская. Техника и практика спектроскопии, М., 1972,452 с.

Лабораторна робота № 3

ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

Мета роботи: ознайомитися з принципом дії фотоелектронних приладів; дослідити основні характеристики фотопомножувачів.

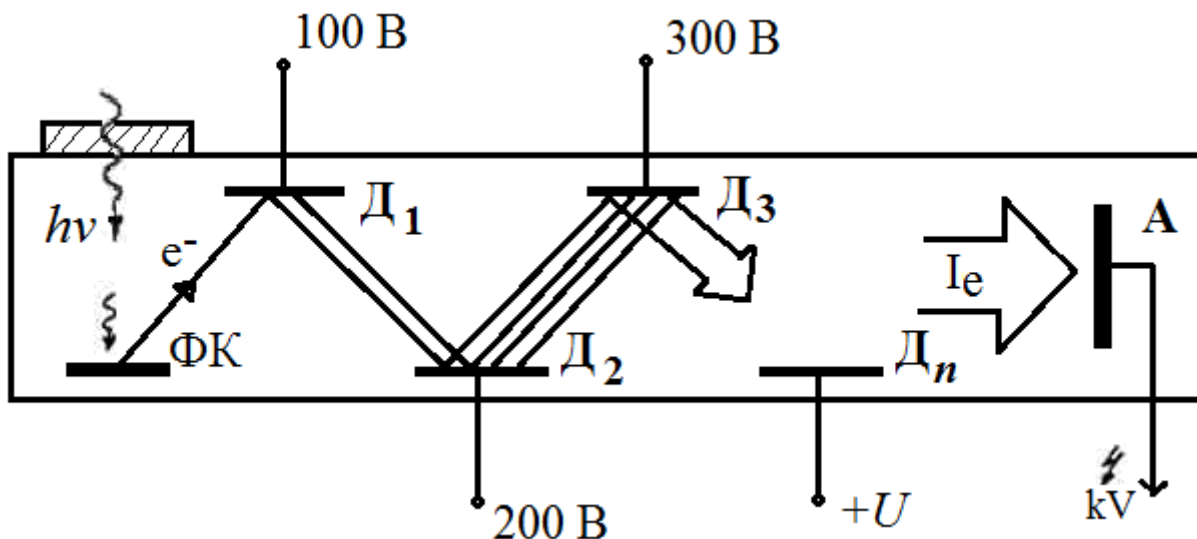
Теоретичні відомості

Фотоелектронними називають прилади, керування струмом яких відбувається за рахунок зміни інтенсивності або спектрального складу падаючого на них світлового потоку, дія таких приладів базується на явищі фотоелектричного ефекту, і відповідно розрізняють наступні основні типи фотоелектронних приладів:

- вакуумні та газонаповнені фотоелементи, фото помножувачі (зовнішній фотоелектричний ефект);
- фотоопори, вентильні фотоелементи, фотодіоди і фото триоди (внутрішній фотоелектричний ефект).

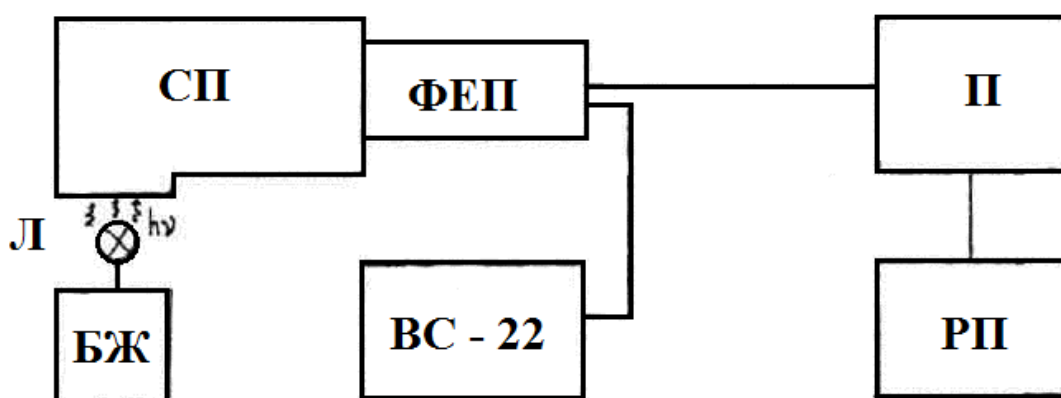
Найбільш чутливими в ультрафіолетовій та видимій областях спектру є прилади з зовнішнім фотоелементом. Зокрема широкого поширення набули фотопомножувачі (ФЕП), як прилади з ефективним підсиленням фотоструму всередині самого фотоелемента за рахунок явища вторинної електронної емісії. Принцип роботи фотоелектронного помножувача (ФЕП) видно з його схеми (див. мал. 3.1). Електрони, емітовані при освітленні фотокатода (ФК), дією електричного поля направляються на диноди (Д), з яких, при достатній енергії ($E \geq$ роботи виходу), можуть "вивільнювати" вторинні електрони.

Якщо коефіцієнт вторинної емісії $\delta > 1$, де δ - відношення кількості вторинних електронів до падаючих на динод, то відбувається помноження електронного потоку в δ^n разів (n - кількість динодів). Теоретично коефіцієнт підсилення фотоструму в ФЕП може досягати 10^6 .



Мал.3.1. До пояснення принципу роботи фотоелектронного помножувача (ФЕП):

ФК - фотокатод, Д - диноди, А - анод.



Мал. 3.2. Блок-схема лабораторної установки:

- Л, БЖ - еталонна лампа і її блок живлення;
- СП - спектральний прилад (ИСП-5І, призмовий);
- ФЕП - фотоелектронний помножувач;
- ВС-22 - блок живлення ФЕП;
- П - підсилювач постійного струму (У5-9);
- РП - реєструючий прилад (В7-20).

Основні характеристики фотоелементів

1. Інтегральна та спектральна чутливість.

- Інтегральна - чутливість фотоелемента до нерозкладеного світла певного джерела випромінювання. Оскільки існуючі джерела мають різні спектральні характеристики випромінювання, для визначення інтегральної чутливості прийнято користуватися еталонним джерелом - лампою розжарення з вольфрамовою спіраллю при температурі 2850 К.

- Спектральна чутливість - це відношення зміни фотоструму до зміни променистого потоку монохроматичного випромінювання на довжині хвилі λ :

$$S_{\lambda} = \frac{dI_{\phi}}{dF_{\lambda}}$$

Скануючи довжину хвилі випромінювання отримують спектральну характеристику фотоелемента, яка виражає залежність його спектральної чутливості від довжини хвилі падаючого монохроматичного випромінювання. Форма спектральної характеристики визначається типом фотокатода, його товщиною, матеріалами підкладки та вікна.

2. Вольтамперна (анодна) характеристика виражає залежність фотоструму від напруги між електродами (динодами) при незмінному світловому потоці. Незалежно від конструкції фотоелемента, вольтамперна характеристика є кривою з областю насичення.

3. Темновий струм виражає залежність струму, що протікає в колі фотоелемента при неосвітленому фотокатоді, від напруги між динодами. Величина цього струму важлива при виборі режиму роботи ФЕП.

Крім того важливими характеристиками фотоелементів є

- а) стомлюваність (визначає стабільність роботи ФЕП в часі);
- б) залежність чутливості фотоелемента від температури;
- в) частотна залежність (характеризує інерційність процесу перетворення променистої енергії в електричну при модуляції світлового потоку в часі).

Завдання і методика виконання роботи

Перед виконанням завдань ознайомитися зі схемою лабораторної установки (мал. 3.2) і правилами експлуатації окремих приладів. Зібрати установку згідно схеми.

1. Зняти залежність темпового струму I_T ФЕП від величини напруги живлення $I_T=f(U)$. Для цього:

- ввімкнути підсилювач постійного струму (У5-9) і реєструючий прилад (В7-20), регулятором нуля підсилювача встановити нуль на індикаторі В7-20;
- ввімкнути блок живлення ФЕП (ВС-22), дати йому прогрітися і ввімкнути тумблер високої напруги. Напруга живлення ФЕП по дається починаючи з 500 В до 1200 В через кожні 100 В регуляторами "грубо" (по 200 В) і "тонко" (по 20 В).

2. Зняти вольтамперну характеристику ФЕП при освітленні фотокатода $I_{\phi}=f(U)$ для монохроматичного випромінювання з $\lambda = 420$ нм;

- провести градування монохроматора (ИСП-5I) в межах 400 -650 нм, встановити барабан на поділці, що відповідає 420 нм;
- подати на лампу напругу живлення (8 - 10 В), впевнитися в наявності сигналу при напрузі живлення ФЕП 800-900 В;
- змінюючи напругу живлення ФЕП як в п.1, фіксувати фотострум.

3. Записати спектральну характеристику ФЕП $I_{\phi} = f(I_{\lambda})$.

I_{λ} - інтенсивність випромінювання лампи на довжині хвилі λ при постійній температурі спіралі Т. Для цього:

- по вольтамперній характеристиці ФЕП і залежності $I_T=f(U)$ вибрати оптимальну напругу живлення ФЕП, встановити її на блоці живлення ФЕП і надалі не змінювати;
- вимкнути живлення лампи і встановити нуль на індикаторі В7-20 зміщенням нуля підсилювача "віднімається" I_T) як в п.1.
- ввімкнути живлення лампи, для випромінювання з $\lambda =650$ нм одержати максимальний сигнал зміною напруги живлення лампи;
- повертаючи барабан пройти спектральну область 650-400 нм через 10 нм (25 точок), фіксуючи величину фотоструму I_{ϕ} .

4. Спектральну характеристику ФЕП привести до одиниці падаючого на фотокатод світлового потоку, враховуючи залежність інтенсивності випромінювання лампи від температури спіралі і довжини хвилі (розподіл енергії випромінювання по формулі Планка):

- визначити з допомогою пірметра температуру нитки розжарення лампи (Т(К)), розрахувати спектр випромінювання лампи в області 650-400 нм (через кожні 10 нм) як $I_{\lambda} = f(\lambda)$ при даній Т;
- виміряні значення I_{ϕ} поділити на відповідні розраховані значення інтенсивності випромінювання на цій же довжині хвилі, побудувати криву приведеної спектральної характеристики.

5. Оформити звіт. Результати досліджень представити як графіки $I_T = f(U)$, $I_{\phi} = f(U)$ - на одному малюнку,

$I_{\lambda} = f(\lambda)I_{\phi} = f(\lambda)$, $\frac{I_{\phi}}{I_{\lambda}} = f_{\lambda}(\lambda)$ - на одному малюнку.

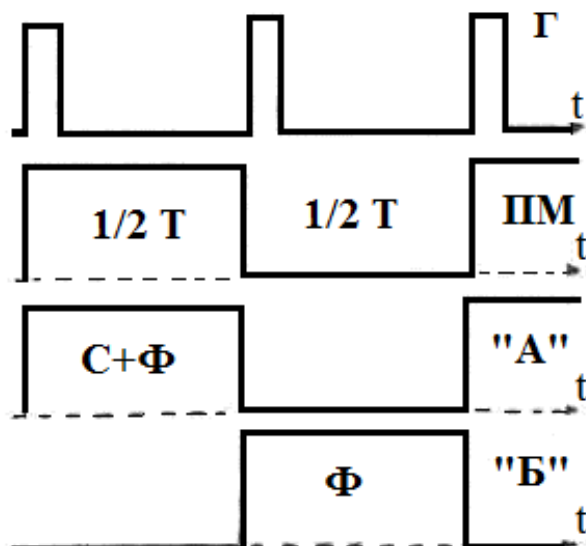
Контрольні запитання

1. Фотоефект і його закони. Зовнішній і внутрішній фотоефект.
2. Принцип роботи і використання фотоелектронних приладів.
3. Основні характеристики фотоелементів.
4. Фотоелектронні помножувачі.

Література

1. А.А.Шишловский. Прикладная физическая оптика. М.,Физматгиз,1961, 814 с.
2. Н.О.Чечик и др. Электронные умножители. М, 1957, 235 с.
3. Н.А.Соболева. Фотоэлектронные приборы. М, Наука, 1966, 310с.

Лабораторна робота № 4



МЕТОДИКА ВИДІЛЕННЯ СЛАБКИХ СВІТЛОВИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи: ознайомитися з модуляційною системою реєстрації слабких світлових потоків, визначити відносні інтенсивності спектральних ліній при модуляції світлового потоку.

Теоретичні відомості

Фотоелектричні методи реєстрації випромінювання одержали широке розповсюдження в спектрофотометрії процесів, що досліджуються в атомній та

ядерній фізиці [1] завдяки високій чутливості, необхідній для реєстрації слабких світлових потоків з досліджуваних джерел випромінювання (газові розряди, пересічні пучки частинок малої концентрації та ін.). При цьому корисний сигнал може складати лише декілька відсотків повного світлового потоку. Джерелом фонового сигналу в таких дослідах може бути як темновий струм фотоелектронних або каналових помножувачів та власні шуми системи реєстрації, так і паразитне випромінювання з досліджуваною довжиною хвилі, збуджене в інших процесах або в суцільному спектрі "засвіток". В таких випадках впевнене детектування корисного сигналу стає можливим лише з застосуванням спеціальних методик, зокрема модуляційних [2]. Робота такої системи в найпростішому виконанні зводиться до модуляції джерела випромінювання прямокутними імпульсами (див. мал. 4.1) таким чином, щоб півперіоду модуляції повний сигнал складався з корисного (С) і фонового (Ф) - С+Ф, а півперіоду - тільки з фонового Ф. Тривале і синхронне з модуляцією накопичення сигналів в першому і другому півперіодах дозволяє виділити корисний сигнал як їх різницю навіть при відношенні $C/\Phi < 1$ (в реальних дослідах може бути $C/\Phi < 1/100$).

Мал.4.1. Принцип виділення корисного сигналу (С) при модуляції випромінювання:

Г - тактовий генератор;

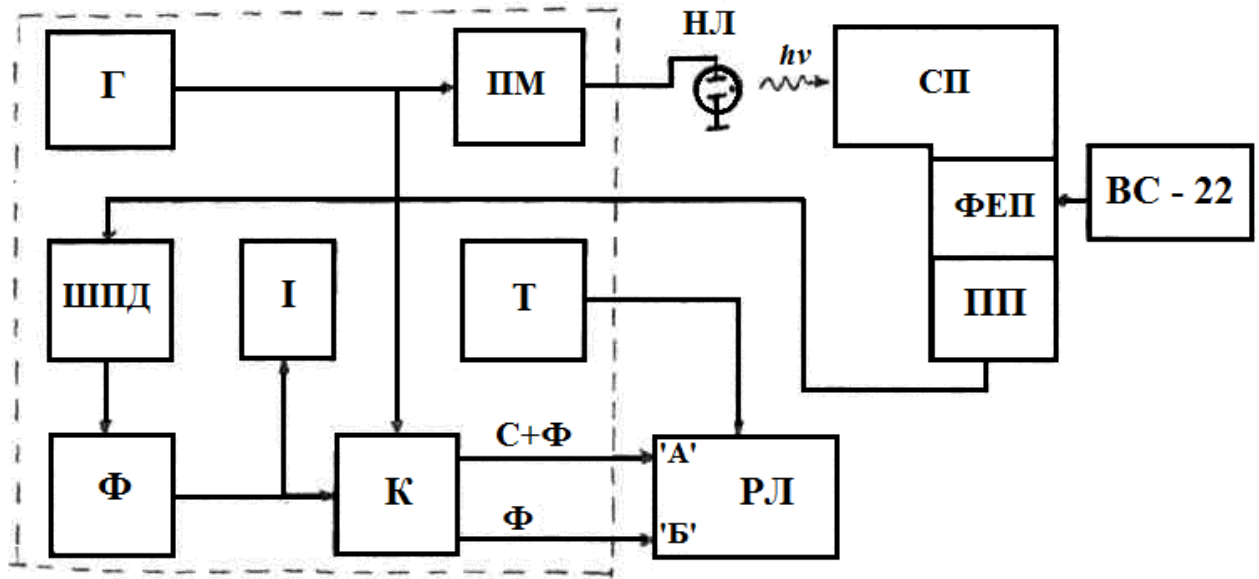
ПМ - підсилювач модуляційних імпульсів;

"А", "Б"- перелікові канали;

В "А" накопичується $+(C+\Phi)$.

В "Б" накопичується $-(\Phi)$.

"А"- "Б" = $(C+\Phi) - (\Phi) = C$;



Мал.4.2. Блок-схема лабораторної установки:

Г - генератор; ПМ - підсилювач модуляційних імпульсів;

НЛ - неонова лампа;

СП - спектральний прилад (ИСП-5І, призмий);

ФЕП і ВС-22 - фотоелектронний помножувач з блоком живлення;

ПП - попередній підсилювач; ШПД - широкосмуговий підсилювач - дискримінатор; Ф -

формував стандартних імпульсів; І - інтенсиметр; К - комутатор сигналів; Т - таймер;

РЛ – реверсивний лічильник Ф 5007.

Лабораторна установка

Блок-схема установки та модуляційної системи реєстрації випромінювання показана на мал.4.2. Прямокутні імпульси модуляції, амплітудою до 250 В, формуються в підсилювачі ПМ тактовими імпульсами генератора Г і подаються на неонову лампу (джерело випромінювання). При цьому випромінювання (корисний сигнал) спостерігається тільки в одному півперіоді модуляції.

Спектральний прилад СП виділяє частину цього випромінювання у вузькому інтервалі довжин хвиль, яка, фотоелектронним помножувачем ФЕП, що працює в режимі рахунку окремих фотоелектронів, перетворюється в електричні імпульси, частота слідування яких пропорційна інтенсивності виділеного випромінювання. Імпульси ФЕП підсилюються попереднім підсилювачем ПП, змонтованим разом з ФЕП, і далі основним підсилюючим каскадом ШПД, який складається з ширококутового підсилювача та дискримінатора, потрібного для "відрізання" менших по амплітуді фонових імпульсів.

Підсилені імпульси ФЕП, для можливості їх рахунку переліковими пристроями (частотомірами), в формувачі Ф стандартизуються по амплітуді (-2 В) і тривалості (0.9 мкс) і поступають на входи інтенсиметра І, що фіксує сумарний сигнал, та комутатора К. Останній синхронно з імпульсами модуляції розділяє сигнальні імпульси в два канали так, що в одному накопичується ОФ, а в другому - тільки Ф (лампа вимкнена). Ці сигнали поступають на входи "А" і "Б" реверсивного лічильника РЛ, який в ході вимірювань автоматично віднімає результати рахунку в каналах і, таким чином виділяє корисний сигнал С (див.мал.4.1).

Синхронний запуск і зупинка всієї системи реєстрації як в ручному, так і в автоматизованому режимі, забезпечується таймером Т, з кількома експозиційними діапазонами (1,2,...,16 с і комбінація). Вибір експозиції залежить від величини сигналу.

Конструктивно блоки Г, ПМ, ШПД, Ф, І, К та Т разом з відповідними регуляторами, які винесені на передню панель, зібрані в одному корпусі (див. мал. 4.2).

Завдання і методика виконання роботи

Перед виконанням завдань ознайомитися з схемою лабораторної установки і правилами експлуатації окремих приладів. Зібрати установку згідно блок-схеми (мал.4.2).

1. Ввести установку в робочий режим для чого:

- ввімкнути блок модуляції та реєстрації випромінювання;
- ввімкнути реверсивний лічильник Ф5007;
- ввімкнути живлення ФЕП (на ВС-22 спочатку тумблер "сеть" і після прогріву тумблер високої напруги).

2. Перевірити роботу системи реєстрації без корисного сигналу:

- ввімкнути підсилювач модуляції (тумблер "мод" в положенні "вкл", регулятор напруги U_m в положенні "0");
- входи "А" і "Б" реверсивного лічильника перемкнути в режим "сумир" (додавання) і серією з 5-7 вимірів визначити середню величину фону Ф;
- перемкнути один з входів лічильника в режим "вычит" (віднімання) і серією з 5-7 вимірів впевнитися, що результат рахунку наближається до нуля (в порівнянні з Ф).

3. Перевірити роботу системи реєстрації при інтенсивному сигналі для лінії NeI λ 585.2 нм):

- провести градування монохроматора в діапазоні 400-650 нм;
- встановити барабан на поділці, що відповідає λ 585.2 нм;

- повільно повертаючи барабан по інтенсиметру визначити точне положення лінії (по максимуму сигналу);
- перемикаючи входи реверсивного лічильника, серіями з 5-7 вимірів визначити середнє значення для С і Ф (як в п.2).

4. Провести дослідження випромінювання малої інтенсивності:

- по відомому спектру випромінювання неону вибрати лінію з малою інтенсивністю (наприклад λ 576.4 нм та ін.);
- за допомогою барабана монохроматора та інтенсиметра визначити точне положення вибраної лінії (чутливість інтенсиметра регулюється у відповідності до величини сигналу);
- серіями з 5-7 вимірів визначити середні значення С і Ф для вибраної лінії (аналогічно п.3). Дослідити інші 2-3 лінії.

5. Оформити звіт. Результати представити у вигляді таблиці

№, под	λ , нм	С, імп	Ф, імп	С/Ф
--------	----------------	--------	--------	-----

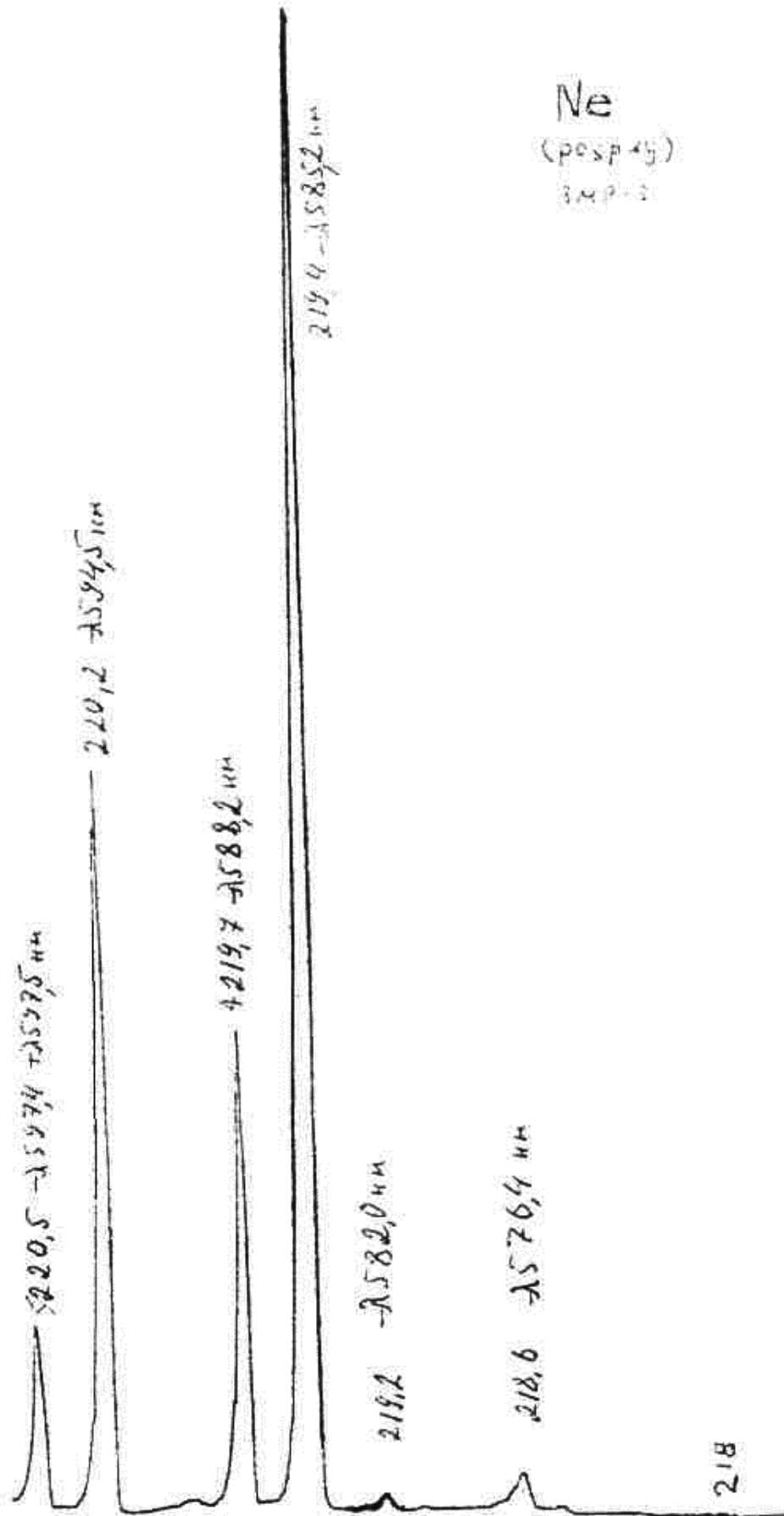
Визначити довірчий інтервал експериментальних даних.

Контрольні запитання

1. Градування спектральних приладів.
2. Призначення систем реєстрації слабких світлових потоків.
- 3.Методика виділення корисного сигналу при малих відношеннях сигнал/фон.

Література

1. А.А.Шишловский. Прикладная физическая оптика. М, Физматгиз, 1961,814 с.
2. А.И.Дашенко и др. ПТЭ, 1972, №4, с. 196.



РОЗРАХУНОК ТА ЮСТУВАННЯ ПРИЗМАТИЧНОГО СПЕКТРОГРАФА

1. Мета роботи

Навчитись розраховувати, юстувати та експериментально знаходити основні характеристики призматичного спектрографа.

2. Необхідні прилади та матеріали

Ртутна лампа (ПРК-2, ПРК-4), щілина, об'єктиви, призма, екран, лазер (ЛГ-55).

3. Теоретичні відомості

Оптичний прилад, який використовується для дослідження спектрального складу світла будь-якого джерела, називається спектральним приладом. Спектральний прилад дає можливість розділити випромінювання різних частот джерела світла. В цих приладах використовується явище заломлення променів (залежність показника заломлення речовини від довжини хвилі), дифракції або інтерференції світла.

Основною частиною спектрального приладу є диспергуюча частина, в ролі якої може бути використана прозора призма (або декілька призм), дифракційна ґратка або інтерференційний прилад.

Найбільш поширеним типом спектральних приладів є призматичний. Призми для них виготовляють з різних матеріалів в залежності від того, для якої області спектру використовується цей прилад. Для роботи в видимій області спектру служить скло з великою дисперсією (флінт), в приладах для ультрафіолету - кварц або силвін (для $\lambda > 200$ нм) і флюорит (для $\lambda < 200$ нм).

Для роботи в інфрачервоній області використовується кам'яна сіль, силвін, кварц, флюорит та інші спеціальні матеріали. Спектральний прилад, за допомогою якого можна фотографувати спектр, називається спектрографом. Спектрографи характеризуються дисперсією, світлосилою, роздільною здатністю, збільшенням тощо.

Якість спектру в великій мірі залежить від того, наскільки правильно та якісно виконано юстування спектрографа.

3.1. Основні частини спектрографа

Спектрограф складається в основному з п'яти головних частин: щілини S_p , коліматорного об'єктиву O_1 , диспергуючої системи (в нашому випадку призми P), об'єктиву камери O_2 , екрана.

На рис.1 показано хід променів в спектрографі для випадку, коли джерело випромінює три монохроматичні промені з довжинами хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

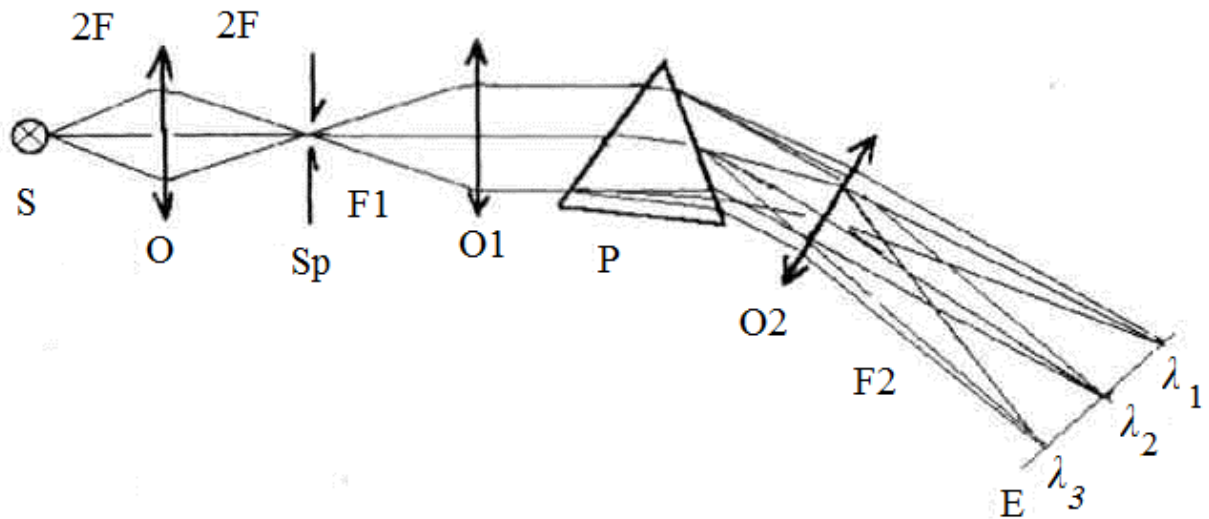


Рис.1. Оптична схема призматичного спектрографа

S - джерело випромінювання, O - лінза освітлювача, Sp - щілина, O - лінза коліматора, P - призма, O₂- лінза об'єктива, E - екран.

Щілина спектрографа разом з коліматорним об'єктивом складає коліматор. Коліматор використовується для одержання паралельного пучка променів, який направляється на призму. Призма розкладає паралельний пучок променів в ряд паралельних монохроматичних променів різних напрямків. За допомогою об'єктиву камери одержуємо монохроматичні зображення щілини, що і складає спектр.

Крім умови встановлення призми в паралельний пучок променів, її ще необхідно встановити в положення найменшого відхилення променів.

3.2. Хід променів через призму

Під кутом відхилення ми розуміємо кут, складений перетином продовження двох променів, а саме, променя що падає на призму і променя, що виходить із призми (рис.2).

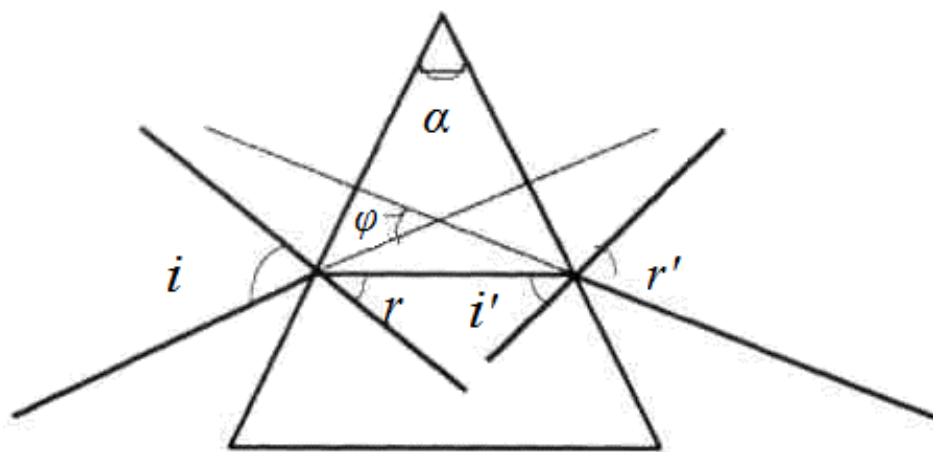


Рис.5.2. Проходження променів через призму.

Легко довести, що кут відхилення може приймати мінімальні значення при деякому значенні кута падіння i (або кута заломлення), тобто що

$$d\varphi/dr = 0, \quad d^2\varphi/dr^2 > 0$$

Виявляється, що ця умова виконується лише у випадку симетричного проходження променів через призму, тобто коли кути r' та r рівні між собою, а також рівні між собою кути i' та i .

У випадку рівнобедреної призми промені проходять паралельно основі призми.

З рис.2 видно, що

$$\varphi = (i + r') - (i' + r) = i + r' - \alpha$$

де φ - кут заломлення. Якщо $i = r'$ та $i = r$, то $r = \alpha/2$. Значить, $\varphi_{min} = 2i - \alpha$, а кут $i = (\alpha + \varphi_{min})/2$.

3.3. Кутова та лінійна дисперсія приладу

Кутова дисперсія призми показує зміну кута відхилення φ при зміні довжини хвилі λ , тобто вираз $d\varphi/d\lambda$.

При певному куті падіння i на призму φ залежить від показника заломлення n , а n , в свою чергу, залежить від довжини

$$d\varphi/d\lambda = d\varphi/dn \cdot dn/d\lambda,$$

де величина $dn/d\lambda$ - дисперсія матеріалу призми. Величину $d\varphi/d\lambda$ можна легко визначити для випадку проходження променів поблизу кута найменшого відхилення, використовуючи зв'язок між цим кутом та показником заломлення:

$$n = \sin i / \sin r = (\sin(\alpha + \varphi_{min}) / 2) / \sin \alpha / 2$$

звідки

$$\frac{dn}{d\varphi_{min}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cos(\alpha + \varphi_{min}) / 2}{\sin \alpha / 2}; \quad \frac{d\varphi_{min}}{dn} = \frac{2 \sin \alpha / 2}{\cos(\alpha + \varphi_{min}) / 2}$$

Оскільки $\varphi_{min} = 2i - \alpha$; $(\alpha + \varphi_{min})/2 = i$, то

$$\frac{d\varphi_{min}}{dn} = \frac{2 \sin \alpha / 2}{\cos i} = \frac{2 \sin \alpha / 2}{\sqrt{1 - \sin^2 i}}$$

Використовуючи закон заломлення $\sin i = n \sin i'$, та враховуючи що $i' = \alpha/2$, маємо $\sin i = n \sin \alpha/2$. Тоді

$$\frac{d\varphi_{min}}{d\lambda} = \frac{2 \sin \alpha / 2}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha / 2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

З цього виразу видно, що кутова дисперсія призми не залежить від її розмірів, а лише від кута заломлення та від матеріалу призми.

Дисперсія речовини $dn/d\lambda$ визначається за інтерполяційною формулою Гартмана $n = n_0 + c/(\lambda + \lambda_0)^a$, де n , c , λ_0 , a - емпіричні сталі. Знаючи значення n для трьох λ , легко знайти ці сталі.

Для більшості сортів скла $a \cong 1$, тоді $n = n_0 + c/(\lambda + \lambda_0)$, а дисперсія $dn/d\lambda = -c/(\lambda - \lambda_0)^2$.

В багатьох спектрографах використовується призма з $\alpha = 60^\circ$, Для цього випадку

$$\frac{d\varphi_{\min}}{d\lambda} = \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}.$$

Кутова дисперсія декількох послідовно розміщених призм, встановлених під кутом найменшого відхилення, дорівнює алгебраїчній сумі кутових дисперсій окремих призм.

Отже, кутова дисперсія залежить від кількості призм, дисперсії речовини та кута заломлення призми.

Але через велике поглинання світла кількість призм не можна сильно збільшувати, оскільки це може привести до повного внутрішнього відбивання світла.

Знаючи кутову дисперсію та фокусну віддаль об'єктива камери f , можна легко визначити лінійну дисперсію, яка дорівнює

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda}.$$

Лінійна дисперсія є основною характеристикою спектрографа. Вона показує віддаль в мм між двома лініями, що відрізняються на 1 Е. Практично це показує, скільки Е міститься в 1 мм спектру.

Формула справедлива для тих спектрографів, для яких об'єктиви камери є ахроматичними. У випадку неахроматичних об'єктивів площина, в якій одержуємо спектр, буде нахилена під певним кутом до оптичної осі, що приводить до збільшення лінійних дисперсій при даному куті заломлення і фокусній віддалі об'єктива камери. Для такого випадку лінійна дисперсія виражається формулою

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \frac{f_2}{\sin \varepsilon},$$

де ε - кут нахилу спектру до оптичної осі камери.

Оскільки ахроматичні об'єктиви значно дорожчі, тому в більшості спектрографів в камерах використовуються неахроматичні об'єктиви.

3.4. Роздільна здатність спектрографа

Кожна лінія спектру є дифракційною картиною з головним та побічними максимумами. За критерієм Релея вважають, що два близькі головні максимуми λ_1 та λ_2 , що мають приблизно однакову інтенсивність, можна ще достатньо добре відділити один від другого, якщо головний максимум дифракційної картини для λ_1 співпадає з першим мінімумом дифракційної картини для λ_2 .

Досвід показує, що для розділення двох ліній достатньо, щоб інтенсивність між лініями була не більшою 75% від максимальної. Роздільна здатність виражається співвідношенням $\lambda/\Delta\lambda = R$, де R - безрозмірна величина, яка може змінюватися від декількох сот (для приладів з малими призмами) до мільйона і більше для великих інтерференційних приладів.

Теорія показує, що гранична роздільна здатність призми пропорційна величині основи призми і та дисперсії речовини призми: $R = t \cdot dn/d\lambda$.

Роздільна здатність декількох однакових призм рівна алгебраїчній сумі роздільних здатностей окремих призм.

$$R = N t \cdot dn/d\lambda,$$

де N - кількість однакових призм.

Якщо бокова грань призми не освітлена повністю, це приводить до зменшення R . Для такого випадку

$$R = (t_1 - t_2) \cdot dn/d\lambda.$$

Окрім того, практична роздільна здатність завжди менша граничної і залежить від аберації об'єктива, дефектів зернистості фотоемульсії (лінія не різко виражена), оптики, ширини щілини.

Попередні формули для R були одержані в умовах нескінченно вузької щілини, абсолютно монохроматичного світла та чіткого фокусування спектру.

Для кінцевої ширини щілини досягнути цих граничних значень роздільної здатності неможливо. Тому Шустер запропонував наближену формулу, яка дає залежність між теоретичною, інакше кажучи, граничною роздільною здатністю R , та чистотою спектру P , тобто практичною роздільною здатністю для кінцевої ширини щілини, у вигляді

$$P = R \lambda / (\psi S + \lambda),$$

де S - ширина щілини, а $\psi = d/f_l$ - апертурний кут, під яким з центру щілини видно діаметр d об'єктива коліматора, що має фокусну віддаль f_l . Якщо $S \rightarrow 0$, то ми знайдемо, що $P \rightarrow R$, тобто чистота спектру рівна його граничній роздільній здатності.

3.5. Світлосила спектрографа

При фотографуванні спектру густина почорніння при інших сталих умовах залежить від кількості променистої енергії, розрахованої на одиницю поверхні, що пройшла через спектрограф. Якщо величину монохроматичного потоку, що падає на одиницю поверхні спектру в середині тілесного кута позначити через E , а величину тілесного кута, під яким енергія збирається на екрані, позначити через w , то мірою світлосили S спектрографа при роботі буде величина освітленості.

Припустимо, що об'єктив коліматора, а також об'єктив камери заповнені, і що їх діаметри D_1 та D_2 рівні, тобто збільшення системи дорівнює одиниці. Повний потік променистої енергії певної довжини хвилі, що проходить через щілину і об'єктив коліматора за одиницю часу, дорівнює

$$E_1 = \varepsilon_1 w_1 l_1 S_1.$$

Тут E_1 - кількість променистої енергії, що проходить за одиницю часу через поверхню щілини в середині тілесного кута, рівного одиниці; w_1 - тілесний кут, під яким з центру щілини видно об'єктив коліматора; l_1 та S_1 - відповідно довжина та ширина щілини.

Якби в середині спектрографа не було втрат на поглинання в матеріалах оптики, або на відбивання від її поверхонь, тоді цей потік повністю дійшов би до екрану. В дійсності величина цього потоку $E = \varepsilon w l S$, де l та S - довжина та ширина зображення щілини, що

дорівнює частині α потоку E_l , тобто $\varepsilon w l S = \alpha \varepsilon_1 w_1 l_1 S_1$ і вираз для світлосили має вигляд:

$$C = \varepsilon w = \alpha \varepsilon_1 w_1 l_1 S_1 / l S$$

Якщо підставити $l = l_1 \cdot f/f_1$ та $S = S_1 \cdot f/f_1$ і скоротити на l_1 та S_1 , одержимо

$$C = \alpha \varepsilon_1 w_1 f_1^2 / f^2 A \varepsilon_1.$$

Коли діаметри об'єктивів коліматора та камери однакові і повністю заповнені, тоді величини w та w_1 відносяться обернено пропорційно квадратам відповідних фокусних віддалей $w f^2 = w_1 f_1^2$ звідки кінцевий вираз

$$C = \alpha \varepsilon_1 w = A \varepsilon_1 D^2 / f^2.$$

Сталий коефіцієнт включає в себе вказані втрати. Значить, світлосила спектрографа залежить тільки від квадрата діючого отвору камери D/f не залежить від величини відносного отвору камери. Реальна світлосила залежить від втрат, які визначаються величинами α та A . Деколи ці втрати можуть бути достатньо значними.

4. Юстування спектрографа

Якість спектру в великій мірі залежить від того наскільки правильно виконано юстування спектральної установки. Юстування спектральної установки складається з двох таких етапів: юстування спектрального приладу та юстування системи "спектральний прилад + освітлювальна система + джерело світла" Юстування спектральної установки слід починати з юстування спектрографа.

При юстуванні спектрографа потрібно щоб:

1. оптичні осі коліматора та об'єктива камери знаходились в площині головного перетину диспергуючої системи;
2. щілина була орієнтована паралельно ребру заломлення призми;
3. коліматор давав паралельний пучок променів, тобто, щоб щілина була розміщена в фокальній площині цього об'єктива;
4. призма була встановлена в положенні найменшого відхилення;
5. екран співпадав з поверхнею, на якій розміщений спектр. Для попереднього юстування спектральних приладів слід користуватися джерелами світла, які дають лінійчатий спектр.

За допомогою лазера, встановленого замість екрана, необхідно встановити на одну оптичну вісь центр щілини, коліматор, призму, об'єктив, лінзу освітлювача та ртутну лампу.

Насамперед встановлюють вхідну щілину в фокальну площину коліматорного об'єктива. Необхідно відмітити, що ця площа буде єдиною для дзеркального об'єктива (ИСП-22) і об'єктивів із скла, виправлених на хроматичну аберацию для певної ділянки спектру.

Паралельність щілини заломлюючому ребру призми встановлюють спочатку грубо (на око), а потім, для покращення якості спектру, більш точно (коли спектрограф уже зібраний). Для цього діафрагмують щілину так, щоб освітлювалася тільки її центральна частина. На екрані одержимо горизонтальну лінію, яка буде очевидно перпендикулярною заломлюючому ребру. Якщо потім щілину відкрити повністю по висоті, то спектральні лінії повинні бути перпендикулярними вказаній лінії.

В положення найменшого відхилення призми встановлюють спостерігаючи зміщення спектру при повертанні призми, міняючи кут падіння.

Накінець, фокусування камери проводять так. Встановивши об'єктив камери на робоче місце, екран переміщують на невеликі віддалі та повертають навколо своєї осі так, щоб на екрані спостерігався чіткий спектр.

Закінчивши юстування спектрографа, замальовують спектр. В цій роботі використовується самий простий метод освітлення, а саме - освітлення щілини за допомогою одної лінзи.

Щоб використати весь об'єктив коліматора необхідно, щоб виконувалось рівняння.

$$D' / d = D / f_1,$$

де D' та D - діаметри освітлювальної лінзи і об'єктива O_1 , d - віддаль L від щілини S ; f - фокусна віддаль об'єктива коліматора.

5. Опис установки та хід виконання роботи

Оптична схема установки зображена на рис.1 (інший варіант - на рис.3). Джерелом світла лінійчатого спектру є ртутна лампа (ПРК-4 або ПРК-2).

Вхідна щілина є стандартною (заводською). Об'єктивами коліматора та камери служать скляні неахроматичні лінзи O_1 та O_2 . Диспергуюча частина спектрографа складається із скляної призми, для якої $n_1 = 1.69$, $n_2 = 1.68$, $n_3 = 1.669$ відповідно для спектральних ліній $\lambda = 404.6$ нм, $\lambda = 435.8$ нм та $\lambda = 486.1$ нм HgI.

Роботу необхідно виконувати в такій послідовності:

1. Розрахувати нормальну та номінальну ширину щілини і граничні значення основних характеристик спектрографа (лінійну дисперсію, світлосилу, роздільну здатність) за допомогою розглянутих вище формул.
2. Провести юстування спектрографа (освітити щілину, поставити щілину в фокальну площину об'єктива коліматора, виставивши призму в положення найменшого відхилення, від фокусувати камеру).
3. Замалювати спектр (щілина при цьому має бути такою, щоб лінії були достатньо вузькими та достатньо інтенсивними). Ідентифікувати (ототожнити) одержані спектральні лінії за таблицею, що додається (див. Додаток 1).
4. Побудувати дисперсійну криву (залежність віддалі між спектральними лініями в залежності від довжин хвиль: $l = f$ і визначити експериментально лінійну дисперсію $\Delta\lambda/\Delta l$).
5. Порівняти одержану експериментально лінійну дисперсію з відповідним значенням, одержаним теоретично.

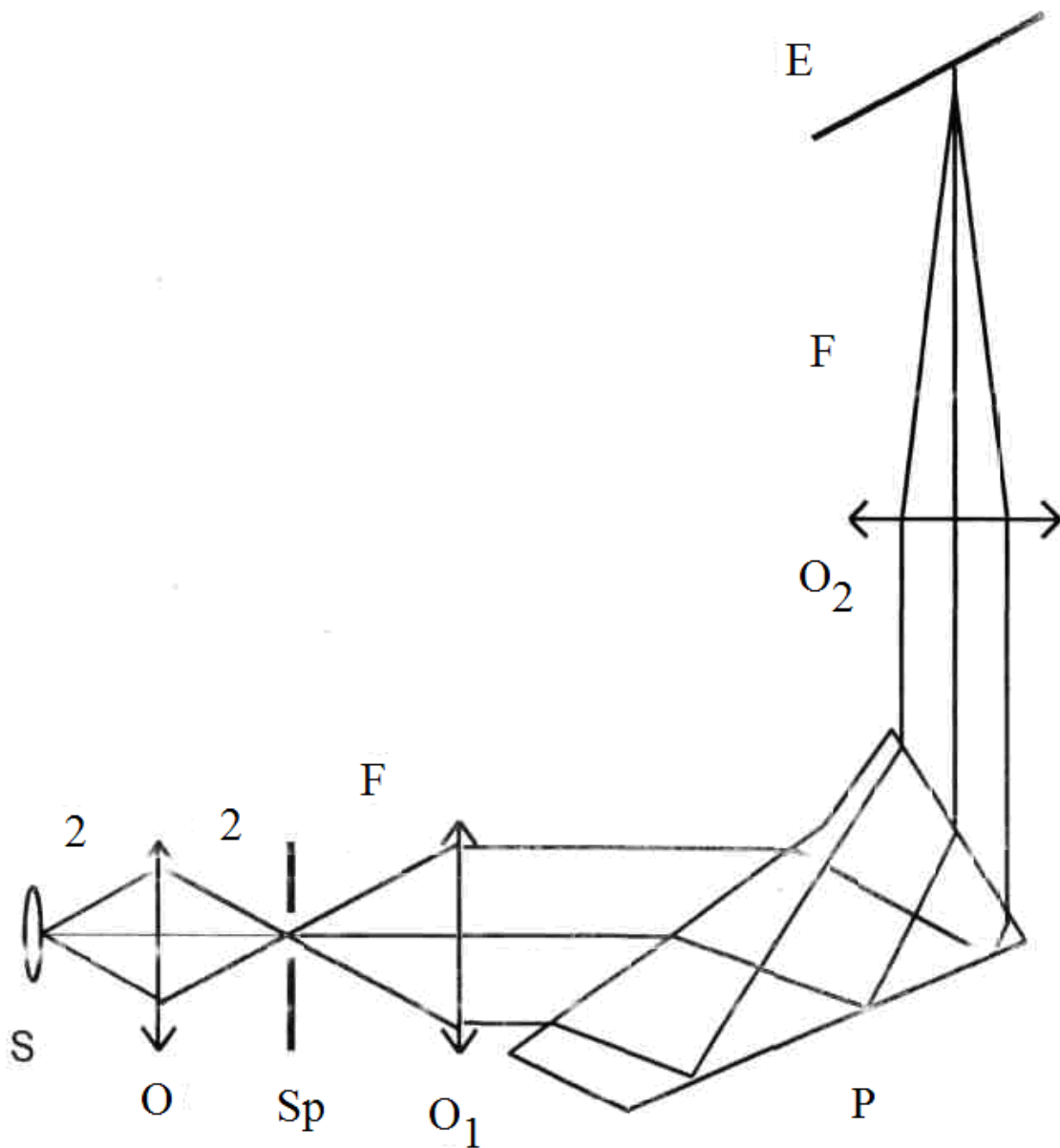


Рис.5.3. Оптична схема призматичного спектрографа (2 варіант).

6. Контрольні запитання

1. Який оптичний прилад називають спектрографом? Які елементи він включає?
2. Які функції виконують коліматор і об'єктив камери?
3. Призма як диспергуючий елемент. Умови її установки.
4. Характеристики спектрографа: кутова та лінійна дисперсія, роздільна здатність і світлосила, їх взаємозв'язок.
5. Юстування призматичного спектрографа.

Література

1. А.Н.Зайдель, Г.В.Островская, Ю.И.Островская. Техника і практика спектроскопии. - Наука, 1972.
2. А.А.Шишловский. Прикладная физическая оптика. Физматиздат, 1962.
3. К.И.Тарасов. Спектральные приборы. - Машиностроение, 1977.

Додаток 1
Довжини хвиль і частоти деяких спектральних ліній ртуті

Довжина хвилі (в повітрі), Е	Частота см ⁻¹	Інтенсивність	Колір
3650,146	27388,4	500	Ультрафіолетова ділянка спектру
3654,883	27353,2	200	
3663,276	27290,2	400	
3704,18	26988,9	20	
3801,658	26296,9	2	
3906,41	25591,7	15	
3983,977	25093,4	(400)	
4046,561	24705,4	300	Фіолетовий
4077,811	24516,1	150	
1108,066	24335,5	5	

4339,235	23039,1	20	Синій
4343,634	23015,7	7	
4347,496	22995,3	50	
4358,35	22938,0	500	
4916,036	20335,9	50	Зелено-голубий
4951,9	20188,7	(2)	
4960,32	20154,4	(5)	
4961,89	20148,0		
5460,74	18307,5	2000	Зелений
5769,59	17327,46	1000	Жовтий
5790,654	17264,4	500	Жовтий

Лабораторна робота №6

РОЗРАХУНОК ТА ЮСТУВАННЯ СПЕКТРОГРАФА З ПЛОСКОЮ ДИФРАКЦІЙНОЮ ГРАТКОЮ

1. Мета роботи

Навчитися розраховувати спектральний прилад з дифракційною ґраткою та дзеркалами, здійснити його юстування, вивчити основні параметри та характеристики такого приладу.

2. Необхідні прилади та матеріали

Дифракційна ґратка (репліка), вгнуті дзеркала, матовий екран, лазер (ЛГ-55 або інший), лінза.

3. Теоретичні відомості

Для одержання спектру того чи іншого джерела світла використовуються спектральні прилади: спектрографи та монохроматори. Диспергуючим елементом в них є скляні (або кварцові) призми або відбиваючі дифракційні ґратки. В залежності від диспергуючого елемента, що використовується, спектральні прилади розділяються на призматичні та дифракційні. В даній роботі використовується дифракційна ґратка. Тому розглянемо основні характеристики дифракційного приладу.

Одержання спектру в дифракційному приладі базується на явищі інтерференції дифрагованих променів світла. Останні одержуються при падінні паралельних променів від коліматора на дифракційну ґратку. Дифракційна картина спостерігається в фокальній площині вихідного об'єктиву (дзеркала), тому тут має місце дифракція Фраунгофера.

Дифракційна ґратка є плоским металічним (алюмінієвим) дзеркалом з великим коефіцієнтом відбивання, на яке нанесена спеціальним різцем велика кількість штрихів (300, 600 або 1200 штрихів на мм). Штрихи мають різну форму (трикутник, пилка та ін.) в залежності від того, для якої ділянки спектру буде використовуватися дана ґратка.

Пучок паралельних променів від вхідного коліматора (див оптичну схему на рис.1) направляєється під деяким кутом до площини дифракційної ґратки. Кут відраховується від перпендикуляра до площини ґратки і називається кутом падіння i .

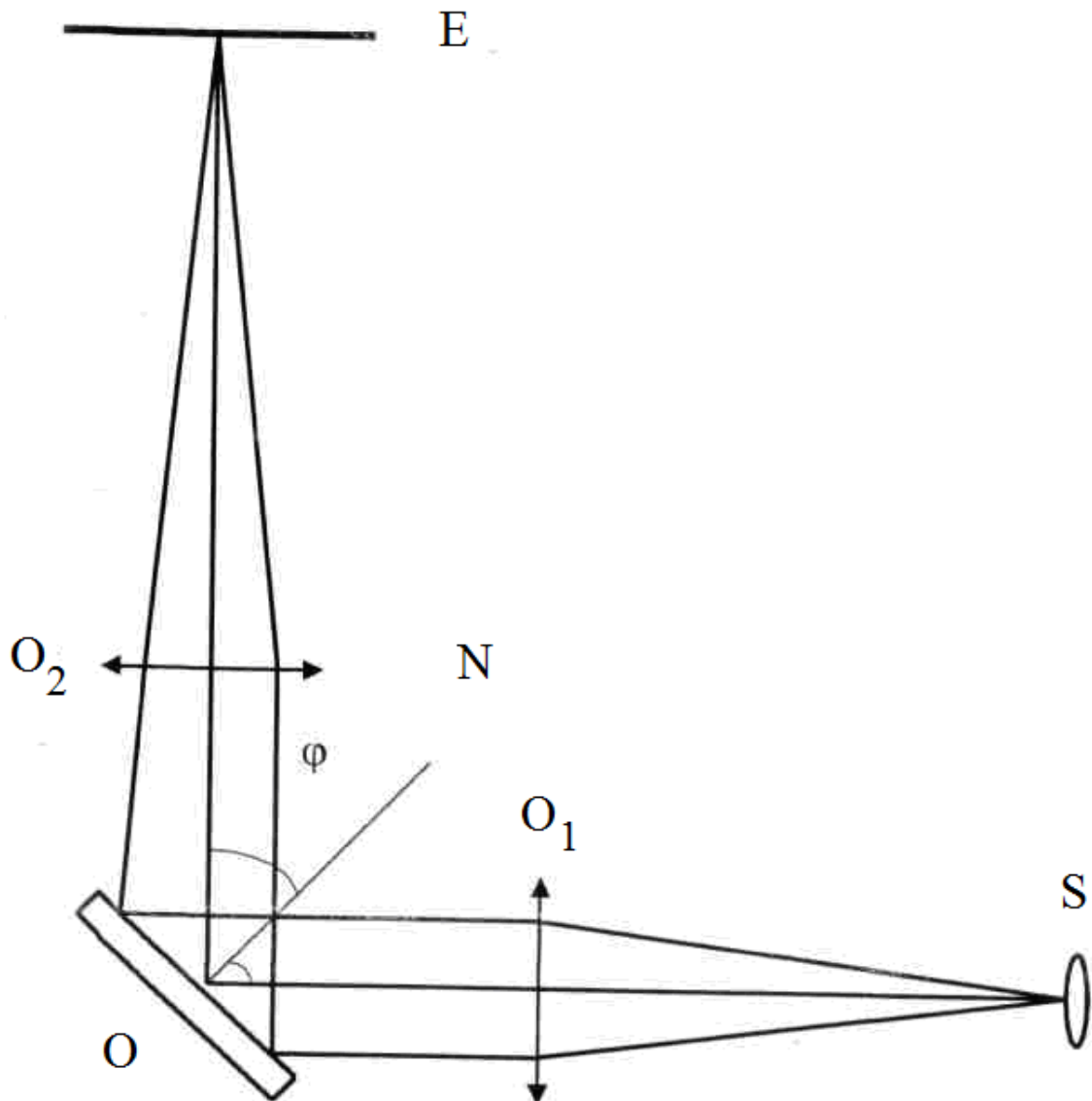


Рис.6.1. Відбивання променів дифракційною ґраткою.

Дифраговані промені різної довжини хвилі відбиваються під різними кутами φ і називаються кутами дифракції. Монохроматичні промені однакової λ будуть паралельними між собою, тобто відбиваються від різних ділянок ґратки під одним і тим же кутом, тому їх можна зфокусувати в фокальній площині вихідного коліматора (дзеркала).

Умова утворення головних максимумів

$$b \cdot (\sin i + \sin \varphi) = \pm k \lambda, \quad (1)$$

де b - стала ґратки (1/300, 1/600 або 1/1200), k - порядок спектра "+" - додатній, "-" - від'ємний), λ - довжина хвилі.

В випадку $i = -\varphi = \varphi_0$ маємо центральну світлову смугу (спектр нульового порядку). Вліво і вправо від нульового порядку знаходяться додатній та від'ємний порядки спектру. Кутова дисперсія ґратки

$$d\varphi / d\lambda = k / \cos \varphi \quad (2)$$

При малих φ кутова дисперсія є сталою величиною в широкій області довжин хвиль. Ця обставина дає можливість визначити довжини хвиль в спектрі, використавши розрахунки.

Для цього достатньо з великою точністю виміряти сталу ґратки (наприклад, електронним мікроскопом).

На відміну від призматичного, де дисперсія змінюється при зміні λ , дифракційний спектр є нормальним, тобто віддаль між лініями з однаковою різницею в довжинах хвиль буде однаковою незалежно від абсолютної величини λ . Це дає, можливість значно простіше розшифровувати дифракційні спектри.

Роздільна здатність приладу визначається в основному ґраткою і дорівнює

$$r = kN, \quad (3)$$

де N - повна кількість штрихів ґратки, тобто $N = L/b$, де L - ширина заштрихованої ділянки ґратки.

Лінійна дисперсія визначається рівнянням

$$D = f k / b \cos \varphi \quad [\text{мм/Е}] \quad (4)$$

де f - фокусна віддаль дзеркала камери (вихідного коліматора), пов'язана з радіусом кривизни дзеркала співвідношенням $R = 2f$.

Обернена лінійна дисперсія

$$d = 1/D \quad [\text{А/мм}]. \quad (4a)$$

Світлосила характеризує кількість світлової енергії, що попадає від джерела на вихід приладу.

Для дифракційного приладу величина освітленості ґратки площиною S залежить від віддалі до джерела l , що визначається фокусною віддаллю коліматора. Освітленість поверхні обернено пропорційна квадрату віддалі, тому світлосила дорівнює:

$$\text{Світлосила} = S/f, \quad (5)$$

де S - площа заштрихованої частини ґратки, f - фокусна віддаль дзеркала коліматора.

Відносний отвір визначає світлосилу приладу і пов'язаний з нею так: квадрат відносного отвору дорівнює світлосилі. Тому

$$\text{Відносний отвір} = \sqrt{\text{світлосила}} = \sqrt{S} / f,$$

або

$$\text{Відносний отвір} = 1 / (f_1 \cdot \sqrt{S}) \quad (5a)$$

Ширина і умови освітлення вхідної щілини визначають як інтенсивність спектральних ліній, так і практичну роздільну здатність приладу. Ширина вхідної щілини визначає також форму контура спектральної лінії та поляризацію світла. Слід мати на увазі, що практична роздільна здатність приладу залежить від багатьох факторів, розглянутих в спеціальній літературі.

Ширина геометричного зображення S'_0 вхідної щілини в спектральному приладі залежить від фокусних віддалей використовуваних дзеркал

$$S'_0 = S_0 f_2 / f_1, \quad (6)$$

де f_1 та f_2 - фокусні віддалі відповідно вхідного та вихідного коліматора.

Якщо використані однакові дзеркала $f_1 = f_2$, тоді зображення вхідної щілини не буде потовщеним ($S'_0 = S_0$).

Величина зображення висоти щілини h' визначається співвідношенням, аналогічним (6):

$$h' = f_2 / f_1 h_0 \quad (7)$$

Слід мати на увазі, що вирази (6) та (7) не враховують астигматизму ввігнутих дзеркал, а сферичним дзеркалам властивий значний астигматизм. Для зменшення астигматизму використовуються асферичні поверхні.

Збільшуючи ширину щілини на вході, змінюється контур спектральної лінії. Спочатку освітленість лінії росте, а потім залишається сталою і не залежить від ширини щілини. При цьому змінюється ширина лінії. Збільшити освітленість лінії можливо лише зменшенням фокусної віддалі вхідного коліматора.

Мінімальне значення ширини вхідної щілини, при якому розширенням за рахунок дифракції на самій вхідній щілині можна нехтувати, називається "нормальною шириною щілини". Величина S_n залежить від освітленості щілини і дорівнює

$$S_{nk} = 2\lambda f_1 / D_1 \quad (8)$$

при освітленні вхідної щілини когерентним світлом, або

$$S_{nnk} = \lambda f_1 / D_1 \quad (8a)$$

при освітленні її некогерентним світлом. Нормальна ширина вхідної щілини S_n забезпечує пропускання через вхідне коліматорне дзеркало енергії, що складає приблизно 80% енергії, яка падає на вхідну площину.

На практиці важко здійснити оптимальне освітлення вхідної щілини і повністю використати апертуру приладу. Зокрема важко одержати рівномірне освітлення вхідної щілини від точкового джерела і хорошу роздільну здатність при сильній освітленості ліній в спектрі. Існує багато способів освітлення вхідної щілини при використанні різних джерел. Всі ці способи описані в літературі.

4. Завдання та методика виконання роботи

1. Розрахувати за даними дифракційної ґратки та дзеркал всі параметри спектрографа, зібраного за оптичною схемою, показаною на рис.2. При цьому розраховуються кутова дисперсія, лінійна дисперсія, обернена лінійна дисперсія, відносний отвір, світлосила, нормальна ширина для зеленої лінії I 546.1 нм, роздільна здатність в першому порядку спектру.
2. Побудувати на білому папері кольоровий спектр найбільш інтенсивних ліній ртуті в видимій області (див. Додаток) в масштабі, що відповідає розрахованій лінійній дисперсії та порівняти його з одержаним на екрані.

3. Зібрати макет дифракційного спектрографа за оптичною схемою і провести його юстування.
4. Одержати на матовому екрані спектр ртутної лампи і визначити обернену лінійну дисперсію. Порівняти одержану експериментально величину з розрахованою, використавши побудований теоретично спектр.

5. Методичні вказівки

1. Для розрахунків користуються формулами (2), (3), (4), (4a), (5), (5a), (8a). Всі розраховані величини приводяться в вигляді окремої таблиці з вказаними розмірностями. В цю таблицю слід також внести фокусні віддалі дзеркал та розміри заштрихованої ділянки дифракційної ґратки і кількість штрихів на міліметр.

2. Для побудови спектру використовують таблиці спектральних ліній (див Додаток 1), листок білого паперу та кольорові олівці. За розрахованою оберненою лінійною дисперсією визначають віддаль між лініями в спектрі і наносять їх на спектр в тому кольорі, який відповідає даній довжині хвилі. На спектр нанести не менше п'яти - шести ліній різного кольору (від синього до червоного).

3. Макет приладу збирається на спеціальних оптичних рейках з використанням рейтерів, на яких закріплені дзеркала, ґратка, щілини, екран, джерело світла, лазер та лінза для освітлення вхідної щілини.

Підбираючи висоту щілини, плоского дзеркала і лазерного променя, добиваються розміщення всіх елементів в одній горизонтальній площині.

Вимірявши висоту над рейкою середини щілини, ставлять на таку саму висоту і центр ґратки. Потім повертанням в горизонтальній та вертикальній площинах вхідного коліматорного дзеркала виводять лазерний промінь на центр ґратки (при цьому вважають, що площина ґратки перпендикулярна рейці). Зараз відповідним повертанням ґратки можна направити лазерний промінь на центр вихідного дзеркала. Відбитий від нього промінь повинен проходити паралельно столу на тій самій висоті від нього, на якій він входить в щілину. В такому випадку всі елементи спектрографа розміщені в одній горизонтальній площині.

УВАГА! Торкатись поверхні ґратки та дзеркал руками або якимись предметами суворо заборонено! Ґратка і дзеркала повинні бути закриті кришками, які знімаються тільки на час вимірів та при настройці.

Оскільки вхідний коліматор освітлює ґратку паралельними променями, то віддаль від вхідного дзеркала до ґратки вибирається довільною, але не дуже великою.

4. На рейку перед щілиною ставиться лінза і ртутна лампа і рівномірно (по можливості) освітлюється щілина.

УВАГА! Робота при включеній лампі проводиться лише в скляних світлозахисних окулярах для запобігання опіків ультрафіолетом.

Переміщуючи екран, одержують на ньому найбільш чітке зображення спектру. При цьому можна в невеликих межах переміщати вхідну щілину та екран. Повертаючи ґратку, одержують спектри в різних порядках дифракції. На папері потрібно замалювати зображення спектральних ліній на екрані.

Вимірюючи віддаль між двома яскравими видимими лініями в спектрі ртуті, визначають обернену лінійну дисперсію. Обернену лінійну дисперсію можна також визначити, вимірявши віддаль між нульовим спектром (порядком) і спектральною лінією відомої довжини хвилі.

6. Контрольні запитання

1. В чому полягає явище інтерференції пучка світла?
2. Дифракційна ґратка як диспергуючий елемент.
3. Основні характеристики дифракційного спектрографа і їх взаємозв'язок.
4. Юстування дифракційного спектрографа.

Література

1. А.Н.Зайдель, Г.В.Островский, Ю.И.Островский. Техника и практика спектроскопии. Наука, 1972.
2. А.А.Шишловский. Прикладная физическая оптика. Физматиздат, 1961.
3. К.И.Тарасов. Спектральные приборы. – Машиностроение 1977.

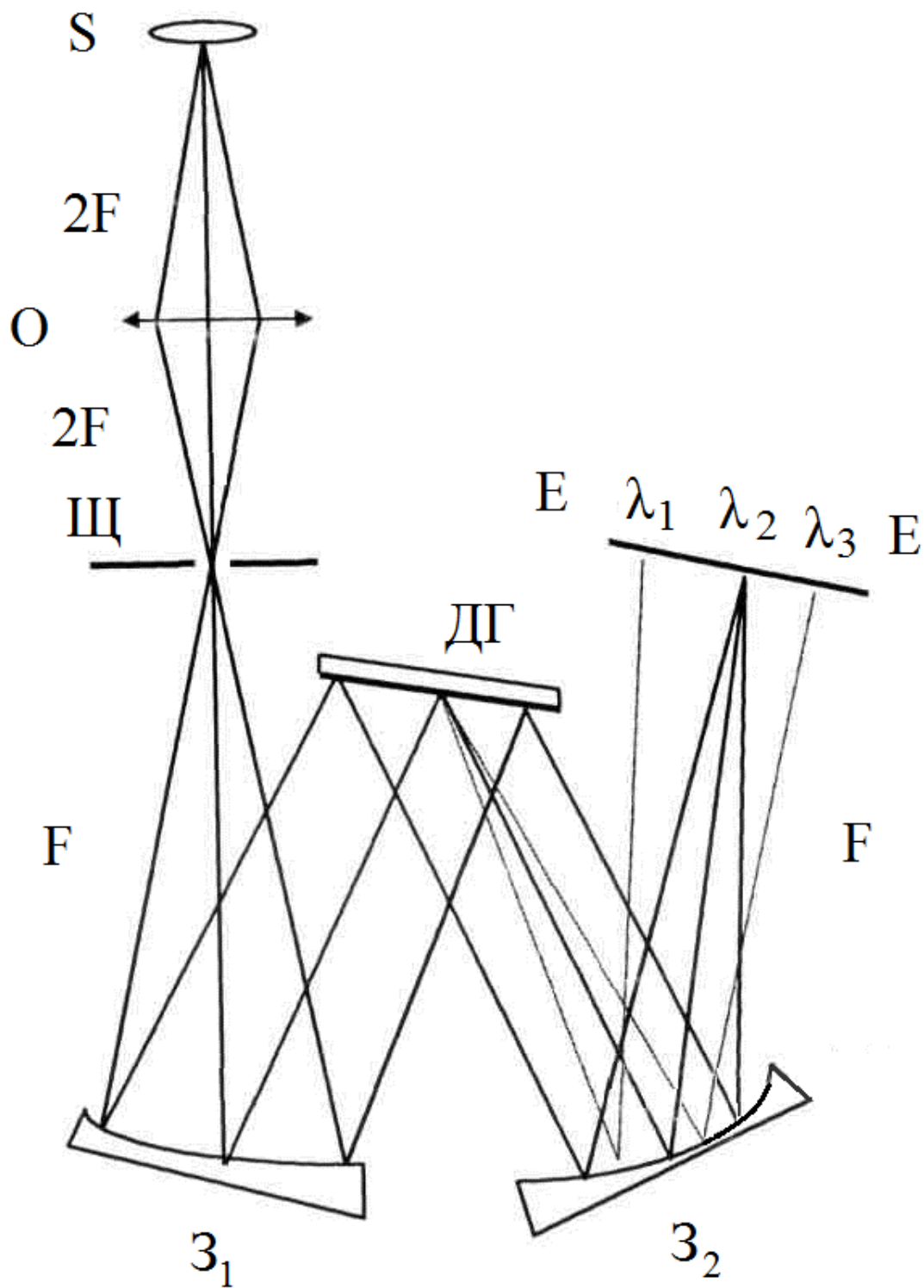


Рис.6.2. Оптична схема дифракційного спектрографа. S - джерело випромінювання, O - лінза освітлювача, Щ - щілина, З_1 і З_2 - сферичні дзеркала, ДГ - дифракційна ґратка, λ_1 , λ_2 , λ_3 - положення спектральних ліній на екрані.