

Волинський національний університет імені Лесі Українки

Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

Федосов С. А., Шаварова Г. П., Кевшин А. Г., Шигорін П. П.

ОПТИКА

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

Частина 1

Луцьк

2021

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки
(протокол № 4 від 15 грудня 2021 р.).

Рецензенти: *Захарчук Д. А.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри фізики та вищої математики, Луцький НТУ;

Сахнюк В. Є. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

Ф 33 Федосов С. А., Шаварова Г. П., Кевшин А. Г., Шигорін П. П. **Оптика** : метод. рек. до лаб. роб. Ч. 1. Луцьк : ВНУ ім. Лесі Українки, 2021. 55 с.

Методичні рекомендації до лабораторних робіт «Оптика» – складова комплексу робочих матеріалів створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузей знань 01 Освіта/Педагогіка, 10 Природничі науки, галузей знань технічних наук. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт охоплюють розділи: «Фотометрія», «Геометрична оптика», «Інтерференція світла» курсу «Оптика». Видання містить набір матеріалів необхідних для організації повноцінної аудиторної та самостійної роботи студентів, є базовим для подальшого поглибленого вивчення навчальних дисциплін фізико-технічної підготовки та спецкурсів спеціальності і рекомендовано використовувати після засвоєння або паралельного вивчення лекційного матеріалу з навчальної дисципліни «Оптика».

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програм підготовки й рекомендовано студентам спеціальностей 014.08 Середня освіта (Фізика), 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали, спеціальностей галузей технічних наук.

ЗМІСТ

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ПІДГОТОВКИ, ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАВДАНЬ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ	4
ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ І ВЛАСТИВОСТІ ОПТИЧНИХ ПРИЛАДІВ	5
1. Похибки вимірювань	5
2. Властивості випадкових похибок вимірювання	5
3. Вага вимірів	7
4. Похибки функцій виміряних величин	8
5. Властивості ока	10
6. Властивості оптичних приладів	12
 Лабораторна робота № 1 ФОТОМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА	 16
 Лабораторна робота № 2 ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНИ ЛІНЗ	 20
 Лабораторна робота № 3 ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ПРОЗОРИХ ТВЕРДИХ ТІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОСКОПА	 25
 Лабораторна робота № 4 ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ РІДИН ЗА ДОПОМОГОЮ РЕФРАКТОМЕТРА	 30
 Лабораторна робота № 5 ВИМІРЮВАННЯ КУТА МІЖ ГРАНЯМИ ПРИЗМИ ТА ЇЇ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ГОНІОМЕТРА	 34
 Лабораторна робота № 6 ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА ЗА ДОПОМОГОЮ БПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ	 41
 Лабораторна робота № 7 ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ СКЛЯНОЇ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОЇ ПЛАСТИНКИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИМ МЕТОДОМ	 46
 ЛІТЕРАТУРА	 51
 ДОДАТОК	 52

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ПІДГОТОВКИ, ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАВДАНЬ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

1. При підготовці до роботи студент повинен:

- розібратися за літературними джерелами в теоретичних основах явищ та властивостях речовин, які вивчаються;
- занотувати теоретичні відомості в робочому зошиті, накреслити принципові схеми, записати прядок виконання роботи;
- підготувати відповіді та контрольні запитання.

2. До наступної роботи допускаються студенти, які захистили звіт за попередню роботу.

3. Перед виконанням лабораторної роботи студенту необхідно:

- ознайомитись із лабораторним устаткуванням, джерелами живлення, вимірювальними приладами;
- у викладача чи лаборанта отримати дозвіл на збирання лабораторного макету та вмикання живлення.

4. Під час виконання роботи студент зобов'язаний:

- неухильно дотримуватись правил техніки безпеки;
- дбайливо відноситись до приладів та лабораторного обладнання;
- усі зміни в електричних схемах проводити лише після знеструмлення лабораторного устаткування;
- вимірювання проводити з максимальною акуратністю. Результати вимірювань та клас точності вимірювальних приладів занести в робочий зошит;
- результати вимірювань та попередніх розрахунків показати викладачеві.

5. Після виконання лабораторної роботи студент повинен:

- привести до порядку робоче місце;
- здати лабораторне устаткування лаборанту. *Студент несе особисту відповідальність за отримане в тимчасове користування майно навчального закладу.*

6. При оформленні звіту студенту необхідно:

- занести в робочий зошит результати вимірювань;
- обчислити похибки непрямих вимірювань. Ключові результати подати в вигляді довірчого інтервалу з вказуванням одиниць вимірювань (графічний матеріал оформляється на міліметровому папері та вклеюють їх до полів робочого зошита);
- зробити загальні висновки, що містять пояснення отриманих результатів;
- звіт готується кожним студентом індивідуально.

7. Для захисту лабораторної роботи студенту потрібно:

- подати звіт лабораторної роботи;
- захистити отримані результати.

ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ І ВЛАСТИВОСТІ ОПТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

1. Похибки вимірювань

Які б не були досконалими оптичні прилади, незмінність умов, в яких їх використовують, і методи робіт, вимірювання неминуче супроводжуються похибками. Тому кожен раз визначають тільки наближене значення величини, яка вимірюється, а похибка, що виникла при цьому, характеризує точність вимірювань.

Під похибкою вимірювання розуміють різницю між вимірним і істинним значеннями величини. По характеру утворення похибки поділяють на три види: систематичні, випадкові і грубі (промахи).

Систематичними називають похибки вимірювань, які утворюються в результаті дії постійних причин, що викликають ці похибки. При повторних вимірюваннях в однакових умовах вони залишаються постійними за величиною і знаком. Систематичні похибки виникають головним чином через конструктивні недоліки вимірювальних приладів, їх неправильне встановлення, неточне градування шкал і лімб і т.д. Похибки, які виникають в результаті вказаних причин, називають також інструментальними або приладовими.

Систематичні похибки виникають і від зміни параметрів середовища, в якому проводять вимірювання, наприклад від зміни температури, тиску і вологості повітря. До систематичних похибок можуть бути віднесені помилки, що виникають від недосконалості органів чуття спостерігача. Наприклад, наведення бісектора або сітки ниток окуляр-мікрометра на зображення штриха шкали спостерігач завжди проводить односторонньо, правіше або лівіше відносно лінії симетрії.

Вплив систематичних похибок на результати вимірювань повинен бути виявлений в процесі роботи і врахований при опрацюванні результатів.

Випадковими називаються похибки, які не можна усунути при обробці результатів вимірювань. Вони неминучі, не мають закономірності і для окремого вимірювання не піддаються обліку. При повторних вимірюваннях в однакових умовах числові значення випадкових похибок різні за величиною і знаком. Оскільки такі похибки неминучі, то спостерігач при роботі повинен прагнути зменшити їх вплив на результати вимірювання. Причинами випадкових похибок можуть бути: недосконалість форми об'єкту і контрольно-вимірювальних приладів, нестабільність умов спостережень (температури, тиску, вологості повітря і вібрації), недосконалість органів чуття спостерігача і ін.

Під грубими (промахами) розуміють випадкові похибки, величина яких різко перевищує допустимі і які явно спотворюють результати вимірювання. Причинами грубих похибок можуть бути: недостатнє вивіряння і регулювання приладу, необережність при роботі, раптові зміни зовнішніх умов під час спостережень. Грубі похибки виявляють при повторних вимірюваннях і обов'язково виключають з результатів вимірювань.

2. Властивості випадкових похибок вимірювання

Вивчення законів виникнення і впливу випадкових похибок на результати вимірювання – предмет теорії похибок. Згідно цієї теорії і даним практики відомо, що випадкові похибки вимірювань мають наступні властивості:

1) випадкові похибки не можуть перевершувати за абсолютною величиною певної межі;

2) випадкові похибки – позитивні і негативні – однаково часто зустрічаються в ряді вимірювань;

3) середнє арифметичне випадкових похибок вимірювань однієї і тієї ж величини, проведених за однакових умов прямує до нуля при необмеженому зростанні числа вимірювань;

4) чим більша абсолютна величина похибки, тим вона рідше зустрічається у ряді вимірювань.

При великому числі вимірювань випадкові похибки підпорядковуються закону нормального розподілу Гауса. Практично число вимірювань повинне бути близько 10. Проводити більше 10-15 вимірювань недоцільно. З третьої властивості витікає, що при великому числі вимірювань n сума випадкових погрешностей δ близька до нуля, позитивні похибки компенсуються негативними, а в межах, коли n велике, сума їх рівна нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n} = 0.$$

Тут під випадковою похибкою δ розуміється різниця між істинним значенням величини x_{ic} і окремим вимірюванням її значенням x_i , тобто $\delta = x_{ic} - x_i$.

З теорії похибок виходить, що для оцінки точності вимірювань якнайкращим критерієм є середня квадратична похибка, отримана із всієї сукупності істинних значень випадкових похибок даного ряду. Згідно формули Гаусса, квадрат цієї похибки рівний середньому арифметичному квадратів істинних величин випадкових похибок:

$$\sigma^2 = \frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n} \quad \text{або} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}. \quad (1)$$

Величину σ називають середньою квадратичною похибкою окремого вимірювання або ряду вимірювань.

Формулу (1) на практиці застосовують рідко, оскільки істинне значення x_{ic} вимірюваної величини в більшості випадків невідоме, отже, невідомі істинні значення випадкових похибок. Тому за істинне значення вимірюваної величини приймають середнє арифметичне $\langle x \rangle$ ряду обмеженого числа вимірювань, а різниця між x і кожним вимірюванням – за найбільш ймовірні похибки Δx .

Нехай із ряду вимірювань x_1, x_2, \dots, x_n отримані найбільш ймовірні похибки:

$$\Delta x_1 = \langle x \rangle - x_1, \Delta x_2 = \langle x \rangle - x_2, \dots, \Delta x_n = \langle x \rangle - x_n.$$

Сума найбільш ймовірних похибок даного ряду вимірювань рівна нулю при великому числі вимірювань. На підставі теорії похибок середню квадратичну похибку, яка характеризує точність одного вимірювання, обчислюють за формулою Бесселя:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Однією з важливих властивостей середньої квадратичної похибки є її надійність в оцінці точності при обмеженій кількості вимірювань, яка визначається за формулою

$$\sigma_m \approx \frac{\sigma}{\sqrt{2n}},$$

де σ_m – середня квадратична похибка самої середньої квадратичної похибки σ . Прийнято вважати σ_m надійною, якщо вона визначена з похибкою, що не перевищує $0,25\sigma$, що практично здійснене при мінімально необхідному числі вимірювань $n = 8$.

Точність результату вимірювання характеризується середньою квадратичною похибкою середнього арифметичного:

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{і} \quad S = \sqrt{\frac{\sum \Delta x^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

Відомо, що випадкова або найбільш ймовірна похибка вимірювання за абсолютною величиною не перевершує потрійної середньої квадратичної похибки:

$$\Delta x_{rp} = \pm 3\sigma. \quad (4)$$

Часто для оцінки точності одного вимірювання використовують ймовірну похибку ρ , яка отримана за умови, що половина випадкових або найбільш ймовірних похибок за абсолютним значенням менше вірогідної, а половина – більше її:

$$\rho = \pm 0,674 \sqrt{\frac{\sum \Delta x^2}{n-1}} = \pm 0,674\sigma.$$

При цьому точність результату вимірювання оцінюється за формулою

$$R = \frac{\rho}{\sqrt{n}}.$$

Наприклад, для 11 вимірювань ($n = 11$) кута призми середня квадратична похибка одного вимірювання рівна

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x^2}{n-1}} = \sqrt{26,2} = \pm 5,2''.$$

Середня квадратична похибка результату вимірювання

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{5,2}{\sqrt{11}} = \pm 1,6''.$$

Гранична похибка $\Delta x_{rp} = \pm 3\sigma$ складає $\pm 15,6''$. Одержаний результат записується так: $\Theta = 22^\circ 30' 25'' \pm 1,6''$.

Якщо сума найбільш ймовірних похибок не дорівнює нулю, то це значить, що в результати ввійшли систематичні похибки, які необхідно виявити і виключити.

3. Вага вимірів

Нерідко одну і ту ж величину вимірюють інструментами різної точності або одним інструментом, але за різних умов. В обох випадках результати вимірювань нерівнозначні. Щоб знайти найбільш ймовірне значення шуканої величини,

необхідно взяти до уваги перевагу кожного вимірювання і оцінити його числовим значенням, яке називається вагою. Кожна вага, таким чином, показує ступінь довіри до результату вимірювання. Вагу вводять в обчислення, виходячи з конкретних умов вимірювання, наприклад, з числа прийомів або характеру вимірювальних засобів. Частіше за все вагу встановлюють залежно від середньої квадратичної похибки результату вимірювання. Чим менше середня квадратична похибка, тим надійніше результат і тим більше його вага. Вага вимірювання приймають обернено пропорційними відповідним середнім квадратичним похибкам.

Середня квадратична похибка одного вимірювання (одиниці ваги), вага якого рівна одиниці, визначається виразом

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum p \Delta x^2}{n-1}},$$

де n – число нерівноточних вимірів; p – вага.

Середня квадратична похибка загальної арифметичної середини

$$M = \sqrt{\frac{\sum p \Delta x^2}{(n-1)\sum p}}.$$

4. Похибки функцій виміряних величин

Якщо шукана величина – функція одного або декількох аргументів, кожен з яких визначений прямими вимірами, то вона визначена непрямими вимірами.

Розглянемо деякі функції і їх середні квадратичні похибки.

Функція суми ($x = y + z + t$) або різниці ($x = y - z - t$) двох, трьох і більше незалежних величин. Середня квадратична похибка

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}, \quad (6)$$

тобто рівна кореню квадратному із суми квадратів середніх квадратичних похибок аргументів.

Функція добутку ($x = yz$) або ділення ($x = \frac{y}{z}$). Середня квадратична похибка

$$\sigma_x = x \sqrt{\left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2}, \quad (7)$$

де σ_y і σ_z – середні квадратичні похибки прямих вимірювань аргументів.

Формула (7) може бути легко отримана логарифмуванням і диференціюванням функцій. Так, для добутку

$$\ln x = \ln y + \ln z, \quad \frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} + \frac{dz}{z}; \quad (8)$$

для ділення

$$\ln x = \ln y - \ln z, \quad \frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} - \frac{dz}{z}. \quad (9)$$

Перехід до середньої квадратичної похибки здійснюється зведенням всіх членів (8) і (9) в квадрат і заміною диференціалів середніми квадратичними похибками:

$$\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2,$$

звідки і отримуємо формулу (7).

Функція загального виду $x = f(y, z, \dots, u)$ від багатьох незалежних змінних.

Середня квадратична похибка

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)^2 \sigma_u^2}, \quad (10)$$

де y, z, \dots, u – істинні значення аргументів, виміряні з відповідними похибками $\delta_y, \delta_z, \dots, \delta_u$; вони можуть бути представленими у вигляді $y + \delta_y, z + \delta_z, \dots, u + \delta_u$. При цьому функція x також зміниться на істинну похибку δ_x . Маємо

$$x + \delta_x = f(x + \delta_y, z + \delta_z, \dots, u + \delta_u).$$

Оскільки значення $\delta_y, \delta_z, \dots, \delta_u$ малі, то розкладемо функцію за формулою Тейлора, зберігаючи лише члени, які містять перші степені малих похибок. Отримаємо

$$x + \delta_x = f(y, z, \dots, u) + \frac{\partial f}{\partial y} \delta_y + \frac{\partial f}{\partial z} \delta_z + \dots + \frac{\partial f}{\partial u} \delta_u,$$

звідки

$$\delta_x = \frac{\partial f}{\partial y} \delta_y + \frac{\partial f}{\partial z} \delta_z + \dots + \frac{\partial f}{\partial u} \delta_u. \quad (11)$$

Щоб перейти до середньої квадратичної похибки за формулою (10), слід піднести всі члени рівняння (11) до квадрату і замінити значення $\delta_y, \delta_z, \dots, \delta_u$ середніми квадратичними похибками.

Таким чином, середня квадратична похибка функції загального вигляду (див. формулу (10)) рівна кореню квадратному з суми добутків квадратів частинних похідних по кожному аргументу на квадрат середньої квадратичної похибки відповідного аргументу.

В оптичних вимірюваннях нерідко точність результату вимірювання оцінюють відносною помилкою, тобто відношенням абсолютного значення похибки до середньої виміряної величини об'єкту, причому зберігають знак і назву похибки, яку при цьому використовують (середня, середня квадратична, вірогідна, відносна похибка і т.д.). *Наприклад*, якщо фокусна відстань об'єктиву $f' = 399,5$ мм виміряна

з похибкою $S = \pm 0,5$ мм, то відносна похибка $\frac{S}{f'} = \pm \frac{0,5}{399,5} = \pm 0,12\%$.

При підрахунку похибок немає необхідності виражати їх великим числом значущих цифр. Їх кількість повинна визначатися точністю вимірювання величини. На практиці достатньо обмежитися однією, рідко двома цифрами; *наприклад*, оптична деталь завтовшки 5,26 мм виміряна з середньою квадратичною похибкою $\pm 0,0418$ мм. В даному випадку достатньо обмежитися значенням $\pm 0,04$ мм.

Числа слід округляти за наступним правилом:

1) якщо остання цифра менша 5, то цифри, які залишаються не змінюються, *наприклад* замість 12,731 після заокруглення отримуємо 12,73;

2) якщо остання цифра більше 5, то передостанню цифру збільшують на одиницю, тобто замість 12,736 маємо 12,74;

3) якщо остання цифра рівна 5, то за наявності попередньої непарної цифри останню збільшують на одиницю, а при наявності парної – цифру 5 відкидають, *наприклад* для 12,735 заокруглене число рівне 12,74, а для 12,745 воно залишається рівним 12,74.

Перш ніж вибрати відповідний метод вимірювання і контрольно-вимірювальний прилад, необхідно знати або встановити допуск на величину, яка вимірюється. Похибка вимірювання не повинна перевищувати 0,1-0,2 величини допуску.

Точність оптичних вимірювань, які здійснюються за допомогою зорових труб, мікроскопів і інтерферометрів, залежить від чутливості останніх. Ступінь чутливості приладів визначається властивостями світла, яке використовується, способом реєстрації спостережуваних процесів і властивостями оптичного приладу.

У даний час відомі три способи реєстрації процесів: візуальний, фотографічний і фотоелектричний. Основним приймачем випромінювання у видимій області спектру є око. Розглянемо властивості ока які важливі при візуальних спостереженнях.

5. Властивості ока

Око людини являє собою оптичну систему, в деякій степені аналогічну об'єктиву фотографічного апарату. До основних властивостей ока відносяться акомодация, адаптация і роздільна здатність.

Властивість ока розглядати предмети, що знаходяться на різних відстанях, називається *акомодациєю* або *акомодацийною здатністю*. Зміна форми хрусталика, яка при цьому відбувається, що викликає зміну фокусної відстані ока, забезпечує отримання різкого зображення предмету на сітківці ока. Межа акомодациї від дальньої до ближньої точки чіткого бачення визначає широту акомодациї, яка змінюється з віком людини.

Для нормального ока широта акомодациї знаходиться в межах від нескінченно віддаленої точки до найближчої точки, розміщеної на відстані 250 мм від ока, або від 0 до 4 діоптрій. Відстань, рівну 250 мм, вважають найзручнішою для розглядання предметів і називають відстанню найкращого зору або відстанню найкращого бачення.

Око, подібно оптичному приладу, має глибину різкого зображення, так звану гостроту акомодациї. Око, акомодоване на предмет, що знаходиться на відстані S , різко бачить предмети, які розташовані дещо далі або ближче за цю відстань. При діаметрі зіниці ока 2 мм гострота акомодациї $\pm 0,3$ діоптрій і обмежується гостротою зору (кружком найменшого розсіяння).

Здатність ока пристосовуватися до різної яскравості називається *адаптацією*. Залежно від яскравості предмету, а при спостереженні в приладі – від яскравості зображення діаметр зіниці ока змінюється від 2 до 7-8 мм.

Пристосування ока до яскравості, що змінюється, вимагає часу. Так, при переході з яскравого освітленого місця до темного потрібно 40-50 хвилин для повної адаптації; процес адаптації при переході з темноти на яскраве світло йде дуже швидко.

Нормальна освітленість при точних вимірюваннях повинна бути 50-250 лк. Освітленість зображення предмету і відлікових шкал слід прирівняти. Світлове збудження, яке здатне сприймати око, адаптоване до темноти, називається *абсолютною границею зорового відчуття*. Астрономи за міру границі світлового збудження приймають освітленість на зіниці $9 \cdot 10^{-9}$ лк, коли око може бачити зірки шостої величини. При лабораторних дослідженнях з «штучними зірками» (малими точковими джерелами світла) отримано інше значення – $2,44 \cdot 10^{-9}$ лк.

Роздільною здатністю ока або *гостротою зору* називають якнайменший кут, під яким роздільно видні два предмети, наприклад дві точки або лінії. Роздільна здатність залежить від діаметра зіниці ока, освітленості, контрасту і форми предмета. У разі точкових предметів і за нормальних умов спостереження роздільна здатність ока при діаметрі зіниці 2 мм рівна одній кутовій хвилині. При зменшенні або збільшенні діаметра зіниці ока від 2 мм роздільна здатність зменшується. Якщо діаметр зіниці менше 1 мм, то роздільна здатність зменшується із-за дифракції світла, а більше 2 мм – в результаті впливу сферичної і хроматичної аберації і розсіяння світла усередині ока.

Гранична контрастна чутливість середнього ока складає 1-2 %, тобто два предмети видні роздільно, якщо різниця в яскравості фону і предметів не нижче 1-2 %.

Особливим випадком є розгляд окремих предметів, наприклад, зірки на темному небі або темної нитки на світлому фоні. В останньому випадку нитка видна при товщині, рівній в кутовій мірі 2-2,5".

На практиці точність наведення на контрольований об'єкт оцінюють за допомогою штрихових шкал. Точність наведення, або точність поперечної установки незброєним оком, залежить головним чином від форми шкали і контрольованого предмету. Існує декілька способів наведення.

1. Поєднання перехрестя ниток з краєм темного широкого штриха (рис. 1а) або темного диска (рис. 1б). У цьому випадку похибка наведення рівна 30-60".

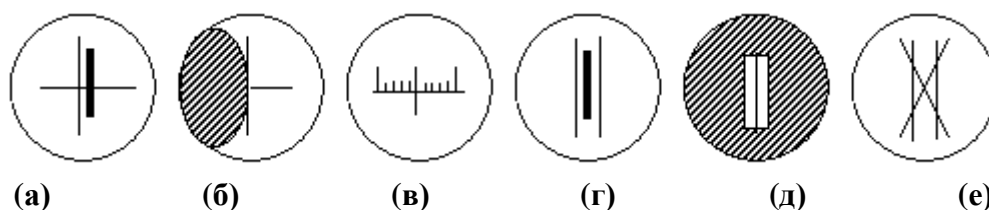


Рис. 1. Вид поля зору при суміщенні:

- (а) тонкого штриха краєм товстого; (б) тонкого штриха з краєм темного диска; (в) двох тонких штрихів; (г) штриха і бісектора; (д) штриха і щілини; (е) косоного штриха і бісектора

2. Ноніусна установка – поєднанням штрихів, між якими знаходиться лінія розділу – ноніус (рис. 1в) або верньєр кутомірного інструменту. Похибка дорівнює 10-15".

3. Бісекторна установка – симетричне розташування штриха між двома тонкими нитками бісектора (рис. 1г) або краями щілини (рис. 1д). Помилка наведення рівна 6-8". До останнього випадку відноситься спосіб наведення косою перехрестя ниток на штрих, бісектор, щілину і т.д. (рис. 1е). Висока чутливість ока при бісекторному наведенні пояснюється його високою здатністю розрізняти несиметричне розташування об'єктів. Гостроту зору за відношенням до поперечного зсуву штрихів іноді називають ноніальною гостротою і приймають рівною 10". При наведенні за бісекторним способом відношення ширини штриха до відстані між нитками бісектора повинна бути 0,5-0,9.

Око здатне сприймати світло в діапазоні довжин хвиль 400–760 нм. Найбільшу спектральну чутливість при денному освітленні око проявляє для випромінювання з довжиною хвилі 555 нм (зелена частина спектру). Для зменшення стомлюваності ока при тривалому спостереженні в оптичних приладах бажано застосовувати зелений світлофільтр. Освітленість робочого місця, журналу для записів спостереження і даного зображення повинна бути однаковою.

До важливих властивостей ока відносяться здатність оцінювати долю інтервалу відлікової шкали, поле зору ока і бінокулярний зір. Найсприятливіша умова, коли око може оцінити 0,1, а іноді і 0,05 інтервалу, створюється при видимій відстані між штрихами шкали 1,5-2 мм (в кутовій мірі 20-27').

Величина поля різкого бачення нерухомого ока рівна 4° або 17 мм в просторі предметів на відстані якнайкращого бачення і визначається розмірами жовтої плями (діаметр 1,25 мм) і задньою фокусною відстанню ока (22,8 мм при акомодатії на нескінченність). Жовта пляма – найбільш чутлива частина сітківки ока. Кути, під якими рухоме око розглядає простір, називають кутами огляду; в горизонтальній площині кут огляду рівний 150°, а у вертикальній площині – 120°. Чітке бачення предметів нерухомими очима обмежено полем зору 4°.

Сприйняття навколишнього простору двома очима називається бінокулярним зором, який значно полегшує оцінку розмірів і різновіддаленості предметів. Бінокулярне поле зору складає кут 120°.

Здатність очей до тривимірного сприйняття простору називається стереоскопічним зором. Кут, під яким сходяться зорові осі очей, направлені в точку предмету, називається паралактичним кутом або паралаксом. Різниця паралаксів двох віддалених точок предмету характеризує роздільну здатність стереоскопічного зору, рівну 10".

При спостереженні близьких предметів осі очей сходяться під деяким кутом, який називається кутом конвергенції, максимальне значення якого 32°, а при відстані 250 мм – 13-15°. Відстань між очима, що називається очним базисом, 58-72 мм; середнє значення очного базису прийнято рівним 65 мм.

6. Властивості оптичних приладів

Висока точність вимірювань за допомогою ока забезпечується застосуванням оптичних контрольно-вимірювальних приладів (зорових труб і мікроскопів), що мають необхідну чутливість.

Під *точністю вимірювань* розуміють якісну оцінку вимірювань, що характеризується близькістю результатів вимірювань до істинного значення

величини, яка вимірюється. Точність оптичних вимірювань оцінюється головним чином точністю приладу. Точність деяких приладів виражають ціною поділки відлікової шкали (найменшим інтервалом між двома сусідніми штрихами шкали). Іноді ціну поділки відлікового пристрою приймають за допустиму величину основної похибки приладу.

Здатність приладу реагувати на зміни величини, що вимірюється, називається *чутливістю*, яка визначається відношенням зміни сигналу або показу вимірювального приладу до зміни величини, що вимірюється. У приладів, призначених для вимірювання довжин, чутливість виражається передаточним числом, тобто відношенням довжини одного інтервалу поділки до ціни поділки. *Наприклад*, при довжині інтервалу 0,8 мм і ціні 0,01 мм чутливість рівна відношенню 80:1.

Важливою характеристикою вимірювальних приладів є *межі вимірювання* – найбільше і найменше значення вимірюваної величини.

В оптичних вимірюваннях використовують поперечне і поздовжнє наведення (установлення) перехрестя на шкалу, марку або контролюючий об'єкт з подальшим зняттям відліків.

Кожне наведення супроводжується похибками поперечного і поздовжнього установлення, величина яких залежить від дифракції світла, залишкової аберації і розсіяного світла в оптичних приладах. Якщо вплив аберації, розсіяного світла і інших конструктивних недоліків на точність установлення можна звести до мінімуму або усунути повністю, то дія дифракції світла неминуча. Дифракція світла обмежує роздільну здатність оптичної системи.

З теорії дифракції світла відомо, що роздільна здатність зорових труб залежить від діаметра D діючого отвору об'єктиву, а у мікроскопів – від апертурного кута σ_A . Роздільна здатність ідеального об'єктиву в кутовій мірі

$$\psi'' = \frac{120''}{D}, \quad (12)$$

де D виражене в міліметрах; а для мікроскопа в лінійній мірі

$$\Delta = \frac{\lambda}{2A}, \quad (13)$$

де λ – довжина хвилі світла, $A = n|\sin \sigma_A|$ – числова апертура в просторі предметів (n – показник заломлення середовища).

Крім того, на точність поперечної і поздовжньої установки також впливає спосіб наведення, який залежить від форми спостерігаючого об'єкту шкали або марки приладу.

Поперечне установлення зорової труби частіше за все проводять на віддалений предмет, повертаючи або нахилиючи трубу, при цьому помилка наведення виражається в кутовій мірі. Поперечне установлення мікроскопа проводять на близько розташований об'єкт переміщенням сітки ниток окулярним мікрометром (у вимірювальних мікроскопах) або ж пересуванням предметного столу разом з контрольованим об'єктом (у інструментальних мікроскопах і горизонтальних компараторів).

Точність поперечного установлення залежить від способу наведення і видимого збільшення оптичного приладу. Для зорової труби точність наведення ξ'' в кутовій мірі рівна:

$$\xi'' = \frac{\varphi_T}{\Gamma_T};$$

для мікроскопа в лінійній мірі

$$t = \frac{b}{\bar{\Gamma}}, \quad (15)$$

де φ_T і b – відповідно гострота зору ока в кутковій і лінійній мірі при різних способах наведення, Γ_T і $\bar{\Gamma}$ – відповідно видиме збільшення зорової труби і мікроскопа.

Точність поперечного і подовжнього установлення підвищується в два рази при застосуванні автоколімаційних оптичних приладів (зорової труби і мікроскопа). Аберация оптичних систем, дицентрована і інші дефекти знижують точність поперечного і подовжнього установлення в 1,5-2 рази.

Подовжнє установлення або фокусування зорової труби здійснюють звичайно переміщенням окуляра, наведення мікроскопа – переміщенням всього мікроскопа. В обох випадках передбачається, що окуляри труби і мікроскопа заздалегідь встановлені на різке бачення сіток ниток.

Нерідко мікроскоп фокусують на зображення об'єкту, побудоване випробовуваною оптичною системою. При цьому найбільш висока точність наведення може бути отримана при умові, що числова апертура об'єктиву мікроскопа рівна або дещо більша апертури випробовуваного об'єктиву.

За відсутності сітки (марки) у фокальній площині окуляра фокусування оптичного приладу невизначене. Для нормального ока з широтою акомодатії 4 діоптрії діапазон різкого бачення зображення між об'єктивом і окуляром

$$\Delta f = \frac{4f_{ok}^2}{1000}.$$

Наприклад, у приладі з фокусною відстанню окуляра $f_{ok} = 20$ мм діапазон різкого бачення $\Delta a = 1,6$ мм.

За наявності сітки точність подовжнього установлення як зорової труби, так і мікроскопа характеризується виразом

$$\Delta f = \frac{\lambda}{3\sigma^2} \quad (16)$$

і залежить від довжини хвилі світла λ і апертурного кута σ . Нехай $\lambda = 0,55$ мкм, тоді

$$\Delta f \approx \frac{0,2}{\sigma^2}. \quad (17)$$

Оптичні прилади, які використовуються для вимірювань, повинні мати високу якість зображення, що найкращим чином досягається при невеликих апертурах. На практиці найбільш часто використовують зорові труби з відносним отвором (1:8 - 1:15) і мікроскопи з числовою апертурою 0,1-0,2.

Для зорової труби з відносним отвором об'єктиву 1:10 при $\lambda = 0,55$ мкм точність фокусування $\Delta f = 0,08$ мм, для мікроскопа з числовою апертурою 0,2 $\Delta f = 0,005$ мм. Отримані значення Δf показують, що відлікові шкали окулярного переміщення труби і тубуса мікроскопа повинні мати ціни поділок відповідно 0,05 і 0,003 мм

Фокусування оптичних приладів на зображення об'єкту здійснюють одним з двох способів: одночасним отриманням різкого зображення сітки і об'єкту (при вихідних зіницях до 1 мм) і способом паралакса (при великих вихідних зіницях). В першому випадку переміщують окулярне переміщення труби або тубус мікроскопа і відшуковують найрізкіше зображення об'єкту, зберігаючи в той ж час різке зображення сітки ниток окуляра. В другому випадку прагнуть виключити паралакс (неспівпадання площини зображення контрольованого об'єкту з площиною візирної сітки ниток), який можна знайти, зміщуючи око вправо і вліво або вгору і вниз. Паралакс затрудняє наведення приладу і знижує точність вимірів, оскільки око акомодоване на різке зображення об'єкту, спостерігає розмите зображення сітки ниток або навпаки. Явище паралакса може виникнути і при суміщених фокусах об'єктиву і окуляра, але при положенні сітки ниток зсунутої вперед або назад щодо фокусу. Паралакс з'являється також внаслідок залишкової аберації оптичної системи, тоді його не можна позбутися, він може бути лише усередненим. Паралакс приладу виражається в лінійній і кутовій мірі або в діоптріях. Найбільша величина паралакса Δf , непомітна для рухомого ока, рівна:

$$\Delta f = \frac{f_{ok}^2 \varphi_{\Gamma}}{a' \cdot 3438},$$

де f_{ok} – фокусна відстань окуляра, φ_{Γ} – роздільна здатність ока, a' – радіус вихідної зіниці приладу, мм. При $f_{ok} = 20$ мм і $a' = 1$ мм $\Delta f \approx 0,1$ мм.

Вихідна зіниця приладу повинна бути трохи менше зіниці ока або рівна йому. Якщо яскравість зображення об'єкту мала, то діаметр вихідної зіниці слід збільшити до діаметра зіниці ока. Оптимальний розмір вихідної зіниці труби або мікроскопа 0,5-1 мм, в цьому випадку око мало стомлюється, а точність поперечного і поздовжнього установа зберігається високою.

Для виключення «мертвих ходів» мікрометренних гвинтів, що мають місце при установці сітки ниток приладу на зображення контрольованого об'єкту або відлікової шкали, наведення необхідно закінчувати на вгвинчуванні мікрометра, тобто за ходом годинникової стрілки.

Лабораторна робота № 1
ФОТОМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Мета: ознайомитись із будовою та принципом дії фотометра Люммера-Бродхуна, виміряти силу світла лампи за його допомогою, а також дослідити індикатрису розсіювання цієї лампи

Прилади і матеріали: 1) оптична лава; 2) фотометр; 3) еталонна лампа (відомої сили світла); 4) лампа з невідомою силою світла; 5) регулятор напруги; 6) люксметр

Теоретичні відомості та опис установки

Для оптичного випромінювання, яке являє собою електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль в межах від 1 нм до 1 мм, похідні оптичні фізичні величини поділяють на дві системи величин: енергетичні (оцінюються об'єктивними енергетичними характеристиками) та світлові. На відміну від енергетичних величин, вимірювання яких не пов'язане з фізіологічною дією світла, вимірювання світлових величин ґрунтується на фізіологічній дії світла і тому значною мірою має суб'єктивний характер. Останнє зумовлене тим, що випромінюванню різних довжин хвиль відповідають, по-перше, різні кольорові відчуття і, по-друге, вони зумовлюють відчуття світла різної інтенсивності.

Під *світлом* розуміють тільки *видиме* випромінювання в межах діапазону довжин хвиль від 380–400 до 760–780 нм.

Умовно джерела світла можна поділити на теплові (абсолютно чорне тіло, електричні лампи розжарювання, штифти і сітки розжарення і т.п.), електричні дуги і іскри, газосвітні та лазерні джерела.

Оптичні методи дослідження або технічного контролю в більшості випадків пов'язані з фотометрією. *Фотометрія* – розділ прикладної оптики, в якому вивчаються методика і техніка вимірювання параметрів джерел світла, світлових пучків та освітлених поверхонь. Методи фотометрії можна умовно поділити на візуальні, електричні та фотографічні.

Основні світлові характеристики джерел світла.

Основною одиницею СІ стосовно оптичних величин є одиниця *сили світла* – кандела (кд).

Світловий потік Φ – величина, яка дорівнює добутку сили світла I джерела на тілесний кут ω : $\Phi = I\omega$.

Одиницею світлового потоку в СІ є люмен (лм). 1 лм = 1 кд·ср. Зрозуміло, що повний світловий потік, який випромінюється джерелом силою світла I , дорівнює $\Phi = 4\pi I$. Дослідним шляхом встановлено, що світловому потоку в 1 лм, створеному випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda = 555$ нм, відповідає потік випромінювання $\Phi_e = 0,0016$ Вт.

Освітленість E – величина, що дорівнює відношенню світлового потоку Φ , який падає на поверхню площею S :

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (1)$$

За одиницю освітленості в СІ прийнято люкс (лк) – це освітленість, яку утворює світловий потік в 1 лм, рівномірно розподілений по поверхні в 1 м² (1 лк = 1 лм/м²).

Згідно з основним рівнянням фотометрії – законом Ламберта (закон обернених квадратів), освітленість, створювану точковим джерелом світла, можна виразити через силу світла I :

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (2)$$

де r – відстань від джерела до освітлюваної поверхні; α – кут між нормаллю до поверхні і напрямом до джерела.

Визначення сили світла джерела практично здійснюється порівнянням сили світла двох джерел (відомого і невідомого), тобто досяганням однакової освітленості пластинки двома джерелами ($E_1 = E_2$). Якщо сила світла одного джерела I_1 , а другого – I_2 , тоді освітленість обумовлена ними, виразиться так (при $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$):

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}, \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}. \quad (3)$$

Якщо обидві освітленості E_1 і E_2 рівні між собою, то

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}, \quad \text{або} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (4)$$

З (4) остаточно знаходимо:

$$I_2 = I_1 \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (5)$$

Таким чином, якщо сила світла еталонного джерела I_1 відома, то, вимірюючи відстані r_1 і r_2 від джерел до освітлюваної поверхні, можна визначити силу світла I_2 невідомого джерела за формулою (5).

Силу світла довільного точкового джерела можна виміряти також за допомогою *об'єктивного фотометра* (люксметр, мікроамперметр), у коло якого ввімкнено фотоелемент. Величина фото-ЕРС фотоелемента (а при сталому опорі кола і значення сили струму) пропорційна в певних межах потокові випромінювання, яке падає. При рівності потоків випромінювання від обох джерел світла ($\Phi_{e1} = \Phi_{e2}$), а отже, і енергетичних освітленостей ($E_{e1} = E_{e2}$, $E_e = \frac{\Phi_e}{S}$, де S – площа фотоелемента) покази мікроамперметра у колі фотоелемента в обох випадках будуть однаковими.

Реальні джерела світла (наприклад, електричні лампи) є неізотропними, тобто сила світла джерела неоднакова в різних напрямках: $I = I(\varphi)$.

Досліди з фотометрії роблять на оптичній лаві, що являє собою лінійку з поздовжніми пазами, по яких переміщаються три спеціальних тримачі. На лінійці нанесені поділki, а в спеціальних тримачах, які дають змогу здійснювати переміщення їх вздовж лави і повороти навколо вертикальної осі укріплюється

фотометр і два джерела світла (рис. 1). Живлення ламп здійснюється стабілізованою напругою.

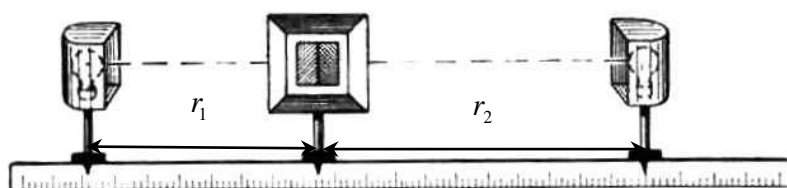


Рис. 1. Оптична лави для фотометричних досліджень

Хід роботи

1. Встановити еталонну і досліджувану лампи на деякій відстані на кінцях оптичної лави. Забезпечити паралельність ниток розжарення ламп.
2. Переміщаючи фотометр вздовж оптичної лави, досягти фотометричної «рівноваги» ($E_1 = E_2$) і виміряти відстані r_1 і r_2 за шкалою лави.
3. Дослід повторити для 3-5 різних відстаней між джерелами світла.
4. Для кожного вимірювання при відомому значенні I_1 розрахувати значення I_2 і обчислити середнє значення сили світла досліджуваної лампи.
5. Результати вимірювань записати в звітну таблицю 1.
6. Дослід повторити для різних значень напруг (пп. 2-5).
7. Визначити похибки вимірювань.
8. Дослідити індикатрису розсіювання. Для цього:
 - для одного значення напруги визначити силу світла досліджуваної лампи як у пп. 2, 4;
 - повертаючи в тримачі навколо вертикальної осі досліджувану лампу визначити силу світла, як у пп. 2, 4 через кожні 10° . Кут повороту фіксується на лімбі тримача.
 - накреслити криву розподілу сили світла I залежно від кута повороту лампи φ .
9. Замість фотометра взяти люксометр і провести дослідження $I(\varphi)$. Порівняти залежності, які отримані за допомогою фотометра і люксометра.
10. Зробити відповідні висновки.

Методичні вказівки

Для раціонального використання часу при проведенні експерименту і запису даних доцільно використовувати таблицю 1.

Таблиця 1.

№	I_1	x_e	x_ϕ	x_∂	r_1	r_2	I_2	ΔI_2
1								
...								
							$\langle I_2 \rangle$	$\langle \Delta I_2 \rangle$

В якій x_e , x_ϕ , x_δ – координати еталонного джерела, фотометра, досліджуваного джерела відповідно, виміряні за шкалою лави з точністю до 1 мм. Визначення відстані r_1 і r_2 проводиться згідно:

$$r_1 = x_\phi - x_e \quad \text{і} \quad r_2 = x_\delta - x_\phi.$$

Після знаходження сили світла досліджуваного джерела I_2 за (5) для кожного випадку, середнього значення $\langle I_2 \rangle$ (як середнього арифметичного) та обчислення середньої абсолютної похибки $\langle \Delta I_2 \rangle$ і середньої відносної ε , треба написати остаточний результат:

$$I_2 = \langle I_2 \rangle \pm \langle \Delta I_2 \rangle, \quad \varepsilon = \frac{\langle \Delta I_2 \rangle}{\langle I_2 \rangle} \times 100 \% .$$

Криві $I(\varphi)$ (індикатриси) зручно подавати в полярних координатах., відкладаючи по радіусах в наперед обраному масштабі значення I_2 , що відповідають цим кутам.

Контрольні запитання

1. Що називають світловим потоком? В яких одиницях він вимірюється?
2. Що називають силою світла і освітленістю і в яких одиницях вимірюється та і друга величина?
3. Охарактеризуйте основні енергетичні та світлові оптичні величини та зв'язок між ними.
4. Охарактеризуйте методи вимірювання світлових величин.
5. Які будова і принцип дії фотометра Люммера-Бродхуна?
6. У чому полягає принцип дії об'єктивних фотометрів? Які його переваги над методом суб'єктивної фотометрії?
7. В межах яких довжин хвиль знаходиться видиме випромінювання?
8. Що вивчає розділ фотометрії?
9. Який існує умовний поділ джерел світла?
10. Як практично здійснюється визначення сили джерела світла випромінювання?

УВАГА!

1. Дотримуйтесь правил електробезпеки при виконанні лабораторної роботи.
2. Забороняється торкатись пальцями до оптичних поверхонь руками.

відстанями (рис. 2). Фокусна відстань f тонкої лінзи пов'язана з радіусами r_1 і r_2 співвідношенням:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (2)$$

де n – показник заломлення матеріалу лінзи, r_1 і r_2 радіуси кривизни першої і другої сферичних поверхонь.

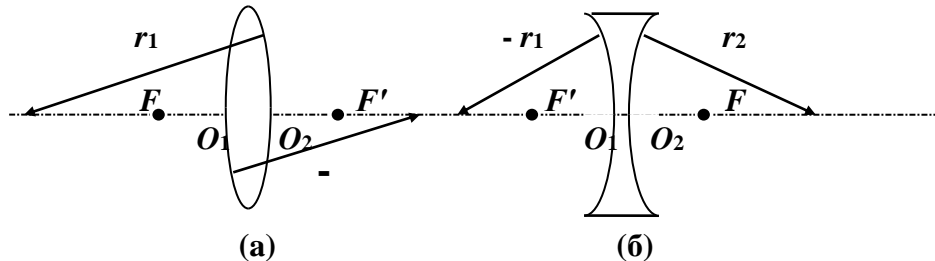


Рис. 2. Кардинальні точки для (а) збірної і (б) розсіювальної лінз

Порівнюючи (1) і (2), дістанемо

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$

Вираз (3) називають *формулою тонкої лінзи*. Її звичайно записують через абсолютні значення величин. Дотримуючись правила знаків, знаходимо, що для двоопуклої лінзи a_1 , r_2 – від'ємні, тому, підставивши їхні значення у (3), матимемо

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right);$$

для двовгнутої лінзи a_1 , a_2 , r_1 – від'ємні, тому

$$\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} = -(n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

Формулу лінзи часто записують у вигляді:

$$\text{для збірної} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}, \quad (4)$$

$$\text{для розсіювальної} \quad -\frac{1}{f} = \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}, \quad (5)$$

де f – віддаль головного фокуса від центра лінзи; a_1 – віддаль об'єкта від центра лінзи і a_2 – віддаль зображення від центра лінзи.

Оптичною силою D лінзи називається величина, обернена до головної фокусної віддалі, тобто

$$D = \frac{1}{f}.$$

Оптична сила лінзи вимірюється в діоптріях. *Діоптрія* – це оптична сила такої лінзи, в якій головна фокусна віддаль дорівнює одиниці – одному метру.

Опис установки.

Оптична лавя являє собою лінійку з пазами, по якій переміщуються полозки (рис. 3). На полозках є покажчики, що визначають положення їх на лінійці. На лінійці ж звичайно наноситься міліметрова шкала. Все інше зрозуміло з рисунка.

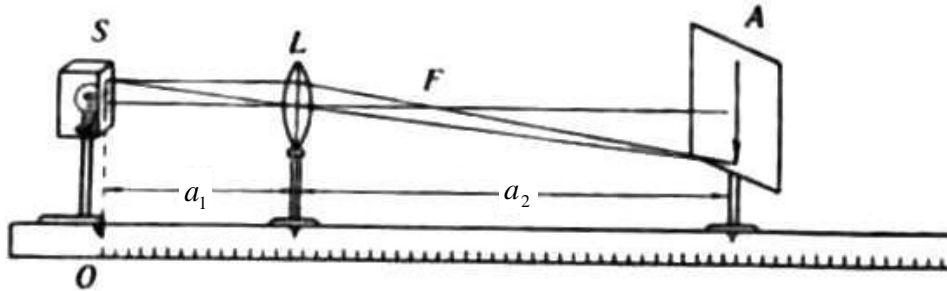


Рис. 3. Оптична лавя для визначення фокусної відстані збірної лінзи:
 S – світний предмет (стрілка); L – лінза; A – екран

Хід роботи

I. Визначення фокусної відстані збірної лінзи.

1. Ввімкнути лампочку.
2. Помістити з одного боку лінзи L світний предмет S (стрілку), а з другого боку екран A (рис. 3).
3. Переміщати лінзу (або екран) доти, доки не з'явиться на екрані чітке зображення предмета (стрілки).
4. Виміряти з точністю до 1 мм a_1 і a_2 .
5. Дослід повторити не менше трьох разів, змінюючи віддаль a_1 між предметом і лінзою (бажано, щоб при цьому були зображення зменшені і збільшені).
6. Результати вимірювань записати в звітну таблицю.
7. Пп. 2-6 проробити для інших лінз.
8. Оцінити похибки вимірювань та зробити висновки.

II. Визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи.

1. Розмістити на лаві предмет S , збірну лінзу L_1 та екран згідно даних попередніх вимірювань, щоб на екрані було чітке зображення стрілки (дані табл. 1).
2. Помістити з правого боку збірної лінзи L_1 досліджувану розсіювальну лінзу L_2 (рис. 4) і, переміщаючи екран праворуч, досягти чіткого зображення предмета S (стрілки).

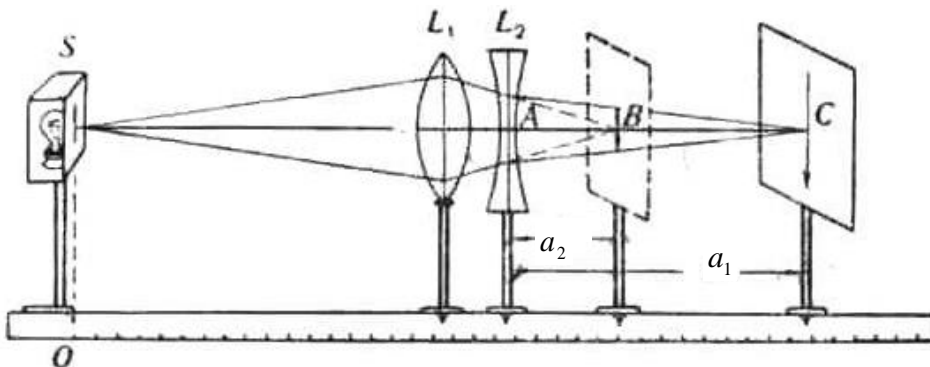


Рис. 4. Оптична лавя для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи:
 S – світний предмет (стрілка); L_1 – збірна лінза; L_2 – розсіювальна лінза

3. Відмітити нове положення C покажчика екрана і A покажчика розсіювальної лінзи L_2 (при цьому перевірити, чи не зрушилась збірна лінза L_1).

4. Дослід повторити з самого початку тричі і результати вимірювань записати в звітну таблицю.

5. Оцінити похибки вимірювань і зробити висновки.

Методичні вказівки

Усі прилади оптичної лави розміщують так, щоб центри їх були на однаковій висоті. При цьому головна оптична вісь лінзи повинна бути паралельна довжині оптичної лави, а площина екрана – перпендикулярна до неї.

Для спрощення відліку показчик предмета S суміщають з нулем шкали оптичної лави. Якщо ж це неможливо, то для найбільш ефективного виконання завдання запис даних проводять, вносячи відповідні координати елементів на лаві у таблицю 1, після чого роблять розрахунки.

Знайшовши значення a_1 і a_2 , обчислюють значення f згідно (4) для кожного випадку досліджуваної збірної лінзи. Після знаходження середнього значення фокусної відстані лінзи $\langle f \rangle$ і похибок $\langle \Delta f \rangle$ та ε , записують остаточний результат:

$$f = \langle f \rangle \pm \langle \Delta f \rangle, \quad \varepsilon = \pm \frac{\langle \Delta f \rangle}{\langle f \rangle} \times 100 \% .$$

Таблиця 1.

№	x_S	x_L	x_A	a_1	a_2	f	Δf
1							
...							

$\langle f \rangle$ $\langle \Delta f \rangle$

Де x_S , x_L , x_A – координати елементів на лаві. Аналогічні обчислення та розрахунки проводять для всіх досліджуваних збірних лінз.

Досліджуючи формулу (4) лінзи, можна переконатися в тому, що коли $a_1 = 2f$, то і $a_2 = 2f$. Тому для перевірки результатів вимірювання предмет S розміщують від лінзи на віддалі $2f$, тобто на віддалі, що дорівнює подвоєній головній фокусній віддалі; якщо при цьому чітке зображення предмета (розмір зображення і предмета однакові) на екрані буде на віддалі $2f$, то, значить, головна фокусна віддаль f знайдена правильно.

Визначити фокусну відстань розсіювальної лінзи не так просто, як збірної. Розсіювальна лінза дає завжди тільки уявне зображення, дістати яке на екрані неможливо. Для одержання зображення на екрані, треба як допоміжну лінзу взяти ще збірну лінзу, оптична сила якої була б більша, ніж оптична сила розсіювальної лінзи. На рис. 4 і 5 збірна лінза L_1 більше зводить промені, ніж розсіювальна L_2 розводить їх, через те така система дає вже дійсне зображення, яке можна одержати на екрані.

Нехай промені, що виходять з точки S (рис. 4 і 5) після заломлення у збірній лінзі L_1 , зійдуться в точці B . (Точка B буде зображенням точки S). Коли ж перед цим зображенням B помістити розсіювальну лінзу L_2 , то остання перенесе це зображення далі, припустимо в точку C . Користуючись явищем «оборотності» променя, ми можемо розглядати точку C як джерело світла; тоді промені,

проходячи назад через розсіювальну лінзу після заломлення в ній і розсіяння, дадуть уявне зображення в точці B .

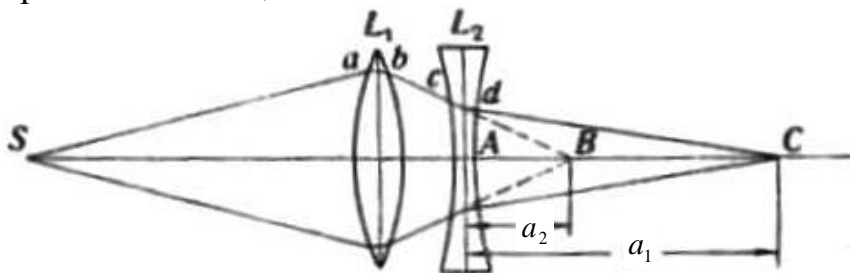


Рис. 5. Оптична схема для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи

Справді (рис. 5) верхній промінь, що вийшов із світної точки S , пройде шлях $SabcdC$ і попаде в точку C . Промінь, що вийшов з точки C , пройшовши шлях $CdcbaS$, попаде в точку S . Коли ж на шляху променя, що вийшов з точки C , не буде збірної лінзи L_1 , то промінь піде в напрямі $Cdcb$, і оку, що знаходиться з лівого боку розсіювальної лінзи, буде здаватися, ніби він виходить з точки B . Тому точку B можна розглядати як уявне зображення C .

Остаточною формулою при виконанні другого завдання буде формула (5). яку краще переписати так:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1}, \quad \text{або} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{AB} - \frac{1}{AC}. \quad (6)$$

Для розсіювальної лінзи результати вимірів та обчислень (згідно формули (6)) заносять у таблицю 2.

Таблиця 2.

№	x_B	x_C	x_A	$AC = a_1$	$AB = a_2$	f	Δf
1							
...							

$\langle f \rangle$ $\langle \Delta f \rangle$

Остаточний результат подайте у вигляді

$$f = \langle f \rangle \pm \langle \Delta f \rangle (\text{м}), \quad \varepsilon = \pm \frac{\langle \Delta f \rangle}{\langle f \rangle} \times 100 \% .$$

Контрольні запитання

1. Що називається збільшенням лінзи?
2. З якою швидкістю і куди рухається зображення предмета, якщо він рівномірно віддаляється від лінзи з швидкістю v ?
3. Що називають оптичною силою лінзи і в яких одиницях її вимірюють?
4. Чи дає збірна лінза уявне зображення?
5. Чому дорівнює оптична сила, якщо фокусна віддаль лінзи дорівнює 25 см?
6. Що означають знаки «+» і «-» перед значенням оптичної сили лінзи?
7. Що називають лінійним поперечним збільшенням оптичної системи?
8. Які лінзи називають тонкими?
9. Як записується формула тонкої лінзи?
10. Які площини називаються фокальними площинами системи?

Лабораторна робота № 3
**ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ПРОЗОРИХ ТВЕРДИХ ТІЛ ЗА
ДОПОМОГОЮ МІКРОСКОПА**

Мета: ознайомитись з будовою та принципом дії мікроскопа і за його допомогою визначити абсолютний показник заломлення скляної пластинки

Прилади і матеріали: 1) мікроскоп; 2) набір плоскопаралельних скляних пластинок; 3) мікрометр

Теоретичні відомості і опис установки

Світловий промінь, який падає на межу поділу двох прозорих середовищ, частково відбивається, а частково заломлюється (рис. 1).

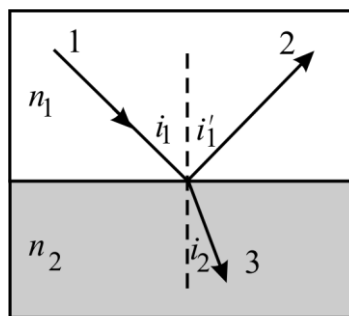


Рис. 1. Хід падаючого на межу поділу двох прозорих середовищ світлового променя

При переході світла із одного середовища в інше ступінь заломлення характеризується відносним показником заломлення. *Відносний показник заломлення другого середовища порівняно з першим n_{21}* дорівнює відношенню фазової швидкості світла в першому середовищі до фазової швидкості світла в другому середовищі:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r},$$

де i – кут падіння променя, r – кут заломлення.

Між відносним показником заломлення двох середовищ і абсолютними показниками заломлення цих середовищ існує співвідношення:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Під *абсолютним показником заломлення середовища* розуміють фізичну величину, яка чисельно дорівнює відношенню швидкості світла у вакуумі до фазової швидкості світла в цьому середовищі, тобто

$$n = \frac{c}{v}$$

З принципу Ферма і дослідних даних випливає, що абсолютний показник заломлення середовища також дорівнює відношенню синуса кута падіння променя до синуса кута заломлення, якщо промінь падає на це середовище з вакууму:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Якщо предмет розглядати через плоскопаралельний шар прозорої речовини з більшою, ніж у повітря оптичною густиною, то зображення цього предмета спостерігається на відстані, ближчій до очей спостерігача, ніж сам предмет. Це явище використовується при вимірюванні показника заломлення скла.

Якщо на шляху світла від предмета помістити плоскопаралельну скляну пластинку, то його зображення наблизиться до спостерігача (рис. 2). Це можна виявити за допомогою мікроскопа.

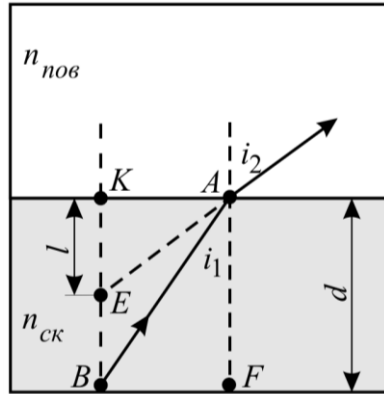


Рис. 2. Утворення зображення світної точки **B** (мітка), яка знаходиться на нижній поверхні плоскопаралельної скляної пластинки

Нанесемо на верхню та нижню поверхню плоскопаралельної пластинки мітки **A** і **B** (рис. 2). Зображення нижньої мітки при спостереженні в мікроскоп, внаслідок заломлення променів при їх проходженні через пластинку, знаходитиметься в точці **E**. Якщо мікроскоп сфокусувати на мітку **A**, то мітка **B** буде поза фокусом. Для того, щоб побачити мітку **B**, об'єктив мікроскопа потрібно опустити не на товщину пластинки $d = AF$, а тільки на відстань $l = KE$, яку можна назвати *позірною товщиною* пластинки. Як видно із рис. 2

$$AK = l \cdot \operatorname{tg} i_2, BF = d \cdot \operatorname{tg} i_1, \text{ а } AK = BF.$$

Отже,

$$l \cdot \operatorname{tg} i_2 = d \cdot \operatorname{tg} i_1,$$

або

$$\frac{\operatorname{tg} i_1}{\operatorname{tg} i_2} = \frac{l}{d}. \quad (1)$$

Оскільки світлові промені від мітки **B** попадають в мікроскоп під невеликими кутами відхилення від вертикалі, то кути падіння i_1 та заломлення i_2 променів світла на межі поділу «скло-повітря» малі, тому тангенси цих кутів можна замінити на їх синуси. У результаті отримаємо

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{l}{d}. \quad (2)$$

З другого боку, згідно закону заломлення світла

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_n}{n_c}. \quad (3)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (2) і (3), отримаємо співвідношення (4) для знаходження абсолютного показника заломлення скляної пластинки:

$$n_c = \frac{d}{l} \cdot n_n. \quad (4)$$

Хід роботи

1. Ознайомитися з будовою мікроскопа та механізмом переміщення тубуса (див. інструкцію мікроскопа).
2. Включити освітлювач мікроскопа (при необхідності) і встановити дзеркало таким чином, щоб поле зору в окулярі мікроскопа було освітлене.
3. Розмістити на предметному столику скляну плоскопаралельну пластинку з нанесеними на її протилежні сторони взаємно перпендикулярними мітками.
4. Сфокусувати мікроскоп на верхню мітку пластинки та записати покази мікрометричного гвинта в звітну таблицю.
5. Повільно обертаючи мікрометричний гвинт, опускати вниз тубус мікроскопа до одержання чіткого зображення нижньої мітки, визначаючи при цьому кількість повних обертів і долей оберту за лімбом мікрометричного гвинта. Записати відлік в таблицю.
6. Обчислити позірну (уявну) товщину l пластинки.
7. Повторити визначення позірної відстані l тричі для різних пластинок.
8. Виміряти дійсну товщину пластинок d за допомогою мікрометра.
9. За формулою (4) визначити абсолютний показник заломлення скла, взявши до уваги, що $n_n = 1,00029$.
10. Результати вимірювань і обчислень за пп. 6-9 записати в звітну таблицю.
11. Розрахувати похибки вимірювань.

Методичні вказівки

Пристаюючи до виконання роботи, треба насамперед перевірити придатність об'єктива мікроскопа для вимірювання пластинки. По-перше, бажано, щоб об'єктив був короткофокусним, тобто давав максимальне збільшення, внаслідок чого похибка вимірювання буде мінімальною. По-друге, треба, щоб об'єктив був достатньо довгофокусним, бо інакше не можливо буде навести мікроскоп на нижню площину пластинки. Отже, *залежно від товщини досліджуваної прозорої плоскопаралельної пластинки необхідно експериментально вибрати той або інший об'єктив, оптимальний для цього вимірювання.*

Якщо крок мікрометричного гвинта невідомий, то його визначають експериментально.

Експериментальне визначення кроку мікрометричного гвинта.

На предметний столик мікроскопа кладуть одна на одну дві плоскопаралельні скляні пластинки. Опускають тубус мікроскопа до дотику об'єктива з верхньою пластинкою (*дуже обережно!*). Отримують відлік за шкалою і лімбом мікрогвинта. Далі обережно виймають верхню пластинку і, обертаючи мікрогвинт, рахують

кількість повних обертів мікрогвинта і долей оберту за лімбом до контакту об'єктива з нижньою пластинкою (*дуже обережно!*). Записують товщину верхньої пластинки в обертах та долях обертів мікрометричного гвинта. Після цього вимірюють товщину верхньої пластинки мікрометром d . З цих даних знаходять крок гвинта і ціну поділки лімба.

Визначення показника заломлення прозорого твердого тіла.

Встановивши мікроскоп так, щоб в окулярі було видно чітке зображення верхньої мітки пластинки (т. А рис. 2), на диску мікрометричного гвинта позначають поділку m_A , яка стоїть проти покажчика. Покази (долі оберту m_A) мікрометричного гвинта записують в таблицю 1.

Таблиця 1.

№ пластини	№ з/п	Показами мікроскопа			l , мм	Δl , мм	d , мм	Δd , мм	n	Δn	ε , %
		m_A , под	m_E , под	N							
1	1										
	2										
	3										
					$\langle l \rangle$	$\langle \Delta l \rangle$	$\langle d \rangle$	$\langle \Delta d \rangle$			
...											

Повільно обертаючи мікрометричний гвинт, тубус мікроскопа переміщують униз до одержання чіткого зображення нижньої мітки (т. Е рис. 2), визначаючи при цьому кількість повних обертів N і позначають поділку m_E , проти якої зупиняється покажчик. Записують відлік в таблицю 1.

Знайдене таким чином *переміщення тубуса мікроскопа* дасть уявну (позірну) *товщину пластинки*, яка визначатиметься за формулою:

$$l = N \cdot c \cdot t + c \cdot (m_A - m_E) = [N \cdot t + (m_A - m_E)] \cdot c \text{ мм},$$

де N – кількість повних обертів барабана мікрометричного гвинта; $c \cdot t$ – крок гвинта; t – кількість поділок в одному повному оберті барабана (кількість поділок на барабані мікрометричного гвинта); c мм/под – ціна однієї поділки барабана; m_A , m_E – відліки для верхнього та нижнього положення тубуса за показами мікрометричного гвинта мікроскопа ($m_A - m_E$ – кількість поділок в неповному оберті барабана).

Наприклад, якщо лімб мікрометричного гвинта мікроскопа має 50 поділок ($t=50$), а ціна однієї поділки дорівнює 0,002 мм ($c=0,002$ мм), то повному обертю мікрометричного гвинта (крок гвинта) відповідає ($c \cdot t$) 0,002 мм \times 50 = 0,1 мм переміщення тубуса.

Тричі повторивши аналогічні вимірювання, визначити уявні відстані l_i , та за трьома значеннями обчислити середні $\langle l \rangle$ та $\langle \Delta l \rangle$, як:

$$\langle l \rangle = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 l_i \quad \text{і} \quad \langle \Delta l \rangle = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta l_i,$$

де $\Delta l_i = |\langle l \rangle - l_i|$.

Виміряти мікрометром дійсну товщину d скляної пластинки у декількох місцях. Якщо Δd більше за інструментальну похибку мікрометра (0,01 мм), то взяти середнє значення $\langle d \rangle$ і обчислити середнє $\langle \Delta d \rangle$ з кожного виміру $\Delta d_i = |\langle d \rangle - d_i|$.

Значення показника заломлення обчислити за формулою (4) як:

$$n = \frac{\langle d \rangle}{\langle l \rangle}.$$

При розрахунку похибки вимірювань (визначенні Δn) слід пам'ятати, що в результат обрахунків входить як похибка від вимірювання d за допомогою мікрометра, так і похибка від вимірювання l за допомогою мікроскопа. Тому доцільним є спочатку знайти відносну, а потім абсолютну похибки:

$$\frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\left(\frac{\langle \Delta d \rangle}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\langle \Delta l \rangle}{\langle l \rangle}\right)^2}, \quad \text{а} \quad \Delta n = n \cdot \sqrt{\left(\frac{\langle \Delta d \rangle}{\langle d \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\langle \Delta l \rangle}{\langle l \rangle}\right)^2}.$$

Результати записати у вигляді:

$$n = n \pm \Delta n, \quad \varepsilon = \frac{\Delta n}{n} \cdot 100 \%.$$

Контрольні запитання

1. Сформулюйте основні експериментальні закони геометричної оптики.
2. Який фізичний зміст має абсолютний показник заломлення середовища?
3. Який фізичний зміст відносного показника заломлення?
4. Що таке позірна товщина скляної пластинки?
5. Дайте пояснення, що таке збільшення мікроскопа?
6. Схематично нарисуйте і поясніть хід променів в мікроскопі.
7. Поясніть, чому уявна товщина скляної пластинки менша за істинну.
8. Поясніть залежність показника заломлення від довжини хвилі падаючого світла.
9. Поясніть залежність швидкості світла від фізичних характеристик середовища.
10. Назвіть інші, відомі Вам, методи визначення показника заломлення твердих тіл, коротко опишіть.

Лабораторна робота № 4
**ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ РІДИН ЗА ДОПОМОГОЮ
РЕФРАКТОМЕТРА**

Мета: ознайомитись з будовою і принципом дії рефрактометра, оволодіти методикою експериментального визначення показників заломлення рідин

Прилади і матеріали: 1) рефрактометр типу РПЛ-2 та/або ІРФ-22; 2) набір водних розчинів цукру різних концентрацій; 3) фільтрувальний папір; 4) піпетка або скляна паличка

Теоретичні відомості та опис приладу

Нехай промінь світла падає на границю поділу двох середовищ із боку оптично більше густішого середовища з n_2 . Для кутів падіння r , менших граничного r_{rp} , світло частково проникає в оптично менш густе середовище з n_1 , а частково відбивається. При $r_{rp} < r < 90^\circ$ (заломлений промінь відсутній, і настає повне відбиття (рис. 1а). У результаті цього у відбитих променях утвориться границя між світлою областю (повне відбиття) і півтінню (часткове відбиття).

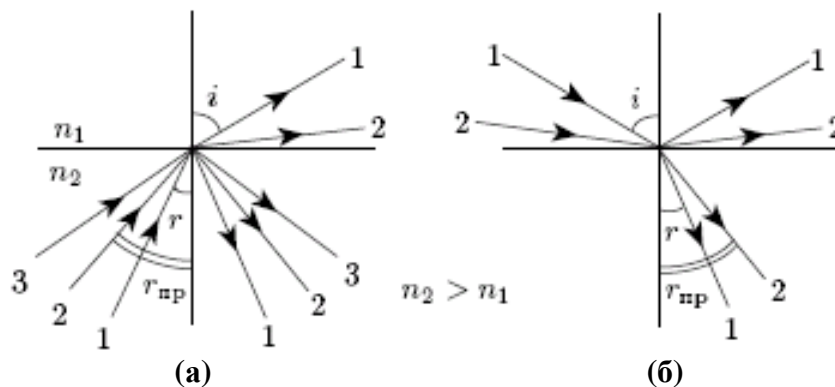


Рис. 1. (а) Граничний кут повного внутрішнього відбивання і (б) граничний кут заломлення

Граничний кут r_{rp} відповідає куту заломлення $i = 90^\circ$, отже,

$$\sin r_{rp} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

Знаючи показник заломлення одного з середовищ і визначаючи дослідно граничний кут, можна за допомогою виразу (1) визначити показник заломлення другого середовища.

Нехай світло падає на границю поділу з боку оптично менш густого середовища (рис. 1б). Залежно від кута падіння промінь у другому середовищі може становити з нормаллю кути, розташовані в інтервалі від нуля до r_{rp} . Граничний кут заломлення r_{rp} відповідає куту падіння $i = 90^\circ$ (промінь ковзання). У результаті в заломлених променях утвориться різка границя між світлою й темною областями. Легко бачити, що величина граничного кута й у цьому випадку визначається формулою (1).

Рефрактометр призначений для визначення показників заломлення рідин і розчинів. Так як показник заломлення розчину n залежить від кількості розчиненої речовини (чим більша концентрація C розчину, тим більший його показник заломлення), то, вимірюючи n , можна визначити і концентрацію C речовини в розчині, наприклад, цукру у воді. У рефрактометрі РПЛ-2 значення показника заломлення розчину n та відповідна концентрація C розчиненої речовини у вагових процентах у водному розчині безпосередньо відображені на його шкалі.

В основі дії рефрактометра лежить явище повного внутрішнього відбивання. Основною частиною рефрактометра є дві призми A і B (рис. 2), які виготовлені із скла, що має назву флінт. Призма B з добре відполірованою гранню називається вимірювальною, а призма A – освітлювальною. Грань A_1-A_2 , що повернута до призми B , є матовою. Вузький проміжок ($\sim 0,1$ мм) між призмами заповнюється досліджуванним розчином.

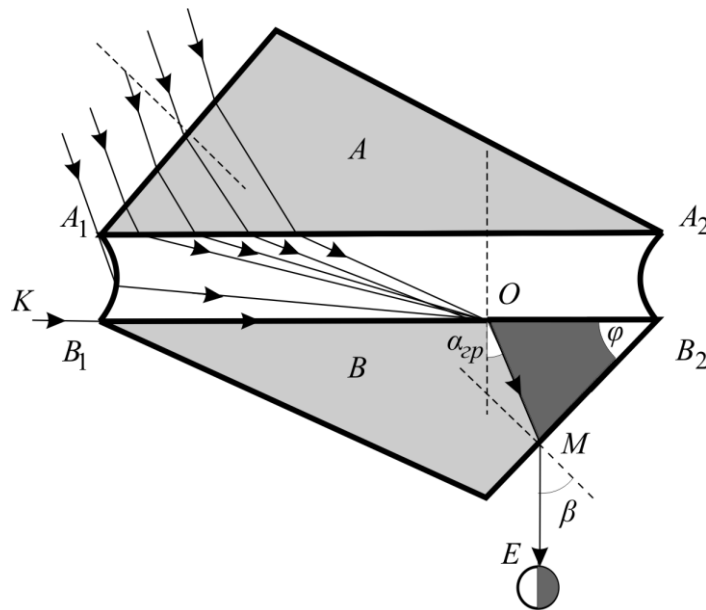


Рис. 2. Хід променів в призмах рефрактометра

Промені світла, що падають на призму A , переходять у шар розчину під різними можливими кутами (від 0^0 до 90^0), попадаючи на межу розділу між розчином та призмою B також під кутами від 0^0 до 90^0 . Показник заломлення скла n_c призми B більший від показника заломлення n досліджуваного розчину, а тому в призмі B заломлені промені будуть розповсюджуватись під кутами від 0^0 аж до граничного кута α_{rp} . Далі промені виходять з призми B у повітря, зазнавши ще одного заломлення. На рис. 2 показано крайній промінь $K-O-M-E$, що відповідає граничному куту α_{rp} . Якщо на шляху цього променя поставити зорову трубу, то в її окулярі побачимо поле зору, яке поділено на світлу і темну зони. Кут β виходу променя $K-O-M-E$ з призми B залежить від показників заломлення n розчину і скла – n_c , а також і від заломлюючого кута φ призми. Із співвідношень, які випливають із законів заломлення променів, їх геометрії і явища повного внутрішнього відбивання, можна отримати формулу:

$$\sin \beta = \sin \varphi \cdot \sqrt{n_c^2 - n} - n \cos \varphi. \quad (2)$$

Із (2) видно, що за відомими значеннями кута β і показника заломлення n_c скла можна визначити показник заломлення n розчину. Також за цією формулою грабують шкалу відліків n та C рефрактометра.

Користуючись рефрактометром обчислень роботи не потрібно, а лише необхідно тільки навести зорову трубу рефрактометра так, щоб три риски (- - -), які видно в її окулярі, збігались з межею між темною та світлою зонами поля зору. Після цього роблять відлік показника заломлення n і концентрації C розчину за шкалою, яку видно через окуляр зорової труби.

Визначивши за шкалою рефрактометра для кожного розчину значення показника заломлення n та використавши відоме значення показника заломлення n_c скла, можна обчислити граничні кути α_{rp} , які відповідають початку повного внутрішнього відбивання для межі поділу скло-досліджуваній розчин з формули:

$$\sin \alpha_{rp} = \frac{n}{n_c},$$

звідки

$$\alpha_{rp} = \arcsin \frac{n}{n_c}. \quad (3)$$

Рефрактометр освітлюється білим світлом. Тому, внаслідок явища дисперсії світла, межа розділу світлої і темної зон матиме кольорове забарвлення. Для усунення цього забарвлення служить дисперсійний компенсатор, який дозволяє отримати чітку межу розділу зон рідин.

Хід роботи

1. Ознайомитися з будовою рефрактометра та механізмом переміщення тубуса (див. інструкцію рефрактометра).
2. Відкрити верхню камеру рефрактометра.
3. Витерти фільтрувальним папером поверхні вимірювальної призми **B** і освітлювальної **A**.
4. Нанести піпеткою 2-3 краплини досліджуваного розчину на чисту та суху поверхню вимірювальної призми **B** та плавно закрити верхню камеру.
5. Спрямувати світло через вікно верхньої камери на призму **A**.
6. Навести окуляр зорової труби на різке зображення шкали приладу та, користуючись компенсатором, усунути кольорове забарвлення межі розділу світлої та темної зон поля зору.
7. Пересуваючи зорову трубу, сумістити три риски (- - -) з межею між темною та світлою зонами поля зору і визначити за лівою частиною шкали показник заломлення розчину n , а за правою – концентрацію C розчину.
8. Для кожного з розчинів вимірювання згідно пп. 2-7 повторити тричі.
9. Знайти середні значення показників заломлення n та концентрацій C розчинів і оцінити похибки вимірювань.
10. За відомими середніми значеннями показників заломлення n досліджуваних розчинів та показником заломлення n_c скла ($n_c = 1,70$) обчислити за

формулою (3) граничні кути α_{rp} , що відповідають початку повного внутрішнього відбивання світла для межі поділу скло-досліджуваній розчин.

11. Результати вимірювань та розрахунків записати в звітну таблицю.

12. Побудувати та проаналізувати графіки залежності величини показника заломлення n розчину та граничного кута α_{rp} від концентрації C водного розчину.

Методичні вказівки

Оскільки показник заломлення речовини (особливо рідини) значною мірою залежить від температури, при вимірах вона повинна підтримуватися постійною.

Після зняття даних заносять результати у таблицю 1.

Таблиця 1.

№ розчину	№ з/п	n	Δn	$\varepsilon_n, \%$	$C, \%$	$\Delta C, \%$	$\varepsilon_C, \%$	α_{rp}
1	1							
	2							
	3							
		$\langle n \rangle$	$\langle \Delta n \rangle$		$\langle C \rangle$	$\langle \Delta C \rangle$		

Тричі повторивши вимірювання, визначають показник заломлення розчину n_i , та за трьома значеннями обчислюють середні арифметичні $\langle n \rangle$ та $\langle \Delta n \rangle$, як:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 n_i \quad \text{і} \quad \langle \Delta n \rangle = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta n_i, \quad \text{де } \Delta n_i = |\langle n \rangle - n_i|.$$

Результати записують у вигляді:

$$n = \langle n \rangle \pm \langle \Delta n \rangle, \quad \varepsilon_n = \frac{\langle \Delta n \rangle}{\langle n \rangle} \cdot 100 \%.$$

Аналогічно розраховують і записують результат для визначеної концентрації C :

$$C = \langle C \rangle \pm \langle \Delta C \rangle, \quad \varepsilon_C = \frac{\langle \Delta C \rangle}{\langle C \rangle} \cdot 100 \%.$$

Контрольні запитання

- З'ясуйте суть явища повного внутрішнього відбивання.
- Що називається абсолютним і відносним показниками заломлення середовища та який їх фізичний зміст?
- Який кут називається граничним кутом?
- Встановіть зв'язок між показником заломлення і довжиною монохроматичної хвилі у вакуумі і в середовищі.
- Який принцип дії рефрактометра Аббе?
- Чому виникає та як усунути кольорове забарвлення межі поля зору в рефрактометрі при використанні для його роботи білого світла?
- Чому нижню поверхню освітлювальної призми роблять матовою?
- Яке фізичне явище лежить в основі принципу роботи рефрактометра Аббе?
- Чому робочі призми рефрактометра виготовляють зі скла з якомога більшим показником заломлення?
- Як впливає товщина пластинки на точність визначення показника заломлення цим методом?

ВИМІРЮВАННЯ КУТА МІЖ ГРАНЯМИ ПРИЗМИ ТА ЇЇ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ГОНІОМЕТРА

Мета: дослідити нормальну дисперсію показника заломлення скла при проходженні світла різних довжин хвиль крізь призму; виміряти заломлюючий кут призми і кутів найменшого відхилення світлової хвилі призмою; визначити оптичні параметри матеріалу призми.

Прилади і матеріали: 1) гоніометр; 2) призма; 3) джерело світла (ртутно-кварцева лампа).

Теоретичні відомості

Істотним у явищі заломлення світла є те, що показник заломлення будь-якої речовини залежить не тільки від властивостей самої речовини, а й від довжини світлової хвилі. Перші експериментальні дослідження цієї залежності належать Ньютону. У 1672 році він провів дослід на розкладання білого світла при заломленні в призмі. У прозорих середовищах показник заломлення зростає із зменшенням довжини хвилі. Ця залежність у видимій частині спектра в області, далекій від поглинання, має вигляд:

$$n_{\lambda} = \frac{a+b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots, \quad (1)$$

де a , b , c – сталі, які характеризують речовину.

Для багатьох тіл можна обмежитись співвідношенням

$$n_{\lambda} = \frac{a+b}{\lambda^2}, \quad (2)$$

яке, звичайно, називають формулою Коші.

Для речовин, що поглинають хвилі певної довжини (в області поглинання), формула Коші втрачає зміст; порушується навіть хід залежності n від λ . Мірою залежності n від λ , тобто мірою дисперсії, є різниця показників заломлення $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ для різних значень λ_1 і λ_2 . Заломлення характеризується звичайно значенням показника заломлення для $\lambda = 589,3$ нм (середнє значення довжин хвиль двох близьких жовтих ліній натрію) і позначається символом n_D . Мірою дисперсії є середня дисперсія, яку визначають як різницю:

$$D_{сер} = n_F - n_C, \quad (3)$$

де n_F стосується $\lambda = 486,1$ нм (синя лінія водню F), n_C стосується $\lambda = 656,3$ нм (червона лінія водню C).

Часто заломлюючу речовину характеризують величиною відносної дисперсії

$$D_{bid} = \frac{(n_F - n_C)}{(n_D - 1)}. \quad (4)$$

У практичних каталогах фігурує величина, обернена до відносної дисперсії, тобто:

$$\frac{1}{D_{bid}} = \gamma = \frac{(n_D - 1)}{(n_F - n_C)}, \quad (5)$$

що має назву коефіцієнта дисперсії, або числа Аббе.

Речовини з малою дисперсією характеризуються великим значенням γ , речовини з великою дисперсією мають мале γ . У більшості випадків дисперсія зростає одночасно з середнім значенням показника заломлення.

Зауважимо, що явище дисперсії можна спостерігати при проходженні світла через будь-яку межу поділу двох прозорих середовищ, за винятком того випадку, коли промені падають перпендикулярно до поверхні поділу середовищ. Дисперсія світла є загальною властивістю всіх речовин, незалежно від їх агрегатного стану. Залежність n від λ пояснює взаємодію електромагнітної (світлової) хвилі із зарядженими частинками речовини. Поширюючись у речовині, електромагнітна хвиля приводить у коливальний рух електричні заряди атомів і молекул. Оскільки частота коливань електронів в атомі значно більша, ніж важких ядер, то електричне коливання зводиться до зміщення центра тяжіння електронів відносно нерухомого центра тяжіння позитивних зарядів атомних ядер.

Розрахунки взаємодії електромагнітної хвилі із зарядами речовини зводяться до такої формули:

$$n^2 = 1 + \frac{N_0 e^2}{m \varepsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)},$$

де N_0 – число молекул (атомів) в одиниці об'єму речовини, e – заряд електрона, m – маса електрона, ε_0 – електрична стала, ω_0 – частота власних коливань електронів, ω – частота електромагнітної хвилі.

Як бачимо, швидкість поширення хвилі в однорідному середовищі, тобто показник заломлення істотно залежить від співвідношення частоти хвилі і власних частот електронів.

Визначення показника заломлення твердих тіл, рідин і газів має важливе значення для швидкого і точного фізико-хімічного аналізу в науково-дослідних і промислових лабораторіях, зокрема при виробництві оптичного скла, для якого показник заломлення є основною характеристикою, у харчовій промисловості для перевірки якості масел, у сільському господарстві для перевірки зрілості цукрових буряків та інших овочів, у медицині для аналізу крові, шлункового соку та ін.

Величина показника заломлення для твердих тіл змінюється в інтервалі від 1,3 до 4; для рідин – від 1,2 до 1,9 і для газів при нормальних умовах – від 1,000035 (He) до 1,000702 (Xe).

Один з найточніших методів визначення показника заломлення речовини ґрунтується на застосуванні тригранної призми. Згідно з законом заломлення промінь світла, проходячи через прозору призму, відхиляється до її основи, якщо речовина призми оптично гущіша, ніж навколишнє середовище. Кут δ , утворений напрямками променя S_1 , що падає на призму, і променя S_2 , що виходить з призми, називається кутом відхилення. Величина цього кута залежить від:

- 1) величини заломлюючого кута призми Θ ;
- 2) відносного показника заломлення речовини призми n_{21} ;
- 3) кута падіння променя на призму i .

Оскільки заломлюючий кут призми Θ та її абсолютний показник заломлення n_2 сталі, кут відхилення δ залежить тільки від кута падіння i , тобто $\delta = f(i)$. При

деякому куту падіння i кут відхилення хвилі призмою набуває найменшу величину. У цьому випадку світлова хвиля всередині призми поширюється паралельно основі. Кут Θ між боковими гранями призми називають заломлюючим (δ_0).

Можна показати, що при симетричному ході променя в середині призми (рис. 1), коли кут падіння i_1 дорівнює куту виходу променя з призми i_2 і промінь у призмі поширюється перпендикулярно до бісектриси заломлюючого кута, кут відхилення має найменшу величину $\delta_{\min} = \delta_0$.

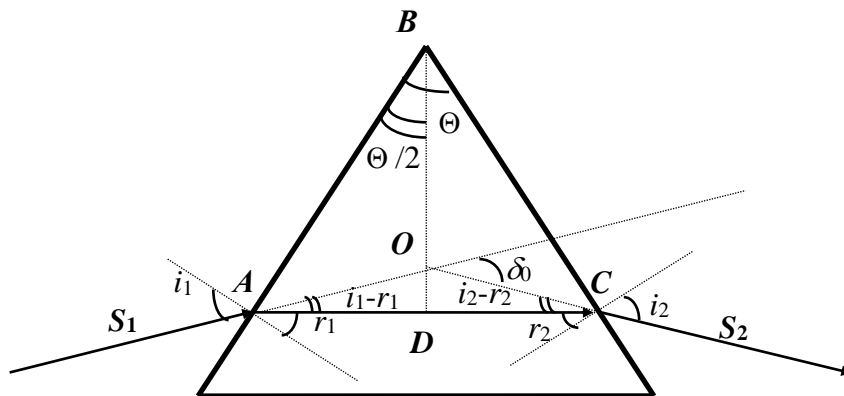


Рис. 1. Хід променя в середині призми

У цьому випадку бісектриса BD є одночасно медіаною сторони AC , тобто $AD=DC$, і тому $AB=BC$, $i_1 = i_2 = i$, $\angle BAC = \angle BCA$, а також $\frac{\Theta}{2} = r_1 = r_2 = r$, як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Крім того, $\angle OAD = \angle OCD = i - r$.

Отже, кут найменшого відхилення δ_0 , як зовнішній кут трикутника AOC , дорівнює сумі двох внутрішніх несуміжних з ним кутів:

$$\delta_0 = 2(i - r) = 2i - \Theta,$$

звідки

$$i = \frac{\Theta + \delta_0}{2}.$$

Підставивши у формулу (1) значення кутів i та r , отримаємо

$$n = \frac{\sin \frac{\Theta + \delta_0}{2}}{\sin \frac{\Theta}{2}}. \quad (6)$$

Отже, як впливає з формули (6), щоб визначити показник заломлення речовини призми, треба виміряти кут найменшого відхилення δ_0 і її заломлюючий кут Θ .

Опис установки.

Схема вимірювальної установки показана на рис. 2.

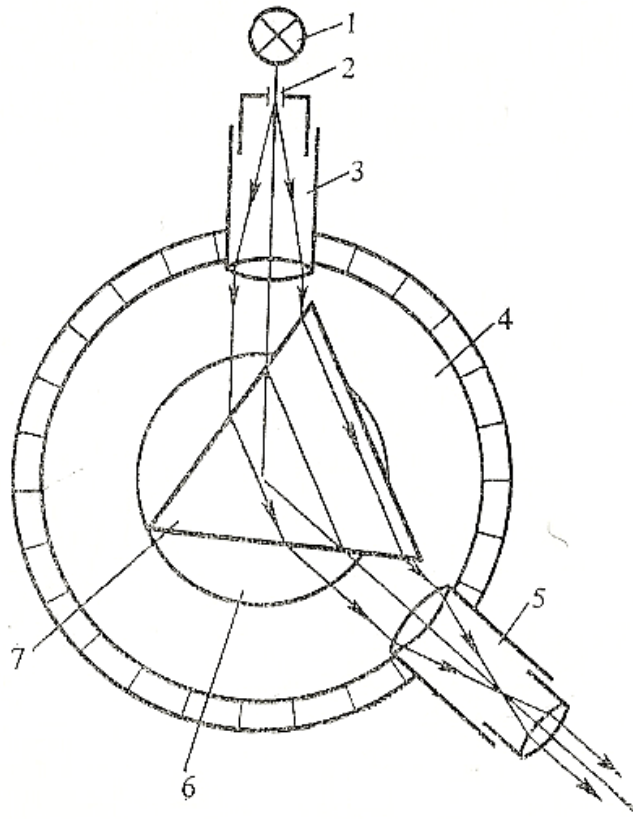


Рис. 2. Схема вимірювальної установки

Світло від джерела 1, пройшовши через вузьку прямокутну щілину 2 коліматора 3 (щілина розміщена у передній фокальній площині об'єктива коліматора), падає паралельним пучком на досліджувану призму 7, встановлену на поворотному столику 6 гоніометра 4. Заломлюючись у призмі, світло потрапляє в зорову трубу 5, яка може повертатись навколо вертикальної осі і дозволяє спостерігати зображення вхідної щілини коліматора. Якщо джерело світла випускає промені кількох довжин хвиль, то у фокальній площині об'єктива зорової труби утворюється ряд зображень щілини коліматора, що відповідають цим довжинам хвиль, тобто лінійчатий спектр. Спостереження спектра проводять через окуляр, який дає збільшене, пряме і уявне зображення. Відлік по лімбу кутового положення зорової труби проводять з допомогою відлікового мікроскопа, розміщеного під окуляром (див. гоніометр-спектрометр ГС-5: зняття відліку по лімбу).

Перш ніж приступити до роботи на гоніометрі необхідно перевірити його робочий стан та при необхідності старанно відрегулювати, тобто від'юстувати (див. гоніометр-спектрометр ГС-5: перевірка приладу).

Хід роботи

I. Вимірювання кута найменшого відхилення.

1. Увімкнути ртутно-кварцеву лампу.
2. Відкрити щілину коліматора (на ширину близько 0,2 мм) і перевірити рівномірність її освітлення.

3. Знявши призму зі столика, встановити зорову трубу гоніометра таким чином, щоб центр візирного перехрестя труби сумістився з серединою зображення щілини

коліматора (біла ахроматична смуга). Зняти відлік по шкалі лімба i_0 (i_0 – кут, що відповідає напрямку пучка, який падає на призму – падаючого променя).

4. Встановити призму. Розкласти світло призмою на спектральні складові. Повернути столик з призмою так, щоб бісектриса заломлюючого кута призми утворювала тупий кут з віссю коліматора (призма в положенні показаному на рис. 3). Спостерігаючи через зорову трубу, дістати вузькі і чіткі лінії спектра.

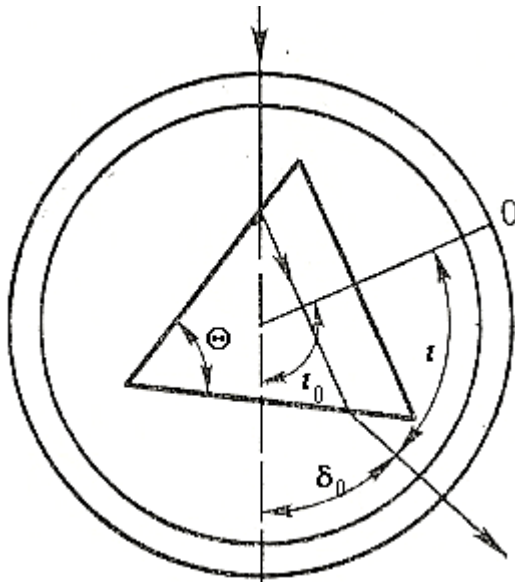


Рис. 3. Схема визначення кута найменшого відхилення

5. Встановити призму поворотом столика для однієї з спектральних ліній в положення, яке відповідає куту найменшого відхилення для даної довжини хвилі. Сумістивши центр перехрестя з серединою цієї лінії, зробити відліки по шкалі лімба i .

6. Аналогічні виміри провести для всіх яскравих спектральних ліній ртутної лампи (i_ϕ – фіолетова, i_c – синя і т.д.).

7. З різниці відліків i і i_0 обчислити значення кута найменшого відхилення δ_0 для кожної лінії спектра.

II. Вимірювання заломлюючого кута призми.

1. Помістити досліджувану призму на середину столика гоніометра, як показано на рис. 4. Призму встановити так, щоб її заломлююче ребро було перпендикулярне до оптичної осі зорової труби.

2. Провести відлік положення зорової труби для зображення вхідної щілини при відбиванні світла від лівої грані призми. Досягнувши в полі зору окуляра труби збігу перехрестя з його зображенням, закріпити столик і зробити відлік по лімбі α (рис. 4).

3. Обертаючи столик, повернути призму другою гранню до труби. Нехай тепер відлік цього положення становить β . Тоді

$$\Theta = \frac{|\alpha - \beta|}{2}.$$

4. Кожне спостереження пп.2-3 повторити не менше трьох разів.

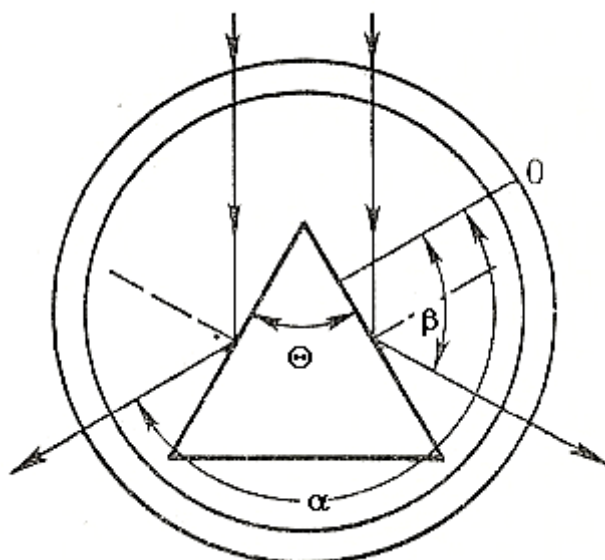


Рис. 4. Схема визначення кута найменшого відхилення

III. Визначення показника заломлення призми для різних довжин хвиль.

1. Користуючись формулою (6), обчисліть значення показника заломлення n даної призми для різних довжин хвиль.
2. Побудуйте графік залежності n від λ .
3. З одержаного графіка визначить величину середньої дисперсії (3), а також число Аббе (5) для досліджуваної призми.

Методичні вказівки

Значення λ для різних ліній ртутно-кварцевої лампи визначають із стандартного спектру випромінювання парів ртуті (див. табл. 3 Додаток).

Для зняття відліку по лімбу маховичок 20 (див. інструкцію Гоніометр-спектрометр) оптичного мікрометра повертають до суміщення верхніх і нижніх штрихів лімба, що видно у лівому вікні поля зору відлікового мікроскопу. Відлік складається із відліку по лімбу і відліку за шкалою мікроскопа (див. інструкцію Гоніометр-спектрометр).

Призму в положення найменшого відхилення для певної спектральної лінії (визначення i у завданні I) встановлюють наступним чином: спостерігаючи в зорову трубу за спектральною лінією, повертають столик з призмою так, щоб лінія зміщувалась до положення невідхиленого (падаючого) променя. При деякому положенні призми лінія в полі зору починає переміщуватися в протилежну сторону. Положення призми, що відповідає моменту зупинки руху спектральної лінії, є положення найменшого відхилення. Значення δ_0 (кута найменшого відхилення) обчислюють, як видно із рис. 3:

$$\delta_0 = |i_0 - i|.$$

Дані та обчислення представляють у табл. 1.

Таблиця 1.

№	колір	λ , нм	i_0 , °' "	i , °' "	δ_0 , °' "	n
1						
...						

Для встановлення призми так, щоб її заломлююче ребро було перпендикулярне до оптичної осі зорової труби виконують наступне. Попередньо від'юстувавши гоніометр, ставлять призму на столик так, щоб вісь обертання одного з установочних гвинтів столика була перпендикулярна до площини однієї із заломлюючих граней призми. Тоді обертання цього гвинта не нахилить грані призми відносно осі обертання приладу. Обертаючи столик, повертають призму цією гранню до труби і, користуючись другим установочним гвинтом столика, суміщають відображення перехрестя з самим перехрестям (при нерухомій трубі). Далі повертають столик другою гранню призми до труби і, суміщаючи перехрестя з його зображенням, обертають тільки перший установочний гвинт столика. Нарешті, знову повертають столик з призмою першою гранню до труби, усувають розходження, яке при цьому виникло, і т.д. Повторюючи ці операції, добиваються повного збігу перехрестя з його зображенням при відбитті від обох граней.

Результати вимірів заломлюючого кута призми і розрахунок середньоквадратичної похибки представляють у таблиці 2.

Таблиця 2.

№	$\alpha, \text{ }^\circ \text{ ' ' '}$	$\beta, \text{ }^\circ \text{ ' ' '}$	$\Theta, \text{ }^\circ \text{ ' ' '}$	$\Delta\Theta$	$\Delta\Theta^2$
1					
...					
			$\langle\Theta\rangle$	$\sum\Delta\Theta^2$	

Середня квадратична похибка одного виміру $\sigma = \sqrt{\frac{\sum\Delta\Theta^2}{n-1}}$; середня

квадратична похибка результатів вимірювання $S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

Контрольні запитання

1. Яке призначення та принцип дії гоніометра?
2. Що називають відносним показником заломлення?
3. Що називають коефіцієнтом дисперсії?
4. Про що слід пам'ятати, працюючи із ртутною лампою?
5. Від чого залежить показник заломлення будь-якої речовини?
6. Яке співвідношення існує між відносним показником заломлення двох середовищ і абсолютними показниками заломлення цих середовищ?
7. В якому випадку можна спостерігати явище дисперсії?
8. Від чого залежить швидкість поширення електромагнітної хвилі в однорідному середовищі?
9. Який інтервал зміни показника заломлення для твердих тіл, для рідин та для газів?
10. Що потрібно виміряти, щоб визначити показник заломлення речовини призми?

Лабораторна робота № 6
**ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА ЗА ДОПОМОГОЮ БІПРИЗМИ
ФРЕНЕЛЯ**

Мета: з'ясувати, від яких факторів залежить інтерференційна картина, що утворюється за допомогою біпризми Френеля, визначити заломлюючий кут призми та довжину світлової хвилі джерела.

Прилади і матеріали: 1) оптична лава; 2) лазер; 3) біпризма; 4) набір збиральних лінз; 5) вимірювальна стрічка; 6) екран.

Теоретичні відомості

Хвильова природа світла досить яскраво проявляється на явищі інтерференції. *Інтерференцією* світла називають явище, яке виникає при додаванні світлових хвиль і полягає в тому, що інтенсивність результуючої світлової хвилі, залежно від різниці фаз хвиль, які додаються, може бути більше або менше за суму їхніх інтенсивностей.

Інтерференція світла спостерігається тільки для когерентних світлових хвиль – таких, що мають сталу різницю фаз світлових коливань протягом певного проміжку часу, достатнього для спостереження інтерференційної картини. Незалежні когерентні джерела реалізувати практично неможливо. Проте в оптиці відомі методи утворення когерентних пучків від одного елементарного випромінювача. Один з методів *поділу хвильового фронту* реалізується за допомогою біпризми Френеля.

Біпризма Френеля складається з двох призм з малими заломлюючими кутами (порядку $30'$), склеєних основами. Світловий пучок від джерела (лазер S) (рис. 1) після заломлення у біпризмі A поділяється на два когерентних пучки з вершинами в уявних зображеннях S_1 і S_2 джерела S .

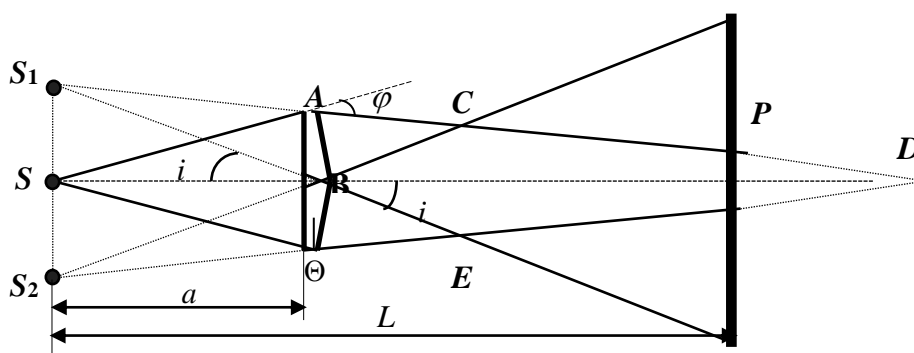


Рис. 1. Утворення інтерференційної картини на біпризмі Френеля

Оскільки джерела S_1 та S_2 когерентні, у будь-якій точці області перекриття пучків $BCDE$ спостерігатиметься інтерференційна картина, яка являє собою послідовність світлих і темних інтерференційних смуг – максимумів і мінімумів. Умови екстремумів мають вигляд:

$$\Delta l = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda \text{ – умова максимуму,}$$

$$\Delta l = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2} - \text{умова мінімуму,}$$

де Δl – різниця ходу інтерферуючих пучків, $k=0, 1, 2, 3\dots$ – порядок інтерференційного максимуму і мінімуму, λ – довжина світлової хвилі.

При спостереженнях фіксується певна площина (або поверхня) в просторі – поле інтерференції. Вибір поля певною мірою довільний і залежить від різних обставин, але через кожен точку поля має проходити не менше як два інтерферуючих пучки. Можна вважати, що при спостереженні інтерференційна картина локалізована в площині екрана (рис. 2).

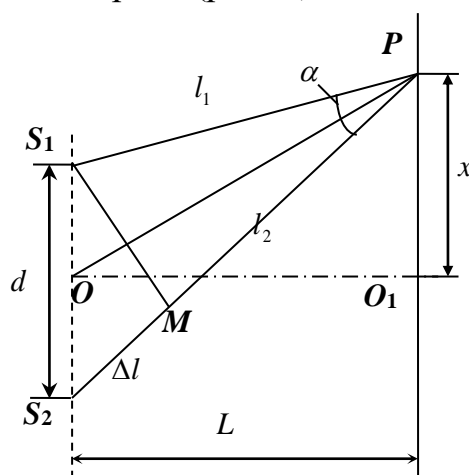


Рис. 2. Хід променів при інтерференції від двох когерентних джерел світла

Інтерференційна картина, створена біпризмою Френеля, аналогічна картині інтерференції від двох когерентних випромінювачів. Тому з рис. 2, маємо:

$$\frac{\Delta l}{d} = \frac{x_k}{L} \quad \text{або} \quad x_k = \frac{L}{d} \Delta l, \quad (1)$$

де x_k – відстань мінімуму (максимуму) k -ого порядку від O_1 , L – відстань від джерел до екрана, $\Delta l = l_2 - l_1$ – різниця ходу інтерферуючих променів, d – відстань між уявними джерелами. Для умови мінімуму інтерференції ($\Delta l_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$), (1) набуде вигляду:

$$x_k = \frac{L}{d} (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Відстань між обраними темними смугами на екрані Δx визначатиметься:

$$\Delta x = x_{k+m} - x_k = \frac{L}{d} m \lambda,$$

де m – кількість світлих смуг між досліджуваними темними. З останньої формули довжина хвилі джерела визначатиметься:

$$\lambda = \frac{\Delta x d}{m L}. \quad (2)$$

Відстань між уявними джерелами знаходимо, вдаючись до таких міркувань. З ΔSS_1B (рис. 1), враховуючи малість кута відхилення променів призмою, можна дістати $SS_1 = \frac{d}{2} = SB \cdot i = a \cdot i$. Для призми із заломлюючим кутом Θ та показником

заломлення n кут відхилення i дорівнює $i = (n - 1)\Theta$. Тоді шукана відстань між уявними джерелами

$$d = 2a(n - 1)\Theta, \quad (3)$$

а довжина хвилі (підставивши (3) в (2)):

$$\lambda = \frac{2a\Theta(n - 1)}{L} \frac{\Delta x}{m}. \quad (4)$$

Як відомо, при використанні білого світла спостерігаються інтерференційні спектри. Але при великих порядках інтерференції може бути перекриття спектрів, що приводить до розмивання інтерференційної картини. Очевидно, умовою інтерференційної картини є

$$k(\lambda + \Delta\lambda) = (k + 1)\lambda,$$

звідки $k = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$. Тобто, чим більша монохроматичність світла, тим більшу кількість максимумів можна спостерігати.

Хід роботи

1. Розташувати прилади на оптичній лаві, відповідно до рис. 1.
2. Ретельно домогтися паралельності лазера, біпризми та екрану.
3. Освітити біпризму, ребро тупого кута якої має бути звернуто до джерела, і спостерігати інтерференцію на екрані.
4. З'ясувати як впливає на інтерференційну картину: відстань a між джерелом та біпризмою; відстань L між джерелом та екраном.
5. Змінюючи взаємне розміщення біпризми та екрана домогтися того, щоб інтерференційні смуги були контрастними при достатній відстані між ними.
8. Визначити ширину смуг Δx , зробивши відлік від однієї з темних смуг до якомога дальшої k -тої смуги і порахувати кількість світлих смуг m між ними.
9. Виміряти відстань L – між джерелом і полем інтерференції, тобто екраном.
10. Якщо параметри біпризми невідомі, тоді відстань між уявними джерелами визначається експериментально. Для цього не зрушуючи приладів на оптичній лаві, помістіть між біпризмою та екраном збиральну лінзу L . Зміщуючи лінзу вздовж оптичної лави, дістати в полі зору екрана чіткі зображення джерел. Виміряти відстань між ними d' та відстань між джерелом та лінзою a_1 . Враховуючи показник заломлення біпризми $n = 1,51$, розрахувати за формулою (3) заломлюючий кут Θ біпризми.
11. Скориставшись (4), обчислити значення довжини хвилі λ лазера.
12. Змінити відстань L три рази, виміряти відповідні значення та зробити їх обчислення згідно пп. 2-11.
13. Визначити похибки вимірювань, зробити висновки.

Методичні вказівки

Уявні джерела S_1 і S_2 , взагалі кажучи, не лежать в одній площині з дійсним джерелом S , але при малому куті Θ їх зміщення по відношенню до площини перпендикулярній осі біпризми SO , порівняно мале з a і L . Для визначення

відстані d між уявними джерелами розглянемо хід хвилі через одну із половин біпризми (рис. 3.).

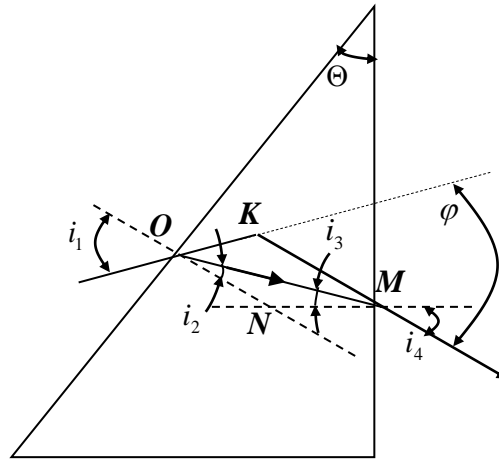


Рис. 3. Заломлення світлового променя в призмі

Для точки O згідно закону Снелліуса $n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$, де $n = 1,51$ – показник заломлення матеріалу призми (скла), i_1 і i_2 – кути падіння і заломлення хвилі. Внаслідок малих значень кутів буде справедливим співвідношення $n \approx \frac{i_1}{i_2}$.

Подібним чином для точки M маємо $n \approx \frac{i_4}{i_3}$.

Розглядаючи трикутники OKM і ONM , можна показати, що є справедливі співвідношення

$$i_3 = \Theta - i_2 = \Theta - \left(\frac{i_1}{n}\right), \quad i_4 = ni_3 = \Theta n - i_1.$$

Із цих співвідношень для кута φ відхилення хвилі половинної біпризми (рис. 1) неважко отримати

$$\varphi \approx \Theta(n - 1).$$

Кут φ з врахуванням певних обмежень однаковий для всіх хвиль, що виходять з джерела S , тому для відстані d , як видно з рис. 1 є справедливим вираз (3):

$$\frac{d}{2} = a \tan \varphi \approx a\Theta(n - 1).$$

Відстань між уявними джерелами в інтерференційному досліді з біпризмою Френеля можна не тільки розрахувати за формулою (3) при відомому Θ , але й безпосередньо виміряти. З допомогою лінзи L (рис. 4), розміщеної між біпризмою A і екраном E , на екрані можна отримати зображення S'_1 і S'_2 джерел S_1 і S_2 . Із рис. 4, на якому для простоти не показана біпризма, видно, що

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{d}{d'}. \quad (5)$$

Переміщуючи лінзу L в проміжку від біпризми до екрана, добиваються чіткого зображення джерел на екрані, що можливе при умові

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{d}{d'}. \quad (6)$$

У виразах (5) і (6) d'_1 і d'_2 – відстані між зображеннями джерел, отриманих при двох положеннях лінзи. Звідси отримують:

$$d = \sqrt{d'_1 d'_2}. \quad (7)$$

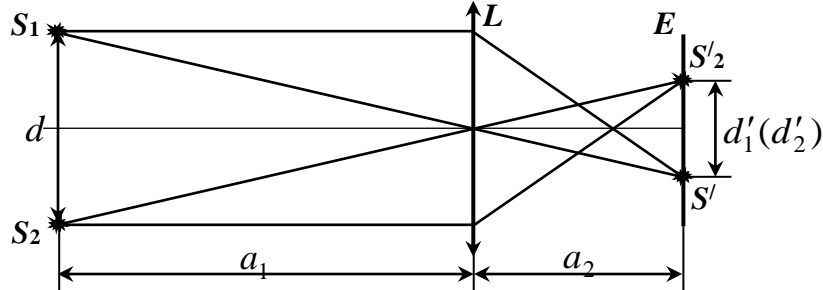


Рис. 4. Утворення зображень двох когерентних джерел

Для одержання точніших результатів знаходження d дійсну відстань між уявними джерелами краще отримати збільшеною за рахунок збільшення лінзи (з рис. 4 $a_1 < a_2$). Тоді (5) для нашого випадку переписують:

$$d = \frac{a_1}{L - a_1} d', \quad (8)$$

де $L - a_1 = a_2$. Прирівнявши (3) і (8), формула для обчислення Θ набуде вигляд:

$$\Theta = \frac{a_1 d'}{2a(n-1)(L - a_1)}.$$

Таблиця 1.

№	Δx	m	L	a	d'	a_1	d	Θ	λ	$\Delta\lambda$
1										
...										

$\langle \lambda \rangle$ $\langle \Delta\lambda \rangle$

Остаточний результат подають у вигляді

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \langle \Delta\lambda \rangle \text{ м,} \quad \varepsilon = \pm \frac{\langle \Delta\lambda \rangle}{\langle \lambda \rangle} \times 100 \% .$$

Контрольні запитання

1. Що називають інтерференцією світла?
2. З чого складається біпризма Френеля?
3. Коли два джерела когерентні?
4. Чому заломлюючий кут біпризми повинен бути малим?
5. Чим визначається кількість видимих інтерференційних смуг?
6. Як зміниться інтерференційна картина, якщо змінити світлофільтр (змінити λ , змінити $\Delta\lambda$)?
7. Записати умову інтерференції світлових хвиль?
8. Що найбільше впливає на точність вимірювання в даній роботі?
9. Які методи утворення когерентних пучків ви знаєте?
10. Як математично записати умову екстремумів для інтерферуючих пучків?

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ СКЛЯНОЇ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОЇ ПЛАСТИНКИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИМ МЕТОДОМ

Мета: ознайомитись з методом отримання інтерференційних смуг рівного нахилу, визначити показник заломлення скляної плоскопаралельної пластинки

Прилади і матеріали: 1) He-Ne лазер типу ЛГ-56; 2) мікрооб'єктив з екраном; 3) плоскопаралельна пластинка.

Теоретичні відомості та опис установки

Інтерференційні смуги, які виникають внаслідок накладання хвиль, що падають на плоскопаралельну пластинку під однаковими кутами, називаються *смугами однакового нахилу*. При великій оптичній різниці ходу променів ці смуги можна спостерігати для монохроматичного лазерного випромінювання. Для цього використовують світловий потік з великою розбіжністю, який одержують наприклад за допомогою мікрооб'єктива O , і направляють на скляну плоскопаралельну пластину Π (рис. 1). Промені, відбиті від передньої і задньої граней плоскопаралельної пластини, дають інтерференційні смуги рівного нахилу на екрані E у вигляді концентричних кілець.

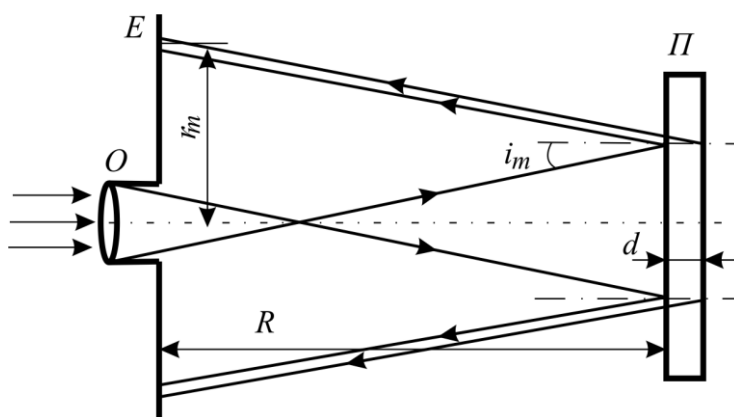


Рис. 1. Одержання інтерференційних смуг рівного нахилу

Нехай кути i_m , при яких спостерігаються мінімуми інтенсивності m -го порядку у відбитому світлі, визначаються з умов

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_m} = m\lambda_0, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (1)$$

Якщо кути i_m малі, то $\sin i_m \approx i_m$ і рівняння (1) можна записати таким чином:

$$2d\sqrt{n^2 - i_m^2} = m\lambda_0, \quad \text{або} \quad 2dn\sqrt{1 - \left(\frac{i_m}{n}\right)^2} = m\lambda_0. \quad (2)$$

З рис. 1 випливає, що $\text{tgi}_m = \frac{r_m}{2R}$, де R – відстань від екрана до поверхні плоскопаралельної пластини, r_m – радіус темного кільця. Так як кут i_m є малим, то $\text{tgi}_m \approx i_m$. Отже

$$i_m = \frac{r_m}{2R}.$$

Підставивши значення i_m у формулу (2) отримаємо:

$$2dn\sqrt{1 - \frac{r_m^2}{4n^2R^2}} = m\lambda_0, \quad \text{або} \quad 2dn\left(1 - \frac{1}{2} \frac{r_m^2}{4n^2R^2}\right) = m\lambda_0.$$

Звідки

$$r_m^2 = 8n^2R^2\left(1 - \frac{m\lambda_0}{2dn}\right) = 8n^2R^2 - \frac{4nR^2\lambda_0}{d}m. \quad (3)$$

Як видно з (3), r_m^2 лінійно залежить від порядку m темного інтерференційного кільця. Для довільно вибраних кілець, згідно із співвідношення (3), впливає, що

$$r_{(m+\Delta m)}^2 = 8n^2R^2 - \frac{4nR^2\lambda_0}{d}(m + \Delta m) \quad \text{і} \quad r_{(m+\Delta m)}^2 - r_m^2 = \frac{4nR^2\lambda_0}{d}|\Delta m|,$$

де Δm – різниця між номерами інтерференційних кілець.

Нехай $\Delta r_{\Delta m}^2 = |r_{(m+\Delta m)}^2 - r_m^2|$. Тоді

$$|r_{(m+\Delta m)}^2 - r_m^2| = \frac{4nR^2\lambda_0}{d}|\Delta m|.$$

Звідки отримуємо, що

$$n = \frac{d}{4\lambda_0R^2} \left| \frac{\Delta r_{\Delta m}^2}{\Delta m} \right|. \quad (4)$$

Опис установки.

Робота виконується на лабораторній установці, загальний вигляд якої наведено на рис. 2.

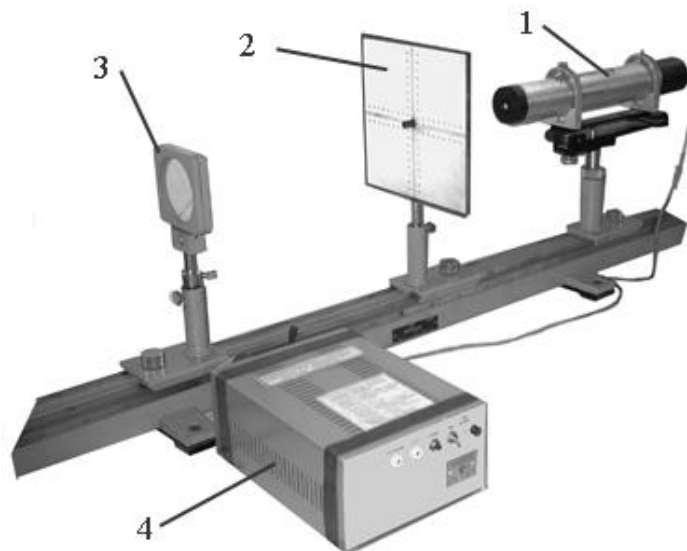


Рис. 2. Загальний вигляд лабораторної установки:

1 – лазер типу ЛГ–56; 2 – екран з мікрооб’єктивом; 3 – плоскопаралельна скляна пластинка;
4 – блок живлення лазера

На оптичній лаві послідовно розташовані джерело світла – He-Ne лазер 1 типу ЛГ-56, екран 2 в центрі якого розміщено мікрооб’єктив, та плоскопаралельна скляна пластинка 3 товщиною d . Мікрооб’єктив формує конусоподібний світловий пучок, який падає на пластинку 3. Відбиваючись від її передньої та задньої граней, промені світла накладаються і утворюють на екрані інтерференційну картину у вигляді концентричних кілець – так звані смуги однакового нахилу.

Хід роботи

1. Увімкнути блок 4 живлення лазера 1 в мережу 220 В і після ~ 5 хв натиснути на ньому кнопку «Випромінювання». При цьому появиться лазерний промінь.
2. На відстані 0,7-0,8 м від вихідного вікна лазера встановити плоскопаралельну пластинку 3.
3. Добитися того, щоб відбитий від пластинки промінь попадав у точку його виходу з лазера, тобто, щоб кут падіння променя на пластинку дорівнював нулю.
4. На відстані 0,30-0,35 м від вихідного вікна лазера встановити мікрооб’єктив з екраном 2 так, щоб оптичний центр мікрооб’єктива співпадав з напрямком поширення променя лазера. При цьому, на екрані повинні спостерігатися концентричні світлі і темні кільця – смуги однакового нахилу (при необхідності провести додаткове юстування оптичної системи).
5. За допомогою шкали на екрані визначити радіуси r_m темних кілець, для яких $m = 1, 2, \dots, 5$.
6. Виміряти відстань R від екрана 2 до поверхні пластинки 3.
7. Знайти показник заломлення n скляної пластинки за формулою (4).
8. Результати вимірювань і обчислень записати в звітну таблицю.
9. Розрахувати похибки знаходження показника заломлення n плоскопаралельної пластинки.
10. Проаналізувати отримані результати, зробити висновки.

Методичні вказівки

За допомогою шкали на екрані визначають радіуси r_m темних кілець, для яких $m = 1, 2, \dots, 5$. Результати вимірювань і обчислень записують в таблицю 1.

Таблиця 1.

№ кільця, m	1	2	3	4	5
$r_m \times 10^{-3}$, м					
$r_m^2 \times 10^{-3}$, м ²					

На основі експериментальних даних будують графік залежності $r_m^2 = f(m)$. З графіка $r_m^2 = f(m)$ для різниці Δm довільних номерів m інтерференційних кілець визначають різницю квадратів радіусів $\Delta r_{\Delta m}^2$ (див. рис. 3).

Якщо побудувати графік залежності $r_m^2 = f(m)$ за рівнянням (3) (див. рис. 3), то тангенс кута нахилу цієї прямої дорівнює коефіцієнту при m у цьому рівнянні:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta r_{\Delta m}^2}{\Delta m},$$

де $\Delta r_{\Delta m}^2$ – різниця квадратів радіусів відповідних кілець, Δm – різниця номерів кілець.

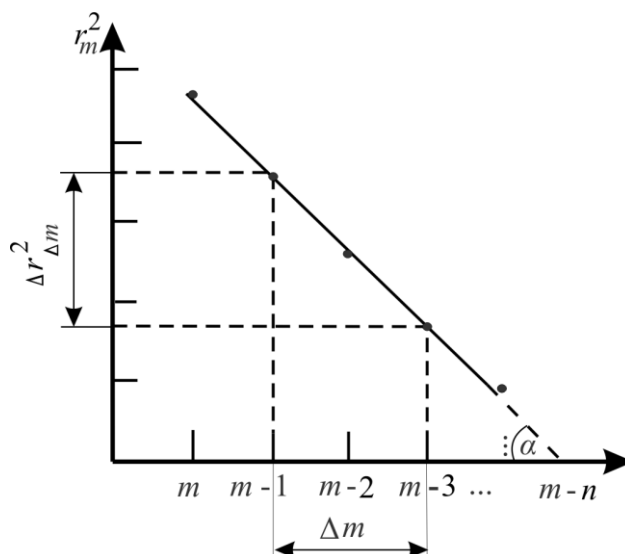


Рис. 3. Графік залежності $r_m^2 = f(m)$

Підставивши значення $\frac{\Delta r_{\Delta m}^2}{\Delta m}$, R , n , d у формулу (4) можна розрахувати довжину хвилі λ_0 випромінювання лазера. Якщо в (4) підставити відомі значення $\frac{\Delta r_{\Delta m}^2}{\Delta m}$, R , λ_0 , d , то можна отримати значення показника заломлення n плоскопаралельної пластини. На цьому базується графічний метод визначення довжини хвилі, або показника заломлення скляної пластинки.

Результати вимірювань і обчислень записують в таблицю 2.

Таблиця 2.

№ з/п	$\frac{\Delta r_{\Delta m}^2}{\Delta m}, \text{м}^2$	$R, \text{м}$	$d, \text{м}$	$\lambda, \text{нм}$	n	Δn	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							

$\langle n \rangle$ $\langle \Delta n \rangle$

Обчисливши $\left| \frac{\Delta r_{\Delta m}^2}{\Delta m} \right|$, знаходять показник заломлення n скляної пластинки за

формулою (4), де d – товщина пластинки (значення d вказано на робочому місці), λ – довжина хвилі випромінювання лазера (для лазера типу ЛГ-56 $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$), R – виміряна відстань від екрана 2 до поверхні пластинки 3 (рис. 2).

Розраховують похибки знаходження показника заломлення n плоскопаралельної пластинки, визначаючи показник заломлення n_i для кожного виміру, та за цими значеннями обчислюють середні арифметичні $\langle n \rangle$ та $\langle \Delta n \rangle$, як:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 n_i \quad \text{і} \quad \langle \Delta n \rangle = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta n_i ,$$

де $\Delta n_i = |\langle n \rangle - n_i|$.

Результати записують у вигляді:

$$n = \langle n \rangle \pm \langle \Delta n \rangle, \quad \varepsilon = \frac{\langle \Delta n \rangle}{\langle n \rangle} \cdot 100 \% .$$

Контрольні запитання

1. Поясніть фізичний зміст абсолютного і відносного показника заломлення середовища. Від чого він залежить?
2. З'ясуйте суть методу непаралельного ходу променів для визначення показника заломлення середовища.
3. Що називається явищем інтерференції світла? Які хвилі називаються когерентними?
4. Чи є суттєва різниця між інтерференцією світла в тонких і товстих плівках? Відповідь обґрунтуйте.
5. Як утворюється інтерференційна картина у вигляді смуг однакового нахилу?
6. Які ви знаєте методи отримання когерентних хвиль?
7. В чому полягає суть методу поділу амплітуди хвилі?
8. Поясніть утворення смуг рівного нахилу та смуг рівної товщини.
9. Виведіть робочу формулу.
10. Чому більш високому порядку інтерференції відповідає менший кут падіння променів?

УВАГА!

Із-за використання високої напруги в лазері (до 5000 В) слід бути гранично уважним і акуратним при виконанні роботи: така напруга небезпечна для життя.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яворський Б. М., Детлаф А. А. Курс фізики. В 3 т. Т. 3. Вид. 3-є, перероб. і доповн. К. : Вища школа, 1973. 500 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 3. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. М. : Наука, 1971. 528 с.
3. Бушок Г. Ф., Венгер Є. Ф. Курс фізики : навч. посіб. [для студ. фіз.-мат. спец. вищ. пед. навч. закл.]. У 2 кн. Кн. 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. : Либідь, 2001. 424 с.
4. Афанасьев В. А. Оптические измерения : учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и дополн. М. : Высш. школа, 1981. 229 с.
5. Дущенко В. П та ін. Фізичний практикум. К. : Вища школа, 1984. 256 с.
6. Горбачук І. Т. та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. К. : Вища школа, 1992. 509 с.
7. Агапон Б. Т., Максютин Г. В., Островерхов П. И. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособ. М. : Высшая школа, 1982. 335 с.
8. Алексеев Б. Ф., Барсуков К. А., Войцеховская И. Я. и др. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособ. для студ. втузов. М. : Высшая школа, 1988. 351 с.
9. Лабораторный практикум по физике / под ред. Ахматова А. С. М. : Высшая школа, 1980. 219 с.
10. Дубровский И. М.. Справочник по физике / И. М. Дубровский, Б. В. Егоров, К. П. Рябошапка. К. : Наукова думка, 1986. 558 с.
11. Куліш В. В., Соловійов А. М., Кузнецова О. Я., Кулішенко В. М. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система : навч. посіб. У 2 ч. Ч. 2. К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. 380 с.
12. Куліш В. В., Соловійов А. М., Кузнецова О. Я. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система : навч. посіб. У 4 ч. М. 3. Коливання і хвилі. Оптика. К. : Книжкове вид-во НАУ, 2007. 172 с.

ДОДАТОК

Таблиця 1.

Коефіцієнти Стьюдента $t_{\alpha,n}$									
<i>n</i>	<i>α</i>								
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	0,16	0,33	0,73	1,38	3,08	6,31	12,70	31,80	63,70
3	0,14	0,29	0,62	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,14	0,28	0,58	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,13	0,27	0,57	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,13	0,27	0,56	0,92	1,48	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,13	0,27	0,55	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,13	0,26	0,54	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50
9	0,13	0,26	0,54	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,13	0,26	0,54	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
12	0,13	0,26	0,54	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
14	0,13	0,26	0,54	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
16	0,13	0,26	0,54	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
18	0,13	0,26	0,53	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
20	0,13	0,26	0,53	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
25	0,13	0,26	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
30	0,13	0,26	0,53	0,85	1,31	1,70	2,05	2,56	2,75
35	0,13	0,26	0,53	0,85	1,31	1,69	2,04	2,45	2,73
40	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
45	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,68	2,02	2,41	2,69
50	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,68	2,01	2,40	2,68
60	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,67
70	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,67	1,99	2,38	2,66
80	0,13	0,26	0,53	0,85	1,30	1,67	1,99	2,37	2,65

Таблиця 2.

Коефіцієнти заломлення деяких твердих тіл при 18°C відносно повітря					
Довжина хвилі, мкм	А 0,760	В 0,687	С (Н) 0,6563	D (Na) 0,5893	Е 0,5270
Скло	1,5986	1,6020	1,6038	1,6085	1,6145
Кварц	1,5391	1,5409	1,5418	1,5442	1,5471

Таблиця 3.

Довжини хвиль спектральних ліній ртуті

№ лінії	Колір	Довжина хвилі лінії, нм
1	червона	708,19
2	-----	690,72
3	-----	671,62
4	оранжева	623,44
5	-----	612,33
6	-----	607,26
7	жовта	589,02
8	-----	579,09
9	-----	576,96
10	зелена	567,59
11	-----	546,07
12	-----	529,01
13	голуба	510,24
14	-----	502,56
15	-----	491,60
16	синя	435,84
17	-----	434,75
18	-----	433,92
19	фіолетова	410,81
20	-----	407,78
21	-----	404,66
22	-----	390,64

Таблиця 4.

Світлові одиниці СІ			
Назва величини	Одиниці вимірювання		
	назва	скорочене позначення	розмірність
Сила світла	кандела	<i>кд</i>	<i>J</i>
Плоский кут	радіан	<i>рад</i>	
Тілесний кут	стерадіан	<i>ср</i>	
Світловий потік	люмен	<i>лм</i>	<i>J</i>
Освітленість	люкс	<i>лк</i>	$L^{-2}J$
Енергетична освітленість (опроміненість), енергетична світність (випромінюваність)	ват на квадратний метр	$\frac{Вт}{м^2}$	MT^{-3}
Сила випромінювання	ват на стерадіан	$\frac{Вт}{ср}$	L^2MT^{-3}
Яскравість	кандела на квадратний метр	$\frac{кд}{м^2}$	$L^{-2}J$
Оптична сила лінзи	метр в мінус першій степені	$м^{-1}$	L^{-1}
Світлова енергія	люмен-секунда	<i>лм · с</i>	<i>TJ</i>
Промениста енергія (енергія випромінювання)	джоуль	<i>Дж</i>	L^2MT^{-2}
Променистий потік (потік випромінювання)	ват	<i>Вт</i>	L^2MT^{-3}
Освітленість	кандела-секунда	<i>кд · с</i>	<i>TJ</i>

Навчально-методичне видання

Федосов Сергій Анатолійович
Шаварова Ганна Петрівна
Кевшин Андрій Григорович
Шигорін Павло Павлович

Оптика

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

Частина 1

Друкується в авторській редакції