

СУЧАСНА ОПТИКА

Методичні вказівки
до лабораторних робіт
для студентів фізичного факультету,
що навчаються за спеціальністю «Оптика»

Київ - 2025

ВСТУП

Оптика — один із базових розділів фізики, що вивчає властивості світла та його взаємодію з речовиною. У сучасних науці та технологіях оптичні методи відіграють важливу роль — вони використовуються як у фундаментальних дослідженнях, так і в прикладних сферах: від телекомунікацій і медичної діагностики до оптоелектроніки й нанотехнологій.

Цей лабораторний практикум розроблений для ознайомлення з основними експериментальними методами в оптиці. Він є невід'ємною частиною навчального процесу для студентів, які спеціалізуються в галузі оптики, і слугує їхнім першим практичним досвідом у майбутній професійній діяльності.

Основна мета практикуму — не лише продемонструвати базові фізичні явища, а й навчити фундаментальним навичкам, необхідним для проведення точних вимірювань, аналізу експериментальних даних, оцінки похибок та формулювання науково обґрунтованих висновків. Ці компетенції є ключовими для будь-якого фахівця-оптика.

Практикум також адаптований для учнів старших класів, які мають відповідну фізико-математичну підготовку. Це надає їм можливість отримати уявлення про прикладні аспекти оптики та набути практичного досвіду до вступу до вищого навчального закладу.

Особливістю посібника є акцент на самостійність і практичну роботу. Теоретичний матеріал подається стисло — студенти заохочуються доповнювати його за допомогою навчальної та наукової літератури. У кожному розділі подано запитання для самоперевірки й творчі завдання, що стимулюють аналітичне мислення та поглиблене розуміння теми.

Назва курсу — «Сучасна оптика» — відображає як змістовне наповнення, так і підхід до організації лабораторних занять. Практикум передбачає використання сучасного обладнання: лазерів, світлодіодних джерел, цифрових відеокамер, комп'ютерів та іншої техніки, що відповідає актуальним освітнім і технологічним стандартам.

Лабораторія, у якій проводяться заняття, обладнана відповідно до вимог сучасної університетської освіти: наявність мультимедійних засобів, інформаційних стендів та продумане робоче середовище полегшують засвоєння матеріалу та сприяють зацікавленості у вивченні оптики.

ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ТА ПРАВИЛА ПОВЕДІНКИ СТУДЕНТІВ У ФІЗИЧНОМУ ПРАКТИКУМІ ІЗ СУЧАСНОЇ ОПТИКИ

1. Загальні положення

1.1. Дана інструкція встановлює обов'язкові для виконання вимоги техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт у фізичному практикумі з сучасної оптики.

- 1.2. До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які:
- пройшли вступний інструктаж із техніки безпеки;
 - ознайомлені з правилами експлуатації обладнання;
 - мають допуск викладача до виконання конкретної роботи.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Ознайомитись з методичними вказівками до лабораторної роботи та інструкцією до приладів.

2.2. Перевірити справність обладнання, цілісність електропроводки, наявність заземлення.

2.3. У разі виявлення несправностей – негайно повідомити викладача.

2.4. Забороняється самостійно підключати або ремонтувати обладнання без дозволу викладача.

3. Вимоги безпеки під час виконання роботи

3.1. Працювати лише на своєму робочому місці та відповідно до вказівок викладача.

3.2. Дотримуватись обережності при роботі з лазерними установками:

– не спрямовувати лазерний промінь у бік очей (своїх чи інших осіб);

– не дивитися в об'єктив лазера;

– використовувати лазери лише у встановленому режимі.

3.3. Не торкатися працюючих приладів мокрими руками.

3.4. Не залишати увімкнене обладнання без нагляду.

3.5. Дотримуватись правил електробезпеки:

– не перевантажувати мережу;

– не змінювати електричні схеми без дозволу.

3.6. При використанні оптичних компонентів (лінзи, дзеркала, оптичні столи) поводитись обережно, щоб уникнути їх пошкодження або неправильного налаштування.

3.7. У разі виникнення аварійної ситуації (коротке замикання, задилення, поранення тощо) – негайно повідомити викладача та діяти

відповідно до його вказівок.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. Вимкнути електроприлади та лазери, переконатись, що обладнання охолгло (якщо це передбачено конструкцією).

4.2. Акуратно привести робоче місце до порядку: прибрати обладнання, оптичні елементи, витерти пил.

4.3. Повідомити викладача про завершення роботи та здати робоче місце.

4.4. Зафіксувати у звіті всі спостереження, навіть ті, що могли бути спричинені несправністю приладів

5. Забороняється

– Використовувати прилади та обладнання без дозволу викладача.

– Самостійно усувати несправності.

– Виконувати дії, що можуть спричинити оптичні або електричні ушкодження.

– Працювати в аудиторії без нагляду відповідального працівника або викладача.

– Використовувати сторонні предмети у схемах або оптичних установках.

6. Відповідальність

6.1. Студенти, які порушують вимоги техніки безпеки, можуть бути відсторонені від виконання лабораторної роботи.

6.2. У разі пошкодження обладнання з вини студента, він може бути зобов'язаний відшкодувати збитки згідно з внутрішніми правилами навчального закладу.

6.3. У разі нещасного випадку — негайно звернутись до викладача, викликати медичну допомогу.

ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. Геометрична оптика

- 1.1. Визначення фокусної відстані тонкої лінзи методом Бесселя.
- 1.2. Визначення фокусної відстані та положення головних площин товстої лінзи.
- 1.3. Визначення фокусної відстані увігнутої лінзи.

2. Інтерференція, дифракція

- 2.1. Визначення довжини хвилі світла за допомогою біпризми Френеля.
- 2.2. Визначення радіусу кривини сферичної лінзи за допомогою кільця Ньютона.
- 2.3. Дифракція Фраунгофера на щілині.
- 2.4. Дифракція Фраунгофера на дифракційній ґратці.

3. Поляризація

- 3.1. Перевірка закону Малюса.
- 3.2. Вимірювання кута Брюстера.

4. Рефракція та дисперсія

- 4.1. Визначення залежності показника заломлення розчину від концентрації.
- 4.2. Вимірювання показника заломлення та дисперсії спектральної призми.
- 4.3. Визначення показника заломлення скляної пластинки за допомогою інтерферометра Майкельсона.

1. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

1.1 Визначення фокусної відстані тонкої лінзи методом Бесселя

Мета роботи: визначити фокусну відстань тонкої лінзи методом Бесселя, порівняти його з іншими поширеними методами та обґрунтувати його переваги.

Короткі теоретичні відомості

Лінза є оптичним елементом, що має дві поверхні, з яких хоча б одна є поверхнею обертання (зазвичай, сферичною), на яких заломлюється світло.

Тонка лінза — це оптична лінза, товщина якої набагато менша за радіуси кривини її сферичних поверхонь. Усі заломлення світла вважаються такими, що відбуваються в одній площині, яку називають площиною лінзи. У цій площині знаходиться оптичний центр — точка, через яку світлові промені проходять без заломлення.

Фокусна відстань (f) тонкої лінзи — це відстань від її оптичного центру до головного фокуса. Головний фокус (F) — це точка на головній оптичній осі, в якій:

- Збираються промені, що падають на лінзу паралельно до головної оптичної осі (для збиральної лінзи).

- Перетинаються продовження променів, що розходяться після проходження лінзи (для розсіювальної лінзи).

Для збиральної лінзи фокусна відстань вважається додатною ($f > 0$), а для розсіювальної — від'ємною ($f < 0$).

Вимірювання фокусної відстані тонких лінз можна здійснити різними методами, які ґрунтуються на принципах геометричної оптики, а саме на формулі тонкої лінзи. Ця формула пов'язує відстань від лінзи до предмета a , відстань від лінзи до зображення b та саму фокусну відстань f :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

На основі цієї формули існує кілька експериментальних методів, що дозволяють визначити f .

Метод далекого предмета

Вимірюється відстань від лінзи до екрана при фокусуванні на дуже

віддалений предмет. Ця відстань i буде наближено дорівнювати фокусній - f . У такий спосіб грубо оцінюють фокусну відстань лінз та невеликих об'єктивів. Замість віддаленого предмета можна використати малопотужний лазер, який, як відомо, випромінює плоску хвилю. Точка, у якій буде сфокусовано лазерний промінь, відповідатиме фокусу лінзи.

Метод тонкої лінзи.

Вимірюються відстані від предмета до лінзи a та від лінзи до зображення b ; для знаходження f використовується рівняння тонкої лінзи (1). Недолік цього методу полягає у значній похибці вимірювання абсолютних відстаней, складність точного визначення положення центру лінзи, особливо для реальних або асиметричних лінз.

Метод Бесселя.

Метод базується на принципі оборотності ходу світлових променів: якщо відстань між предметом і екраном $L > 4f$, то існує два симетричних положення лінзи, де зображення буде різного масштабу, але однаково чітке. Відповідні оптичні схеми показано на рис.1.

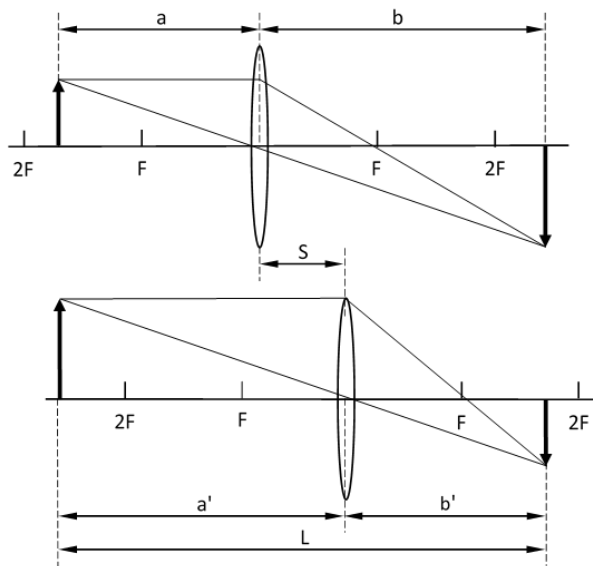


Рис.1

Предмет і екран фіксують на відстані $L > 4f$. Лінзу переміщують між ними й знаходять два положення, у яких на екрані утворюється чітке

зображення (одне збільшене, інше зменшене). Відстань між цими положеннями — S . Формула для фокусної відстані має вигляд¹:

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

Головна перевага методу Бесселя в тому, що не потрібно точно знати абсолютне положення лінзи — достатньо виміряти лише відстань між двома положеннями, що значно зменшує систематичні похибки.

Порядок виконання лабораторної роботи

- Оцініть фокусну відстань тонкої лінзи за допомогою методу далекого предмета.
- Встановіть предмет (наприклад, освітлену сітку) та екран на оптичній лаві на фіксованій відстані L (переконайтесь, що $L > 4f$).
- Встановіть лінзу між предметом і екраном у тримачі, щоб її можна було вільно переміщати вздовж лави.
- Переміщуйте лінзу, поки на екрані не з'явиться чітке зображення предмета (збільшене або зменшене).
- Зафіксуйте положення лінзи за шкалою лави (x_1).
- Продовжуйте переміщати лінзу в тому ж напрямку, поки знову не отримаєте чітке зображення предмета (тепер зображення буде протилежного масштабу).
- Зафіксуйте друге положення лінзи (x_2).
- Визначте відстань між двома положеннями лінзи: $S = |x_2 - x_1|$.
- Виміряйте відстань між предметом і екраном L .
- Підставте значення L і S у формулу (2).
- Повторіть вимірювання кілька разів для підвищення точності.
- Обчисліть середнє значення f та оцініть стандартне відхилення.

1.2. Визначення фокусної відстані та положення головних площин товстої збірної лінзи

Мета роботи: визначити фокусну відстань та положення головних площин за способом Аббе.

¹ Більшість робочих формул наведено без виведення. Умовою успішного захисту відповідної лабораторної роботи є вміння самостійно вивести ці формули. Необхідний теоретичний матеріал подано в основних джерелах [1–3].

Короткі теоретичні відомості

Товста лінза — це оптична лінза, товщина якої є співмірною або більшою за радіуси кривини її сферичних поверхонь. У цьому випадку, на відміну від тонкої лінзи, не можна вважати, що заломлення світла відбувається в одній площині. Промінь світла заломлюється двічі: спочатку на першій поверхні лінзи, а потім — на другій.

Основна відмінність полягає в тому, що для опису оптичних властивостей тонкої лінзи достатньо одного параметра — її фокусної відстані, яка відраховується від її оптичного центру. У моделі тонкої лінзи її товщиною нехтують, і всі заломлення умовно відносять до однієї центральної площини.

Для товстої лінзи ця модель не працює. Її властивості описуються не однією, а двома головними площинами та двома відповідними фокальними відстанями. Заломлення променів, що проходять крізь товсту лінзу, зводиться до уявної заміни лінзи двома площинами, які розташовані на певній відстані одна від одної.

Головні площини (H_1, H_2) — це дві уявні площини, перпендикулярні до головної оптичної осі, які використовуються для спрощеного опису ходу променів у товстій лінзі. Кожна з цих площин є спряженою з іншою таким чином, що лінійне (поперечне) збільшення для них дорівнює $+1$.

Фокальні відстані товстої лінзи — це відстані від головних площин до відповідних головних фокусів. Передня фокальна відстань f_1 — це відстань від першої головної площини (H_1) до переднього головного фокуса (F_1) . Передній головний фокус — це точка на оптичній осі, з якої виходять промені, що після заломлення в лінзі стають паралельними до оптичної осі. Задня фокальна відстань f_2 — це відстань від другої головної площини (H_2) до заднього головного фокуса (F_2) . Задній головний фокус — це точка на оптичній осі, в якій збираються (або з якої розходяться) промені, що падають на лінзу паралельно до оптичної осі. Побудова ходу променів у товстій лінзі з відомими головними фокусами і головними площинами, показано на рис.2.

Нехай предмет розміром Y знаходиться на відстані x_1 від головного фокусу F_1 товстої збірної лінзи. Його зображення матиме розмір y_1

Лінійне збільшення становитиме $\beta_1 = \frac{y_1}{Y} = \frac{f_1}{x_1}$. Для іншого положення пре-

дмета (x_2) лінійне збільшення буде, відповідно, $\beta_2 = \frac{f_1}{x_2}$. Звідси неважко

отримати вираз для фокусної відстані:

$$f_1 = \frac{\Delta}{Y} \cdot \frac{y_1 \cdot y_2}{y_2 - y_1}; \quad (3)$$

де $\Delta = x_2 - x_1$ - переміщення предмета.

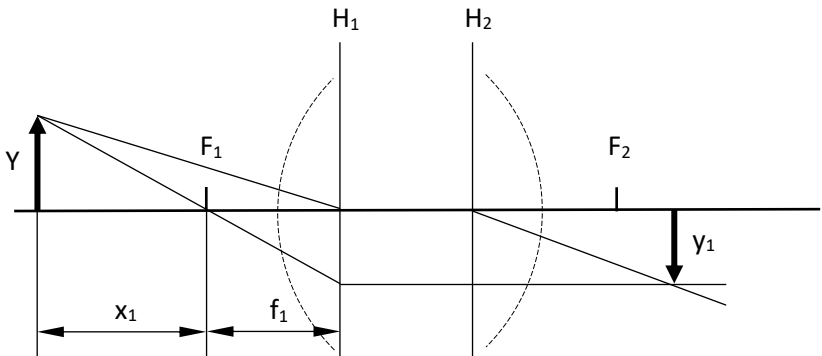


Рис.2

Для знаходження положення головних площин потрібно ще визначити положення головних фокусів F_1 та F_2 . Для цього використовують основну ідею «Методу далекого предмета». Якщо розташувати предмет у фокальній площині лінзи, то зображення цього предмета буде на нескінченності, або у фокальній площині об'єктива зорової труби, налаштованої на нескінченність.

Порядок виконання лабораторної роботи

- Послідовно встановити на оптичній лаві: «предмет» - освітлену сітку зі шкалою, досліджувану товсту збірну лінзу, екран зі шкалою, зорову трубу, налаштовану на нескінченність.

- Зафіксувати перше положення «предмета» - x_1 .

- Визначити по шкалі на екрані лінійні розміри зображення - y_1 .

- Зробити аналогічні вимірювання (x_2, y_2) для другого положення предмета.

- За допомогою виразу (3) порахувати фокусну відстань f .

- Спостерігаючи крізь зорову трубу, налаштовану на нескінченність, розташовують предмет у передній фокальній площині товстої лінзи
- Знайшовши положення фокальних площин товстої лінзи, відкладають від них відрізки, рівні фокусним відстаням f , і визначають положення головних площин товстої лінзи відносно показника її на оптичній лаві.

1.3 Визначення фокусної відстані увігнутої лінзи

Мета роботи: визначити фокусну відстань увігнутої (розсіювальної) лінзи двома способами.

Короткі теоретичні відомості

Існує два способи визначити фокусну відстань розсіювальної лінзи, оскільки її не можна виміряти безпосередньо. Це пов'язано з тим, що вона створює уявні зображення дійсних предметів.

Перший спосіб передбачає послідовне використання двох лінз: допоміжної (збиральної) та досліджуваної (розсіювальної). На оптичній лаві розміщується збиральна лінза, при цьому на екрані формується дійсне зображення об'єкта, яке слугуватиме уявним предметом для розсіювальної лінзи. У простір між збиральною лінзою та зображенням встановлюється розсіювальна лінза. В результаті, зображення зміщується на нову позицію (Рис. 3). За допомогою шкали на оптичній лаві фіксуються координати: початкового зображення; розсіювальної лінзи; кінцевого зображення. На основі цих даних обчислюються оптичні відстані: відстань від уявного об'єкта до розсіювальної лінзи; відстань від розсіювальної лінзи до кінцевого зображення. З урахуванням зміни знаку для уявного предмета, для випадку розсіювальної лінзи формула (1) набуває вигляду:

$$\frac{1}{b'} = \frac{1}{a'} + \frac{1}{f'}, \quad (4)$$

з якої визначається фокусна відстань.

У другому способі для більш точного визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи застосовується метод автоколімації. У цьому методі використовується допоміжна збірна лінза та зорова труба, налаштована на нескінченність.

Якщо зображення від збірної лінзи збігається з фокусом розсіювальної лінзи ($b = a' = -f'$), то, згідно формули (3), $b' \rightarrow \infty$, тобто, промені

після розсіювальної лінзи йдуть паралельно.

Паралельність променів можна перевірити за допомогою зорової труби, попередньо налаштованої на нескінченність. Знаючи положення розсіювальної лінзи та положення зображення, яке слугує її фокусом, можна розрахувати фокусну відстань f за формулою: $f = |d - b|$, де d - відстань від збірної лінзи до розсіювальної, а b - відстань від збірної лінзи до зображення.

Цей метод дозволяє мінімізувати похибки вимірювання, оскільки фокусна відстань визначається непрямым способом через точну фіксацію положення паралельного пучка.

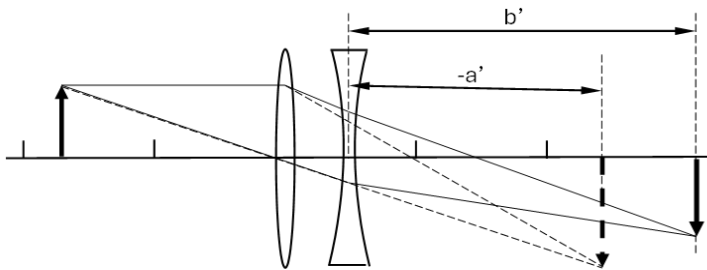


Рис.3

Порядок виконання лабораторної роботи

- За допомогою збиральної лінзи отримайте чітке зображення предмета на екрані, зафіксуйте його положення b .
- Встановіть розсіювальну лінзу після збиральної, зафіксуйте її положення $d = b - a' \Rightarrow a' = b - d$.
- Переміщуючи екран, добийтеся чіткого зображення предмета.
- Виміряйте відстань від другої лінзи до екрана b' .
- Визначте фокусну відстань системи лінз за формулою (3).
- Отримайте чітке зображення предмета на екрані за допомогою збиральної лінзи.
- Зафіксуйте відстань від лінзи до зображення b .
- Розташуйте розсіювальну лінзу після збірної таким чином, щоб на виході утворився паралельний пучок. Для перевірки паралельності використайте зорову трубу налаштовану на нескінченність.
- Переміщенням розсіювальної лінзи досягніть максимальної чіткості зображення у зоровій трубці. Зафіксуйте відстань між лінзами d .

- Розрахуйте фокусну відстань f' за формулою: $f' = |d - b|$, де d
- відстань від збірної лінзи до розсіювальної, а b - відстань від збірної лінзи до зображення.

Контрольні питання

1. Залежність оптичної сили тонкої лінзи від матеріалу та середовища. Як зміниться оптична сила тонкої двоопуклої лінзи, якщо її перенести з повітря у воду? Які фактори, окрім показника заломлення води, будуть впливати на її нову оптичну силу?

2. Формування зображень тонкою лінзою. Об'єкт розташований на відстані $2f$ від збиральної тонкої лінзи. Опишіть характеристики отриманого зображення (дійсне/уявне, пряме/перевернуте, збільшене/зменшене, розташування). Як зміниться зображення, якщо об'єкт перемістити ближче до фокусної площини, але залишити позаду фокуса?

3. Порівняння тонкої та товстої лінзи. У чому полягає принципова відмінність між тонкою та товстою лінзою з точки зору їхніх оптичних властивостей? Які поняття необхідно ввести для опису товстої лінзи, що є зайвими для тонкої?

4. Головні площини товстої лінзи. Яке фізичне значення мають головні площини товстої лінзи? Чому їх розташування відіграє ключову роль при розрахунку оптичних систем з товстими лінзами, і як їхнє розташування може вплинути на ефективну фокусну відстань?

5. Побудова зображень товстою лінзою. Якщо ви знаєте положення головних площин та фокусів товстої лінзи, як побудувати хід променів та знайти положення зображення об'єкта? Порівняйте цей процес з побудовою для тонкої лінзи.

6. Система з двох тонких лінз: збиральна та розсіювальна. Розглянемо систему з двох тонких лінз: збиральної з фокусною відстанню f_1 та розсіювальної з фокусною відстанню $f_2 < 0$, розташованих на деякій відстані d одна від одної. Які можливі конфігурації такої системи (залежно від f_1, f_2, d) можуть призвести до того, що вся система діятиме як збиральна лінза? Наведіть приклад використання такої комбінації.

7. Телескопічна система. Опишіть, як можна створити просту телескопічну систему (систему, яка формує зображення віддалених об'єктів у нескінченності або дуже далеко) використовуючи дві тонкі лінзи. Які вимоги до їхніх фокусних відстаней та відстані між ними? Які переваги та недоліки такої системи?

8. Аберації та їх корекція в лінзових системах. Які основні аберації (окрім хроматичної) притаманні простим лінзам? Як інженери-оптики намагаються мінімізувати ці аберації у складних лінзових системах (наприклад, у фотооб'єктивах), не вдаючись до використання асферичних поверхонь?

9. Оптична сила системи лінз. Якщо дві тонкі лінзи з оптичними силами D_1 та D_2 дотично складені одна з одною, яка буде оптична сила цієї комбінованої системи? Чи завжди ця формула застосовна, якщо лінзи не дотичні, а розташовані на деякій відстані? Поясніть чому.

10. Вибір лінзи для конкретних задач. Для яких оптичних приладів (наприклад, лупа, мікроскоп, телескоп) принципово важливо використовувати лінзи з максимальною світлосилою? Якими фізичними параметрами лінзи визначається її світлосила, і чому це важливо для згаданих приладів?

Творче завдання

Запропонуйте принципову схему простої оптичної системи, яка мала б таку властивість: відстань між площиною об'єкта та площиною його дійсного зображення залишається постійною, незалежно від положення самої системи на оптичній осі між площиною предмету та площиною зображення. Обґрунтуйте, чому саме така конфігурація забезпечує цю "інваріантність". Виведіть співвідношення між фокусною відстанню лінз та відстанню між об'єктом і зображенням, за якого це працює.

Сформулюйте конкретну практичну задачу, де властивість інваріантності відстані між об'єктом і зображенням була б принципово важливою. Поясніть, як ця властивість спрощує або покращує процес вимірювання.

2. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, ДИФРАКЦІЯ

2.1. Визначення довжини хвилі світла за допомогою біпризми Френеля

Мета роботи: ознайомитися з явищем інтерференції світла; експериментально отримати інтерференційну картину за допомогою біпризми Френеля; визначити довжину хвилі світла, використовуючи виміряні параметри інтерференційної картини

Короткі теоретичні відомості.

Для спостереження інтерференції світла мають бути дотримані певні умови:

- Вихідне джерело світла повинно мати високий ступінь монохроматичності, що визначається відношенням $\lambda / \Delta\lambda$ ($\Delta\lambda$ - ширина смуги випромінювання, λ - центральна довжина хвилі цієї смуги).

- Когерентні світлові хвилі отримують поділом хвилі на дві або більше частин, які приходять в точку накладання різними шляхами.

Одним з інструментів для розділення хвилі на дві когерентні

частини є біпризма Френеля. Вона складається з двох скляних призм з малими кутами заломлення (близько десятків кутових хвилин), складених своїми основами. Принципова схема ходу променів від точкового джерела S в біпризмі Френеля показана на рис. 4.

Призми відхиляють промені у різних напрямках, таким чином, утворюються два уявних джерела світла S_1 та S_2 . Промені від цих джерел перекриваються в області екрану, де утворюють інтерференційну картину у вигляді системи світлих і темних смуг.

За умови $L \gg d$ ширина інтерференційної смуги (відстань між сусідніми максимумами) визначається як:

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot L}{d}, \quad (5)$$

де: Δx - ширина інтерференційної смуги, λ - довжина хвилі світла, L - відстань від уявних джерел до екрану, d - відстань між уявними джерелами (визначається параметрами біпризми). За допомогою цієї формули можна визначити довжину хвилі.

При використанні у якості джерела світла малопотужного лазера, слід врахувати, що сформувати точкове джерело можна, пропустивши лазерний пучок через короткофокусну лінзу (див. Роботу 1.1). Тобто, задній фокус лінзи гратиме роль точкового джерела.

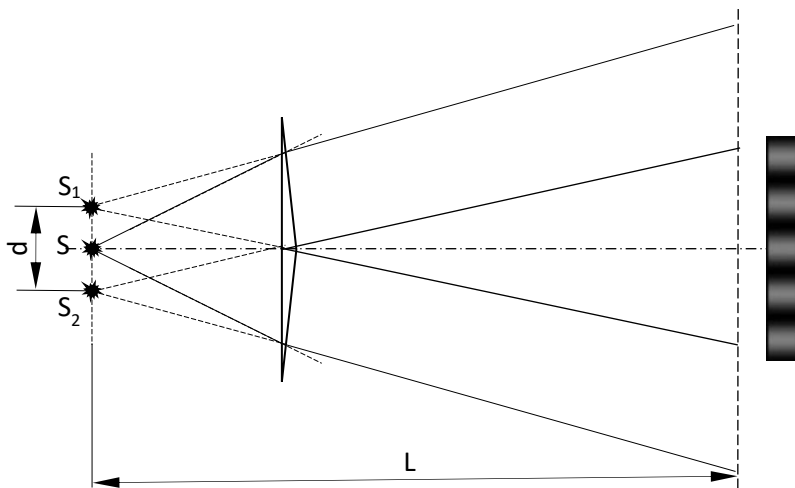


Рис.4

Порядок виконання лабораторної роботи

- Встановити на оптичні рейці послідовно: гелій-неоновий лазер, короткофокусну лінзу, поляризаційний фільтр, біпризму, відеокамеру.
- Переконались, що лазерний промінь проходить через центр усіх оптичних елементів і потрапляє в центр відеокамери.
- За допомогою фільтру встановити оптимальну інтенсивність лазерного пучка, щоб його спостерігати візуально, але уникнути засвітки матриці камери.
- Встановити та зафіксувати оптичні елементи так, аби відеокамера зареєструвала зображення двох уявних джерел та інтерференційну картину, які вони утворюють.
- Виміряти значення L , з урахуванням фокусної відстані лінзи.
- Зробити та зберегти на комп'ютері цифровий знімок.
- Повторити дослід для трьох положень біпризми відносно камери, при яких обидва зображення уявних джерел потрапляють на матрицю камери.
- По серії цифрових зображень визначити (в пікселях) відстані між центрами зображень уявних джерел d і ширину відповідних інтерференційних смуг Δx .
- Використовуючи параметри матриці камери (розміри, щільність пікселів) перерахувати отримані значення в мм. За допомогою формули (4) обрахувати довжину хвилі гелій-неонового лазера.

Примітка.

В роботі використовується відеокамера SIGETA CMOS 3100, яка має такі параметри приймальної матриці: розміри 6.55 x 4.92 мм, роздільна здатність 2048 x 1536.

2.2 Визначення радіусу кривини сферичної лінзи за допомогою кілець Ньютона

Мета роботи: ознайомитись з явищем інтерференції світла на прикладі кілець Ньютона, дослідити інтерференційну картину, що утворюється між плоскою скляною пластинкою і плоско-опуклою лінзою, а також визначити радіус кривини лінзи за допомогою вимірювання радіусів кілець Ньютона.

Короткі теоретичні відомості.

Кільця Ньютона виникають через інтерференцію світла в тонкому повітряному прошарку, що утворюється між плоскою скляною пластинкою і опуклою лінзою, яка торкається пластинки в одній точці (Рис.5). Товщина повітряного шару збільшується від точки дотику до країв, що призводить

до появи концентричних світлих і темних кілець при освітленні монохроматичним світлом.

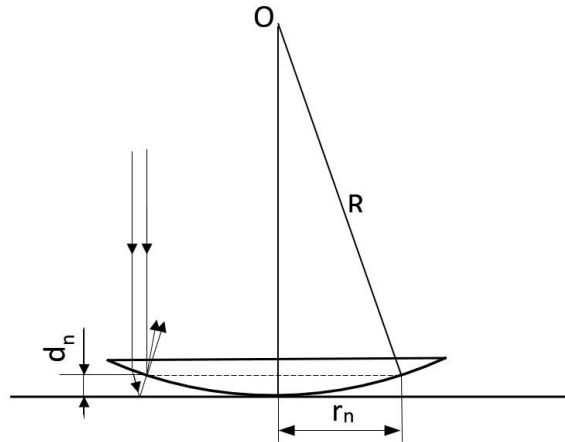


Рис.5

Інтерференційна картина виникає через різницю ходу світлових хвиль, що відбиваються від верхньої і нижньої межі повітряного прошарку. Умова максимуму, яка відповідає світлим кільцям, з урахуванням втрати півхвилі при відбиванні від більш щільного середовища, записується у вигляді:

$$\Delta_n \approx 2d_n + \frac{\lambda}{2} = n\lambda, \quad (6)$$

де d_n - товщина повітряного прошарку в околі точки відбивання променя, $n=1,2,3,\dots$ - номер світлого кільця. Відповідно, умова мінімуму (темні кільця):

$$\Delta_m \approx 2d_m = m\lambda, \quad (7)$$

де $m=1,2,3,\dots$ - номер темного кільця.

Радіус r_n n -го кільця Ньютона пов'язаний з радіусом кривини лінзи R та товщиною відповідного повітряного прошарку d_n співвідношенням:

$$R \approx \frac{r_n^2}{2d_n}, \quad (8)$$

з якого, врахувавши умови (5) або (6), можна визначити радіус кривини лінзи R . Зокрема, для темних кілець:

$$R = \frac{r_m^2}{m\lambda} \quad (9)$$

Порядок виконання лабораторної роботи

- Покласти плоско-опуклу лінзу з великим радіусом кривини на плоску скляну поверхню, так, щоб опукла частина торкалась поверхні в околі поля зору мікроскопу.
- Включити живлення джерела освітлення; переконавшись, що в оптичній схемі присутній зелений світлофільтр та вимірювальна шкала.
- На малих збільшеннях знайти точку дотику, встановити її в центрі поля зору.
- Зробити збільшення мікроскопу таким, щоб за допомогою вимірювальної шкали можна було б поміряти радіуси десяти кілець Ньютона.
- Поміряти та записати в таблицю радіуси 10 кілець.
- Скориставшись формулами (5 - 8) для кожного кільця обрахувати значення радіуса кривини лінзи.
- Виконати стандартний статистичний аналіз.

2.3 Дифракція Фраунгофера на щілині

Мета роботи: Дослідити явище дифракції Фраунгофера на одиночній щілині, виміряти положення дифракційних мінімумів, визначити ширину щілини за результатами експерименту та порівняти отримані дані з теоретичними розрахунками.

Короткі теоретичні відомості

Дифракція — це відхилення світлових променів від прямолінійного поширення при їх проходженні поблизу країв перешкод або через малі отвори. Явище дифракції є прямим наслідком хвильової природи світла.

Дифракція Фраунгофера — це дифракція у паралельних променях, яка спостерігається в умовах, коли і джерело світла, і площина спостереження (екран) розташовані на «нескінченності» (або еквівалентно — лінзи використовуються для колімації та фокусування хвиль). Це спрощує математичний опис явища.

Дифракція Фраунгофера на щілині — найпростіша конфігурація, де це явище чітко проявляється і дозволяє отримати аналітичний розв'язок.

Розглянемо щілину шириною a , освітлену монохроматичним світлом з довжиною хвилі λ . Для опису дифракційної картини використовують принцип Гюйгенса-Френеля: кожна точка щілини є джерелом вторинних хвиль, і результуюче світлове поле на відстані визначається суперпозицією (інтерференцією) цих хвиль.

На великій відстані або у фокусі збиральної лінзи хвилі, що виходять із різних точок щілини, можна вважати паралельними, тобто вони утворюють однакові кути з напрямком на спостережувану точку. У цьому наближенні амплітуда в точці спостереження визначається інтегралом:

$$E(\theta) = E_0 \cdot \int_{-a/2}^{a/2} e^{ikx \cdot \sin \theta} dx \quad (10)$$

де: E_0 - амплітуда падаючої хвилі, $k = 2\pi / \lambda$ - хвильове число, x - координата вздовж щілини, θ - кут відхилення променя від напрямку нормалі до щілини.

Виконуючи операцію інтегрування, отримаємо: $E(\theta) = E_0 \cdot \text{sinc}(\beta)$,

де $\beta = \frac{\pi \cdot a \cdot \sin(\theta)}{\lambda}$; $\text{sinc}(\beta) = \frac{\sin \beta}{\beta}$. Відповідно, кутовий розподіл інтенсивності світла на екрані визначається як квадрат модуля амплітуди:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2; \quad (11)$$

де I_0 - інтенсивність у центральному максимумі (при $\theta = 0$).

Основні особливості дифракційної картини (Рис. 6):

- Головний (центральный) максимум розташований при $\theta = 0$, і має найбільшу інтенсивність.

- Мінімуми інтенсивності (тобто $I(\theta) = 0$) спостерігаються при:

$$\beta = \pm m\pi \Rightarrow a \sin(\theta_m) = m\lambda, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Ширина центрального максимуму (кутова) визначається як кут між першими мінімумами (ліва і права межа головного максимуму):

$$\Delta\theta = 2\theta_1 \approx \frac{2\lambda}{a}, \quad (12)$$

де врахована малість кутів $\sin \theta \approx \theta$.

Формула (10) дозволяє експериментально визначати геометричні параметри системи (наприклад, ширину щілини a).

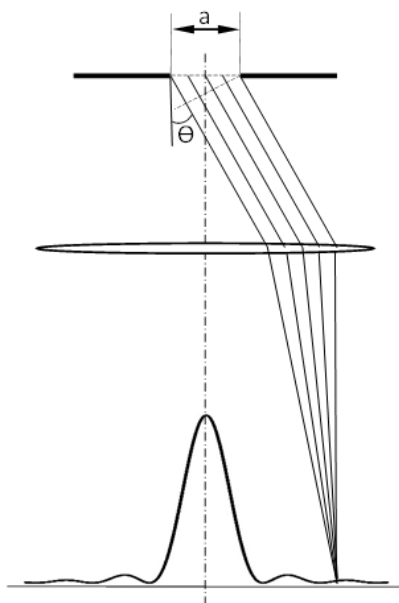


Рис.6

Порядок виконання лабораторної роботи

- Встановити на оптичній рейці послідовно: гелій-неоновий лазер, поляризаційний фільтр з перестроюваним пропусканням, щілину з регульованою шириною, відеокамеру.

- Зафіксувати відстань від щілини до площини матриці камери L .

- Переконайтесь, що лазерний пучок проходить через центри усіх оптичних елементів і потрапляє на центр вхідного отвору відеокамери.

- Відкрити щілину так, щоб лазерний пучок повністю проходив через неї. За допомогою фільтру встановити низьку інтенсивність лазерного пучка аби уникнути засвітки матриці камери. Переконайтесь що пучок реєструється камерою.

- Зменшити ширину щілини так, аби почали проявлятися дифракційні ефекти. Визначити діапазон ширин щілини від такого її значення, коли дифракція ще спостерігається до значення, коли в межах матриці камери поміщаються лише нульовий та перші максимуми.

- Зареєструвати дифракційні картини (зробити цифрові знімки) для 5 фіксованих значень ширини щілини в межах робочого діапазону.

- По серії цифрових зображень визначити (в пікселях) відстані до перших мінімумів дифракційних картин x і ширину відповідних центральних максимумів.

- Використовуючи параметри матриці камери (розміри, щільність пікселів) перерахувати отримані значення в mm .

- Беручи до уваги малість кутів дифракції ($\theta \sim x / L$), по отриманих значеннях за допомогою формули (11) обрахувати ширину щілини для кожного з 5 дослідів.

2.4 Дифракція Фраунгофера на дифракційній ґратці

Мета роботи. Дослідити явище дифракції Фраунгофера на пропускарній дифракційній ґратці, експериментально спостерігати дифракційну картину, виміряти положення дифракційних максимумів, визначити період ґратки та довжину хвилі світла, а також перевірити виконання умови дифракційного максимуму.

Короткі теоретичні відомості.

Дифракційна ґратка — це періодична структура, що складається з великої кількості рівновіддалених паралельних щілин або прозорих зон. Вона слугує класичним прикладом просторового модулятора хвильового фронту. У цій роботі розглядається пропускарна дифракційна ґратка, яка пропускає світло через вузькі щілини, розділені непрозорими проміжками.

При освітленні такої ґратки монохроматичним когерентним світлом (наприклад, від лазера), у далекій зоні (режим Фраунгофера) спостерігається дифракційна картина у вигляді ряду світлих максимумів, розташованих симетрично відносно оптичної осі (Рис. 7). Якщо ґратка має період d (відстань між центрами сусідніх щілин), то кутове положення максимумів у дифракційній картині визначається умовою максимуму:

$$d \sin \theta_m = m\lambda, \quad (13)$$

де: θ_m - кут дифракції m -го порядку, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – порядок дифракційного максимуму, λ - довжина хвилі.

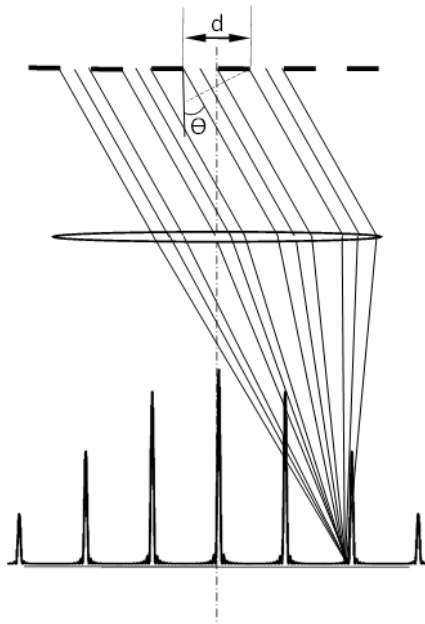


Рис. 7

Основні особливості дифракційної картини:

- Центральний максимум ($m = 0$) — найяскравіший, розташований у напрямку прямого ($\theta_0 = 0$) проходження світла.
- Бічні максимуми ($m = \pm 1, \pm 2, \dots$) — розташовані симетрично ліворуч і праворуч. Їх яскравість зменшується з ростом порядку.
- Інтенсивність у максимумі m -го порядку залежить як від числа щілин N , так і від ширини окремої щілини. Для великої кількості щілин, максимуми стають дуже вузькими та контрастними, що є закономірним явищем для багатопроменевої інтерференції.
- За умови широкого спектра (наприклад, білого світла), різні довжини хвиль розходяться під різними кутами, що дає спектральне розкладання.

Дисперсія ґратки — це параметр, який характеризує здатність дифракційної ґратки розділяти світлові хвилі за довжиною. Вона визначає, як сильно змінюється кут дифракції θ при зміні довжини хвилі λ . Математично дисперсія визначається із (12):

$$D_{\theta} = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}. \quad (14)$$

Порядок виконання роботи

- За інструкцією ознайомитись із будовою та принципом дії гоніометра Г5.
- Розташувати ртутну лампу перед коліматорним об'єктивом гоніометра.
- Подати живлення на лампу, дочекатись стабілізації дугового розряду.
- Розташувати лампу, коліматорний та камерний об'єктиви на одній осі, виставити ширину щілини, сфокусувати її зображення, візуально переконатись в належній якості зображення.
- По шкалі визначити «0» гоніометра, коли сфокусоване зображення щілини збігається із центром шкали окуляра.
- Поставити на шляху світлового пучка пропускальну дифракційну ґратку. Переконатись, що «0» гоніометра не змінився.
- Поворотом труби окуляру знайти і зафіксувати кутове положення ліній спектру випромінювання ртутної лампи для +1 і -1 порядків. Для ідентифікації спектральних ліній використати наступну таблицю:

<i>Колір</i>	<i>Довжина хвилі, нм</i>
Червона	644
Перша жовта	589
Друга жовта	587
Зелена	541
Бірюзова	488
Синя	460
Фіолетова	405

- Побудувати графіки залежності кутового положення ліній спектру від довжини хвилі.

Контрольні питання

- 1.Інтерференція хвиль на плівці.** Чому мильні бульбашки переливаються різними кольорами? Поясніть, як товщина плівки та кут спостереження впливають на кольори, що спостерігаються.
- 2.Інтерференція у досліді Юнга.** Що станеться з інтерференційною картиною, якщо одну зі щілин у досліді Юнга частково закрити? Як зміниться контраст (видимість) інтерференційних смуг?
- 3.Зсув фази при відбитті.** Поясніть, чому при відбитті світла від межі з оптично більш щільним середовищем відбувається зсув фази на π (тобто на півхвилі). Як це впливає на інтерференцію у тонких плівках?
- 4.Коефіцієнт контрастності.** Як зміниться контраст інтерференційних смуг, якщо джерела світла не є повністю когерентними? Який зв'язок між когерентністю та видимістю інтерференційної картини?

5.Інтерференція в лінзі Ньютона. Чому у досліді з лінзою Ньютона в центрі інтерференційної картини у відбитому світлі спостерігається темна пляма? Що зміниться, якщо використати світло, що пройшло крізь систему?

6.Залежність інтерференційної картини від довжини хвилі. Поясніть, чому при освітленні інтерферометра білим світлом спостерігається кольорова інтерференційна картина. Чому смуги швидко зникають на відстані від центру?

7.Дифракція Фраунгофера на щілині. Як зміниться ширина центрального дифракційного максимуму при зменшенні ширини щілини? Чому це не суперечить інтуїції про «проходження через отвір»?

8.Дифракція на ґратці. Чим зумовлена висока спектральна роздільна здатність дифракційної ґратки? Чому збільшення кількості штрихів покращує спектральне розділення?

9.Кутове положення максимумів. Чому у дифракційній ґратці максимуми з'являються під різними кутами для різних довжин хвиль? Поясніть фізично та математично, як це використовується у спектрометрах.

10. Дифракція Френеля і зони Френеля. Що станеться з інтенсивністю світла в точці спостереження, якщо одну із зон Френеля заекранувати? Як це допомагає зрозуміти хвильову природу світла?

Творче завдання

Інтерференція та дифракція світла зазвичай вивчаються у класичних експериментах (дослід Юнга, дифракція на щілині, інтерферометри тощо). Але в реальних умовах природи та технологій ці явища мають і менш очевидні, побічні чи супутні прояви, які можна використати нестандартно.

Ваше завдання — придумати, описати та обґрунтувати принцип дії нового приладу або пристрою, що базується не на прямій інтерференції/дифракції, а на одному з супутніх або другорядних ефектів цих явищ, наприклад:

- зміна контрасту через зменшення когерентності;
- поява кольірних артефактів у складному середовищі (наприклад, на CD-дисках, крилах комах);
- зміщення максимумів через рух, деформацію або зміни температури;
- вплив мікроструктури поверхні на дифракцію (структурне забарвлення, «оптична невидимість» тощо).

3. ПОЛЯРИЗАЦІЯ

3.1 Перевірка закону Малюса

Мета роботи. Експериментально перевірити закон Малюса, який описує залежність інтенсивності лінійно поляризованого світла, що пройшло крізь аналізатор, від кута між площинами поляризатора та аналізатора.

Короткі теоретичні відомості

Світло — це електромагнітна хвиля, в якій вектор електричного поля \vec{E} і вектор магнітного поля \vec{H} коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. Для природного (неполяризованого) світла напрям коливань вектора \vec{E} є випадковим і змінюється хаотично в часі. Поляризованим називають світло, в якому коливання вектора \vec{E} відбуваються у певному впорядкованому напрямі.

Основні види поляризації:

- Лінійна: вектор \vec{E} коливається лише в одній площині.
- Кругова: кінець вектора \vec{E} описує коло в площині, перпендикулярній до напрямку поширення.
- Еліптична: узагальнення кругової, коли траєкторія кінця вектора \vec{E} — еліпс.

У даній роботі розглядається лінійна поляризація. Існує кілька способів отримання лінійно поляризованого світла:

- Подвійне променезаломлення (наприклад, у кристалі кальциту).
- Відбивання від діелектричних поверхонь (зокрема при куті Брюстера).
- Поглинання певної компоненти коливань за допомогою поляризатора (наприклад, поляроїдної плівки).

У лабораторній роботі використовується саме останній метод — поляроїдний фільтр пропускає лише коливання електричного вектора у певному напрямку та поглинає всі інші.

Якщо через поляризатор пропустити природне світло, на виході отримаємо лінійно поляризоване випромінювання з інтенсивністю I_0 . Для дослідження цього світла застосовують другий поляризатор, який називається аналізатором. Якщо площини пропускання поляризатора та аналізатора співпадають, світло проходить майже повністю. Якщо вони взаємно перпендикулярні, світло практично не проходить.

Залежність інтенсивності світла після проходження через аналізатор була встановлена французьким фізиком Етьєном-Луї Малюсом у 1809 році.

Нехай: \vec{E}_0 — амплітуда електричного вектора після поляризатора, θ — кут між площинами пропускання поляризатора та аналізатора. Тоді складова електричного вектора, що проходить через аналізатор:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \cos \theta. \quad (15)$$

Оскільки інтенсивність світла пропорційна квадрату амплітуди:

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (16)$$

де I_0 — інтенсивність після поляризатора, I — інтенсивність після аналізатора. Це і є закон Малюса.

Можна вважати, що промінь неполяризованого світла містить рівномірну суміш лінійних поляризацій під усіма можливими кутами. Оскільки середнє значення $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1/2$, коефіцієнт пропускання поляризатора $I/I_0 = 1/2$. На практиці частина світла втрачається в поляризаторі, тому пропускання для поляроїдних плівок буде нижчим, приблизно 40%, а для деяких типів призм з подвійним променезаломленням ~ 49.9 %.

Хід виконання роботи

1. Закріпіть джерело світла, поляризатор, аналізатор та фотоприймач на оптичній рейці.
2. Переконайтеся, що світловий промінь проходить перпендикулярно до площини поляризатора та аналізатора.
3. Встановіть аналізатор так, щоб його площина пропускання співпадала з площиною поляризатора ($\theta = 0^\circ$).
4. Виміряйте початкову інтенсивність I_0 .
5. Поступово повертайте аналізатор від 0° до 360° з кроком 5° .
6. Для кожного кута зафіксуйте значення інтенсивності світла $I(\theta)$.
7. Побудуйте залежність $I(\theta)$.
8. Порівняйте її з теоретичною кривою закону Малюса. Зробити висновок щодо якості поляризатора.

3.2 Вимірювання кута Брюстера

Мета роботи. Визначити кут Брюстера для межі розділу повітря-скло, виміряти показник заломлення матеріалу, дослідити поляризацію відбитого світла.

Короткі теоретичні відомості

При падінні світла на межу розділу двох середовищ відбувається часткове відбиття та заломлення світлової хвилі. Інтенсивність відбитого світла залежить від кута падіння та поляризації хвилі. Формули Френеля описують амплітуди відбитих і заломлених хвиль для двох поляризацій: паралельної (\parallel) та перпендикулярної (\perp) до площини падіння. Для коефіцієнтів відбиття амплітуд r_{\parallel} і r_{\perp} маємо [1-3]:

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (1)$$

де n_1, n_2 - показники заломлення першого (повітря) та другого (скло) середовищ, θ_i - кут падіння, θ_t - кут заломлення, який пов'язаний із θ_i законом Снелліуса: $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$.

Кут Брюстера θ_B — це кут падіння, при якому відбитий промінь світла повністю поляризований, тобто, відсутня відбита складова паралельної поляризації $r_{\parallel} = 0$. Прирівнявши до нуля чисельник першого з двох рівнянь (1) і врахувавши закон Снелліуса, отримаємо:

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Випадок одинарної пластинки. Якщо світло падає на поверхню скляної пластинки, то відбите світло утворюється від передньої та задньої поверхонь. При цьому для задньої поверхні умови Брюстера строго не виконуються через повторне заломлення та зміщення фаз. Це призводить до неповної поляризації навіть у точці, близькій до θ_B . Проте мінімум інтенсивності відбитого світла у напрямку паралельної поляризації все одно спостерігається в околі кута Брюстера.

Випадок стопи паралельних пластинок. У разі стопи пластинок (звичайно 5–10 тонких пластинок зі скла), складених так, щоб відбиті пучки не перекривалися, ефект поляризації посилюється. Це пояснюється тим, що відбиті пучки з різних поверхонь інтерферують слабо (через зміщення), а основний внесок у спостережуване відбиття робить передня поверхня кожної пластинки. Таким чином, поляризація відбитого світла в околі кута Брюстера наближається до ідеальної, і мінімум інтенсивності стає набагато більш виразним.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Розташувати на оптичній рейці послідовно: джерело світла, збиральну лінзу, поляризатор, поворотний столик із скляною пластинкою та фотодетектором (рис. 12).
2. Налаштувати джерело і збірну лінзу так, щоб світловий пучок падав на поверхню скляної пластинки.
3. Встановити поляризатор між джерелом та пластинкою.
4. Виставити поляризатор так, аби площина поляризації була б паралельною до площини падіння.
5. Повільно змінюючи кут падіння, спостерігати зміну інтенсивності відбитого світла.
6. Зареєструвати залежність показання фотодетектора від кута падіння в діапазоні $(5 - 85)^\circ$. В інтервалі $(50 - 60)^\circ$ крок зміни кута зробити мінімально можливим.
7. Аналогічні вимірювання виконати для перпендикулярної до площини падіння поляризації.
8. Побудувати в одних осях два графіки залежності інтенсивності відбитого світла від поляризації. Для паралельної поляризації ділянку залежності в діапазоні $(50 - 60)^\circ$ апроксимувати поліномом низького порядку. Зафіксувати положення мінімуму, яке відповідає куту Брюстера.
9. Обчислити показник заломлення скла за формулою: $n = \operatorname{tg} \theta_B$
10. Замінити одинарну пластинку на стопу паралельних пластинок.
11. Повторити вимірювання інтенсивності відбитого світла для двох поляризацій в залежності від кута падіння.
12. Знову обчислити показник заломлення.

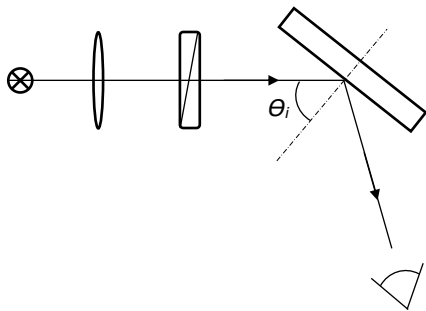


Рис. 12

Контрольні питання

1. **Відбиття та поляризація.** Чому світло, відбите від водної поверхні під певним кутом, стає частково або повністю поляризованим? Як пов'язаний цей кут із показником заломлення середовища?
2. **Поляризаційні окуляри.** Чому поляризаційні сонцезахисні окуляри ефективні для зменшення відблисків від горизонтальних поверхонь? Яким чином вони працюють?
3. **Подвійне променезаломлення.** Чому в кристалі кальциту промінь світла розділяється на два (звичайний та незвичайний)? Як це пояснюється з точки зору поляризації?
4. **Фарбування у поляризованому світлі.** Чому деякі прозорі пластмаси або мінерали у схрещених поляризаторах виявляють кольорові візерунки? Який зв'язок цього явища з поляризацією та дисперсією?
5. **Обертання площини поляризації.** Чому деякі речовини (наприклад, розчини цукру) здатні обертати площину поляризації світла? Як цей ефект можна використати для практичних вимірювань?
6. **Поляризація в небі.** Чому світло від небосхилу частково поляризоване? Як цим користуються тварини (наприклад, бджоли) для орієнтації?
7. **Еліптична та кругова поляризація.** Чим відрізняється лінійна, кругова та еліптична поляризація? У яких випадках природним шляхом виникає кругова або еліптична поляризація?
8. **Інтерференційні фігури.** Як можна за допомогою поляризованого світла виявити внутрішні механічні напруження у прозорих тілах? Чому інтерференційні фігури в полярископі дають інформацію про анізотропію матеріалу?
9. **Поляризація в технологіях.** Яку роль відіграє поляризація в роботі РК-дисплеїв (рідкокристалічних екранів)? Чому дисплей не видно крізь схрещені поляризаційні фільтри?
10. **Поляризаційні методи в науці.** Як можна за допомогою аналізу поляризації світла визначати властивості тонких плівок, біологічних тканин або атмосферних аерозолів?

Творче завдання

Відомо, що при повному внутрішньому відбиванні у призмі типу AP-90 виникає зсув фаз між ортогональними поляризаційними компонентами світла. Внаслідок цього, якщо на вхід призми подати лінійно-поляризоване світло, то на виході воно набуде еліптичної поляризації.

Запропонуйте спосіб, як можна скомпенсувати цей зсув фаз так, щоб на виході знову отримати лінійно-поляризоване світло.

У яких дослідах чи приладах така компенсація може бути корисною? Спробуйте вказати розділ фізики, де використання контрольованої зміни та компенсації поляризації може дати експериментальні переваги (наприклад, дослідження розсіяння світла, спектроскопія чи фотоніка).

4. РЕФРАКЦІЯ ТА ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

4.1 Визначення залежності показника заломлення розчину від концентрації

Мета роботи: Ознайомитися з принципом дії рефрактометра; виміряти показник заломлення для розчинів різної концентрації; встановити залежність між показником заломлення і концентрацією розчину.

Короткі теоретичні відомості

Рефрактометр - це прилад, який вимірює показник заломлення рідини. Одним з найпоширеніших є рефрактометр типу Аббе. Його принцип дії базується на явищах, що спостерігаються при проходженні світла через межу розділу двох середовищ. Згідно закону заломлення, кут падіння світла на межу розділу і кут заломлення пов'язані співвідношенням:

$$\frac{\sin i}{\sin j} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

де n_1 та n_2 – абсолютні показники заломлення першого та другого середовищ відповідно. При проходженні світла із середовища з меншим показником заломлення в середовище з більшим показником заломлення ($n_1 < n_2$)

кут заломлення не може бути більшим за граничний кут $j_{cp} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$. Ви-

мірювання граничного кута дає простий і разом з тим досить точний метод визначення відносного показника заломлення двох середовищ.

Головні складові частини рефрактометра Аббе – дві прямокутні призми (Рис.13). повернуті одна до одної діагональними гранями, між якими утворюється тонкий плоско-паралельний прошарок. Грань верхньої (освітлювальної) призми матова і служить для освітлення розсіяним світлом рідини. Нижня (вимірювальна) призма зроблена з важкого флінту ($n_2 > 1.7$). Призми зв'язані між собою шарніром і можуть бути розведені для нанесення кількох крапель досліджуваної рідини на гіпотенузу грань нижньої призми. Після зведення призм між гіпотенузними гранями утворюється тонкий шар рідини.

Світло, розсіяне матовою поверхнею верхньої призми, проходить тонкий шар досліджуваної рідини і падає на діагональну грань вимірювальної призми під різними кутами $0 \leq i \leq 90^\circ$. Промінь світла, для якого $i = 90^\circ$, називається ковзним.

Оскільки показник заломлення досліджуваної рідини менший за показник заломлення нижньої призми, то ковзний світловий пучок, заломлюючись на межі рідина-скло, піде у нижній призмі під граничним кутом заломлення j_{zp} . Далі він виходить з призми, зазнаючи ще одного заломлення.

Всі промені, які падають на грань нижньої призми в різні точки грані під кутами, близькими до 90° , поширюються паралельно один до одного. Вони залишаються паралельними і після заломлення. Якщо оптична вісь зорової труби співпадає з напрямком граничного променя, то всі промені, паралельні граничному, зійдуться в точку у фокальній площині на оптичній осі зорової труби. При $i < 90^\circ$ світлові промені заломлюються під меншими кутами і дають зображення в зоровій трубці в точках фокальної площини нижче, ніж точка для променів з граничним кутом j_{zp} . Таким чином, нижня половина поля зору в трубці буде світлою, а верхня - темною, оскільки паралельні промені з кутами заломлення, більшими, ніж j_{zp} відсутні. Межею світла та тіні є промінь з граничним кутом.

Якщо відомі показник заломлення призми (n_2), заломлюючий кут призми і кут, під яким спостерігається межа світла і тіні, можна розрахувати показник заломлення досліджуваної рідини.

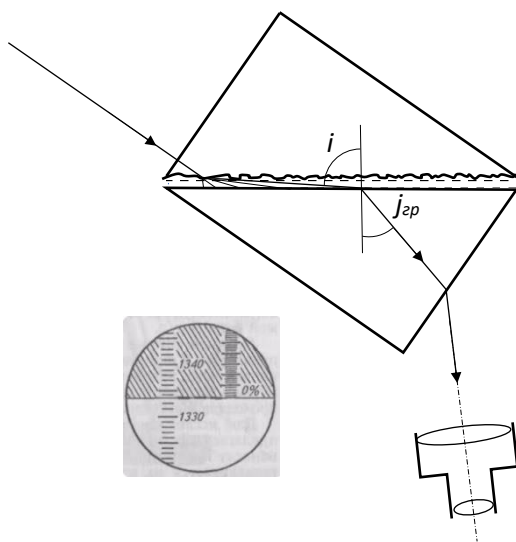


Рис. 13

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Переконайтеся, що рефрактометр відкалібрований (перевірте за дистильованою водою, $n = 1.3330$ при 20°C).
2. Очистіть поверхні призми приладу фільтрувальним папером або серветкою.
3. Нанесіть 1-2 краплі досліджуваного розчину на призму рефрактометра.
4. Закрийте призму і зачекайте 20-30 секунд для вирівнювання температури.
5. Спрямуйте у вхідний отвір приладу світловий пучок від джерела, подивіться в окуляр і зніміть показання (значення n визначається по межі світлотіні на шкалі).
6. Після кожного вимірювання очистіть призму.

4.2 Вимірювання показника заломлення та дисперсії спектральної призми

Мета роботи: Ознайомитися з методом визначення показника заломлення прозорих середовищ. Навчитися працювати з оптичним гоніометром. Визначити залежність показника заломлення матеріалу призми від довжини хвилі (дисперсію). Побудувати дисперсійну криву для досліджуваної призми. Визначити марку скла.

Короткі теоретичні відомості

Показник заломлення середовища визначається співвідношенням швидкості світла у вакуумі c до швидкості світла в середовищі v :

$$n = \frac{c}{v}. \quad (4)$$

У реальних матеріалах λ залежить від довжини хвилі. Ця залежність називається дисперсією. Для більшості прозорих середовищ характерна нормальна дисперсія: показник заломлення зменшується зі збільшенням λ . У ділянках поблизу смуг поглинання може спостерігатися аномальна дисперсія, де залежність має протилежний характер.

Призма — це оптичний елемент із двома заломлюючими поверхнями, що утворюють між собою кут α (заломлюючий кут призми). Пропускаючи світло через призму, можна розкласти його на складові за довжиною хвилі, оскільки промені з різними значеннями λ відхиляються від початкового напрямку на різні кути δ (Рис. 14). Кут відхилення залежить від кута падіння та від показника заломлення матеріалу, і ця залежність має доволі складний характер.

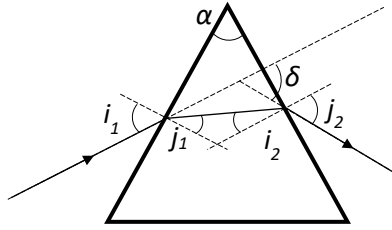


Рис.14

Для кожної довжини хвилі існує такий напрям падіння променя на грань призми, при якому відхилення δ є мінімальним. У цьому випадку промінь проходить через призму симетрично відносно її основи ($i_1 = j_2, i_2 = j_1$). Мінімальний кут відхилення δ_{\min} , заломлюючий кут α та показник заломлення n зв'язані між собою співвідношенням [3]:

$$n \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}, \quad (5)$$

Звідки можна отримати робочу формулу для обрахунку показника заломлення:

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (6)$$

Оскільки δ_{\min} залежить від довжини хвилі, вимірюючи його для різних спектральних ліній, можна визначити залежність $n(\lambda)$ та побудувати дисперсійну криву.

Якщо використовують газорозрядну лампу на парах ртуті, то в її спектрі виділяють кілька інтенсивних ліній, які найбільш придатні для вимірювання дисперсії: лінія C (червона) — $\lambda = 643,8$ нм, лінія d (жовта) — $\lambda = 578,0$ нм, лінія F (синя) — $\lambda = 486,1$ нм. Для більш зручної характеристики дисперсії вводиться число Аббе (іноді позначають V_d):

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}. \quad (7)$$

Тут: n_C, n_d, n_F - показники заломлення для червоної, жовтої та синьої ліній, відповідно. Число Аббе показує, наскільки швидко змінюється показник заломлення із довжиною хвилі.

Марка скла визначається парою n_d, V_d . Перше число n_d характеризує середній показник заломлення для жовтої лінії. Друге число V_d описує дисперсійні властивості.

У каталогах оптичних стекел для кожної марки наводяться ці два параметри. Порівнявши експериментально знайдені значення з табличними, можна ідентифікувати матеріал призми. Всі марки стекел відображено на так званій діаграмі Аббе.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Встановіть призму на столик гоніометра.
2. Вирівняйте її так, щоб одна з граней була перпендикулярна до напрямку променя коліматора.
3. Наведіть зорову трубу послідовно на відбиті промені від двох граней призми.
4. За відліками на шкалі обчисліть кут між ними — це і є заломлюючий кут призми α .
5. Спостерігаючи спектральні лінії через призму, повільно обертайте її до положення, коли переміщення лінії змінює напрям.
6. Зафіксуйте відліки на гоніометрі для цього положення та визначте для кожної лінії значення δ_{\min} .
7. Для кожної довжини хвилі обчисліть $n(\lambda)$ за формулою (22) та побудуйте графік залежності – дисперсійну криву.
8. Обрахуйте число Аббе і по діаграмі Аббе визначте марку скла.

4.3 Визначення показника заломлення скляної пластинки за допомогою інтерферометра Майкельсона

Мета роботи: Ознайомитися з особливостями роботи інтерферометра Майкельсона. Дослідити вплив додаткового набігу фази при обертанні тонкої скляної пластинки, розташованої в одному з плечей інтерферометра. На прикладі спостереження динамічної інтерференційної картини проілюструвати можливість визначення показника заломлення скла.

Короткі теоретичні відомості

Принцип роботи Інтерферометра Майкельсона базується на поділі когерентного променя світла на два плеча, відбиття від дзеркал та наступному складанні хвиль (Рис.15). Результатом є інтерференційна картина у вигляді системи кілець рівного нахилу. Інтерференційна картина дуже

чутлива до малих змін різниці ходу між двома променями. Це використовують у багатьох методах оптичних вимірювань, зокрема для визначення показника заломлення тонких прозорих пластинок.

Якщо у плече інтерферометра вставити прозору пластинку товщиною d та показником заломлення n , то оптична довжина шляху в цьому плечі збільшується. При повороті пластинки на кут φ її ефективна оптична товщина змінюється, що призводить до додаткового набігу фази та появи нових кілець інтерференційної картини.

Кількість нових кілець N , що виникають при зміні кута нахилу пластинки, пов'язана з параметрами експерименту співвідношенням (де вра-

ховано, що кут φ малий, тому $\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}$):

$$N(\varphi) \approx \frac{d(n-1)}{\lambda} \cdot \varphi^2 \quad (8)$$

Практично це проявляється як народження та рух кілець рівного нахилу під час обертання пластинки. Зафіксувавши, на який кут повороту потрібно повернути пластинку для появи певної кількості нових кілець, можна обчислити показник заломлення за формулою:

$$n \approx 1 + \frac{N \cdot \lambda}{d \cdot \varphi^2} \quad (9)$$

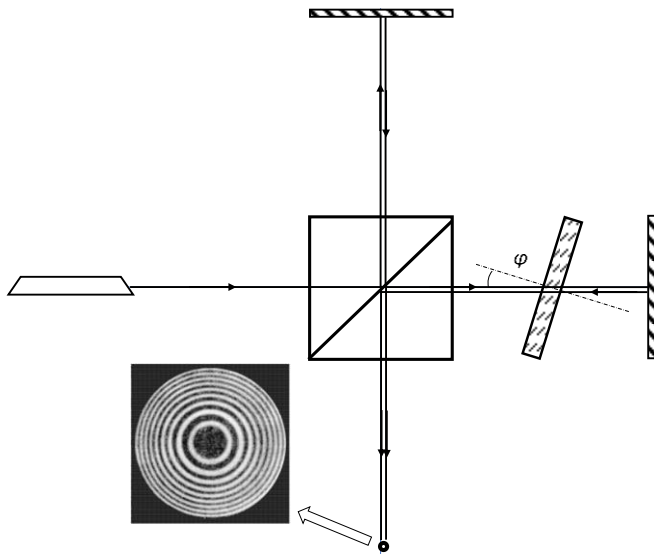


Рис.15

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Увімкнути лазер та налаштувати інтерферометр так, щоб на екрані з'явилася інтерференційна картина у вигляді кілець рівного нахилу.
2. Зафіксувати початкову картину.
3. Повільно обертати столик зі скляною пластинкою, спостерігаючи динамічну зміну кількості кілець.
4. Порахувати, скільки нових кілець з'являється при обертанні пластинки на певний кут φ .
5. Повторити вимірювання для кількох різних значень кута.
6. Використовуючи співвідношення (15), оцінити показник заломлення скла.
7. Порівняти результат з табличним значенням та обговорити причини можливих розбіжностей.

Примітка

Ця лабораторна робота носить передусім демонстраційний характер. Її головна цінність полягає не у високоточному визначенні показника заломлення, а у наочному показі того, як інтерферометр Майкельсона дозволяє виявляти надзвичайно малі зміни оптичної довжини шляху за інтерференційними смугами.

Контрольні питання

1. **Призми та спектр.** Чому скляна призма розкладає білий промінь у спектр, а паралельні грані плоскопаралельної пластинки — ні?

2. **Атмосферна дисперсія.** Чому Сонце, Місяць або яскраві зорі поблизу горизонту іноді мають кольорову облямівку (верхній край синюватий, нижній — червонуватий)? Як цей ефект пояснюється дисперсією показника заломлення повітря?

3. **Форма спектра.** Чому відстань між кольорами у спектрі, створеному призмою, нерівномірна? Чому фіолетова ділянка розтягнута сильніше, ніж червона?

4. **Веселка та краплі дощу.** Як саме дисперсія у воді визначає кутове положення кольорових смуг у веселці? Чому червоний колір видно вище, ніж фіолетовий?

5. **Хроматична аберація.** Чому прості скляні лінзи дають хроматичні аберації? Яким чином поєднання двох різних матеріалів у ахроматичних об'єктивах зменшує цей ефект?

6. **Групова та фазова швидкість.** Чому в дисперсійних середовищах фазова швидкість хвилі відрізняється від групової? Як це впливає на поширення коротких імпульсів світла у волоконно-оптичних кабелях?

7. **Аномальна дисперсія.** Що таке аномальна дисперсія? Чому вона спостерігається поблизу частот власних коливань атомів і молекул?

8. **Дисперсія у волокнах.** Чому дисперсія в оптичних волокнах обмежує швидкість передачі даних? Які способи компенсації дисперсії застосовують у сучасній телекомунікації?

9. **Анізотропні кристали.** Деякі кристали (наприклад, кальцит) змінюють колір або напрям поширення променів залежно від кута спостереження. Як у цьому проявляється поєднання подвійного променезаломлення та дисперсії?

10. **Призми й ґратки.** І призма, і дифракційна ґратка здатні розкласти біле світло у спектр. У чому полягає відмінність принципу дисперсії в обох випадках і чому ґратки зазвичай мають вищу спектральну роздільну здатність?

Творче завдання

Відомо, що при проходженні світла крізь скляну призму білий промінь розкладається у спектр через залежність показника заломлення від довжини хвилі (дисперсію). При цьому різні кольори відхиляються на різні кути.

Запропонуйте оптичну систему, у якій для певного кольору промені проходили б без відхилення (так, ніби призми «не існує»). Для інших кольорів світло відхилялося б максимально. Як можна скомбінувати декілька елементів (призм чи лінз) так, щоб досягти цього ефекту? Поясніть

фізичний принцип роботи вашої системи, виходячи з рефракції та дисперсії. Подумайте, де подібний підхід можна було б використати.

Список літератури для самостійного опрацювання.

Основна:

1. Горбань І.С. *Оптика*. 1979, К.: Вища школа.
2. Білий М.У., Скубенко А.Ф. *Оптика*. 1987, К.: Вища школа.
3. Романюк М.О., Крочук А.С., Пашук І.П., *Оптика*. 2012, Львів.

Додаткова:

4. Одарич В.О., Поперенко Л.В., Стащук В.С., Якунов А.В. *Прикладна оптика 1*. 2010, Київ: ВПЦ Київський університет.
5. Макаренко О.В., Одарич В.А., Поперенко Л.В., Якунов А.В. *Прикладна оптика 2*. 2013, Київ: Пульсари.
6. Коваленко Г.М. та ін. *Загальна фізика у прикладах, запитаннях і відповідях. Оптика: навчальний посібник*. 2012, Київ: ВПЦ Київський університет.