

Ю.Б. Басараба, А.Г. Калугін, Т.І. Пуцишин

ОПТИКА

Частина II

**Геометрична оптика
Взаємодія світла з речовиною**

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
80-87, 97, 98

Івано-Франківськ

2012

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**

Кафедра загальної та прикладної фізики

Ю.Б. Басараба, А.Г. Калугін, Т.І. Луцишин

Оптика

Частина II

Геометрична оптика

Взаємодія світла з речовиною

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Івано-Франківськ

2012

УДК 535
ББК 22.34
Б 27

Рецензент

Гевик В. Б. к. ф.-м. наук, доцент
кафедри загальної та прикладної фізики
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу

*Рекомендовано методичною радою університету
(протокол № 16 від 23.02.2012)*

Басараба Ю. Б., Калугін А. Г., Луцишин Т. І.

Д Оптика. Лабораторний практикум. Ч.ІІ. Геометрична оптика.
Взаємодія світла з речовиною. -- 2-ге вид., переробл. -- Івано-
Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. -- 98 с.

МВ 02070855 -- 3738--2012

Даний лабораторний практикум написаний згідно з програмою курсу загальної фізики для студентів вищих технічних навчальних закладів України і містить методичні вказівки до проведення двадцяти однієї лабораторної роботи з розділу «Оптика».

До кожної лабораторної роботи додано виклад теорії та вказано методику і послідовність виконання роботи. Значну увагу звернено на практичне застосування відповідних фізичних явищ.

Призначений для використання студентами усіх інженерних напрямів підготовки денної та заочної форм навчання.

УДК 535
ББК 22.34

МВ 02070855 -- 3738--2012

© Басараба Ю. Б.,
Калугін А. Г.,
Луцишин Т. І.
© ІФНТУНГ, 2012

ЗМІСТ

Частина 2.....	4
Вступ	4
Методичні вказівки до підготовки, виконання і оформлення звітів з лабораторних робіт	5
Методичні рекомендації для самостійного вивчення геометричної оптики та взаємодії світла з речовиною	5
Геометрична оптика	7
Лабораторна робота № 80. Вивчення мікроскопа та зорової труби.....	7
Лабораторна робота № 81. Визначення фокусної відстані збиральних та розсіювальних лінз	22
Лабораторна робота № 82. Дослідження аберацій лінз	41
Лабораторна робота № 83. Визначення головної фокусної відстані сферичних дзеркал	49
Взаємодія світла з речовиною.....	54
Лабораторна робота № 84. Вимірювання концентрації і показника заломлення розчинів за допомогою інтерферометра ЛІР-2	54
Лабораторна робота № 86. Визначення показника заломлення і дисперсії твердих та рідких тіл.....	63
Лабораторна робота № 87. Визначення показника заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа.....	71
Лабораторна робота № 97. Дослідження спектрів поглинання твердих тіл фотоелектричним методом. Вивчення явища дихроїзму.....	77
Лабораторна робота № 98. Дослідження явища розсіювання світла.....	90
Перелік рекомендованих джерел	98

ЧАСТИНА II

*... "Учися, серденько, колиш
З нас будуть люди", – ти сказала.*

М. Т. Шевченко

ВСТУП

Методичні вказівки підготовлені для допомоги студентам під час виконання лабораторних робіт з розділу «Оптика» курсу загальної фізики.

Складені методичні вказівки відповідно до навчального плану та програми з фізики. Вони охоплюють детальні теоретичні відомості та інструкції з 21 лабораторної роботи цього розділу. Методичний посібник складається з двох окремих частин:

Частина I. Хвильова оптика. Квантова оптика.

Частина II. Геометрична оптика. Взаємодія світла з речовиною.

Виконання цих робіт ознайомить з основними властивостями світла, допоможе кращому розумінню явищ інтерференції, дифракції та поляризації світла; ознайомить з найбільш цікавими як з наукової, так і практичної точок зору, їх властивостями, а також з найбільш зручними методами їх дослідження. Ознайомить з проявом цих явищ у природі та їх практичним застосуванням у техніці.

Виконання кожної лабораторної роботи пов'язане з необхідністю попереднього вивчення певних теоретичних питань. З цією метою у кожній інструкції до роботи наведено перелік контрольних питань з теоретичного матеріалу, який необхідно засвоїти під час підготовки до роботи, опис установки, порядок проведення вимірювань.

Методичні вказівки до підготовки, виконання і оформлення звітів з лабораторних робіт

При підготовці до лабораторних робіт необхідно перш за все ознайомитися з теоретичним матеріалом даної роботи, вивчити інструкції з експлуатації до вимірюваних приладів і методику виконання експерименту.

З цією метою студент повинен:

- ознайомитися з даними методичними вказівками;
- самостійно вивчити теоретичний матеріал до даної лабораторної роботи;
- у спеціально відведеному для лабораторних робіт зошиті підготувати інструкції по виконанню роботи з виведенням робочих формул і формул для розрахунку похибок;
- підготувати бланк звіту про виконання лабораторної роботи.

Отримавши допуск у викладача, студент може приступити до виконання лабораторної роботи. Для цього необхідно:

- ознайомитися з приладами, які необхідні для виконання роботи;
- провести спостереження і вимірювання;
- опрацювати результати вимірювань (обчислити шукану фізичну величину за формулами і дати оцінку похибок вимірювання).

Методичні вказівки до вивчення явищ геометричної оптики та взаємодії світла з речовиною

Уявлення геометричної оптики справедливі у тій степені, в якій можна знехтувати явищами інтерференції та дифракції світлових хвиль. Чим менша довжина хвилі тим менш помітні явища дифракції світла. Можна стверджувати, що геометрична оптика є граничним випадком хвильової оптики, якій відповідають малі довжини хвиль.

Геометрична оптика або оптика променя, описує поширення світла терміном промінь. Приймаючи це абстрактне поняття і пов'язані з ним правила ми суттєво спрощуємо задачу оптики, але не в стані пояснити багато важливих оптичних ефектів, наприклад дифракцію і поляризацію.

Наступне спрощення в геометричній оптиці – параксіальне наближення, або «наближення малих кутів». Математичне поведінка променя стає лінійною, дозволяючи представити оптичні компоненти простими матрицями. Використання методів Гаусівської оптики дає змогу знайти властивості першого порядку оптичних систем.

Універсальним у фізиці поняттям є швидкість світла. Її значення у вакуумі представляє не тільки граничну швидкість поширення електромагнітних коливань будь-якої частоти, але й взагалі граничну швидкість поширення будь-якої дії на матеріальні об'єкти. При поширенні світла у різних середовищах швидкість світла зменшується $v = c/n$, де n – показник заломлення середовища, який характеризує її оптичні властивості і залежить від частоти світла $n = n(\nu)$. Залежність показника заломлення від частоти світла проявляється у вигляді явища дисперсії світла.

Геометрична оптика

*Як багато спроби вважалися
неможливими, поки вони не
були здійснені.*

Пліній Старший

Лабораторна робота № 80

Вивчення мікроскопа та зорової труби

Мета: ознайомитися з будовою і призначенням основних частин та визначити основні характеристики мікроскопа та зорової труби.

Прилади: мікроскоп, зорова труба, освітлювач, стінний масштаб, рулетка, окулярний мікрометр, масштабна лінійка, об'єктивний мікрометр.

Теоретичні відомості

Око людини є складною біологічною оптичною системою, що характеризується певною роздільною здатністю, тобто найменшою відстанню між елементами спостережуваного об'єкту (які сприймаються як крапки або лінії), при якому вони ще можуть бути відрізані один від одного. Для нормального ока при віддаленні від об'єкту на т.з. відстань найкращого бачення $D=250$ мм мінімальна роздільна здатність складає приблизно 0,08 мм (а у більшості людей – близько 0,20 мм), що відповідає куту зору не менше однієї кутової хвилини. Розміри мікроорганізмів, більшості рослинних і тваринних клітин, дрібних кристалів, деталей мікроструктури металів та сплавів і т.п. значно менше цієї величини. Кут зору можна збільшити, наближаючи предмет до ока. Проте це не завжди можливо (наприклад, для астрономічних об'єктів). Крім того, існує обмеження чіткого спостереження предмета при наближенні його до ока внаслідок існування границі акомодатії ока. Розширити можливості ока людини можна за допомогою різних оптичних приладів. Для збільшення кута зору при спостереженні і вивченні дрібних об'єктів призначені мікроскопи різних типів, а при розгляді макроскопічних,

але віддалених об'єктів – зорові труби (телескопи). За допомогою мікроскопів визначають форму, розміри, будову та багато інших характеристик мікрооб'єктів. Мікроскоп дає можливість розрізнити структури з роздільною здатністю до 0,20 мкм.

Мікроскоп (від грецького *μικρός* – малий і *σκοπεω* – дивлюсь) – оптичний пристрій для отримання збільшених зображень об'єктів (або деталей їх структури), невидимих неозброєним оком.

Найпростіший мікроскоп складається із двох лінз – об'єктива і окуляра, розділених значним у порівнянні з їх фокусними відстанями проміжком і з'єднаних трубою – тубусом. Об'єктив – лінза із дуже малою фокусною віддаллю. Він підноситься близько до об'єктної площини, на якій лежить призначений для вивчення об'єкт. Об'єктив забезпечує велике збільшення і створює обернене дійсне зображення. Це зображення ще раз перевертається окуляром, через який його розглядає дослідник. В сучасних мікроскопах як об'єктив, так і окуляр – складні оптичні системи. Сучасні мікроскопи мають також додаткову систему освітлення об'єкта спостереження, що лежить на предметному столику, макро- та мікро- гвинти для настроювання різкості зображення, систему управління положенням конденсора, який відіграє основну роль в системі освітлення. В залежності від призначення, у спеціалізованих мікроскопах можуть бути використані додаткові пристрої і системи.

В сучасних мікроскопах (рис. 1) можна виділити дві частини: механічну і оптичну. Оптична частина складається з джерела світла 7, діафрагми і конденсора 8, змінних об'єктивів 3, окуляра 1. До механічної належать основа 10, гвинт 4 для грубого фокусування мікроскопа, механізм 5 тонкого фокусування мікроскопа, предметний столик 6 з тримачем зразка 9, револьвер 2 з закріпленими на ньому об'єктивами, тубуса 11 та тубусотримача 12.

Основне призначення освітлювальної системи мікроскопа – створення рівномірно освітленого поля зору мікроскопа. Конденсор – короткофокусна лінза (дзеркало) або система лінз (дзеркал), що збирає і спрямовує промені від джерела світла на об'єкт, який розглядають або проєктують.

Об'єктив являє собою складну багатолінзову оптичну систему (до 12–13 лінз), розміщену в оправу. Головну роль в одержанні збільшеного зображення відіграє передня, або так звана фронтальна лінза, інші ж служать для усунення недоліків зображення і називаються коригуючими,



Рисунок 1 – Основні елементи оптичного мікроскопа

Об'єктиви мікроскопів – короткофокусні, а їх збільшення лежать в межах від 10 до 100.

Окуляр являє собою складну лупу, до якої входить верхня окулярна лінза і нижня збиральна. Лінзи розташовані на відстані, що дорівнює півсумі їх фокусних відстаней. Ця оптична система також міститься в оправі. Окремі окуляри забезпечуються окулярним мікрометром – прозорою пластинкою, на якій нанесено шкалу з певною ціною поділки. Розміщують окулярний мікрометр поблизу фокальної площини окуляра. Окуляр виготовляють з фокусними відстанями від 0,85 до 12 см і збільшенням від 2 до 25.

Підбираючи різні об'єктиви і окуляри, збільшення мікроскопа можна змінювати у широких межах.

Досліджувані предмети кладуть на предметний столик 6. Якщо вони прозорі, спостереження ведеться у прохідному світлі і освітлення здійснюється за допомогою джерела світла 7 і конденсора 8. Непрозорі предмети спостерігають у відбитому світлі при освітленні їх з боку об'єктива за допомогою спеціального освітлювача.

Розглянемо схему побудови зображення у мікроскопі (рис. 2).

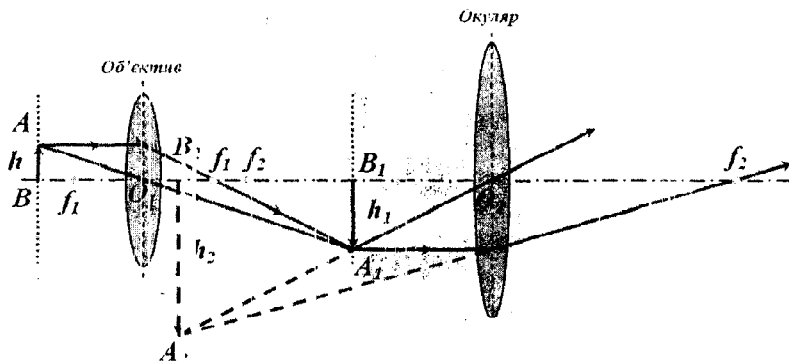


Рисунок 2 – Схема побудови зображення у мікроскопі

Досліджуваній предмет AB розмішують недалеко за фокусом об'єктива F_1 . Його лінійні розміри h . Об'єктив дає збільшене перевернуте дійсне зображення предмета A_1B_1 за подвійною фокусною відстанню об'єктива. Розміри зображення h_1 . По відношенню до окуляра зображення A_1B_1 є предметом. Окуляр розмішують так, щоб зображення A_1B_1 попадало між його оптичним центром і фокусом. Кінцеве зображення A_2B_2 буде уявним і відносно предмета AB перевернутим і збільшеним. Зображення A_2B_2 знаходиться на відстані найкращого зору.

Основними характеристиками мікроскопа є збільшення, роздільна здатність, глибина різкого зображення. Розглянемо їх.

Збільшення мікроскопа. Позначимо збільшення об'єктива k_1 , окуляра k_2 , а загальне збільшення мікроскопа k . Згідно з рис. 2 маємо

$$k = \frac{h_1}{h} = \frac{O_1B_1}{O_1B}, \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{B_2O_2}{B_1O_2}, \quad (2)$$

$$k = \frac{h_2}{h} = \frac{O_1 B_1 \cdot B_2 O_2}{O_1 B \cdot B_1 O_2}. \quad (3)$$

Щоб збільшення мікроскопа було максимально можливим, беруть $O_1 B \approx f_1$, $B_1 O_2 \approx f_2$. При цьому $O_1 B_1 = f_1 + \Delta$, де Δ – відстань між головними фокусами об'єктива і окуляра, яка практично дорівнює довжині тубуса мікроскопа. Позначимо відстань найкращого зору $B_2 O_2 = L$ (L для нормального ока дорівнює 25 см). Оскільки $f_1 \ll \Delta$, то можна вважати, що $O_1 B_1 = \Delta$ – оптична довжина мікроскопа. Отже, формула збільшення мікроскопа набирає такого вигляду:

$$k = k_1 \cdot k_2 = \frac{L \cdot \Delta}{f_1 \cdot f_2}. \quad (4)$$

На практиці f_1 складає величину порядку 1 мм, $f_2 \approx 10$ мм, $\Delta \approx 100$ мм. При цих значеннях отримуємо

$$R = \frac{250 \cdot 100}{1 \cdot 10} = 2500.$$

З формули (4) видно, що, зменшуючи фокусні відстані і збільшуючи Δ , можна досягнути будь-яких значень R . Однак границю збільшення, що дає оптичний мікроскоп, обмежує хвильова природа світла.

Роздільна здатність. Важливою характеристикою мікроскопа є його здатність давати роздільне зображення двох сусідніх об'єктів. Роздільна здатність мікроскопа як і усіх оптичних приладів, обмежена хвильовою природою світла (дифракційними явищами) і залежить лише від числової апертури об'єктива A і довжини світлової хвилі λ . Числова апертура об'єктива A визначається входною зіницею об'єктива, який обмежує конус променів, що входять в об'єктив.

Врахувавши, що площа зображення, яке створює об'єктив, лежить на відстані, значно більшій ніж діаметр об'єктива, промені у просторі зображення можна вважати паралельними. Застосовуючи

формули фраунгоферової дифракції на апертурній діаграмі об'єктива, дістають вираз для роздільної здатності мікроскопа:

$$R = \frac{0,61 \cdot \lambda}{A}. \quad (5)$$



Рисунок 3 – Сучасний електронний мікроскоп

Як випливає з формули (2), роздільну здатність мікроскопа можна підвищити, збільшуючи числову апертуру об'єктива A або зменшуючи довжину хвилі λ . Часто для збільшення апертури об'єктива простір між об'єктивом і фронтальною лінзою заповнюють імерсійною рідиною (імерсійне масло з показником заломлення $n = 1,515$, вода, водний розчин гліцерину). При цьому апертура збільшується в n разів. Іноді для збільшення роздільної здатності мікроскопа використовують ультрафіолетове випромінювання.

Для довжини хвилі електромагнітного випромінювання $\lambda = 550$ нм, що відповідає зеленому світлу, у середовищі повітря, найбільша числова апертура становить 0,95, а з використанням імерсійної олії до 1,5. На практиці найменше значення для R яке отримують становить близько 200 нм.

Для практичного визначення роздільної здатності мікроскопа і зорових труб користуються штриховими тест-таблицями – *мірсами*. Штрихова міра являє собою групу сімейств (квадратів), по-різному розміщених у вигляді матриці. Штрихи сімейств у кожному рядку орієнтовані один відносно одного під кутом 45° . У межах одного сімейства штрихи паралельні і однакові за шириною. Таких груп сімейств буває, як правило, 16 або 25. Ширина штрихів від групи до групи зростає у геометричній прогресії.

Оскільки роздільна здатність мікроскопа обмежена, то і його збільшення також обмежене певним максимумом, який називають *корисним збільшенням*.

Роздільна здатність мікроскопа – це його здатність видавати чітке роздільне зображення двох близько розміщених точок об'єкта. Ступінь проникнення у мікросвіт, можливості його вивчення залежать від роздільної здатності приладу. Ця характеристика визначається перш за все довжиною хвилі випромінювання яка використовується в мікроскопі (видиме, ультрафіолетове, рентгенівське випромінювання). Фундаментальне обмеження полягає в неможливості отримати за допомогою електромагнітного випромінювання зображення об'єкта, меншого за розмірами, ніж довжина хвилі цього випромінювання. Проникнути глибше у мікросвіт можливо при використанні випромінювання з меншими довжинами хвиль.

Електрон, який володіє властивостями не тільки частинки, але й хвилі, може бути використаний як опorne випромінювання в мікроскопії. Довжина хвилі електронного випромінювання залежить від його енергії, а енергія електрона дорівнює $N = eU$, де U – різниця потенціалів, яку проходить електрон, e – заряд електрона. Довжини хвиль електронного випромінювання при проходженні різниці потенціалів 200000 В складає порядку 0,1 нм. Електронне випромінювання легко фокусувати електромагнітними лінзами, оскільки електрон – заряджена частинка. Електронне зображення може бути легко переведене у видиме (рис. 3).

В групі німецького вченого Штефана Хелля з Інституту Біофізичної Хімії наукового співтовариства Макса Планка (Гетінген) у співпраці з аргентинським вченим Маріано Боссі у 2006 році був розроблений оптичний мікроскоп під назвою наноскоп, який дозволяє подолати бар'єр Аббе і спостерігати об'єкти розміром близько 10 нм залишаючись в діапазоні видимого випромінювання, отримуючи при цьому високоякісні тримірні зображення об'єктів раніше недоступних для звичайної світлової і конфокальної мікроскопії. Оптичні мікроскопи інтенсивно використовуються в мікроелектроніці, нанофізиці, біотехнології, фармацевтиці і мікробіології, медичній діагностиці.

Глибина різкого зображення. Геометричні точки (рис. 4, точка А), що лежать у площині S , на яку сфокусовано мікроскоп, проєктуються у площині зображення S' у вигляді точки A' . Точки B і C , які лежать нижче від площини фокусування або вище від неї, проєктуються на площину зображення у вигляді кругів розсіяння.

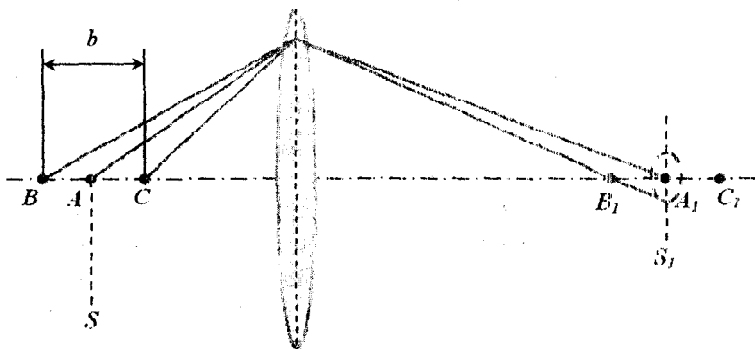


Рисунок 4 – Глибина різкого зображення мікроскопа

Чим далі точки B і C від площини фокусування, тим більшим буде круг розсіяння. Шар, для площини якого кутова величина кругів розсіяння не перевищує роздільної здатності ока, сприймається різким (шар BC). Його товщину називають *геометричною глибиною зображення*

$$b = \frac{2L}{k^2}. \quad (6)$$

Отже, при збільшенні k швидко зменшується глибина різкого зображення.

Зорові труби. Прилади, які дозволяють розглядати предмети, які знаходяться на значній відстані, називаються *телескопічними*. До них належать такі, що вимірюють координати рухомих цілей – дальноміри та висотоміри, геодезичні прилади: нівеліри, теодоліти та інші, за допомогою яких визначають координати точок на земній поверхні. Відрізняються телескопічні системи від інших оптичних систем тим, що промені входять у вигляді паралельного пучка і виходять з неї теж і вигляді паралельних пучків. Отримати паралельність спряжених пучків променів у просторі, предметів та зображень у просторі можна лише тоді, коли задній фокус об'єктива збігається з переднім фокусом окуляра. Оптична довжина такої системи дорівнює сумі фокусних відстаней об'єктива і окуляра. Для наведення на різкість відстань між об'єктивом і окуляром може ненабагато змінюватися.

Оптичні телескопічні системи використовують в астрономії (для спостереження за небесними світилами). Також, телескоп може використовуватися в якості зорової труби, для спостереження за віддаленими об'єктами.

Головними оптичними характеристиками телескопічної системи є: *видиме збільшення* N , *поле зору* β , *збиральна здатність труби* C , *роздільна здатність труби*.

Зорова труба складається з об'єктива і окуляра, розміщених так, що задній фокус об'єктива співпадає з переднім фокусом окуляра (рис. 5). Об'єктив дає дійсне, перевернуте і зменшене зображення A_1B_1 предмета AB .

Окуляр виконує роль лупи і дає уявне, пряме і збільшене зображення щодо A_1B_1 . Зображення знаходиться на відстані найкращого бачення L (25 см).

Кутове збільшення зорової труби

$$N = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (7)$$

Де α – кут, під яким зображення предмета розглядається у зоровій трубі; β – кут, під яким предмет видно неозброєним оком.

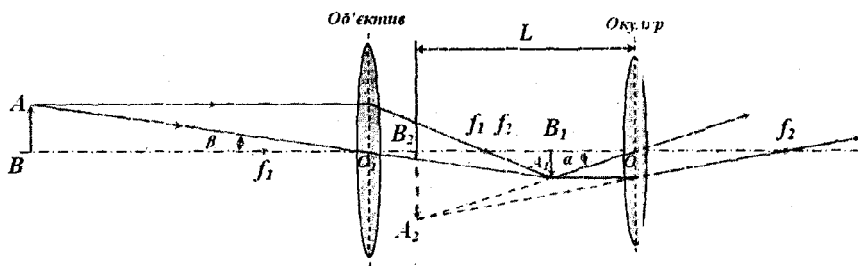


Рисунок 5 – Схема побудови зображення у зоровій трубі

З рис. 5 видно, що

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_2B_2}{O_2B_2} = \frac{A_1B_1}{O_2B_1}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{O_1 B} = \frac{A_2 B_1}{O_1 B_1} \quad (9)$$

Звідси

$$N = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{A_1 B_1}{O_2 B_1} \quad (10)$$

$$\frac{A_1 B_1}{O_1 B_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (11)$$

Основні характеристики телескопічних систем (збільшення кута зору, велика роздільна здатність, велика світлосила) залежать від якості та діаметра їхніх об'єктивів. Діаметри світлових пучків відповідають діаметрам вхідної та вихідної зіниць. Вхідна зіниця визначається діаметром об'єктива телескопічної системи, який можна збільшувати, виходячи з конкретних умов застосування. Вихідна зіниця як зображення оправи об'єктива, створеного окуляром, не може бути більшою за діаметр зіниці ока. Тому збільшення кута зору системи буде прямо пропорційним значенню діаметра об'єктива. Якщо зображення віддаленого об'єкта спостерігається оком (а не фотографується), то оптимальне зорове враження («зорова яскравість») буде тоді, коли зіниця ока цілком заповнюється конусом променів, які проходять через кожну точку зображення. При цьому буде досягнуто максимальної яскравості зображення на сітківці ока, яку не можна збільшити жодними допоміжними оптичними засобами, оскільки будь-які пучки світла з великою апертурою обмежуватимуться тією самою діафрагмою – зіницею ока. Збиральна здатність телескопічної системи визначається відношенням площі поверхні об'єктива до площі зіниці ока:

$$C = \frac{S_{об}}{S} \quad (12)$$

Полею зору називають найбільшу кутову відстань, яку одночасно видно в трубу:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{L}{l} \quad (13)$$

При малих кутах $\beta = \frac{L}{l}$ (β – в радіанах), де L – найбільша довжина видимої в трубу частини масштабної шкали (у сантиметрах) підвищеної на відстані l від об'єктива труби.

Роздільна здатність зорових труб, так само як і мікроскопа, обмежена явищем дифракції. Розрахунки показують, що роздільна здатність труби R визначається співвідношенням між апертурою D труби і довжиною хвилі світла λ .

Отже,

$$R = k \frac{D}{\lambda}, \quad (14)$$

де k – коефіцієнт пропорційності ($k = 0,41 \cdot 10^{-5}$). Чим менша апертура, тим сильніший вплив дифракції і менше R .

Порядок виконання роботи

Мікроскоп

Завдання I. Ознайомлення з будовою мікроскопа, призначенням основних його вузлів та отримання зображення мікроскопічних об'єктів за різних збільшень мікроскопа

1. Розмістити на предметному склі столика мікроскопа краплину води із сферичними частинами мікроскопічних розмірів (5–50 мкм). Накрити краплину покривним склом і провести дослідження.

2. Добитися максимального освітлення об'єкта поворотом дзеркала і переміщенням конденсора.

3. Опускаючи тубус мікроскопа за допомогою мікрогвинтів грубого і тонкого наведення, добитися різкого зображення частинок.

4. Провести ці досліді для різних збільшень мікроскопа, міняючи об'єктиви та окуляри.

Завдання II. Визначення збільшення мікроскопа

1. Покласти на предметний столик мікроскопа об'єктивний мікрометр (скляну пластинку, на яку нанесено шкалу з ціною поділки 0,01 мм), сфокусувати мікроскоп і дістати різке зображення поділок шкали.

2. Збоку від мікроскопа на відстані найкращого бачення (25 см) поставити вертикально масштабну лінійку з ціною поділки 1 мм.

3. На окуляр мікроскопа під кутом 45° до осі поставити дзеркало і встановити його так, щоб одночасно бачити зображення шкали об'єктивного мікрометра і шкали вертикальної масштабної лінійки.

4. Відрахувати кількість цілих поділок N_1 , шкали масштабу, які збігаються з цілим числом поділок N_2 зображення шкали мікрометра. Оскільки відношення ціни поділки шкали до ціни поділки мікрометра дорівнює 100, то збільшення мікроскопа визначається за формулою

$$k = \frac{N_2}{N_1} \cdot 100.$$

5. Порівняти виміряне збільшення мікроскопа з обчисленим за формулою (1).

6. Визначити ліну поділки окулярного мікрометра C , помістивши на предметний столик об'єктивний мікрометр з відомою ціною поділки C' , сумістивши кілька його поділок N з n поділками окулярного мікрометра. Тоді $C = \frac{N}{n} C'$.

7. Помістити замість об'єктивного мікрометра дротини різного перерізу і за відомою ціною поділки окулярного мікрометра визначити їх діаметри.

8. Повторити аналогічні вимірювання для сферичних полімерних частинок (наприклад, для частинок полістиролу).

9. Виміряти діаметр дротини механічним мікрометром і, знаючи ціну поділки окулярного мікрометра, обчислити збільшення мікроскопа.

Завдання III. Визначення роздільної здатності мікроскопа

1. Встановити міру перед об'єктивом мікроскопа, освітити міру і дістати різке її зображення.

2. Знайти залежність найменшої роздільної відстані від збільшення різних окулярів. Величина найменшої роздільної відстані визначається за допомогою таблиці (номер останнього квадрата міри, штрихи якого ще видно роздільно).

3. Для окуляра відомого збільшення знайти роздільну здатність у червоних і синіх променях (скористатись світлофільтрами).

4. Порівняти одержані дані Δ з розрахованими за формулою (2), знаючи апертуру для кожного об'єктива і довжину хвилі світла.

5. Повторити досліди для інших об'єктів.

Завдання IV. Визначення глибини різкого зображення

1. За допомогою мікрометричного гвинта визначити величину переміщення мікроскопа відносно об'єкта у межах його різкого зображення. Найкраще це зробити, сфокусувавши мікроскоп у кювету, де є суспензія мікроскопічних частинок. Знаючи збільшення мікроскопу, обчислити глибину різкого зображення b за формулою (3) і порівняти його з вимірним значенням.

Зорова труба

Завдання I. Ознайомлення з будовою зорової труби, призначенням її основних частин та визначення збільшення зорової труби

1. Ознайомитися з будовою зорової труби і призначенням її окремих вузлів.

2. Навести трубу на масштабну лінійку, що прикріплена до стіни.

3. Поруч із трубою на відстані 25–30 см від ока встановити вертикально на штативі таку саму шкалу і добре її освітити.

4. Добитися, щоб у полі зору були одночасно обидва масштаби (краще це зробити за допомогою рисувального приладу або призми, надітих на окуляр труби).

5. Порівнюючи зображення настінної шкали з шкалою у трубі, обчислити величину зображення $A'B'$ і дійсну довжину видимої частини шкали AB .

6. За формулою $k = A'B' \cdot l / (AB \cdot l_1)$, де l – відстань від ока до шкали на стіні, а l_1 – відстань від ока до зображення шкали (25 см), обчислити збільшення зорової труби k .

7. Провести досліди кілька разів при різних відстанях l . Обчислити середнє значення k і порівняти його з обчисленим за формулою (4).

8. Накреслити хід променів у трубі, наведений на віддалений предмет.

Завдання II. Визначення збиральної здатності зорової труби

1. Виміряти діаметр зорової труби і обчислити її збиральну здатність за формулою (5), приймаючи діаметр зіниці ока за такий, що дорівнює 5 мм.

2. Обчислити збиральну здатність телескопа, діаметр об'єктива якого дорівнює 1 м.

Завдання III. Визначення поля зору труби

1. Навести трубу на масштабну шкалу і заміряти довжину шкали L , видиму в трубу.

2. Рулеткою заміряти відстань l від об'єктива труби до шкали.

3. За формулою (6) обчислити величину поля зору труби.

4. Повторити дослід при різних відстанях l і обчислити середнє значення β .

Завдання IV. Визначити роздільну здатність зорової труби

1. Встановити міру на відстані 2-3 м від об'єктива труби і добре освітити лампою. Сфокусувати трубу і одержати різке зображення міри.

2. Визначити номер великого квадрата, штрихи якого ще видно роздільно. За таблицями визначити відстань a між штрихами цього квадрата при фіксованій відстані b від міри до об'єктива труби.

3. Обчислити граничну кутову відстань $\varphi = a/b$, а також роздільну силу $R = \frac{1}{\varphi} = b/a$. Порівняти здобуті результати з обчисленими за формулою (6) ($\lambda = 550$ нм).

4. Перевірити залежність R від апертури D і довжини хвилі λ , скориставшись різними об'єктивами і світлофільтрами.

Контрольні запитання

1. Накресліть хід променів у мікроскопі і у зоровій трубі.
2. Виведіть формули збільшення мікроскопа і зорової труби.
3. Назвіть основні характеристики мікроскопа.
4. Назвіть основні характеристики телескопічних систем.
5. Чим визначається гранична роздільна здатність мікроскопа і зорової труби?
6. Які вимоги ставляться до об'єктива і окуляра розглянутих приладів?
7. Порівняйте роздільну здатність ока і зорової труби.
8. Як визначити розміри мікрооб'єктів за допомогою мікроскопа?
9. Для чого у мікроскопах використовують імерсійні рідини?
10. Назвіть основні частини мікроскопа.
11. Що таке конденсор і для чого він призначений?
12. На чому базується робота електронного мікроскопа? Які типи телескопів для спостереження космічних об'єктів? Що таке радіотелескоп?

*Суди про прожитий день не за вражам,
який ти зібрав, а за тим насінням,
що ти посіяв у цей день.*

Р. Стівенсон

Лабораторна робота № 81

Визначення фокусної відстані збірних та розсіювальних лінз

Мета: засвоїти різні методи визначення фокусної відстані тонких лінз.

Прилади: оптична лава з чотирма рейтерами, освітлювач, екран, три збірних лінзи і одна розсіювальна, лінійка.

Теоретичні відомості

В ізотропному середовищі під *променями* розуміють лінії нормальні до хвильових поверхонь. Сукупність променів утворюють *пучок*. Якщо промені при своєму продовженні перетинаються в одній точці, пучок називається *гомоцентричним*. Гомоцентричному пучку відповідає сферична хвильова поверхня. Частинним випадком гомоцентричного пучка є пучок паралельних променів, йому відповідає плоска світлова хвиля. Коли пучку променів відповідає хвильова поверхня двоякої кривизни, то перетин променів відбувається не в одній точці, а в сукупності точок, розміщених на двох взаємно перпендикулярних прямолінійних відрізках.

Такий пучок називається *астигматичним*. Відстань між цими відрізками називається *астигматичною різницею*. Будь-яка оптична система здійснює перетворення світлових пучків. Якщо система не порушує гомоцентричності пучків, то промені які вийшли з точки *A* перетнуться у точці *A'*. Ця точка являє собою оптичне зображення точки *A*. Якщо будь-яка точка предмета зображується у вигляді точки, зображення називається точковим або стигматичним.

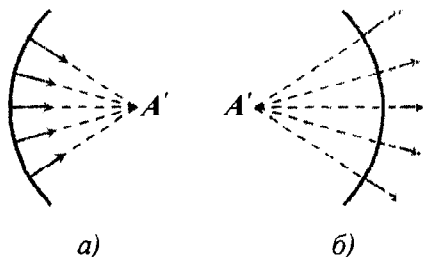


Рисунок 1 – Гомоцентричний пучок променів

Зображення називається дійсним, якщо світлові промені в точці A' дійсно перетинаються (рис. 1а), і уявним, якщо в A' перетинаються продовження променів, проведених у напрямі, зворотному до поширення світла (рис. 1б).

Оптична система, утворена сферичними (плоскими) поверхнями, називається центрованою, якщо центри усіх поверхонь лежать на одній прямій. Цю пряму називають оптичною віссю системи.

Велике значення у геометричній теорії оптичних систем і зображень мають параксіальні промені, які проходять нескінченно близько до оптичної осі або під дуже малими кутами до неї.

Оптична лінза – найпростіший оптичний елемент, виготовлений із прозорого матеріалу, обмежений двома сферичними заломлюючими поверхнями, які мають спільну вісь або взаємно перпендикулярні площини симетрії. Лінза основний елемент оптичної системи. Важливою характеристикою лінзи є її *оптична сила* Φ (величина, обернена фокусній відстані f), вимірюється у м^{-1} (діоптрія).

Нехай n_0 , n_1 і n_2 – показники заломлення трьох середовищ в тому порядку, в якому промінь перетинає їх, а R_1 і R_2 – «параксіальні» радіуси кривизни поверхонь. Фокусні відстані першої поверхні виражаються формулами:

$$f_0 = -\frac{n_0 R_1}{n_1 - n_0} = -\frac{n_0}{\Phi_1}, \quad f'_0 = -\frac{n_1 R_1}{n_1 - n_0} = -\frac{n_1}{\Phi_1}, \quad (1)$$

а для другої поверхні

$$f_1 = -\frac{n_1 R_2}{n_2 - n_1} = -\frac{n_1}{\Phi_2}, \quad f'_1 = -\frac{n_2 R_2}{n_2 - n_1} = -\frac{n_2}{\Phi_2}, \quad (2)$$

Фокусні відстані комбінації поверхонь рівні:

$$f = \frac{f_0 f_1}{\Delta}, \quad f' = \frac{f'_0 f'_1}{\Delta} \quad (3)$$

де Δ – відстань між фокусами f'_0 і f_1 . Нехай d – осьова товщина лінзи, тобто відстань між полюсами двох поверхонь; тоді

$$\Delta = d - f'_0 + f_1. \quad (4)$$

Підставляючи сюди вирази для f'_0 і f_1 , отримаємо

$$\Delta = \frac{D}{(n_1 - n_0)(n_2 - n_1)}, \quad (5)$$

де

$$D = (n_1 - n_0)(n_2 - n_1)d - n_1[(n_2 - n_1)R_1 + (n_1 - n_0)R_2]. \quad (6)$$

Підставимо в (3) вирази для f_0 , f_1 , f'_0 , f'_1 і Δ , то отримаємо вирази для фокусних відстаней комбінації двох сферичних поверхонь, а саме

$$f = n_0 n_1 \frac{R_1 R_2}{D}, \quad f' = -n_1 n_2 \frac{R_1 R_2}{D}. \quad (7)$$

Оптична сила лінзи рівна

$$\begin{aligned} \Phi &= -\frac{n_0}{f} = \frac{n_2}{f'} = -\frac{D}{n_1 R_1 R_2} = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{d}{n_1} \Phi_1 \Phi_2 = \\ &= \frac{n_1 - n_0}{R_1} + \frac{n_2 - n_1}{R_2} - \frac{d}{n_1} \frac{(n_1 - n_0)(n_2 - n_1)}{R_1 R_2} = \\ &= \frac{n_1[(n_2 - n_1)R_1 + (n_1 - n_0)R_2] - (n_1 - n_0)(n_2 - n_1)d}{n_1 R_1 R_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

де Φ_1 і Φ_2 — оптичні сили двох поверхонь.

Відповідно фокусні відстані визначаються з формул

$$f = -\frac{n_0}{\Phi}, \quad f' = -\frac{n_2}{\Phi}.$$

Особливий інтерес представляє випадок рівності показників заломлення середовища по обидва боки лінзи, тобто $n_2 = n_0$. З (8) отримаємо

$$\Phi = \frac{n_1 - n_0 (n_1 - n_0)d - n_1(R_1 - R_2)}{n_1 R_1 R_2}. \quad (9)$$

Відповідно фокусна відстань

$$f' = -f = \frac{n_0 n_1}{n_1 - n_0} \frac{R_1 R_2}{(n_1 - n_0)d - n_1(R_1 - R_2)} \quad (10)$$

У випадку коли лінза знаходиться у повітрі ($n_0 = 1$) з формули (10) отримаємо:

$$\begin{aligned} \Phi = \frac{1}{f} &= \frac{n_1 - 1 (n_1 - 1)d - n_1(R_1 - R_2)}{n_1 R_1 R_2} = \\ &= (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{n R_1 R_2} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

де f — фокусна відстань лінзи; n — показник заломлення матеріалу лінзи; R_1 — радіус кривизни поверхні лінзи розміщеної ближче до джерела світла; R_2 — радіус кривизни поверхні лінзи розміщеної далі від джерела світла; d — товщина лінзи (відстань вздовж оптичної осі лінзи між двома вершинами поверхонь лінз).

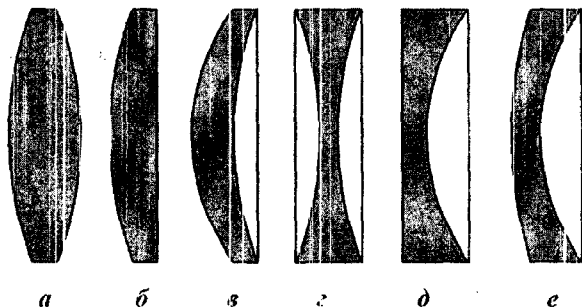
Знаки при радіусах вважаються додатними, якщо центр сферичної поверхні знаходиться справа від лінзи і від'ємним, якщо зліва. Якщо d є дуже мале у порівнянні з радіусами кривизни поверхні лінзи, то така лінза називається *тонкою*, а її фокусну відстань можна знайти за формулою (лінза знаходиться у повітрі) приймаючи $d = 0$:

$$\frac{1}{f} \approx (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]. \quad (12)$$

Цю формулу називають формулою тонкої лінзи. Величина фокусної відстані додатна для збірних лінз і від'ємна для розсіювальних.

При виготовленні лінз для видимого діапазону використовують оптичне або органічне скло, в ультрафіолетовому діапазоні – кварц, флюорит та ін., в інфрачервоному діапазоні – спеціальні сорти скла, кремній, сапфір, германій та ін. Природною оптичною лінзою є кришталик ока.

Здебільшого лінзи мають аксіальну симетрію й обмежені двома сферичними поверхнями однакового або різного радіусу. Залежно від розташування центрів сферичних поверхонь та їхнього радіусу розрізняють наступні типи лінз (рис. 2).



a – двовипукла; *б* – плоско-випукла; *в* – збірний меніск; *г* – двоовігнута;
д – плоско-овігнута; *е* – розсіювальний меніск

Рисунок 2 – Типи лінз

Залежно від того, сходяться чи розходяться паралельні пучки променів після проходження лінзи, лінзи поділяють на збірні (рис. 2 *a, б, в* та рис. 3), розсіювальні (рис. 2 *г, д, е* та рис. 4) та телескопічні (афокальні).

Вісь симетрії аксіально-симетричної лінзи називається *оптичною віссю*. Світловий промінь, який розповсюджується вздовж оптичної осі не заломлюється.

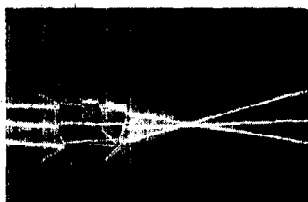
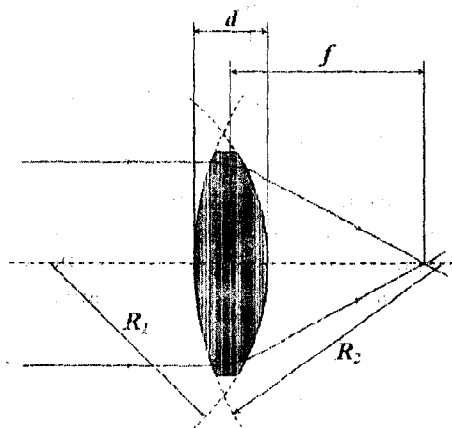


Рисунок 3 – Збірна лінза

Лінза називається *тонкою лінзою*, коли її товщина набагато менша за радіуси кривизни поверхонь лінзи. У протилежному випадку, коли товщиною лінзи не можна знехтувати у порівнянні з радіусами кривизни, лінзу називають *товстою*. Поділ лінз на товсті та тонкі є принциповим, оскільки дія лінзи залежить і від товщини. Так, наприклад, двовипукла лінза може бути розсіювальною, якщо її товщина перевищує радіуси кривизни у кілька разів.

Оптичний центр лінзи – точка, проходячи через яку промінь світла не змінює свого напрямку.

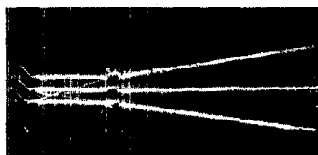
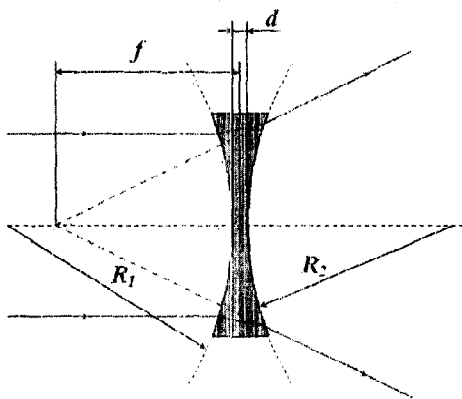


Рисунок 4 – Розсіювальна лінза

Збірна лінза має властивість збирати промені, випущені з однієї точки, в іншій точці по другий бік від лінзи. Якщо на деякій відстані перед лінзою розмістити точку A , то промені що виходитимуть з цієї точки, проходилимуть через лінзу заломлюючись до оптичної осі і збиратимуться в одній точці. Ця точка називається *спряженим фокусом* до точки A .

Розсіювальна лінза відхиляє промені від оптичної осі, тому її фокуси – уявні. Телескопічна лінза залишає паралельні промені паралельними, лише змінює ширину пучка і його нахил. Фокуси телескопічної лінзи містяться на нескінченності, тому вона ще називається афокальною.

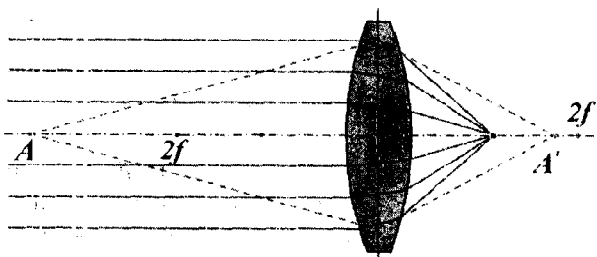


Рисунок 5 – Побудова зображення у збірній лінзі при віддаленні предмета

Якщо віддаляти точку A від лінзи (рис. 5), то точка A' переміщатиметься ближче до лінзи.

Якщо точка A знаходитиметься нескінечно далеко від лінзи, то промені від неї будуть паралельними, а точка A' називатиметься *головним фокусом лінзи*, а відстань до неї – *головною фокусною відстанню*. Фокусна відстань є додатною для збірних лінз та від'ємною для розсіювальних лінз.

При побудові зображень створених двовипуклою лінзою, проводять три лінії (рис. 6)

1 – з вершини предмета паралельно оптичній осі лінзи до головної площини лінзи, далі, заломлюючись, через задній головний фокус;

2 – з вершини предмета через центр лінзи;

3 – з вершини предмета через передній фокус до головної площини лінзи, а далі паралельно оптичній осі лінзи.

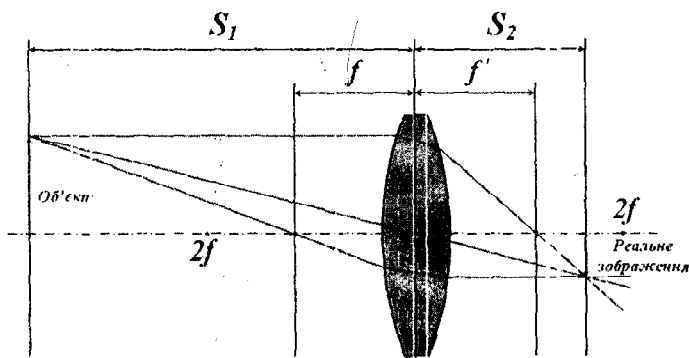


Рисунок 6 – Побудова зображень у збірній двовипуклій лінзі

Ці три лінії перетинаються в одній точці і дають зображення вершини предмета. Відповідно до формули:

$$\frac{1}{S_1} \pm \frac{1}{S_2} = \pm \frac{1}{f}. \quad (13)$$

де S_1 – відстань від лінзи до предмета; S_2 – відстань від лінзи до зображення. Знак $+$ відповідає збиральній, а знак $-$ розсіювальній лінзам. У випадку товстої лінзи формула залишається без змін, тільки відстані відраховуються не від центру лінзи, а від головних площин. Знаки величин S_1 , S_2 та f вибираються виходячи з наступних міркувань. Для дійсного зображення від дійсного предмета у збірній лінзі усі ці величини додатні. Якщо зображення уявне – відстань до нього приймається від'ємною, якщо предмет уявний – відстань до нього від'ємна, якщо лінза розсіювальна – фокусна відстань від'ємна. Кожна лінза має два фокуси – передній і задній.

Якщо предмет знаходиться на нескінченно великій відстані від лінзи (рис. 8), то його зображення отримується у задньому фокусі лінзи f' дійсним, перевернутим і зменшеним до подібності точки.

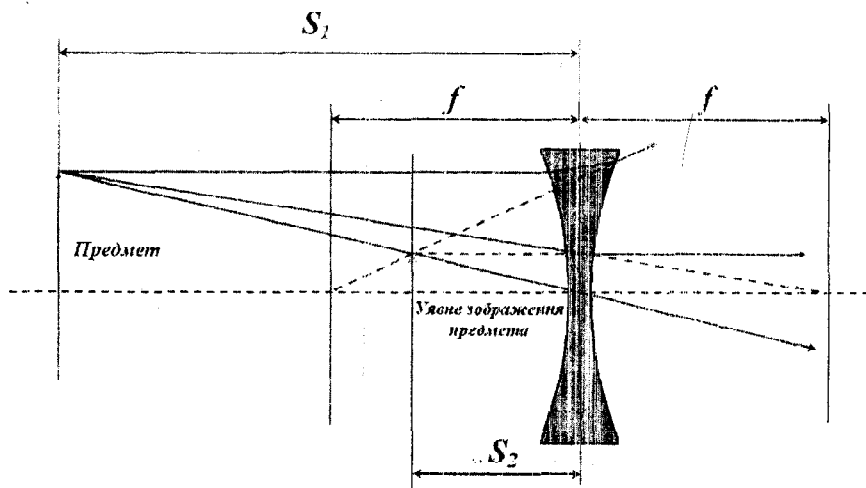


Рисунок 7 – Побудова зображення у розсіювальній лінзі

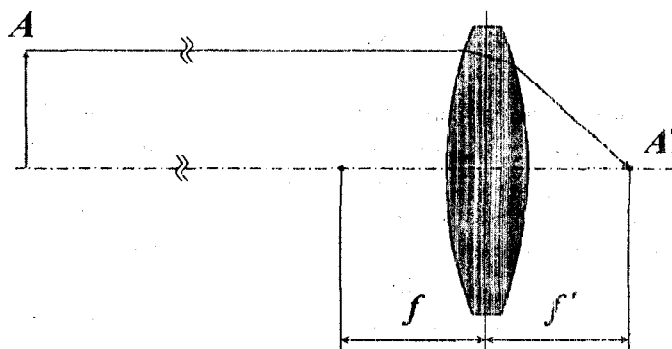


Рисунок 8 – Побудова зображення у збірній лінзі: предмет знаходиться на нескінченності

Якщо предмет наближений до лінзи і знаходиться на відстані, яка перевищує подвійну фокусну відстань лінзи (рис. 9), то зображення його буде дійсним, перевернутим і зменшеним і розміститься за головним фокусом на відріжку між ним і подвійною фокусною відстанню.

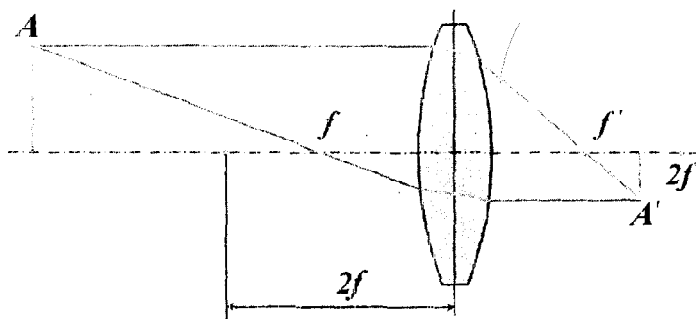


Рисунок 9 – Побудова зображення у збірній лінзі: предмет знаходиться на відстані, яка перевищує подвійну фокусну відстань лінзи

Якщо предмет розміщений на подвійній фокусній відстані від лінзи, то отримане зображення знаходиться по інший бік лінзи на подвійній фокусній відстані від неї. Зображення отримується дійсним, перевернутим і рівним по величині предмету.

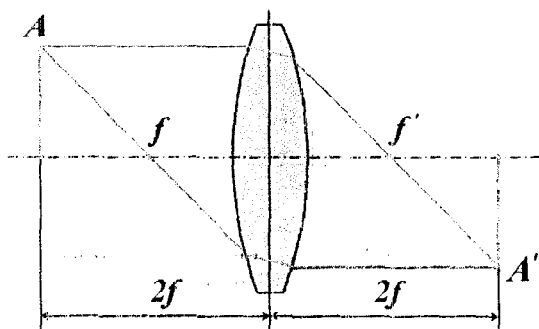


Рисунок 10 – Побудова зображення у збірній лінзі: предмет знаходиться на подвійній фокусній відстані від лінзи

Якщо предмет розміщений між переднім фокусом і подвійною фокусною відстанню, то зображення буде отримане за подвійною фокусною відстанню і буде дійсним, перевернутим і збільшеним.

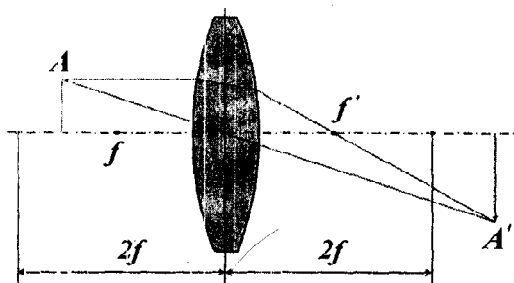


Рисунок 11 – Побудова зображення у збірній лінзі: предмет знаходиться між переднім фокусом і подвійною фокусною відстанню

Якщо предмет знаходиться у площині переднього головного фокуса лінзи, то промені пройшовши через лінзу, підуть паралельно, і зображення може бути отримане тільки в нескінченності.

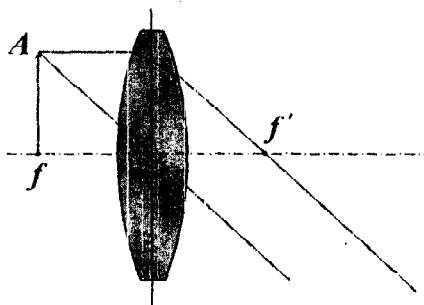


Рисунок 12 – Побудова зображення у збірній лінзі: предмет знаходиться у площині переднього головного фокуса лінзи

Якщо предмет розмістити на відстані, меншій головної фокусної відстані, то промені вийдуть з лінзи розхідним пучком, ніде не перетинаючись. Зображення при цьому отримується уязне, пряме і збільшене, тобто у цьому випадку лінза працює як лупа.

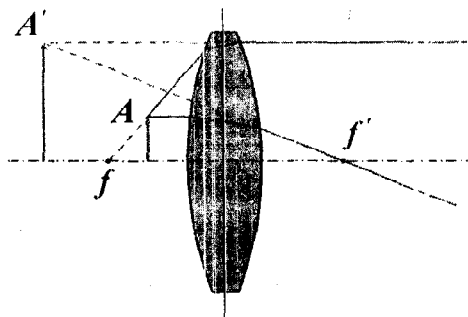


Рисунок 13 – Побудова зображення у збірній лінзі: предмет знаходиться на відстані, меншій головної фокусної відстані

При наближенні предмета з нескінченності до переднього фокуса лінзи зображення віддаляється від заднього фокуса і по досягненні предметом площини переднього фокуса знаходиться в нескінченності від нього. Ця закономірність має велике значення у практиці різних видів фотографічних робіт, тому для визначення залежності між відстанню від предмета до лінзи і від лінзи до площини зображення необхідно знати основну формулу лінзи.

Лінзи є універсальним оптичним елементом більшості оптичних систем. Традиційне використання лінз – біноклі, телескопи, оптичні приціли, теодоліти, мікроскопи, фотовідеотехніка. Одиночні збірні лінзи використовуються як збільшувальне скло (лупа).

Друга важлива сфера використання лінз – офтальмологія, де без них неможливе виправлення недоліків зору – близорукості та дальзорукості, неправильної акомодації, астигматизму і інших захворювань. Лінзи використовуються у таких приспособленнях як окуляри і контактні лінзи.

Опис установки

Для експериментального визначення фокусної віддалі лінз використовують оптичну лаву 1 зі шкалою, освітлювач 2, предмет (діафрагма з отворами розміщеними по контуру стрілки) 3, тримач з лінзою 4 та екран 5 (рис. 14).

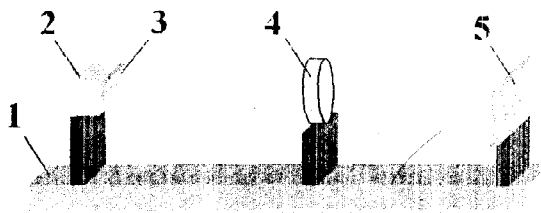


Рисунок 14 – Схема установки для визначення фокусної відстані лінз

На повзунках є візирні покажчики, за допомогою яких визначається положення повзунків відносно шкали оптичної лави. Лінзи і предмет встановлюють так, щоб центри їх були розташовані вздовж однієї осьової лінії. Правильність установки перевіряють переміщенням лінзи вздовж оптичної лави. При такому переміщенні центр зображення на екрані не повинен зміщуватися.

Методика визначення фокусної відстані лінз

1. Для характеристики зображення, утвореного лінзою, крім його положення необхідно знати і його розмір. З рис. 15 видно, що

$$\frac{h}{h'} = \frac{S_1}{S_2}. \quad (14)$$

Звідси

$$S_1 = \left(\frac{h}{h'} \right) S_2. \quad (15)$$

Використовуючи формулу (13), знайдемо зв'язок між розмірами предмета та його зображення з фокусною відстанню лінзи:

$$f = \frac{h}{h + h'} \cdot S_2, \quad (16)$$

де h та h' – розміри предмета і його зображення на екрані.

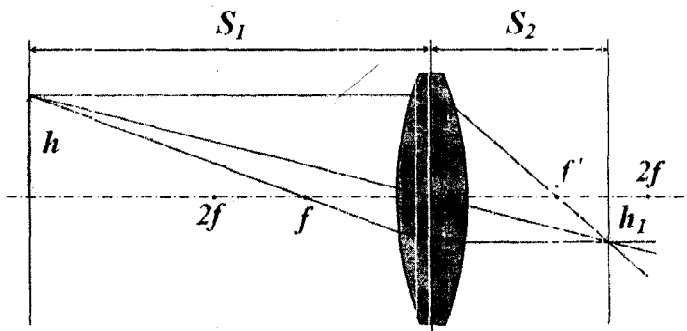


Рисунок 15 – Визначення фокусної відстані лінзи

2. Метод Бесселя. Згідно цього методу визначають відстань L між предметом та екраном, на якому дістають різке зображення предмета при певних відстанях S_1 та S_2 (рис. 16). Потім переміщують лінзу в інше положення і знову дістають різке зображення того самого предмета на тому самому екрані, але вже при нових відстанях S'_1 і S'_2 . Вимірявши відстань між двома послідовними положеннями лінзи l і знаючи L , можна обчислити f .

Покажемо це. Оскільки в обох випадках на екрані зображення утворювалося за допомогою тієї самої лінзи, то з формули (13) можна записати

$$\frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} = \frac{S'_1 S'_2}{S'_1 + S'_2} = f. \quad (17)$$

З рисунка видно, що $S_1 + S_2 = S'_1 + S'_2 = L$.

Отже,

$$S_1 S_2 = S'_1 S'_2, \quad (18)$$

$$S'_1 - S_1 = S_2 - S'_1 = l;$$

звідси

$$S'_1 = l + S_1, \quad \text{а} \quad S'_2 = S_2 - l.$$

Підставимо ці значення в (18):

$$S_1 S_2 = (S_2 - l)(l + S_1) \text{ або } S_2 - S_1 = l.$$

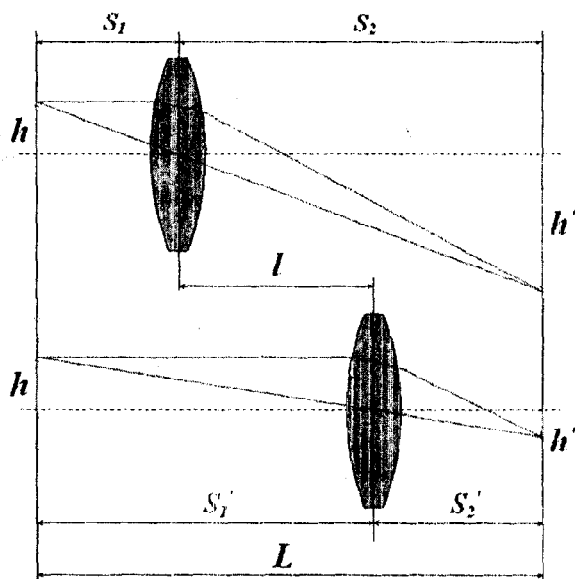


Рисунок 16 – Визначення фокусної відстані лінзи за допомогою методу Бесселя

Отже, для S_1 і S_2 маємо систему рівнянь

$$S_2 - S_1 = l$$

$$S_2 + S_1 = L$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо

$$S_2 = \frac{L+l}{2}; \quad S_1 = \frac{L-l}{2}.$$

Підставимо ці значення в (17), тоді

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}. \quad (19)$$

Розсіювальні лінзи не дають дійсного зображення предмета на екрані. У цьому випадку для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи створюють збиральну центровану систему із розсіювальної та збиральної лінз. При цьому на екрані дістають дійсне зображення предмета. Оптична сила такої системи лінз визначається формулою

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}, \quad (20)$$

де f_c – фокусна відстань системи лінз; f_1 і f_2 – фокусні відстані лінз, що входять в систему; d – відстань між головними площинами лінз, з яких складається система. Якщо лінзи досить тонкі і торкаються одна одної, то d можна вважати таким, що дорівнює нулю. Тоді оптична сила системи лінз дорівнює сумі оптичних сил лінз, які входять до цієї системи.

Роблять інакше. Підбирають допоміжну збиральну лінзу з оптичною силою, більшою ніж у розсіювальної лінзи. За допомогою цієї збиральної лінзи дістають на екрані дійсне зображення предмета (рис. 17).

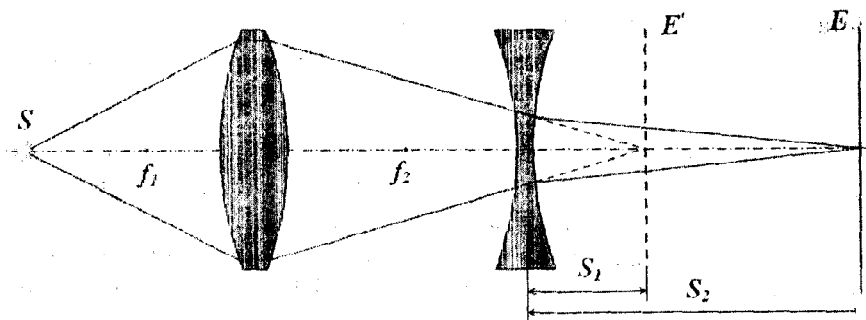


Рисунок 17 – Визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи

Потім між екраном і збиральною лінзою розміщують розсіювальну лінзу на відстані S_1 від екрану. При цьому різке зображення зникає. Переміщуючи екран на відстань від розсіювальної лінзи, знову дістають різке зображення предмета. Оскільки роль предмета для розсіювальної лінзи відіграє зображення, утворене за допомогою збиральної лінзи, то для розсіювальної лінзи

$$f = \frac{S_1 S_2}{S_2 - S_1} \quad (21)$$

Порядок виконання роботи

1. Визначення головної фокусної відстані збиральної лінзи.

1.1 За розмірами предмета, зображення і відстанню зображення від лінзи.

а) Розмістити лінзу між екраном та освітлювальним предметом. Переміщуючи предмет отримати сильно збільшене чітке зображення.

б) Виміряти розміри зображення h' і відстань зображення від лінзи. Розміри предмета задаються. Вимірювання провести декілька разів для різного положення екрану.

в) Для кожного вимірювання обчислити фокусну відстань f за формулою (16), знайти середнє значення і похибку вимірювання.

1.2 Вимірюванням відстаней між предметом і його зображенням до лінзи.

а) Достатньо віддалити екран від освітлювального предмета. Встановити між ними тримач з лінзою і переміщуючи його отримати на екрані різке зображення. Зафіксувати положення лінзи, предмета та екрану.

б) Змінити положення екрану і повторити дослід. Провести не менше трьох вимірювань для різних положень екрану, лінзи та предмета.

в) Користуючись формулою (13) для збиральної лінзи, обчислити головну фокусну віддаль для кожного вимірювання, знайти середнє значення та похибку вимірювання.

1.3 Метод Бесселя.

а) Розмістити на оптичній лаві предмет та екран на віддалі, яка б перевищувала $4f$.

б) Розмістити лінзу між предметом і екраном так, щоб на екрані було чітке збільшене зображення предмета. Зафіксувати це положення лінзи по шкалі оптичної лави.

в) Не змінюючи положення предмета та екрана, знайти інше положення лінзи при якому утворюється чітке, але зменшене зображення предмета на екрані. Зафіксувати це положення по шкалі оптичної лави.

г) Визначити віддаль l як різницю двох зазначених переміщень.

д) Виміряти відстань між екраном та предметом L .

е) Змінити відстань між екраном та предметом.

є) Визначити середнє значення фокусної відстані f з декількох вимірювань при різних значеннях l та L за формулою (19). Обчислити похибку вимірювань.

2 Визначення головної фокусної відстані розсіювальної лінзи.

2.1 Метод створення збиральної центрованої системи.

а) Визначити фокусну відстань збиральної лінзи використовуючи метод Бесселя.

б) Закріпити в одній оправі розсіювальну лінзу з невідомою фокусною відстанню і збиральну з відомою.

в) Визначити фокусну відстань системи f_0 і за формулою (20) обчислити фокусну відстань розсіювальної лінзи. Досліди провести для трьох значень d .

2.2 Метод подвійного фокусування.

а) Розмістити на оптичній лаві між предметом та екраном збиральну лінзу з довільною невідомою фокусною відстанню. Дістати різке зображення предмета і виміряти відстань між лінзою та екраном (це буде d для розсіювальної лінзи).

б) Між збиральною лінзою та екраном розмістити розсіювальну лінзу. Переміщуючи екран, отримати різке зображення предмета.

в) Виміряти відстань між розсіювальною лінзою і новим положенням екрану (це буде f для розсіювальної лінзи). За формулою (21) обчислити фокусну відстань розсіювальної лінзи.

г) Обчислити похибки вимірювання фокусної відстані розсіювальної лінзи і порівняти їх між собою.

Контрольні запитання

1. Вивести формулу для товстої лінзи.
2. Запишіть і проаналізуйте формулу тонкої лінзи.
3. Що таке промінь? Пучок? Який пучок називається гомоцентричним та астигматичним?
4. Що таке лінза?
5. Що називають оптичною віссю та оптичним центром лінзи?
6. Що називають оптичною силою лінзи і в яких одиницях її вимірюють?
7. Що називають лінійним збільшенням лінзи? Як визначити збільшення оптичної системи?
8. У чому полягає метод Бесселя визначення фокусної відстані лінзи?
9. Запишіть та поясніть формулу для оптичної сили сумішених тонких лінз.
10. Які властивості середовища та матеріалу лінзи впливають на величину фокусної відстані лінзи?
11. Побудуйте зображення для збиральної та розсіювальної лінз. (Розгляньте всі можливі випадки)?
12. Які особливості методики розрахунку фокусної відстані розсіювальної лінзи?

*Не бачать очі те, чого не бачить розум,
чим розум твій оволодів, те і побачиш
оком.*

Бідець

Лабораторна робота № 82

Дослідження аберації лінз

Мета: ознайомитися з основними недоліками реальних оптичних систем. Дослідити аберації оптичних систем.

Прилади: оптична лава, освітлювач із сіткою, коліаторна лінза, досліджувані лінзи, набір світлофільтрів, набір діафрагм з круговими отворами у центрі і кільцевими по краях, сітка з відстанню між штрихами 1 см, екран.

Теоретичні відомості

Ідеальна оптична система повинна задовольняти три умови Максвелла:

- 1) гомоцентричний пучок променів залишається гомоцентричним після проходження через ідеальну оптичну систему;
- 2) зображення плоских фігур в ідеальній оптичній системі підлягає закону подібності (відповідність формі предмета);
- 3) якщо площина предмета перпендикулярна до головної оптичної осі, то і площина зображень залишається перпендикулярною до неї.

Реальні оптичні системи відповідають законам ідеальних оптичних систем лише для *параксіальних пучків* променів. Використання на практиці параксіальних пучків призводить до сильного скорочення розмірів предметів які відображаються оптичною системою. Крім того, вузькість світлових пучків обумовлює малу освітленість зображення, оскільки світловий потік пропорційний тілесному куту, у межах якого він знаходиться. По цих причинах на практиці використовують широкі світлові пучки. В результаті відмови від параксіальності виникають різні спотворення зображення, які називають *абераціями*. Аберації також пов'язані з дисперсією світла при проходженні через оптичну систему. Наявність

аберацій може суттєво знизити якість оптичного зображення, що дає система. Однак, використовуючи відповідним чином підібрані комбінації лінз, можна досягти практично повного усунення аберацій.

Аберації оптичних систем поділяються на *монохроматичні* (спотворення зображень, що утворюються променями однієї частоти) і *хроматичні* (зумовлені дисперсією променів різної частоти). Монохроматичними є: *сферична аберація* (поздовжня і поперечна), *кома*, *астигматизм*, *дисторсія*, *кривизна поля зображення*; хроматичними – *поздовжня хроматична аберація* і *хроматична різниця збільшень*.

Сферична аберація. Якщо від точкового джерела світла S , розташованого на головній оптичній осі попадає на лінзу широкий пучок світла, то параксiальний пучок дає зображення точкового джерела у точці S_1 , а більш віддалені промені – зображення світної точки в S_2 , S_3 і т.д. (рис. 1).

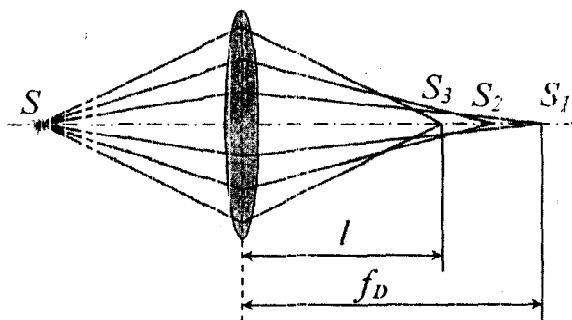


Рисунок 1 – Сферична аберація

При достатній ширині пучка монохроматичних променів стигматичності зображення не буде. В результаті зображення світної точки на екрані буде у вигляді розпливчатої плями. Цей недолік оптичної системи називається *сферичною аберацією*. Оскільки сферична аберація відраховується вздовж оптичної осі, то вона дістала назву *поздовжньої сферичної аберації*. Мірою поздовжньої сферичної аберації ΔS є різниця відстаней від центру лінзи до зображення для широких і параксiальних променів, тобто

$$\Delta S = l - f_D, \quad (1)$$

де f_D – фокусна відстань лінзи для жовтої лінії натрію $\lambda = 586$ нм, l – відстань від центру лінзи до точки, в якій визначається сферична аберація.

Для збиральних лінз поздовжня сферична аберація від'ємна, для розсіювальних – додатна. Тому, комбінуючи розсіювальні і збиральні лінзи, які мають різний показник заломлення, вдається майже повністю усунути сферичну аберацію.

Астигматизм. Втрата гомоцентричності пучка променів внаслідок скісного падіння їх на лінзу або неоднаковості кривизни поверхонь лінзи в довільних двох перерізах називається *астигматизмом*. Сферична поверхня фронту гомоцентричного пучка променів, що попадає на лінзу, при виході з неї внаслідок астигматизму стає поверхнею двоякої кривизни. Інакше кажучи, заломлений у лінзі пучок світлових променів стає астигматичним пучком, що має двояку кривизну, завдяки чому поперехні зображення вертикальних і горизонтальних ліній предмета виявляються розділеними з простору. На рис. 2 зображено астигматичний пучок променів.

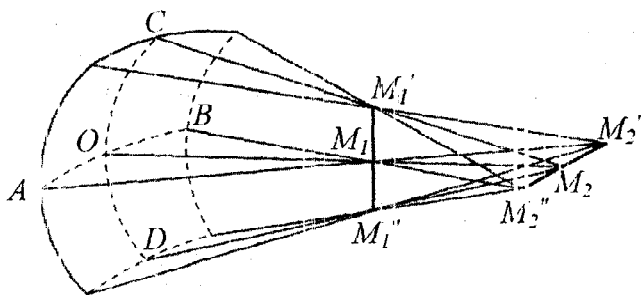


Рисунок 2 – Астигматичний пучок променів

Промені вертикальних меридіональних поверхонь астигматичного пучка перетинаються по лінії $M_1'M_1''$, а промені горизонтальних сагітальних поверхонь перетинаються по лінії $M_2'M_2''$. Відповідно радіусом кривизни меридіональної поверхні буде

відстань $OM_1 = l_1$, а сагітальної – $OM_2 = l_2$. Величину $\Delta l = l_2 - l_1$ називають астигматичною різницею.

Причиною астигматизму можуть бути також асиметрія оптичної системи, її не відпрацьованість, наявність дефектів у лінзах.

Практично астигматичну різницю визначають із спостережень зображення вертикальних і горизонтальних ліній сітки при різних кутах повороту лінзи.

Астигматизм усувається шляхом підбору радіусів кривизни і оптичних сил заломлюючих поверхонь.

Оптичну систему, виправлену крім сферичної і хроматичної аберацій також і на астигматизм, називають *анастигматом*.

Кома. У лінз, виправлених на сферичну аберацію для широких пучків, які виходять з точкового об'єкта, який лежить на оптичній осі системи, може зберегтися сферична аберація для косих пучків (які поширюються від об'єкта, що лежить в стороні від осі). В цьому випадку зображення світної точки на екрані має вигляд витягнутої несиметричної плями (рис. 3). Така аберація називається *комою*. Відповідним підбором комбінації додатних і від'ємних лінз можна усунути і цю аберацію.

Дисторсія. Дисторсією називається спотворення зображення, викликане неоднаковістю поперечного збільшення в межах поля зору. На рис. 4 приведено зображення квадрату, спотвореного внаслідок дисторсії. Якщо лінійне збільшення зростає з відстанню h від осі системи, має місце *подушкоподібна дисторсія* (рис. 4, а). При зменшенні збільшення по мірі віддалення від осі системи спостерігається *бочкоподібна дисторсія* (рис. 4, б, в)

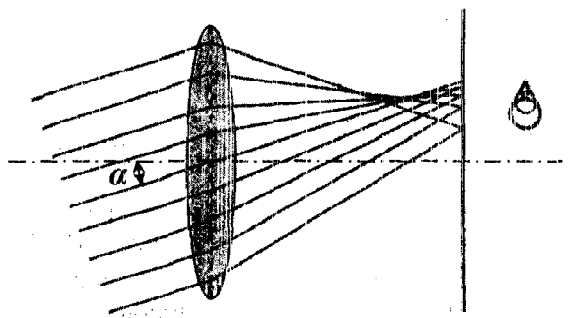


Рисунок 3 – Кома

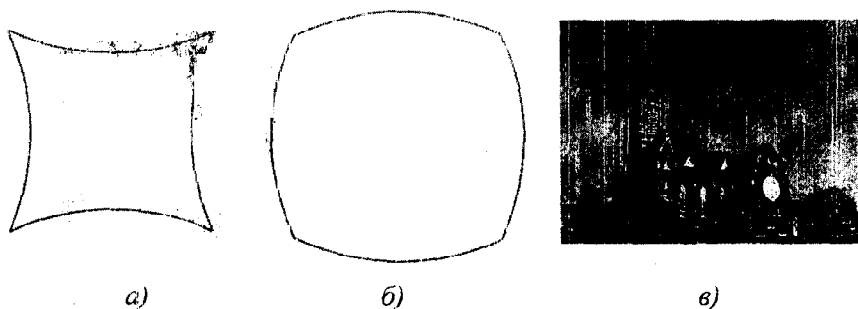


Рисунок 4 – Дисторсія

Хроматична аберація. Хроматична аберація зумовлена залежністю показника заломлення оптичних середовищ від довжини світлової хвилі.

Фокусна відстань лінзи залежить від її показника заломлення і від радіусів кривизни сферичних поверхонь, що обмежують лінзу:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]. \quad (2)$$

Оскільки $n = f(\lambda)$, то і $f = f(\lambda)$. Тому навіть параксіальний монохроматичний пучок променів після заломлення у лінзі матиме цілий ряд фокусів вздовж головної оптичної осі, кожний з яких відповідатиме певній довжині хвилі (рис. 5). Тому на практиці визначають фокусну відстань оптичних систем для певної довжини хвилі, найчастіше для жовтої лінії натрію λ_D .

Поздовжня хроматична аберація лінз Δf визначається різницею фокусних відстаней для досліджуваної довжини хвилі f_λ і для жовтої лінії натрію f_D :

$$\Delta f = f_\lambda - f_D. \quad (3)$$

Різні сорти скла володіють неоднаковою дисперсією. Тому, комбінуючи додатні і від'ємні лінзи, виготовлені із різних видів скла, вдається здійснити *ахроматичну* (виправлену на хроматичну аберацію) оптичну систему.

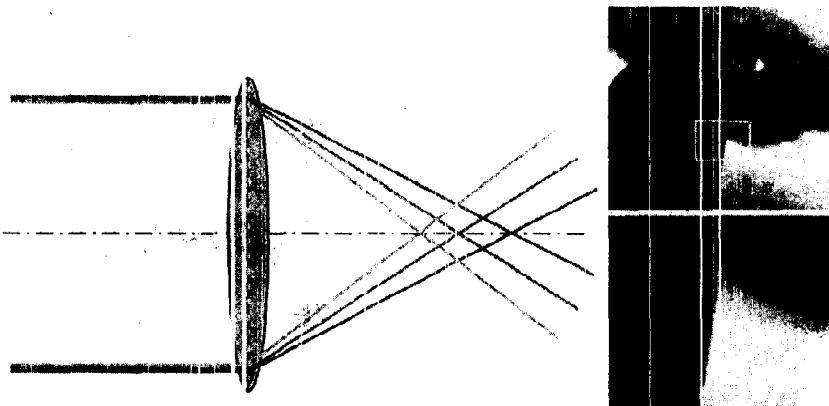


Рисунок 5 -- Хроматична аберація

Система, виправлена на сферичну і хроматичну аберації, але яка не усунула астигматизм, називається *спланатом*.

Для одночасного усунення усіх аберацій необхідно створювати досить складні оптичні системи. Як правило йдуть іншим шляхом – усувають повністю тільки ті недоліки, які особливо шкідливі для тих цілей, для яких призначена оптична система, і миряться з неповним усуненням решти недоліків.

Опис установки

Експериментально деякі аберації лінз можна дослідити за допомогою оптичної лави, на якій закріплено освітлювач з сіткою 1, коліматорну 2 і досліджувану 3 лінзи і екран 4. Всі ці прилади за допомогою штативів і гвинтів встановлюються у рейтерах 5 (рис. 6). Рейтери мають покажчики для фіксації їх положення на шкалі оптичної лави. Довжина оптичної лави має бути не меншою ніж 1 м, а ціна поділки її шкали не повинна перевищувати 1 мм. Рейтер з досліджуваною лінзою має лімб для підрахунку кута повороту лінзи. В оправу досліджуваної лінзи можуть бути вставлені діафрагми з отворами і кільцями різних діаметрів.

Коліматорна лінза довгофокусна. Освітлювач з сіткою має оправу для встановлення світлофільтрів.

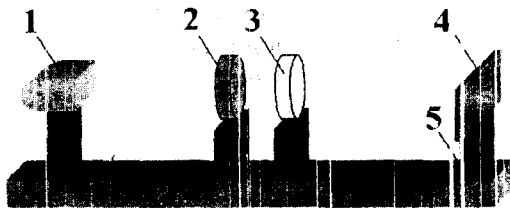


Рисунок 6 – Розміщення елементів на оптичній лаві для дослідження аберацій лінз

Порядок виконання роботи

Завдання I. Дослідження позовжньої сферичної аберації

1. Встановити освітлювач з сіткою, досліджувану і коліматорну лінзи, а також екран на оптичній лаві. Відцентрувати систему вздовж головної оптичної осі досліджуваної лінзи.

2. Пересуваючи коліматорну лінзу вздовж оптичної лави, встановити її так, щоб сітка освітлювача знаходилася у її фокусі. Досліджувану лінзу встановити поряд з коліматорною.

3. Встановити в оправу досліджуваної лінзи діафрагму з найменшим отвором (виділити параксіальний пучок променів) і, пересуваючи екран, знайти зображення сітки. Вивірити відстань від лінзи до екрану. Це і буде фокусна відстань f_D .

4. Вставляючи в оправу кільцеві діафрагми з різним віддаленням кілець від осі, також знайти різке зображення сітки на екрані і щоразу заміряти відстань між екраном і досліджуваною лінзою. Це будуть відстані від лінзи до абераційних зображень сітки l_1, l_2 і т.д.

5. Для кожної кільцевої діафрагми розрахувати позовжню сферичну аберацію за формулою (1). Врахувати знак ΔS .

6. Побудувати графіки залежності ΔS і l від діаметрів діафрагм та проаналізувати їх.

Завдання II. Дослідження астигматизму лінзи

1. Встановити в освітлювач з сіткою жовтий світлофільтр ($\lambda = 586$ нм) (астигматизм вивчають у монохроматичному світлі) і повернути досліджувану лінзу на кут $\varphi = 10^\circ$.

2. Пересуваючи екран уздовж оптичної лави, знайти найбільше різке зображення вертикальних ліній сітки, а потім горизонтальних. Зафіксувати в обох випадках положення екрану по шкалі оптичної лави. Різниця цих положень дасть величину астигматичної різниці Δl .

3. Повторити досліди, послідовно повертаючи досліджувану лінзу на наступні 10° .

4. Побудувати графік залежності Δl від кута повороту лінзи φ .

Завдання III. Дослідження позовжньої хроматичної аберації

1. В опрау досліджуваної лінзи встановити діафрагму і виділити параксiальний пучок променів.

2. Встановити жовтий світлофільтр освітлювач 1, перемішуючи екран, знайти різке зображення сітки. Відстань між лінзою і екраном визначає фокусну відстань лінзи.

3. Змінюючи світлофільтри, повторити досліди і визначити для кожного з них f_λ .

4. За формулою (3) для кожної довжини хвилі обчислити позовжню хроматичну аберацію, враховуючи її знак.

5. Побудувати графік залежності $\Delta f = f(\lambda)$ і проаналізувати його.

Контрольні запитання

1. Які оптичні системи називаються ідеальними?
2. Які причини виникнення спотворень зображення у лінзах?
3. Які ви знаєте основні поняття геометричної оптики? Дайте їх означення.
4. Назвіть види аберації лінз. Поясніть їх причини.
5. Які основні характеристики аберацій, дослідження яких ви провели?
6. Як усувають аберації оптичних систем на практиці?
7. Яке зображення називається стигматичним?
8. Який пучок променів називається гомоцентричним?
9. Який пучок променів називається астигматичним?
10. Яка оптична система називається центрованою?
11. Що таке апланат і анастигмат?
12. Яка оптична система називається ахроматичною?

Лабораторна робота № 83

*Люди перестають думати, коли
перестають читати.*

Дідро Д.

Визначення головної фокусної відстані сферичних дзеркал

Мета: визначити фокусну відстань сферичних дзеркал.

Прилади: оптична лава, ввігнуте та опукле сферичні дзеркала на підставках, екран, освітлювач, лінійка, спиці на підставках

Теоретичні відомості

Сферичними дзеркалами називаються відполіровані поверхні частин сфери, які дзеркально відбивають світло. Сферичні дзеркала бувають ввігнутими та опуклими: у першому випадку дзеркальна поверхня звернута до центра кривизни, в другому – у протилежний бік.

Для визначення фокусної відстані F в геометричній оптиці використовують співвідношення для осьових променів, яке пов'язує відстань від світлової точки до полюса дзеркала S_1 , відстань від зображення до дзеркала S_2 і радіус кривизни дзеркала R :

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{2}{R}. \quad (1)$$

Для опуклого дзеркала

$$\frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1} = \frac{2}{R}. \quad (2)$$

Якщо предмет нескінченно віддалений $S_1 \rightarrow \infty$, то промені паралельні головній оптичній осі, і тоді $\frac{1}{S_2} = \frac{2}{R}$, звідки

$$F = S_2 = \frac{R}{2}. \quad (3)$$

З врахуванням (3) формулу (1) можна переписати так:

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{F}. \quad (4)$$

Формули (1) і (4) є основними для дослідження сферичних дзеркал, за ними знаходять одну з трьох величин S_1 , S_2 , F , якщо між розміром предмета h і його зображенням h'

$$\frac{h}{h'} = \frac{S_1 - F}{F} = \frac{F}{S_2 - F}. \quad (5)$$

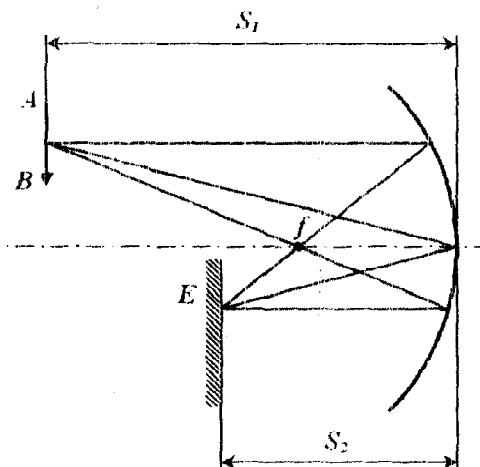
Зазначені вище формули справедливі для параксіальних променів.

Порядок виконання роботи

Визначення головної фокусної відстані ввігнутого сферичного дзеркала об'єктивним методом.

1. Дзеркало 1, предмет 2 та екран 3 для спостереження дійсного зображення предмета закріпити на оптичній лаві. По шкалі лави визначити відстані S_1 та S_2 з точністю до 1 мм. Як предмет можна взяти стрілку, вирізану в освітлювачі.

2. Розмістити предмет від дзеркала на відстані, більшій за подвійну фокусну відстань. Пересуваючи екран, дістати чітке зображення предмета на екрані (рис. 1).



**Рисунок 1 – Визначення фокусної відстані сферичного дзеркала
об'єктивним методом**

3. Відрахувати по шкалі відстані S_1 та S_2 .
4. Виміряти висоту предмета h та висоту зображення h' .
5. Наблизити предмет до дзеркала, знову знайти чітке його зображення на екрані і виміряти висоту предмета h та зображення h' , а також нові значення S_1 та S_2 .
6. Дослід повторити 5-7 разів, змінюючи відстані предмета до дзеркала.
7. Користуючись формулами (4) та (5), обчислити середнє значення F . Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювання.
8. Порівняти значення відношень розмірів зображень до розмірів предметів. Перевірити, чи не спотворює дзеркало зображень.

***Визначення головної фокусної відстані опуклого дзеркала
методом відсутності паралакса.***

1. Закріпити опукле дзеркало на оптичній лаві.
2. На оптичній осі дзеркала на відстані 20 см від нього встановити спицю AB діаметром 8-10 мм (рис. 2).

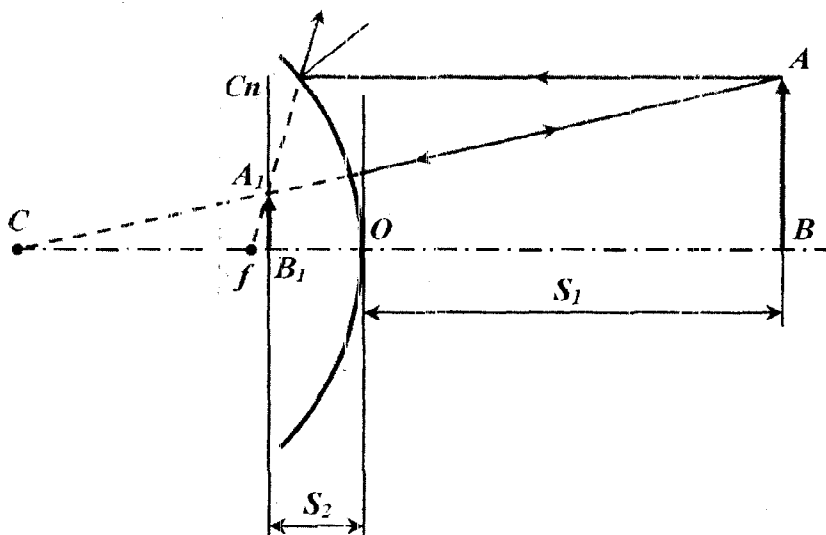


Рисунок 2 -- Визначення фокусної відстані сферичного дзеркала методом відсутності паралакса

3. Встановити за дзеркалом на відстані найкращого бачення від ока другу спицю CD діаметром 2-3 мм.

4. Пересувати спицю AB вздовж головної оптичної осі опуклого дзеркала доти, поки зображення спиці AB в опуклому дзеркалі і спиці CD не знаходитимуться на одній відстані від ока спостерігача. Це станеться тоді, коли зникне різниця між зображенням спиці AB в опуклому дзеркалі і спицею CD при боковому переміщенні ока спостерігача відносно головної оптичної осі опуклого дзеркала.

5. Виміряти відстані S_1 та S_2 . За формулою (2) обчислити F .

6. Змінити відстань S_1 спиці AB від дзеркала і повторити досліди 5-7 разів.

7. Обчислити середнє значення F . Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Чому при проведенні дослідів треба ставити предмет на відстані $d > 2F$?
2. Яке зображення утворюється у ввігнутому дзеркалі при $F < d < 2F$ та при $F > d$? Де воно знаходиться? Побудувати зображення для усіх випадків.
3. Які дзеркала називаються ввігнутими?
4. Які дзеркала називаються опуклими?
5. Побудуйте зображення в опуклому дзеркалі при різних віддаленнях предмета.
6. Де застосовуються дзеркала?
7. Запишіть і проаналізуйте формулу тонкої лінзи.
8. Що таке промінь? Пучок?
9. Який гучок називається гомоцентричним та астигматичним?
10. Що називають оптичною віссю та оптичним центром лінзи?
11. Що називають оптичною силою лінзи і в яких одиницях її вимірюють?
12. Сформулюйте основні положення геометричної оптики.

Взаємодія світла з речовиною

*Блаженство тіла в здоров'ї, блаженство
розуму – в знанні*

Фалес

Лабораторна робота № 84

Вимірювання концентрації і показника заломлення розчинів за допомогою інтерферометра ЛІР-2

Мета: ознайомитися з фізичними принципами дії інтерференційного рефрактометра Релея; визначення концентрації і коефіцієнта заломлення розчинів за допомогою інтерферометра ЛІР-2.

Прилади: інтерференційний рефрактометр Релея, набір розчинів, кювети, набір рідин з відомими показниками заломлення.

Теоретичні відомості

Інтерферометрами називають оптичні прилади, дія яких базується на явищі інтерференції світла. Вони призначені для точних вимірювань довжин, кутів, характеристик оптичних поверхонь, показників заломлення середовищ і т.д.

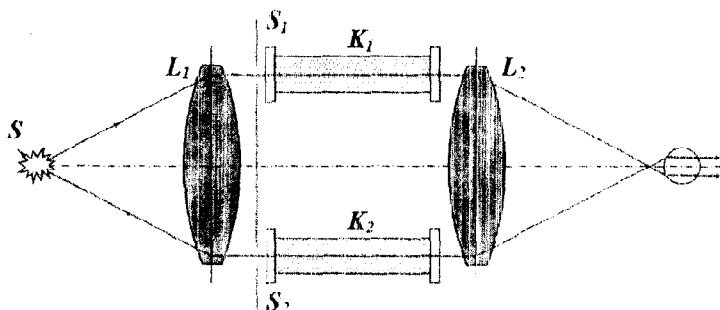


Рисунок 1 – Схема інтерферометра Релея (вид зверху)

Спостереження інтерференційних смуг при цьому стає не метою дослідження, а засобом проведення вимірювань. Залежно від характеру завдання, яке потрібно вирішити до оптичної системи інтерферометра і його конструкції представляють різні вимоги. Розглянемо принцип роботи інтерферометра Релея.

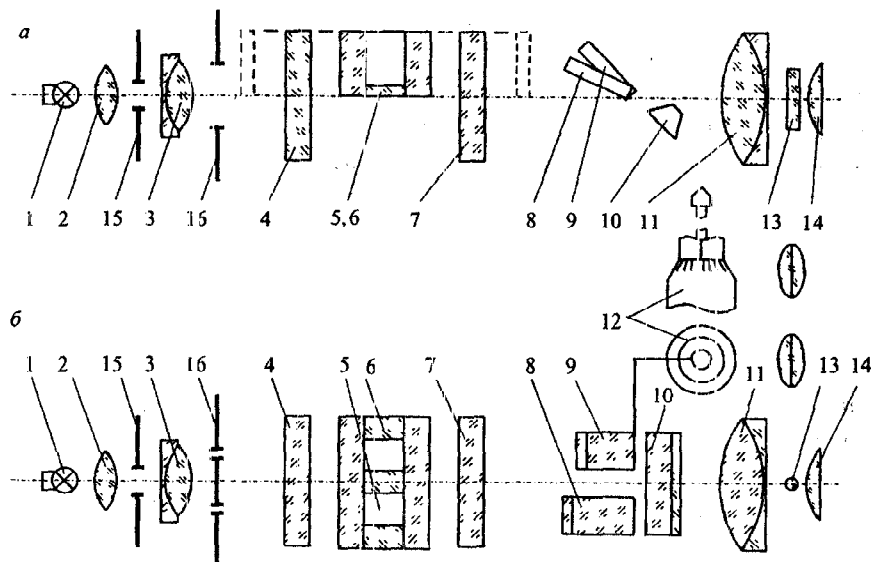
В інтерферометрі Релея, призначеному для вимірювання показників заломлення газів і рідин, використаний, як і в досліді Юнга, метод поділу хвильового фронту. Джерело у вигляді вузької щілини S розміщене в фокальній площині лінзи L_1 (рис. 1). Паралельний пучок, який виходить з неї, йде через діафрагму з двома щілинами S_1 і S_2 , паралельними до щілини S . Пучки світла від S_1 і S_2 проходять через кювети K_1 і K_2 і утворюють інтерференційні смуги у фокальній площині лінзи L_2 . Введення кювет, які містять досліджувані гази або рідини, потребує значної відстані між S_1 і S_2 , внаслідок чого інтерференційні смуги розміщуються тісно і для їх спостереження необхідне велике збільшення. Для цієї мети зручний циліндричний окуляр у вигляді тонкої скляної палочки, вісь якої паралельна смугам. Кювети займають тільки верхню половину простору між лінзами L_1 і L_2 , а внизу світло йде поза кюветами. Завдяки цьому виникає друга система інтерференційних смуг з такою ж відстанню між смугами, яка може служити шкалою для відліку. Верхня система смуг зсунута відносно нижньої, оскільки при проходженні світла через кювети з'являється додаткова різниця ходу $\Delta = (n_2 - n_1)l$, де n_1 і n_2 — коефіцієнти заломлення речовин, які заповнюють кювети. По цьому зміщенні визначають $n_2 - n_1$. В один з пучків ставиться компенсатор, за допомогою якого можна добиватися, щоб плавно змінювалася оптична різниця ходу, протилежна за знаком тій, яка обумовлена проходженням світла через кювети.

Співпадиння двох систем смуг використовується для встановлення повної компенсації різниці ходу. Візуально можна встановити співпадиння з точністю до $1/40$ порядку, що при $l = 0,1$ м, $\lambda = 550$ нм дозволяє зафіксувати зміну $n_2 - n_1$ близько 10^{-7} .

Опис установки

Робота інтерферометра ЛІР-2 базується на основі інтерференції від двох щілин (дослід Юнга). На рис. 2 представлена в спрощеному вигляді оптична схема інтерферометра ЛІР-2, що відрізняється від схеми реального приладу тим, що в реальному приладі джерело 1 і вхідна щілина 15 розташовані з боку спостерігача, а щілини 16 зроблені дзеркальними.

Пучок променів, що йде від джерела 1, фокусується лінзою 2 у площині вхідної щілини 15, поміщеної у фокальній площині об'єктива 3. Рівнобіжні пучки променів на виході з об'єктива попадають на екран із двома щілинами 16 і у фокальній площині об'єктива 11 зорової труби утворюють дифракційну картину, що розглядається за допомогою циліндричного окуляра 13 з очною лінзою 14.



а - вертикальний переріз; б - горизонтальний переріз

Рисунок 2 – Оптична схема інтерферометра ЛІР-2

Досліджувані речовини вводяться в кювети 5 і 6, що займають тільки верхню частину об'єму перед об'єктивом. Нижні пучки променів проходять під кюветами й утворюють нижню нерухому

систему інтерференційних смуг, верхні проходять через кювети й утворюють верхню рухливу систему смуг. Обидві системи інтерференційних смуг розмежовані за допомогою пластини 10 тонкою лінією розділу. На шляху верхніх пучків променів встановлені дві однакові плоскопаралельні пластинки 8 і 9, при цьому пластинка 9 може повертатися навколо горизонтальної осі за допомогою мікрометричного механізму 12 і, таким чином, вводити необхідну додаткову різницю ходу, величина якої може бути визначена по барабані мікрометричного механізму.

На рис. 3 видно, що збільшення кута φ приводить до збільшення оптичного шляху променя.

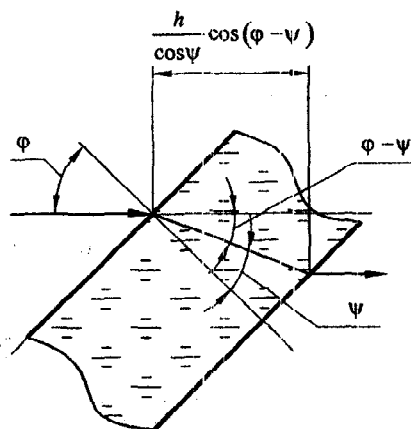


Рисунок 3 – До розрахунку додаткової різниці ходу променів, внесеною поворотною пластинкою

При дослідженні рідин кювети 5 і 6 поміщають в термокамеру, основне призначення якої полягає у вирівнюванні температури досліджуваних рідин. Термокамера має прозорі пластини 4 і 7, через які пучки світла попадають у кювети і далі йдуть у зорову трубу.

У термокамеру вмонтовано мішалку, рукоятка якої виведена через кришку приладу. При поступальному русі рукоятки лопата мішалки робить обертальний рух у межах, що дає можливість перемішувати рідину в термокамері, не зідриваючись від спостережень.

В інтерферометрі ЛІР-2 у верхній половині поля зору навпроти щилин встановлюються кювети, в одну з яких поміщається речовина з відомим коефіцієнтом заломлення n_0 а в іншу — з невідомим n . Кювети майже цілком ідентичні і внаслідок розходження коефіцієнтів заломлення речовини в різних кюветах між хвилями, що приходять від різних щилин, виникає додаткова різниця ходу. Це приводить до зсуву дифракційної картини у верхній половині поля зору вправо чи вліво. Це значення визначає “нуль” відліку.

Конструктивно прилад ЛІР-2 виконаний у корпусі 6 (рис. 4). Джерелом світла служить електрична лампочка 1, що включається тумблером 7. У середині корпусу під кришкою 5 міститься термокамера, на верхню площину якої кладуться оправа з рідинними кюветами. Компенсаційний механізм із мікрометричним гвинтом 4 змонтований на корпусі, що жорстко кріпиться на зоровій трубці. Циліндричний окуляр з лінзою 2.

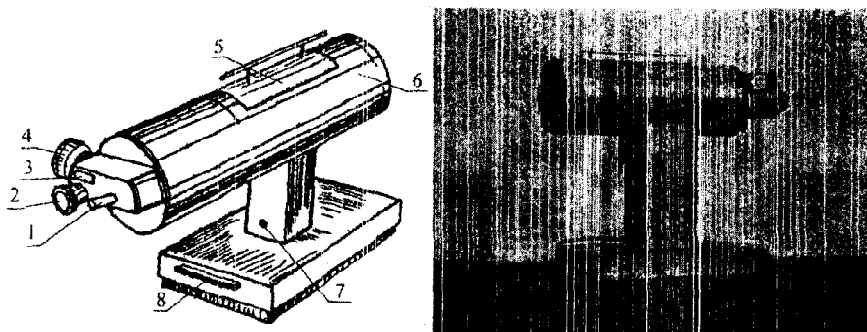


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд приладу ЛІР-2

Мікрометричний механізм 4 має дві шкали, з яких одна (нерухома) має 30 штрихів, а друга рухома (обертובה) — 100 штрихів. У результаті по мікрометричному механізмі може бути відлічено 3000 штрихів. Нерухома і рухома шкали цифровані через 5 штрихів.

Прилад забезпечений набором кювет. При дослідженні рідин використовуються кювети, зображені на рис. 5.

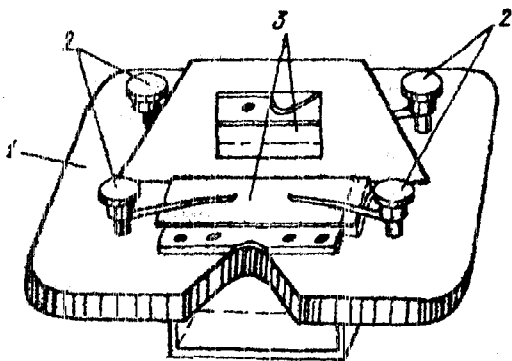


Рисунок 5 – Оправа з рідинними кюветами

Рідинні кювети складаються з двох камер (рис. 5) у загальній оправі 1. Оправа встановлюється на термокамеру приладу. Обидві камери закриваються скляними кришками 3, що притискаються до камер притисками 2. При роботі з кюветами слід дотримуватися чистоти, тому що найменше потрапляння пилу і бруду перешкодить щільній постановці кришок.

Особлива увага повинна бути приділена обережному поводженню з кюветами. Під час роботи кювету повинні ставити на спеціальну підставку, наповнену частою ватою. Ставити кювети на лабораторний стіл неприпустимо, тому що при цьому можна пошкодити тонке дно кювети і легко внести забруднення в термокамеру при вимірах.

Порядок виконання роботи

1. Включити прилад, підключивши його до мережі.
2. Спостерігаючи в окуляр, встановити регулюванням напруги необхідну яскравість і обертанням мікрометричного гвинта 4 сполучити верхню і нижню дифракційні картини.
3. За допомогою спеціальної піпетки дуже обережно заповнити на 2/3 обсягу відділення кювети розчинником. Обережно закрити кришки. Вставити кювету в термокамеру. Визначити так називаний «нуль кювети», тобто той відлік по барабані, на якому інтерференційні картини суміщені.

4. Обережно за допомогою спеціальної піпетки з одного відділення кювети вибирається розчинник і наливається досліджувана речовина найменшої концентрації. При поміщенні кювети в термокамеру, внаслідок градієнта температур дифракційні смуги спотворюються. Тому воду в термокамері варто обережно перемішувати з метою вирівнювання температури. Після закінчення декількох хвилин картина приймає нормальний чіткий вид.

5. Унаслідок різних показників заломлення досліджуваного розчину і розчинника верхня інтерференційна картина виявляється зміщеною щодо нижньої. Спостерігаючи в окуляр приладу, обертанням барабана 4 компенсувати різницю ходу до суміщення обох інтерференційних картин по нульовій центральній смугі. Суміщення необхідно робити кілька разів до одержання стійкого відліку в межах одного штриха по барабані. Нульову смугу довідаються по відсутності фарбування. Отриманий відлік записують. Наприклад, якщо "нулю кювети" 32 штрихи, то при відліку 166 вважають величиною зсуву $166 - 32 = 134$ штрихи.

6. Виміри повторюють для розчинів усіх концентрацій і в разі потреби для кювети іншої товщини.

Завдання 1. Визначення невідомої концентрації розчину

За результатами вимірів обчислюються різниці значення числа штрихів барабана і нульового відліку. Будується графік на міліметровому папері залежності цих значень від концентрації розчину. За обмірюваним значенням для розчину невідомої концентрації і побудованому графіку визначається невідома концентрація розчину.

Завдання 2. Визначення показника заломлення розчинів

Отримані значення числа штрихів барабана дозволяють знайти показник заломлення розчину по відомому показнику заломлення для розчинника (для води $n_0 = 1,333$). Для цього необхідно знати різницю ходу, що вводиться пластиною компенсатора. Поблизу нульового відліку зсуву верхньої інтерференційної картини на одну смугу відповідає 30 штрихів барабана. Покладемо, приміром, що обмірюваний і нульовий відліки барабана N_2 і N_1 . З іншого боку,

різниця ходу, викликана різними значеннями показників заломлення розчину і розчинника, дорівнює $\Delta = l(n - n_0)$. Звідси отримуємо робочу формулу

$$n - n_0 = \frac{1}{30} \frac{\lambda}{l} (N_1 - N_2),$$

де λ – середня довжина хвилі світла, l – довжина кювети, $1/30$ – константа яка обумовлена особливостями будови приладу. За допомогою цієї формули можуть бути визначені значення показника заломлення для розчинів усіх концентрацій. З графіка залежності показника заломлення від концентрації можна також визначити невідому концентрацію по виміряному значенням показника заломлення.

Завдання 3. Визначення показника заломлення розчиненої речовини

Якщо виразити молярну концентрацію C залежно від різниці показника заломлення Δn , то в більшості випадків отримаємо лінійну залежність

$$C = K \cdot \Delta n,$$

де K – константа, яка залежить від виду розчиненої речовини.

Якщо показник заломлення розчиненої речовини n_1 , то дану формулу можна переписати:

$$n - n_0 = \frac{n + n_0(1 - 0,01 \cdot P)}{0,01 \cdot P},$$

де n – показник заломлення розчину, n_0 – показник заломлення розчинника, P – вагові проценти.

З даної формули ми можемо визначити показник заломлення розчиненої речовини:

$$n_1 = \frac{n + n_0(1 - 0,01 \cdot P)}{0,01 \cdot P},$$

де n_1 – показник заломлення розчиненої речовини.

Використовуючи цю формулу визначити показник заломлення розчиненої речовини.

№	$P, \%$	N_2	$l, \text{м}$	n	n_1
1.					
Сер.	—	—			

Контрольні запитання

1. Запишіть умову максимумів інтенсивності у випадку дифракції Фраунгофера на двох щілинах.
2. Чим визначається величина різниці ходу, що вводиться компенсатором?
3. На чому заснований принцип дії приладу ЛІР-2? Які величини можуть бути обмірювані за допомогою цього приладу?
4. Яким чином здійснюється спостереження інтерференційної картини в даній роботі?
5. Які ви знаєте інтерферометри? Для чого використовують?
6. Дайте означення абсолютного та відносного показників заломлення. Який між ними зв'язок?
7. Який параметр електромагнітної хвилі змінюється при проходженні через середовище і чому?
8. Що таке дисперсія світла?
9. Яку швидкість світла можна обчислити, взявши показник заломлення для певної довжини хвилі?
10. В чому полягає принцип роботи інтерферометра Релея?
11. Що таке нормальна та аномальна дисперсія?
12. Як залежить показник заломлення від магнітної та діелектричної проникності середовища?

*Нема нічого нерозумнішого
за дурний сміх*

Катулл

Лабораторна робота № 86

Визначення показника заломлення і дисперсії твердих та рідких тіл

Мета: визначити показник заломлення та дисперсію прозорих твердих тіл та рідин за допомогою рефрактометра.

Прилади: рефрактометр УРЛ-1, набір прозорих твердих тіл, набір пробірок з досліджуваними рідинами, проміжна рідина (машинне масло).

Теоретичні відомості

Світло у прозорих речовинах залежно від їхніх електричних властивостей поширюється з різною швидкістю. Тому на межі поділу таких середовищ напрям поширення світла змінюється (воно заломлюється). Абсолютний показник заломлення речовини визначається відношенням швидкості світла у вакуумі до швидкості у середовищі:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Прилади для вимірювання показника заломлення твердих, рідких і газоподібних речовин називаються рефрактометрами. Принцип дії цих приладів ґрунтується на явищі повного внутрішнього відбивання при проходженні світлом межі поділу двох середовищ з різними показниками заломлення. У даній роботі використовується рефрактометр УРЛ-1, основними частинами якого є дві призми: вимірювальна 1 та освітлювальна 2 (рис. 1). Нижня поверхня АВ освітлювальної призми зроблена матовою.

Показники заломлення прозорих рідин визначають у прохідному білому світлі. Досліджувану рідину поміщають між двома паралельними гіпотенузними гранями призм 1 і 2. Паралельний пучок

променів, пройшовши освітлювальну призму, попадає на матову поверхню AB і розсіюється. Отже, в досліджувану рідину входять промені різних напрямів. Оскільки показник заломлення досліджуваної рідини завжди менший, ніж показник заломлення вимірювальної призми n_0 ($n_0 = 1,74$), то промені різних напрямів, зломившись на межі поділу рідина – скло, входять у призму 1.

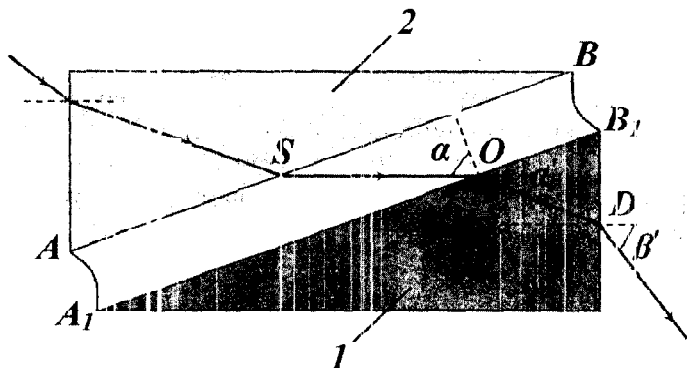


Рисунок 1 – Рух променя в призмах рефрактометра

Для променя SO , який падає під кутом α на вимірювальну призму, можна записати такі співвідношення:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_0}{n}, \quad \frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'} = \frac{1}{n_0}, \quad (2)$$

де β – кут заломлення вимірювальної призми.

При умові $n_0 > n$ кут заломлення завжди обмежений, тобто він не може бути більшим, ніж певний граничний кут заломлення β_{gr} , якому відповідає кут падіння $\alpha = 90^\circ$ (кут падіння при цьому ковзає по поверхні A_1B_1).

Усі інші промені проходять у вимірювальну призму під кутами, меншими ніж β_{gr} . Оскільки для променя, який ковзає по поверхні A_1B_1 , $\sin \alpha = 90^\circ = 1$, то для граничного кута заломлення матимемо з (2):

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta_{ep}} = \frac{n_0}{n},$$

або

$$n = n_0 \sin \beta_{ep}. \quad (3)$$

За формулою (3) можна обчислити n . Проте тут не враховується заломлення променя при його виході з вимірювальної призми. Експериментально не можна заміряти β_{ep} . В той же час граничному куту β_{ep} завжди відповідає граничне значення кута β'_{ep} , величину якого можна зиміряти.

Для $\triangle ODC$ кут DCK зовнішній і дорівнює $\varphi = \beta + \alpha'$. Тоді з виразу (2) можна записати

$$\sin \beta' = n_0 \sin \alpha' = n_0 \sin(\varphi - \beta) = n_0 \sin \varphi \cdot \cos \beta - n_0 \cos \varphi \cdot \sin \beta. \quad (4)$$

Так само з виразу (2) $\sin \beta = (n/n_0) \sin \alpha$, а

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - (n/n_0)^2 \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

Підставивши (5) і (2) в рівняння (4), дістанемо

$$\sin \beta' = \sin \varphi \sqrt{n_0^2 - n^2 \sin^2 \alpha} - n \cos \varphi \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

Якщо промінь SO наближається до поверхні A_1B_1 , тобто якщо $\alpha = 90^\circ$, то настає явище повного внутрішнього відбивання. Отже, у вимірювальну призму ввійдуть лише промені під кутом, не більшим ніж β_{ep} . При $\alpha = 90^\circ$ формула (6) переписеться так:

$$\sin \beta' = \sin \varphi \sqrt{n_0^2 - n^2} - n \cos \varphi. \quad (7)$$

Оскільки для даної призми n_0 і φ — величини сталі і визначаються незалежно, то при різних n змінюватиметься β'_{ep} . Отже, вимірюючи β'_{ep} , можна вимірювати показники заломлення

різних речовин. Проте формулу (7) на практиці використовують для градуювання шкали рефрактометрів, а невідомі показники заломлення речовин визначають по градуювальній шкалі.

Припустимо, що для певної рідини призми 1 і 2 розташовані так, що в полі зору спостерігається різке розділення світлого і темного полів, причому межа поділу розташована посередині зорового поля.

Якщо між призмами помістити іншу речовину, то для неї β'_{zp} буде іншим і межа поділу зміститься з центру поля зору. Щоб межу поділу помітити у центрі поля зору, потрібно повернути призми 1 і 2 на певний кут. За кутом повороту призм градуюють рефрактометри, а потім по шкалі безпосередньо визначають показник заломлення досліджуваних рідин. Нагадаємо, що рефрактометрами вимірюються також показники заломлення твердих речовин і газів.

Дисперсія речовини характеризує швидкість зміни коефіцієнта заломлення при зміні довжини світлової хвилі. Якщо двом довжинам хвиль λ_1 і λ_2 відповідають значення коефіцієнтів заломлення n_1 і n_2 , то середня дисперсія в інтервалі довжин хвиль $\lambda_2 - \lambda_1$ визначається співвідношенням

$$\langle \nu \rangle = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda}. \quad (8)$$

Значення дисперсії поблизу даної довжини хвилі визначаються границею відношення (8), тобто

$$\nu = \frac{dn}{d\lambda}. \quad (9)$$

Для обчислення середньої дисперсії встановлено емпіричну формулу

$$\langle \nu \rangle = A + B\sigma, \quad (10)$$

де A і B – сталі коефіцієнти для даного рефрактометра, величину яких знаходять в таблицях, що додаються до приладу; σ – сталий коефіцієнт, який також знаходять в таблицях для отриманого значення Z , яке відраховують по шкалі барабана приладу.

Опис установки

Рефрактометр УРЛ – 1 (рис. 2) складається з таких основних частин: 1 – основа; 2 – корпус; 3 – нижня камера; 4 – освітлювач; 5 – верхня камера; 6 – лімб компенсації дисперсії; 7 – шкала; 8 – окуляр; 9 – настрювальний механізм.

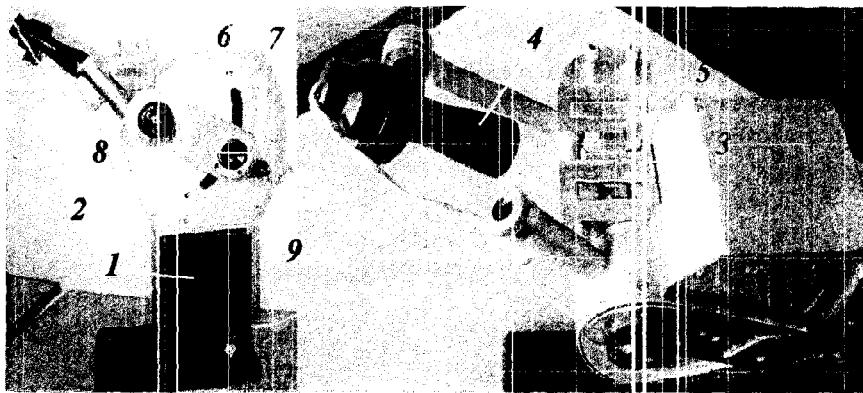


Рисунок 2 – Рефрактометр УРЛ -- 1

В УРЛ – 1 передбачено темостатування, для чого в оправках призми є спеціальні камери, через які пропускається вода від термостата. Термометром контролюється температура.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення показника заломлення рідини

1. Відкинути верхню камеру вимірювальної головки, на поверхню вимірювальної призми скляною паличкою нанести кілька крапель досліджуваної рідини і закрити головку.

2. Перевірити, чи повністю заповнила досліджувана рідина зазор між вимірювальною і освітлювальною призмами.

3. Увімкнути термостат, встановивши контактним термометром температуру 20°C . Термометром перевірити температуру з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

4. Спрямувати світло від освітлювача на освітлювальну призму і добитися рівномірного її освітлення.

5. Спостерігаючи в окуляр і повертаючи рукоятку за допомогою настроювального механізму, знайти межу поділу світла і тіні. Обертанням ручки лімбу компенсації дисперсії усунути забарвленість.

6. Сумістити межу поділу світла і тіні з перехрестям і зняти відлік по шкалі показників заломлення. Слід мати на увазі, що шкала показників заломлення побудована для температури 20°C . При інших температурах треба вводити поправки (формули для розрахунку температурної поправки наводяться в заводських інструкціях до приладу).

7. Оцінити похибку вимірювання.

Завдання II. Визначення показника заломлення твердого тіла

1. Перевірити, чи відповідає досліджуваній зразок таким вимогам. Зразок повинен бути оптично однорідним і мати дві взаємно перпендикулярні грані. Грань, що торкається вимірювальної призми, повинна бути ідеально плоскою, бокові грані – матовими, товщина зразка – не меншою ніж 0,15 мм.

2. Відкинути верхню камеру вимірювальної головки. Поверхні зразка і вимірювальної призми промити спиртом і протерти чистою ватою. На поліровану поверхню зразка скляною паличкою нанести тонкий шар проміжної рідини (машинного масла).

3. Покласти досліджуваний зразок полірованою гранню на вимірювальну призму. При цьому стежити, щоб проміжна рідина не утворила клин, який значною мірою спотворює результати вимірювань. При хорошій установці зразка немає забарвленості поверхні дотику зразка і призми.

4. Провести вимірювання показника заломлення так само, як це робиться для рідини.

5. Повторити досліди кілька разів. Знайти середнє значення. Зробити висновки.

6. Шуканий показник заломлення твердого тіла обчислити за формулою $n = n' \cdot b$, де n' – показник заломлення, знятий по шкалі приладу, b – сталий коефіцієнт (для машинного масла $b = 1,02$).

Завдання III. Визначення середньої дисперсії речовини

1. Встановити зразок так само, як і для вимірювання показника заломлення рідини або твердого тіла.

2. Сумістити границі світлотіні з перехрестям сітки зорової труби і зняти відлік показника заломлення і кількості поділок Z по дисперсному лімбу.

3. При вимірюваннях провести не менше п'яти підрахунків з обох боків барабана і знайти середнє арифметичне значення Z .

4. Для виміряного значення показника заломлення n досліджуваної речовини за таблицями знайти константи A і B .

5. Для виміряного значення Z знайти за таблицями величину σ . Слід врахувати, що для Z , більших за 30, σ набуває від'ємних значень. Оскільки в таблицях значення дисперсійних коефіцієнтів A і B подано для показників заломлення через кожен $1 \cdot 10^{-3}$, а рефрактометрі можна виміряти показник заломлення з точністю до $1 \cdot 10^{-4}$, то відповідні виміряним значенням показника заломлення коефіцієнти A і B отримують інтерполяцією. Аналогічно для дробових значень Z значення σ визначають інтерполяцією.

6. За визначеними A , B і σ розрахувати середню дисперсію за формулою (10).

7. Провести досліди для рідини і твердого тіла.

Контрольні запитання

1. Яка будова рефрактометрів і принцип їх дії?

2. Вивести формулу для обчислення показника заломлення за відомим граничним кутом.

3. Що буде видно в зоровій трубці рефрактометра, якщо умова $n > n_0$ не виконується?

4. З яких міркувань слід обирати вимірювальну призму і іммерсійну рідину?

5. Які ще методи вимірювання показника заломлення ви знаєте?

6. Дайте означення абсолютного та відносного показників заломлення. Який між ними зв'язок?

7. Який параметр електромагнітної хвилі змінюється при проходженні через середовище і чому?
8. Що таке дисперсія світла?
9. Яку швидкість світла можна обчислити, взявши показник заломлення для певної довжини хвилі?
10. Сформулюйте закони геометричної оптики.
11. Що таке нормальна та аномальна дисперсія?
12. Як залежить показник заломлення від магнітної та діелектричної проникності середовища?

Ти повинен вірити в себе – у цьому секрет успіху!

Чарлі Чаплін

Лабораторна робота № 8'

Визначення показника заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа

Мета: визначити показник заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа. Дослідити явище дисперсії світла.

Прилади: мікроскоп, набір прозорих твердих пластинок різної товщини (скло різного сорту, оргскло тощо), освітлювач з набором світлофільтрів, мікрометр.

Теоретичні відомості

Згідно закону заломлення світла: заломлений промінь лежить у площині падіння; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох прозорих середовищ залежить лише від довжини світлової хвилі і не залежить від кута падіння:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (1)$$

Величина n_{21} називається відносним показником заломлення другого середовища відносно першого. Він визначається відношенням швидкості поширення світла у першому середовищі v_1 до швидкості світла у другому середовищі v_2 . Показник заломлення середовища відносно вакууму називають абсолютним показником заломлення цього середовища:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v}, \quad (2)$$

де i – кут падіння; r – кут заломлення; c – швидкість світла у вакуумі; v – швидкість світла в даному середовищі.

Оскільки швидкість світла у повітрі близька до швидкості світла у вакуумі, то показник заломлення середовища, виміряний відносно повітря, практично дорівнюватиме абсолютному показникові заломлення цього середовища.

Оскільки n залежить від частоти (довжини хвилі) падаючого світла, то його прийнято нормувати до лінії натрію D і записувати n_D . Часто індекс D опускають, маючи на увазі згадану вище умову.

Показник заломлення залежить від властивостей середовища і частоти (довжини) хвилі випромінювання. Залежність показника заломлення від частоти називається дисперсією. В більшості спектральних діапазонів показник заломлення зростає з частотою, що називається нормальною дисперсією. Проте в певних частотних діапазонах близьких до резонансних частот показник заломлення стрімко падає, що називається аномальною дисперсією. Завдяки цим різким падінням показник заломлення для низьких частот завжди більший, ніж для дуже високих частот (рентгеновського діапазону), де він, зростаючи з частотою, наближається до одиниці знизу.

Існують оптично анізотропні речовини, в яких показник заломлення залежить від напрямку поширення світла. Це кристали з досить низькою симетрією кристалічної ґратки, а також речовини які знаходяться під дією механічних деформацій.

При великій інтенсивності падаючого світла (лазерне випромінювання) показники заломлення оптичних середовищ нелінійно залежать від інтенсивності світла. Такий характер цієї залежності спостерігається тоді, коли напруженість електричного поля падаючої хвилі співмірна з напруженістю поля атомів речовини. Слід відмітити, що при великій інтенсивності лазерного випромінювання спостерігаються такі явища як самофокусування, оптичний пробій повітря.

В таблиці 1 наведено значення показників заломлення для різних речовин. Оскільки показники заломлення залежать від частоти, то його зазвичай наводять для певного цілком визначеного значення частоти ν . Щодо показника заломлення скла, то його значення лежить у широкому діапазоні, в залежності від його складу й якості.

Таблиця 1. Показники заломлення деяких речовин

Речовина	Показник заломлення $\nu=5,09 \times 10^{14}$ Гц	Речовина	Показник заломлення $\nu=5,09 \times 10^{14}$ Гц
Вакуум	1 (точне значення)	Органічне скло	1,51
Гелій	1,000036	Кам'яна сіль	1,516
Повітря	1,0002926	Кварц	1,544
Вуглекислий газ	1,00045	Цукор	1,56
Лід	1,31	Поліетилен	1,5750
Вода (20 °C)	1,332986	Скло	1,485 – 1,925
Ацетон	1,36	Топаз	1,63
Етанол	1,36	Фіаніт	2,15 – 2,18
Тефлон	1,35 – 1,38	Діамант	2,419
Масло оливкове	1,46	Кіновар	3,02
Гліцерин	1,4729	Арсенід галію	3,927
Бензол	1,500	Кремній	4,01

Показник заломлення можна виразити як корінь квадратний з добутку магнітної і діелектричної проникностей середовища

$$n = \sqrt{\mu \epsilon} \quad (3)$$

Однак, потрібно враховувати, що значення μ і ϵ також можуть змінюватися в залежності від частоти світла.

Опис установки

У зв'язку з труднощами безпосереднього вимірювання кутів падіння і заломлення світлових променів розроблено інші методи визначення показника заломлення n . У даній роботі розглядається метод визначення показника заломлення прозорої твердої плоскопаралельної пластинки за допомогою мікроскопа для монохроматичного та білого світла.

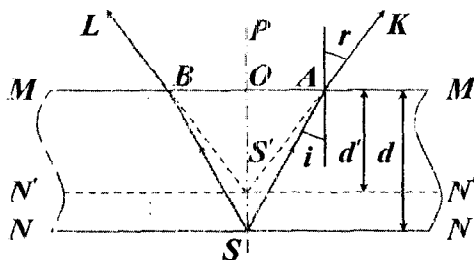


Рисунок 1 – Методика визначення показника заломлення за допомогою мікроскопа

Розглянемо шар прозорої речовини, обмеженої двома плоско паралельними поверхнями NN та MM (рис. 1). Нехай товщина шару d . Якщо розглядати шар зверху у мікроскоп, то здаватиметься, що нижня поверхня шару займає положення $N'N'$. Це можна показати, побудувавши зображення кожної точки площини NN . Якщо на нижню поверхню пластинки нанести тонку подряпину S , то вона буде джерелом розсіяних світлових хвиль. Розглянемо два промені SAK та SBL , які розходяться під малим кутом, оскільки у протилежному випадку вони не попадуть в об'єктив мікроскопа. На верхній поверхні розділу речовина – повітря (лінія MM) обрані промені переходять в оптично менш густе середовище, а отже розходяться ще більше. Для спостерігача, який дивиться вздовж нормалі PS , промені AK та BL перетнуться на продовженні в точці S' – уявному зображенні точки S .

Сукупність точок, аналогічних S' , утворює уявне зображення поверхні NN . Як видно з рисунка, уявна товщина пластинки менша за дійсну товщину d .

Покажемо, що абсолютний показник заломлення шару прозорої твердої речовини можна обчислити, вимірявши дійсну d і уявну d' товщину пластинки. Справді, з трикутника OSA маємо $OA = OS \cdot \operatorname{tgi}$, з трикутника $OS'A$ – $OA = OS' \cdot \operatorname{tgr}$. Тому

$$\frac{\operatorname{tgi}}{\operatorname{tgr}} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_{\text{воз}}}{n_{\text{ск}}} = \frac{OS'}{OS}.$$

Заміна тангенсів відповідних кутів на їх синуси можлива внаслідок малості кутів i та r .

З останнього співвідношення можна визначити також абсолютний показник заломлення речовини пластинки. Оскільки

$$OS = d, OS' = d', \text{ то } n_{ск} = \frac{d}{d'} n_{пов}.$$

Порядок виконання роботи

1. За допомогою освітлювача та дзеркала мікроскопа добитися рівномірної оптимальної яскравості поля зору в окулярі.

2. Покласти на предметний столик мікроскопа, наприклад, скляну пластинку з двома взаємно перпендикулярними подряпинками на нижній та верхній поверхнях.

3. За допомогою гвинта грубого фокусування підняти тубус мікроскопа у крайнє верхнє положення. Обертаючи гвинт мікрометричного фокусування, встановити його у нульове положення.

4. Опустити тубус мікроскопа гвинтом грубого фокусування і одержати різке зображення подряпинки на верхній поверхні пластинки.

5. Опускаючи далі тубус мікроскопа гвинтом мікрометричного фокусування, дістати різке зображення подряпини на нижній поверхні пластинки. При цьому підрахувати кількість повних обертів і кількість поділок по шкалі мікрометричного гвинта. Знаючи ціну поділки шкали, розрахувати глибину опускання тубуса мікроскопа, тобто уявну товщину пластинки d' .

6. Мікрометром виміряти дійсну товщину пластинки d у кількох місцях і взяти середнє значення.

7. Згадані вимірювання провести у білому світлі не менше трьох раз. Для кожного вимірювання підрахувати значення показника заломлення $n_{ск}$, а потім знайти середнє значення.

8. Аналогічні вимірювання провести для пластинки з іншого матеріалу у білому світлі. Порівняти результати, одержані для обох пластинок і пояснити їх.

9. Повторити усі вимірювання ще три рази у монохроматичному світлі, для чого використати світлофільтри.

10. Побудувати графік залежності $n = f(\nu)$, відкладаючи ν вздовж осі абсцис, а n – вздовж осі ординат.

Контрольні запитання

1. Дайте означення абсолютного та відносного показників заломлення. Який між ними зв'язок?
2. Який параметр електромагнітної хвилі змінюється при проходженні через середовище і чому?
3. Що таке дисперсія світла?
4. Яку швидкість світла можна обчислити, взявши показник заломлення для певної довжини хвилі?
5. Сформулюйте закони геометричної оптики.
6. Накресліть хід променів у мікроскопі.
7. Виведіть формулу збільшення мікроскопа.
8. Назвіть основні характеристики мікроскопа.
9. Назвіть основні частини мікроскопа.
10. Як впливає товщина пластинки на точність вимірювання цим методом показника заломлення?
11. Що таке нормальна та аномальна дисперсія?
12. Як залежить показник заломлення від магнітної та діелектричної проникності середовища?

Лабораторна робота № 97

Дослідження спектрів поглинання твердих тіл фотоелектричним методом. Вивчення явища дихроїзму

Мета: дослідити фотоелектричним методом спектри поглинання твердих тіл.

Прилади: монохроматор УМ-2, лампа розжарювання на 12,6 В, мікроамперметр М-252, універсальне джерело живлення УІП-1, фотопомножувач ФЕУ-39, поляроїд, набір поглинаючих зразків.

Теоретичні відомості

Пройходження світла через речовину призводить до виникнення коливань електронів середовища під дією електромагнітного поля хвилі і супрооджується втратою енергії цієї хвилі, яка витрачається на збудження коливань електронів. Частково ця енергія знову повертається випромінюванню у вигляді вторинних хвиль, які посиляють електрони, а частково вона може переходити і в інші форми енергії. Коли на поверхню речовини падає паралельний пучок променів (плоска хвиля), інтенсивність якого є I , то описувані процеси повинні вести до зменшення інтенсивності у міру проникнення хвилі у речовину.

Розглянемо деякий світловий потік Φ , який від джерела світла падає на досліджуване тіло (частково прозора пластинка). При проходженні через це тіло світловий потік Φ_0 взаємодіє з речовиною, що призводить до часткового відбивання світла на межі двох середовищ, рефракції (заломлення) світла у тілі, розсіювання та поглинання частини світлового потоку речовиною тіла. В окремих випадках взаємодія світла з речовиною супроводжується поляризацією світла, обертанням площини поляризації, люмінесценцією та іншими явищами.

Кількісно вказані явища характеризуються коефіцієнтами (показник заломлення, коефіцієнт поглинання, стала обертання, тощо), які залежать від природи і стану речовини (хімічний склад, температура, агрегатний стан та ін.), від довжини хвилі світла, що взаємодіє з речовиною.

Обмежимося найпростішим випадком послаблення світлового потоку Φ_0 при проходженні через досліджуване тіло тільки поглинанням світла речовиною. У 1729 році французький вчений П.Бугер встановив, що послаблення світлового потоку $d\Phi$ при проходженні через дуже тонкий шар речовини прямо пропорційне величині початкового потоку Φ_0 , який падає на цей шар та товщині шару dl . Іншими словами, шари однакової товщини тіла поглинають однакові відносні частини світлового потоку, що проходить через них. Це означає, що при проходженні світлом першого шару речовини товщиною 1 мм інтенсивність світлового потоку послаблюється у два рази, проходження через наступний шар такої самої товщини послаблює світловий потік, що залишився, також у два рази. Отже, інтенсивність I_0 початкового світлового потоку зменшиться у чотири рази. Таким чином, якщо товщина шару речовини, яка поглинає світло, зростає за арифметичною прогресією, то інтенсивність світла при цьому зменшується за геометричною прогресією. Математично це можна записати так:

$$d\Phi = -\alpha\Phi dl. \quad (1)$$

Знак «мінус» вказує на те, що світловий потік при проходженні через шар речовини послаблюється. Мірилом цього послаблення є коефіцієнт послаблення α .

Розділимо змінні величини і проінтегруємо цю рівність:

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = -\alpha dl, \quad (2)$$

$$\int_{\Phi_0}^{\Phi} \frac{d\Phi}{\Phi} = -\alpha \int_0^l dl, \quad (3)$$

$$\ln \Phi - \ln \Phi_0 = -\alpha l, \quad (4)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\alpha l}, \quad (5)$$

тоді

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha l}. \quad (6)$$

Останній вираз називається законом Бугера. Часто його записують для інтенсивності світлового потоку

$$I = I_0 e^{-\alpha l}. \quad (7)$$

Із закону Бугера випливає, що початковий світловий потік Φ_0 при проходженні в речовині послаблюється за експоненціальним законом. Літерою « Φ » позначено потік після проходження світла. Очевидно, поглинуту тілом частину світлового потоку Φ_n можна визначити з виразу

$$\Phi_n = \Phi_0 - \Phi = \Phi_0 (1 - e^{-\alpha l}). \quad (8)$$

Коефіцієнт α (в загальному випадку послаблення світлового потоку) називають коефіцієнтом екстинкції (коефіцієнт послаблення). Інколи коефіцієнт екстинкції поділяють на два і більше доданків ($\alpha = k + \beta$), кожен з яких характеризує послаблення світлового потоку якоюсь причиною (розсіювання, відбивання). В основному таке послаблення викликається поглинанням світла речовиною, а інші явища (розсіювання, відбивання) не відіграють помітної ролі в цьому процесі ($\beta \ll k$), і тоді коефіцієнт екстинкції в інтегральній формулі закону Бугера називають натуральним показником поглинання, а сам закон Бугера записують у вигляді

$$\Phi = \Phi_0 e^{-k l}. \quad (9)$$

Встановимо фізичний зміст натурального показника заломлення. Якщо позначити $k = \frac{1}{l}$, то з закону Бугера випливає, що

$$\Phi = \Phi_0 e^{-1} = \frac{\Phi_0}{e}. \quad (10)$$

Отже, величина обернена до натурального показника поглинання ($I_0 = \frac{1}{k}$), визначає товщину шару речовини, в якому світловий потік послаблюється в $e = 2,72$ разів. Цю відстань (l_0) інколи називають середньою глибиною проникнення світла у речовину.

Фізичний зміст закону Бугера полягає у тому, що натуральний показник поглинання не залежить від інтенсивності світла, а отже, і від товщини поглинаючого шару. Вавілов С. І. встановив, що закон Бугера виконується у дуже широких межах зміни інтенсивності світла (приблизно в 10^{20} разів). Однак слід взяти до уваги, що при поглинанні світла молекула переходить у новий, збуджений стан, запасавши поглинуту енергію. Поки вона перебуває у такому стані, її здатність поглинати світло змінено. Та обставина, що у дослідах Вавілова С. І. закон Бугера виконувався при високій інтенсивності, доводить, що число таких збуджених молекул у кожний момент незначне, тобто вони дуже короткий час перебувають у збудженому стані. Справді, для таких речовин, з якими були виконані зазначені досліди, цей час не перевищує 10^{-3} . Це справедливо для великої кількості речовин, для яких справедливий закон Бугера. Це є галузь оптики, яку називають лінійною оптикою.

На практиці дуже часто розглядають не показник поглинання k , а пов'язану з ним величину D , яку називають оптичною густиною тіла. Зв'язок між k та D випливає з таких міркувань. Закон Бугера

$$I = I_0 e^{-k l}, \quad (11)$$

для практичних цілей записують у більш зручній формі, замінюючи основу натуральних логарифмів числом 10, а саме

$$I = I_0 10^{-k' l}, \quad (12)$$

де

$$k' = 0,4343 \cdot k = \lg e^k. \quad (13)$$

Щоб розрізнити споріднені за фізичним змістом показники k та k' , число k називають натуральним показником поглинання.

Відношення $\frac{I}{I_0} = T$, що показує, яку частину становить інтенсивність I світлового потоку, який пройшов через тіло, від інтенсивності I_0 початкового світлового потоку, називають коефіцієнтом пропускання тіла.

Отже,

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-kl} = 10^{-k'l}. \quad (14)$$

Оптичною густиною тіла D прийнято називати десятковий логарифм величини, оберненої коефіцієнту пропускання, тобто

$$D = \lg \frac{1}{T}. \quad (15)$$

Оскільки $T = 10^{-k'l}$, то за означенням

$$D = \lg \frac{1}{T} = \lg \frac{1}{10^{-k'l}} = k'l. \quad (16)$$

Вираз $D = k'l = 0,4343 \cdot kl$ є шуканим зв'язком між оптичною густиною D , лінійними розмірами поглинаючого тіла l у напрямі поширення світла, показником поглинання k та натуральним показником поглинання речовини. Виходячи з залежності $D = \lg T^{-1}$, легко визначити межі зміни цих величин для тіл з різним поглинанням. Справді, якщо тіло не поглинає, тобто повністю пропускає узесь світловий потік, тоді $I = I_0$ та $T = 1$. При цьому оптична густина тіла дорівнює нулю:

$$D = \lg \frac{1}{T} = \lg 1 = 0. \quad (17)$$

Для випадку, коли $T = \frac{I}{I_0} = 0,1$, дістанемо

$$D = \lg \frac{1}{0,1} = \lg 10 = 1. \quad (18)$$

В адсорбційній спектрофотометрії розрізняють такі величини:

– коефіцієнт пропускання

$$T = \frac{I}{I_0}, \quad (19)$$

– пропускання

$$\tau = T \cdot 100\% = \frac{I}{I_0} \cdot 100\%, \quad (20)$$

– оптична густина

$$D = \lg \frac{1}{T} = k' l, \quad (21)$$

– натуральний показник поглинання

$$k = \frac{D}{0,4343 \cdot l} = \frac{\lg \frac{1}{T}}{0,4343 \cdot l} = \frac{\lg \frac{I_0}{I}}{0,4343 \cdot l}. \quad (22)$$

У широкій області спектра звичайно $k = f(\lambda)$. Таку залежність показника поглинання k від довжини світлової хвилі λ , як правило зображають графічно, так само, як і для коефіцієнта пропускання T (або пропускання τ) і оптичної густини D . Отриману криву називають спектральною характеристикою поглинання речовини. Для різних речовин спектральні криві поглинання мають найрізноманітніший вигляд, виявляючи у різних частинах спектру вузькі або широкі максимуми (піки і смуги) поглинання.

Аналізуючи вираз $D = \lg \frac{1}{T}$ або $\frac{1}{T} = 10^D$, бачимо, що великим значенням D відповідають дуже малі значення T . Це означає, що спектральна крива пропускання $\tau = f(\lambda)$ буде повною мірою обернена кривій поглинання: проти максимумів поглинання знаходитимуться мінімуми на кривій пропускання і навпаки. Отже, можна говорити про селективне і нейтральне пропускання. Так, пластинка з червоного скла добре пропускає червоні промені і значно послаблює промені інших довжин хвиль. Але «на око» за кольором

прозорого тіла ще не можна точно судити про його спектральну криву пропускання. Наприклад, розбавлене фіолетове чорнило або розчин перманганату калію та синє скло від захисних окулярів для електрозварювання або сигнальних ліхтарів на залізницях добре пропускає крім фіолетових та синіх ще й червоні промені. Зрозуміло, що таку речовину не можна застосувати як світлофільтр для виділення з білого випромінювання, наприклад, лампи розжарення, монохроматичного світлового потоку. Для виготовлення оптичних світлофільтрів придатні такі матеріали, які мають тільки одну досить вузьку смугу на спектральній кривій пропускання.

Серед розглянутих характеристик поглинаючої здатності тіл крім натурального показника поглинання k , інші характеристики послаблюючої дії речовини (пропускання, оптична густина, тощо) є безрозмірними величинами.

Показник поглинання k має розмірність оберненої довжини і може вимірюватись у різних одиницях, найчастіше в см^{-1} або мм^{-1} . Обчислення натурального показника поглинання k легко виконати на основі закону Бугера

$$I = I_0 e^{-k l} \quad (23)$$

за вимірними в експерименті значеннями I , I_0 та l . Але при цьому можливі значні похибки, які призводять до неправильних значень показника поглинання. Справді, I_0 – інтенсивність початкового світлового потоку вимірюється до проходження світла через досліджувану речовину (потік вже пройшов межу повітря – поглинаюче тіло), I – інтенсивність ослабленого світлового потоку, який пройшов товщу досліджуваної речовини, але ще не вийшов з неї. Послаблення світла у речовині може відбуватися не тільки в результаті поглинання, а й при частковому відбиванні світла на межі повітря – досліджувана речовина та при розсіюванні світла у речовині. Тому, використовуючи формулу $k l = \ln \frac{I_0}{I}$, ми фактично визначаємо не натуральний показник поглинання, а коефіцієнт екстинкції.

Серед поглинаючих оптичне випромінювання тіл, для яких в практичній діяльності людини з тих чи інших причин є необхідність визначати спектральні характеристики поглинання

$(k(\lambda), k'(\lambda), D(\lambda), T(\lambda) \dots)$ є оптично ізотропні та оптично анізотропні речовини. До оптично анізотропних речовин звичайно відносять деякі кристалічні об'єкти та оптично ізотропні речовини, які в момент дослідження, наприклад, $k = k(\lambda)$, перебувають під дією певних зовнішніх чинників (наприклад, під дією деформуючих їх зусиль або полів), які перетворюють оптично ізотропні речовини у речовини оптично анізотропні.

Для оптично ізотропних тіл (гази, рідини скло та ін.) залежність є незмінною при зміні напрямку проходження в цих речовинах світла або його поляризації. Навпаки, при виконанні таких вимірювань для оптично анізотропних речовин отримана функція $k = k(\lambda)$ може залежати від того, як була орієнтована у досліджуваному об'єкті траєкторія проходження світла (тобто як орієнтований відрізок l) або як було поляризоване це світло. Як приклад розглянемо опис спектральної характеристики поглинання світла у природних кристалах.

Деякі з кристалів, наприклад ідеальні кристали кам'яної солі, гранати тощо, є оптично ізотропними тілами, інші — оптично анізотропними тілами (двозаломлюючими), наприклад, кристали ісландського шпату, кварцу, рубіну, турмаліну тощо. Для двозаломлюючих кристалів характерним є те, що при проходженні через них світла у напрямках, які не збігаються з їх оптичною віссю (або осями), виникає два промені — звичайний (o) і незвичайний (e). Ці промені відрізняються у загальному випадку поляризацією світла, величинами показників заломлення n_o та n_e , напрямками поширення (відносно ґратки кристала) та можуть відрізнятися спектральними характеристиками поглинання світла у цьому кристалі

$$k_o = k_o(\lambda) \quad (24)$$

та

$$k_e = k_e(\lambda) \quad (25)$$

Явище відмінності $k_o(\lambda) \neq k_e(\lambda)$ називають дихроїзмом (або плеохроїзмом). Воно відкрите в 1809 р. Кордье на кристалі, який в його пам'ять називають кордіорітом. До плеохроїчних кристалів належать рубін, турмалін, кордіоріт, александрит та інші. Для спостереження дихроїзму слід забезпечити умови виникнення в

кристалі двозаломлення, тобто промінь світла в такому кристалі має проходити через нього в напрямку, який не збігається з напрямком оптичної осі кристала. Кристали ісландського шпату, кварцу і ряд інших, які є двозаломлюючі, в значній області $\Delta\lambda$ є не дихроїчні – для них в цій області $k_o(\lambda) = k_e(\lambda)$.

Опис установки

У даній роботі для дослідження спектрів поглинання кристалів використовують спектрофотометр, змонтований на базі монохроматсра УМ-2 (рис. 1).

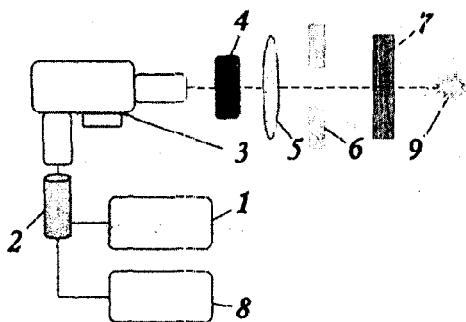


Рисунок 1 – Схема установки для дослідження спектрів поглинання твердих тіл фотоелектричним методом

Визначається окремо інтенсивність світла I , що проходить через кристал 6 і інтенсивність I_0 початкового світлового потоку (кристал відсутній, на його місце ставиться еталон – прозора скляна пластинка, чим враховується відбивання). Джерелом світла 9 служить лампа розжарення, яка живиться струмом від універсального джерела живлення УИП-1 (12,6 В) 8. Основною частиною установки є монохроматср УМ-2 3 прилад для утворення монохроматичного світлового пучка.

Приймачем монохроматичного випромінювання служить фото помножувач (ФЕП) 2 типу ФЭУ-39, який сполучений з мікроамперметром 1 для визначення фотоструму, що є пропорційним

інтенсивності світлового потоку, падаючого на фотокатод (в області лінійності ФЕП).

Для дослідження дихроїзму кристала на шляху променів світла, що йде від джерела 9, встановлюється поляризатор (наприклад, поляроїд), а досліджуваний кристал 6 монтується на шайбі. Поляроїд і шайба мають осі обертання, що збігаються з напрямом поширення світла.

Порядок виконання роботи

Дослідження $k = k(\lambda)$ для недихроїчних тіл.

1. Ознайомитися зі схемою спектрофотометричної установки та вивчити схему монохроматора. Ознайомитися з параметрами деталей, що входять в електричне коло установки.

2. Скласти таблицю спостережень, в якій n – показ на барабані механізму повороту призми монохроматора УМ-2, λ – довжина хвилі світла. Величини n та λ пов'язані згідно з паспортом приладу. У таблиці λ вписувати через 10 нм, починаючи з 420 нм до 630 нм.

Таблиця

n	λ , нм	Покази мікроамперметра		$T=I/I_0$	I_0/I	$D=\lg(I_0/I)$	$k'=D/I$	$\Delta k'/k'$
		I_0	I					

3. Ввімкнути електричну схему установки – після дозволу викладача. Перевірити юстування установки. Подати напругу на ФЕП – близько 600 В. Змінюючи λ в межах 420-630 нм, перевірити, чи відхилення стрілки мікроамперметра не перевищують 150 мкА. При необхідності ці відхилення можна зменшити шляхом зменшення вхідної щілини монохроматора.

4. Встановити на шляху світла, що йде з лампи досліджуваній зразок. Закрити вхідну щілину ковпачком. На ньому лінза створює зображення діафрагми зі зразком 6 (рис. 5), або діафрагми з еталонем. Встановити тотожність розташування цих зображень стосовно перехрестя ліній на ковпачку. Зняти ковпачок. Виміряти I та I_0 для усього діапазону 420-630 нм.

5. Обчислити для кожного значення λ величини T та $D = \lg \frac{1}{T}$.

Результати обчислень записати у таблицю спостережень.

6. Побудувати графіки залежностей $T = f_1(\lambda)$, $D = f_2(\lambda)$ та $k' = f_3(\lambda)$.

7. Розрахувати похибки вимірювань та провести аналіз отриманих результатів.

Дослідження дихроїзму $k_o = k_o(\lambda)$ та $k_e = k_e(\lambda)$ кристала турмаліну

1. Ознайомитися зі схемою спектрофотометричної установки та вивчити схему монохроматора. Ознайомитися з параметрами деталей, що входять в електричне коло установки.

2. Скласти таблицю спостережень, в якій n – показ на барабані механізму повороту призми монохроматора УМ-2, λ – довжина хвилі світла. Величини n та λ пов'язані згідно з паспортом приладу. У таблиці λ вписувати через 10 нм, починаючи з 420 нм до 630 нм.

Таблиця

n	λ , нм	Покази мікроамперметра			$I_n^{\leftrightarrow}/I_T^{\leftrightarrow}$	$I_n^{\rightarrow}/I_T^{\rightarrow}$	$D^{\leftrightarrow} = \lg(I_n^{\leftrightarrow}/I_T^{\leftrightarrow})$	$D^{\rightarrow} = \lg(I_n^{\rightarrow}/I_T^{\rightarrow})$	$k^{\leftrightarrow} = D^{\leftrightarrow}/l$	$k^{\rightarrow} = D^{\rightarrow}/l$	$\Delta k^{\leftrightarrow}/k^{\leftrightarrow}$	$\Delta k^{\rightarrow}/k^{\rightarrow}$
		$I_n^{\leftrightarrow}$	$I_T^{\leftrightarrow}$	$I_T^{\rightarrow}$								

3. Встановити ширину вхідної щілини монохроматора 1 мм. Закрити цю щілину ковпачком. Ввімкнути електричну схему установки після дозволу викладача. Подати на ФЭП напругу приблизно 920 В.

4. Встановити на шляху світла, що йде з лампи 9 поляризатор 7. Зняти ковпачок зі щілини, обертаючи барабан монохроматора, встановити його у положенні коли відхилення стрілки мікроамперметра буде 50-70 мкА. Обертаючи поляризатор навколо горизонтальної осі (у напрямку ходу світла, що йде від джерела),

знайти таке його положення, коли покази мікроамперметра є максимальними – це положення поляризатора має бути в усіх наступних вимірах фіксованим. При цьому у світлі, що пройшло через поляризатор, вектор $\vec{E}$ матиме напрям, який є горизонтальним до напрямку щілини монохроматора – відбито у позначеннях $I_n^{\leftarrow}, \dots, k^{\leftarrow}$ горизонтальною стрілкою.

5. Виміряти величини $I_n^{\leftarrow}$ для усіх λ діапазону 420-630 нм, де « n » означає «поляризатор». При проведенні вимірювань $I_n(\lambda)$ для $\lambda > 500$ нм покази мікроамперметра будуть перевищувати 150 мкА. Тому в області $\lambda = 500$ нм слід зменшити ширину вхідної щілини монохроматора до зменшення $I_n^{\leftarrow}(500 \text{ нм})$ у два рази. Те ж саме слід зробити при $\lambda = 530$ нм. Остаточню після вимірів усіх I_n ці зміни щілини слід врахувати. Максимальну ширину щілини в області $\lambda < 500$ нм позначимо b .

6. Встановити на шляху світла, що пройшло поляризатор і лінзу 5 перед вхідною щілиною, тримач турмаліну. Закрити щілину ковпачком. Знайти таке положення тримача турмаліну, коли світлова плямка на ковпачку за діаметром буде дещо більша за діаметр меншого кола на ковпачку.

7. Зняти ковпачок з щілини монохроматора. Встановити ширину щілини 8 мм. Обертаючи втулку-тримач турмаліну навколо горизонтальної осі, знайти таке його положення, коли показ мікроамперметра при ширині щілини b , буде максимальним. Це буде для даної λ максимальне значення $I_T^{\leftarrow}$ (T – означає «турмалін»).

8. Виміряти $I_T^{\leftarrow}$ для усіх λ . В області $\lambda = 520$ нм слід зменшити ширину щілини і далі діяти так, як в п. 6.

9. Відновити ширину щілини 8 мм. Обертаючи втулку-тримач турмаліну на кут 90° , отримаємо його позицію, коли $I_T^{\rightarrow}$ є мінімальним (слід цього домогтися). Це є позиція для вимірювання $I_T^{\rightarrow}$. Очевидно $I_T^{\rightarrow} < I_T^{\leftarrow}$.

10. Виміряти $I_T^{\rightarrow}(\lambda)$ при постійній ширині щілини 8 мм.

11. Розрахувати послідовно для всіх λ величини $\frac{I_n^{\leftarrow}}{I_T^{\leftarrow}}, \frac{I_n^{\rightarrow}}{I_T^{\rightarrow}}, \ln \frac{I_n^{\leftarrow}}{I_T^{\leftarrow}}, \ln \frac{I_n^{\rightarrow}}{I_T^{\rightarrow}},$

$k^{\leftarrow}, k^{\rightarrow}, \frac{\Delta k^{\leftarrow}}{k^{\leftarrow}}, \frac{\Delta k^{\rightarrow}}{k^{\rightarrow}},$ приймаючи $l = 0,1$ мм.

12. Побудувати графіки $k'^{-1} = k'^{-1}(\lambda) = k_e(\lambda)$, $k'^1 = k'^1(\lambda) = k_o(\lambda)$, де позначка «e» відповідає незвичайному променеві, а позначка «o» – звичайному променеві.

13. Порахувати $\frac{\Delta k'^{-1}}{k'^{-1}} = f(\lambda)$ та $\frac{\Delta k'^1}{k'^1} = \Psi(\lambda)$ і провести аналіз отриманих результатів.

Контрольні запитання

1. Записати та пояснити закон Бугера.
2. Які явища супроводжують проходження світла через речовину?
3. Як кількісно характеризуються явища, що супроводжують проходження світла через речовину і від чого вони залежать?
4. Що таке коефіцієнт екстинкції?
5. Розкрити фізичний зміст закону Бугера.
6. Що таке коефіцієнт пропускання?
7. Що таке пропускання?
8. Що таке оптична густина?
9. Що таке натуральний показник поглинання?
10. Які речовини називаються оптично анізотропними?
11. Які речовини називаються оптично ізотропними?
12. Яке явище називають дихроїзмом?

Лабораторна робота № 98

Дослідження явища розсіювання світла

Мета: ознайомитися з основними положеннями теорії розсіювання світла та методом турбидиметрії, визначити середній розмір колоїдних частинок.

Прилади: нітрат срібла, йодид калію, фотоколориметр КФК-2, кювети.

Теоретичні відомості

Явище розсіювання світла колоїдними системами спостерігав ще Фарадей (1857), який досліджував золь золота. Тиндаль встановив, що світлорозсіювання зручно спостерігати на темному фоні при пропусканні пучка світла через золь збоку. Особливо чітко воно видно при фокусуванні світла всередині колоїдної системи, коли утворюється світлий конус (конус Тиндаля). Саме це явище часто називають ефектом Тиндаля. В подальшому було встановлено, що світлорозсіювання не є особливістю гетерогенно-дисперсних систем. У повністю однорідному середовищі світло не повинно розсіюватися. У відповідності з принципом Гюйгенса кожна точку середовища, до якої дійшов хвильовий фронт, можна розглядати як нове джерело коливань. Ці вторинні коливання підсилюють один одного у напрямі поширення хвилі і послаблюють в інших напрямках. Розглядаючи таким чином поширення хвильового фронту, можна вважати, що в однорідному ізотропному середовищі він завжди залишається геометрично подібним собі, наприклад, плоска хвиля буде залишатися плоскою. Якщо на шляху поширення плоскої хвилі з'являється місце за неоднорідність (з іншим показником заломлення), то кожна точка неоднорідності стане самостійним центром коливань. Виникає фронт хвилі, напрям якого змінюється і залежить від розміру неоднорідності. Якщо розмір неоднорідності значно більший довжини хвилі, то, в основному, спостерігається відбивання згідно

відповідних законів. При довжині хвилі більшій за розмір неоднорідності, коливання розсіюється по всіх напрямках. В цьому випадку коливання, які виходять від кожної точки неоднорідності, не мають визначених різниць фаз і більше або менше підсилюють один одного в усіх напрямках. Так виникає розсіювання світла в усі напрямки. Розсіювання можливе тільки тоді, коли неоднорідності знаходяться на відстанях один від одного більших, ніж довжина хвилі. Самі неоднорідності повинні мати розміри менші довжини хвилі.

Таким чином, розсіювання світла виникає тільки в неоднорідному середовищі. Світлові хвилі, дифрагуючи на неоднорідностях середовища, дають дифракційну картину, яка характеризується досить рівномірним розподілом інтенсивності в усіх напрямках. Таку дифракцію на дрібних неоднорідностях називають розсіюванням світла.

Середовища з явно вираженою оптичною неоднорідністю називаються мутними. До них належать: дими, тобто підвішені дуже дрібні частинки в газах; тумани – підвішені дрібні краплі рідини в газі; суспензії, утворені плаваючими в рідині твердими частинками; емульсії, тобто дрібні краплини однієї рідини в іншій, яка не розчиняє першу; тверді тіла – перламутр, опал, молочне скло та ін.

Теорія розсіювання для сферичних частинок, які не поглинають світло була розвинута Релеєм.

Згідно теорії, розвинутій Релеєм, припускається, що сферичні частинки в дисперсній системі знаходяться настільки далеко одна від одної, що можна знехтувати вторинним розсіюванням, і тому інтенсивність розсіяного світла пропорційна числу частинок в одиниці об'єму, або чисельній концентрації дисперсної системи ν . Формула Релея для інтенсивності світла I_p , розсіяного одиницею об'єму дисперсної системи з сферичними частинками, значно меншими довжини хвилі падаючого світла (не більше 0,1 λ) на відстані R від частинок у напрямі, що складає кут θ з напрямом поширення випромінювання, має вигляд

$$I_p = I_0 \left(F \frac{\nu - \nu^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \theta) \right), \quad (1)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого світла.

Функція від показника заломлення F визначається співвідношенням

$$F = \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2. \quad (2)$$

Звідси випливає, що розсіювання може бути відсутнім і в неоднорідному середовищі, якщо показники заломлення дисперсної фази і дисперсного середовища однакові.

Навіть очищені від сторонніх домішок і забруднень рідини і гази, яких не можна назвати мутними середовищами, у деякій степені розсіюють світло. Мандельштам і Смолуховський встановили, що причиною появи оптичних неоднорідностей є в цьому випадку флуктуації густини (спостережувані в межах малих об'ємів відхилення густини від її середнього значення). Ці флуктуації викликані неупорядкованим хаотичним рухом молекул речовини; тому обумовлене ними розсіювання світла називається молекулярним.

Молекулярним розсіюванням пояснюється голубий колір неба. Безперервно виникаючі в атмосфері, внаслідок неупорядкованого молекулярного руху, місця згущення і розрідження повітря розсіюють сонячне світло. При цьому згідно закону Релея голубі і сині промені розсіюються сильніше, ніж жовті і червоні, обумовлюючи голубий колір неба. Коли Сонце знаходиться низько над горизонтом, промені які поширюються безпосередньо від нього проходять велику товщину розсіювального середовища, в результаті чого вони стають збагаченими більшими довжинами хвиль. По цій причині небо при заході Сонця забарвлюється в червоні тони.

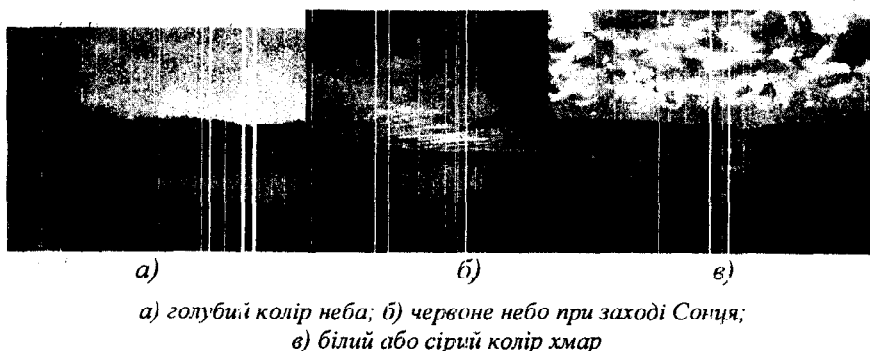


Рисунок 1. – Наслідки розсіювання сонячного світла в атмосфері Землі

Закономірність, виведена Релеєм, перестає виконуватися, якщо розміри частинок дисперсної фази наближаються до довжини хвилі падаючого світла.

Закон Релея не виконується для дисперсних систем з частинками, які поглинають світло. Селективно поглинають світло, наприклад, металеві частинки, що обумовлює, крім того, складну залежність кольору пройденого світла від розмірів частинок.

Частинки повинні бути не електропровідні і мати сферичну форму.

До основних методів дослідження, які використовують явище розсіювання світла, відноситься ультрамікроскопія, турбидиметрія і нефелометрія.

Турбидиметричний метод дослідження базується на вимірюванні інтенсивності світла, яке пройшло через дисперсну систему. Інтенсивність падаючого світлового потоку послаблюється в результаті його розсіювання дисперсною системою. Якщо прийняти розсіяне світло за фіктивно поглинуте, то це дозволяє отримати просте співвідношення, аналогічне закону Бугера-Ламберта-Бєра для поглинання світла молекулярними розчинами. Послаблення інтенсивності світла dI пропорційне інтенсивності падаючого світла I і приросту товщини шару досліджуваної системи dx :

$$dI = -I dx, \quad (3)$$

де τ – коефіцієнт пропорційності, який характеризує здатність системи розсіювати світло, його називають мутністю.

Після інтегрування в межах від I_0 до I_n і відповідно від $x = 0$ до l – товщини шару системи отримаємо

$$I_n = I_0 e^{-\tau l}, \quad (4)$$

де I_n – інтенсивність світла, яке пройшло через систему.

Мутність пов'язана з оптичною густиною D співвідношенням

$$D = \ln \left(\frac{I_0}{I_n} \right) = \tau l. \quad (5)$$

Перевагою турбидиметричного методу дослідження є простота підготовки і проведення досліджень. Для турбидиметричних досліджень можна використовувати широко поширені фотоколориметри, призначені для визначення оптичної густини кольорових молекулярних розчинів. Точність турбидиметричного методу невисока, оскільки інтенсивність розсіювання (відносно мала величина) визначається по різниці двох значень інтенсивностей падаючого і прохідного світла. Використання методу обмежується дисперсними системами, які відрізняються порівняно високою мутністю.

Нефелометричний метод дослідження базується на вимірюванні інтенсивності світла, розсіяного дисперсною системою. Більш висока чутливість і точність цього методу у порівнянні з тою яка досягається в турбидиметрії дозволяє визначити не тільки концентрацію і розмір частинок в золях, але й форму частинок, взаємодії між частинками і інші властивості дисперсних систем. В основі нефелометрії лежить рівняння Релея. Для вимірювання використовуються спеціальні прилади – нефелометри.

Опис установки

Турбидиметричний метод базується на вимірюванні інтенсивності світла, яке пройшло через дисперсну систему.

Згідно теорії Релея інтенсивність розсіяного світла в безколірному золі пропорційна числу частинок в одиниці об'єму і розміру дисперсних частинок:

$$I_p = kI_0\lambda^{-n}, \quad (6)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого світла; k – константа, яка залежить від показників заломлення дисперсного середовища і дисперсної фази; λ – довжина хвилі падаючого світлового пучка; n – величина, пропорційна розміру частинок.

Для визначення інтенсивності розсіювання в роботі за допомогою фотоколориметра (рис. 2) вимірюється світло пропускання:

$$T\% = \frac{I}{I_0} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де I – інтенсивність пройденого світла.



Рисунок 2 – Фотоколориметр

Можна розрахувати величину світлорозсіювання:

$$R\% = 100\% - T\%, \quad (8)$$

Величина світлорозсіювання за визначенням

$$R\% = \frac{I_p}{I_0} \cdot 100\%, \quad (9)$$

З формул (6) і (9) отримуємо

$$I_p = R\% \cdot I_0 \cdot 100\% = I_0 k \lambda^{-n}, \quad (10)$$

$$R\% \cdot 100\% = k \cdot \lambda^{-n}. \quad (11)$$

Прологарифмуємо рівняння (10):

$$\lg R\% \cdot 2 = \lg(k \lambda^{-n}), \quad (12)$$

$$2 \lg R\% = \lg k - n \lg \lambda, \quad (13)$$

$$\lg R\% = \frac{\lg k}{2} - \frac{n \lg \lambda}{2}. \quad (14)$$

Якщо концентрація частинок в розчині не змінюється, а довжина хвилі відома, то величину n можна розрахувати з рівняння (11). Для

цього необхідно визначити світлорозсіювання при проходженні світлового пучка через колсідну систему з використанням різних світлофільтрів при різних довжинах хвиль.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з інструкцією по експлуатації фотоколориметра КФК-2.

2. В колбу на 50 мл наливають 10 мл 0,01 Н розчину йодиду калію і при сильному перемішуванні додають 7 мл 0,01 Н розчину нітрату срібла.

3. В ліву комірку фотоколориметра на весь час експерименту встановити кювету з дистильованою водою, в праву кювету – з золам.

4. Провести вимірювання на фотоколориметрі з світлофільтрами № 3...8 ($\lambda = 400 - 750$ нм) у відповідності до інструкції по експлуатації приладу.

5. Результати експерименту занести в таблицю.

Довжина хвилі λ , нм	$\lg \lambda$	$T, \%$	$R\% = 100 - T\%$	$\lg R\%$
400				
440				
490				
540				
590				
670				
750				

6. Отримані дані представити у вигляді графіка залежності в координатах $\lg R - \lg \lambda$ приймаючи, що в безколірному золі послаблення світлового потоку обумовлено тільки світлорозсіюванням.

7. По куту нахилу отриманої прямої визначити n – показник степені в рівнянні Релея для інтенсивності розсіяного світла.

8. З графіка залежності $\frac{n}{2} = f(r)$, де $\frac{n}{2}$ – в рівнянні (11), визначити середній розмір частинок (рис. 3).

9. Зробити висновки. Оформити звіт.

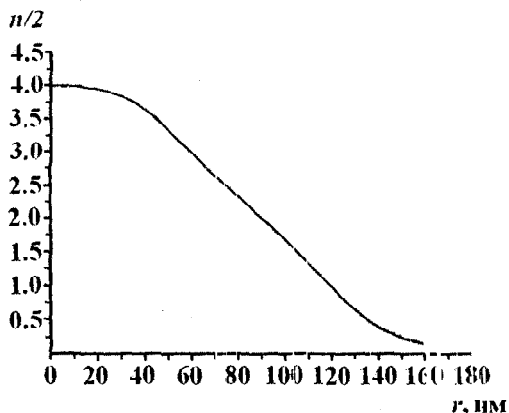


Рисунок 3 – Визначення середнього розміру колоїдних частинок

Контрольні запитання

1. Які явища супроводжують проходження світла через речовину?
2. Як кількісно характеризуються явища, що супроводжують проходження світла через речовину і від чого вони залежать?
3. Записати та пояснити закон Бугера.
4. Що таке коефіцієнт екстинкції?
5. Як визначається величина світлорозсіювання?
6. Які середовища називаються мутними? Навести приклади.
7. Що таке коефіцієнт пропускання?
8. Що таке оптична густина?
9. Які є методи дослідження, що використовують явище розсіювання світла? Суть цих методів.
10. У чому полягає суть теорії розсіювання Релея? Межі застосування теорії Релея.
11. Яке розсіювання називається молекулярним?
12. Які природні явища обумовлені розсіюванням світла? Чому?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бушок Г.Ф., Венер Є.Ф. Курс фізики. У 3-х книгах.: Навчальний посібник. Кн. 3. Оптика. Фізика атома та атомного ядра. – К.: Вища школа, 2003.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. Навчальний посібник для вищих технічних закладів. Т. 3. Оптика. Атомна і ядерна фізика. – К.: Техніка, 2006.
3. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М. та ін. Курс фізики: Підручник. – Львів: Афіша, 2003.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. – К.: Радянська школа, 1961.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 5 т. – М.: Наука, 1974-1989. – Т. 4: Оптика. – 1980.
6. Савельев И.В. Общий курс физики: В 3 т. Т. 3: Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, – 1971.
7. Годжаев Н.М. Оптика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1977.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // Изд. 2-е. Перевод с англ. – М.: Наука, 1973.
9. Кучерук І.М., Душенко В.П., Андріанов В.М. Обробка результатів фізичних вимірювань. – К.: Вища шк., 1981.
10. Бутиков Е.И. Оптика: Учеб. пособие для вузов / Под. ред. Н.И.Калитеевского. – М.: Высш. шк., 1986.
11. Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. Physical Optics. – Oxford: Clarendon Press, 1997.
12. Загальна фізика: Лабораторний практикум.: Навч. Посібник / В.М.Барановський, П.В.Бережний, І.Т.Горбачук та ін.; За заг. ред. І.Т.Горбачука. – К.: Вища шк., 1992.