

Лабораторна робота № 5.82

Визначення фокусних відстаней і аберацій тонких лінз

Мета роботи: визначення фокусних відстаней збиральної та розсіювальної тонких лінз, а також аберацій збиральної лінзи.

Прилади й приладдя: оптична лава, рейтери, освітлювач із регульованим джерелом живлення, збиральні й розсіювальні лінзи, червоний і синій світлофільтри, дискова й кільцева діафрагми, екран.

Теоретичний вступ

У геометричній оптиці світна точка і світловий промінь є математичними поняттями. **Світловий промінь** - лінія, вздовж якої переноситься світлова енергія. Наочніше, світловим променем можна назвати пучок світла малого поперечного розміру.

Зображення, які утворені перетином самих променів, називаються **дійсними**. Зображення, утворені перетином геометричних продовжень променів, називаються **уявними**.

Лінза являє собою оптично прозоре тіло, обмежене з двох сторін кривими (часто сферичними) заломлюючими поверхнями. Якщо відстань між обмежувальними поверхнями в центрі лінзи значно менше радіусів їх кривизни, лінза називається **тонкою**.

Лінзи бувають **двоопуклі** (збірні), **двогнуті** (розсіювальні), **плосковгнуті** (розсіювальні), **опукловгнуті** (збірні і розсіювальні).

Головною оптичною віссю називають пряму, що проходить через центри кривизни обох сферичних поверхонь лінзи.

Промені, паралельні оптичній осі, після проходження через двоопуклу (збірну) лінзу сходяться в точці M на цій осі (рис. 1, а) (лінза має два головні фокуси). Ця точка називається **головним фокусом збірної лінзи**.

При проходженні через двогнуту (розсіювальну) лінзу паралельні промені розходяться. Точка M_1 на головній оптичній осі, де перетинаються продовження цих променів, що розходяться, називається **головним фокусом розсіювальної лінзи** (рис. 1, б) (цей фокус називають **уявним**).

Відстань від оптичного центру лінзи до головного фокусу називається **головною фокусною відстанню** лінзи F . Радіуси кривизни сферичних поверхонь R_1 і R_2 , що обмежують лінзу, пов'язані з показником заломлення речовини лінзи n і з її головною фокусною відстанню F таким співвідношенням

$$D = 1/F = (n - 1) (1/R_1 - 1/R_2) \quad (1)$$

Знаки R_1 та R_2 визначаються напрямком відліку від оптичного центру лінзи.

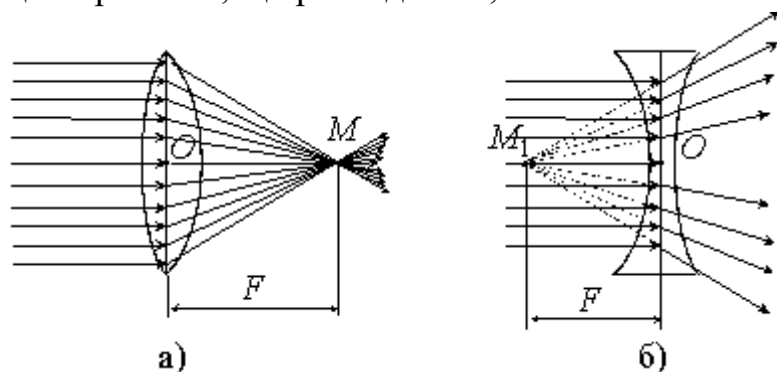


Рис.1.

Головна фокусна відстань F пов'язана з відстанню d від лінзи до предмета і f від лінзи до зображення **формулою лінзи**

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \dots\dots\dots(2)$$

Формула (2) описує як збірні, так і розсіювальні лінзи. При цьому слід враховувати **правило знаків**:

- Перед $1/F$ ставиться знак "+", якщо лінза збірна, і знак "-", якщо лінза розсіювальна.
- Перед $1/f$ ставиться знак «+», якщо зображення є дійсним, і знак «-», якщо воно є уявним.
- Перед $1/d$ ставиться знак «+», якщо предмет є дійсним (на лінзу падає розбіжний пучок променів), і знак «-», якщо предмет є уявним (на лінзу падає збіжний пучок променів).

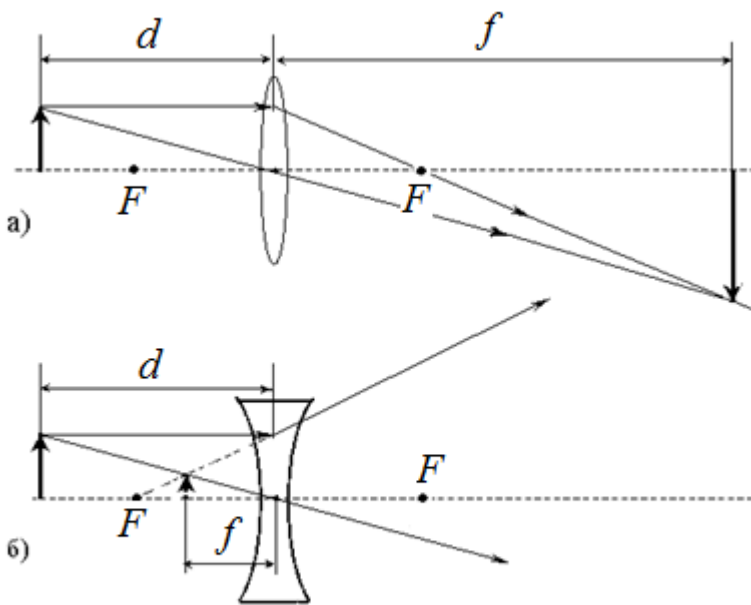


Рис. 2.

Величина $D = \frac{1}{F}$ назива-

ється **оптичною силою** лінзи. Оптична сила лінзи вимірюється у діоптріях. Діоптрія дорівнює оптичній силі лінзи з фокусною відстанню в один метр. Оптична сила збірної лінзи додатна, а розсіювальної - від'ємна.

Збірна лінза (рис. 2, а) дає як дійсне, так і уявне зображення, як збільшене, так і зменшене зображення, як пряме, так і зворотне зображення. Це залежить від того, де розміщений предмет: між лінзою та фокусом,

або між фокусом та подвійним фокусом, або за подвійним фокусом.

Розсіювальна лінза (рис. 2, б) завжди дає уявне та зменшене зображення.

При виведенні формул (1) і (2) передбачалося, що промені **параксіальні** (ут-

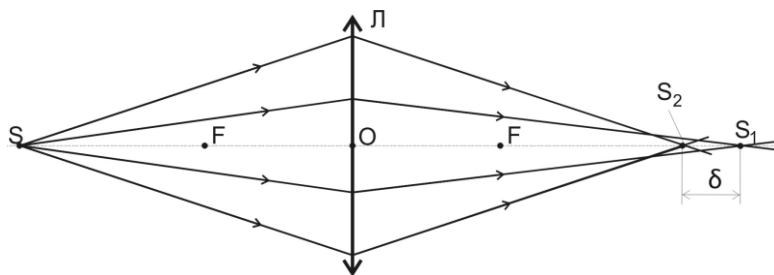


Рис. 3.

ворюють із оптичною віссю малі кути), що падає на лінзу світло монохроматичне, а показник заломлення світла не залежить від довжини хвилі λ . У реальних оптичних системах ці умови не виконуються, тому в них виникають спотворення, які називаються **абераціями** або ви-

кривленням зображень. Розглянемо деякі з них.

Сферична аберація. Цей вид аберації пов'язаний зі сферичністю заломлюючих поверхонь лінзи й спостерігається коли на лінзу падає розбіжний пучок світла (рис. 3). Тоді параксіальні промені після заломлення в лінзі перетинаються (рис.3) в точці S_1 , а промені, які більш віддалені від оптичної осі, – у точці S_2 . В результаті цього на екрані, який розташовано перпендикулярно до оптичної осі, замість чіткого зображення джерела S або іншого предмета спостерігається **розпливчата пляма**. Кількісною мірою сферичної аберації є відрізок

$$OS_1 - OS_2 = \delta. \quad (3)$$

Збірні лінзи мають $\delta > 0$ а розсіювальні – $\delta < 0$,. Тому сферичну аберацію можна практично усунути, якщо збирати систему з комбінації цих лінз.

Хроматична аберація. Показник заломлення речовини лінзи й навколишнього середовища залежить від довжини хвилі світла λ (явище дисперсії). Тоді згідно з (2) f , а, значить і F будуть функціями λ . Тому, якщо на лінзу падає поліхроматичне світло (наприклад, біле), то окремі монохроматичні промені, що складають його, фокусуються на оптичній осі в різних точках: червоні промені мають найбільшу фокусну відстань, а фіолетові – найменшу. Зображення предмета виявляється **розмитим і пофарбованим по краях**. Мірою хроматичної аберації є різниця між положеннями фокусів лінзи при її освітленні монохроматичним світлом різної довжини хвилі (різних кольорів)

$$\delta' = F_{\text{черв}} - F_{\text{син}} \quad (4)$$

Різні сорти стекол мають різну дисперсію. Комбінуючи збиральні і розсіювальні лінзи з різних сортів скла, можна сумістити фокуси різних кольорів і тим самим усунути цей вид аберації.

Опис установки

Оптична лав являє собою станину, на якій закріплюються в необхідному порядку елементи оптичної схеми. Уздовж лави існує міліметрова шкала для відліку положення рейтерів. Рейтери слугують для установки на лаві окремих елементів схеми. Матовий **екран** призначений для спостереження й виміру зображень предметів. На ньому нанесені вертикальна й горизонтальна шкали із ціною розподілу 1 мм. Для кріплення лінз у рейтерах є утримувачі, які виконані у вигляді півкілець.

В якості предмету при побудові оптичних зображень використовується **сітка зі шкалою** (ціна розподілу 0,20 мм). Вона кріпиться в оправі конденсора освітлювача. **Освітлювач** складається з **галогенної лампи** накаливання з невеликою ніткою розжарення, що наближає її до точкового джерела світла, і оправы з конденсором. Дискава й кільцева **діафрагми** дозволяють вирізати центральну й периферичну частини пучка світла від освітлювача. Вони кріпляться на оправу лінзи.

Світлофільтри ЧС і СС дозволяють виділити червоний і синій діапазони випромінювання освітлювача.

Перед початком вимірів центри всіх лінз і їхні оптичні осі необхідно виставити приблизно **на одну лінію**, яка паралельна ребру оптичної лави - оптичній осі установки. Для цього на кінці оптичної лави встановлюють освітлювач із сіткою й шкалою, що при подальших вимірах відіграє роль предмета. Далі **центрують екран**. Для цього рейтер з екраном підсувають впритул до освітлювача й сполуча-

ють центр екрана із центром шкали. Потім екран відсувають від освітлювача й закріплюють на лаві.

Завдання 1. Визначення фокусної відстані збиральної лінзи

Фокусну відстань тонких збиральних лінз можна визначати різними способами. Розглянемо один з них.

Фокусну відстань тонкої збірної лінзи можна визначити, виходячи з формули лінзи (2). Для цього достатньо виміряти відстані d та f , показані на рис. 2, а, і потім обчислити F за формулою

$$F = \frac{df}{d + f} \quad (5)$$

Порядок виконання роботи

1. Помістивши екран на досить великій відстані від освітлювача, ставлять між ними збиральну лінзу (Л № 6) і пересувають її до тих пір, поки не отримають на екрані чітке **збільшене зображення** сітки освітлювача.

2. За шкалою на оптичній лаві відраховують відстань d від освітлювача до лінзи та відстань f від лінзи до зображення.

3. Отримані дані заносяться до таблиці 1.

4. Зважаючи на неточність візуальної оцінки різкості зображення, рекомендується повторити дослід не менше трьох разів при різних положеннях екрану.

5. Помістивши екран на досить великій відстані від об'єкта, ставлять між ними лінзу і пересувають її до тих пір, поки не отримають на екрані чітке **зменшене зображення**.

6. Повторюють пункти 2-4.

7. З кожного окремого виміру за формулою (5) визначають фокусну відстань та з отриманих результатів знаходять середню арифметичну.

8. За стандартною процедурою (див. Додаток) проводять обробку результатів вимірювання та визначають граничну похибку ΔF .

Таблиця 1

N за/п	d (м)	f (м)	F_i (м)	$\langle F \rangle$ (м)	ΔF_i	S_F	$t_{\alpha, n}$	ΔF (м)	Е%
Збільшене зображення									
1.									
2.									
3.									
Зменшене зображення									
1.									
2.									
3.									

Результат записують у вигляді

$$F = \langle F \rangle \pm \Delta F, \text{ (м) при } \alpha =$$

Завдання 2. Визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи.

Визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи утруднене тим, що при дійсному джерелі (предметі) його зображення виходить уявним і його безпосередньо виміряти не можна. Завдання можна вирішити за допомогою **допоміжної збірної лінзи**.

Якщо скласти разом збірну лінзу (оптична сила додатна) і розсіювальну лінзу (оптична сила від'ємна), то оптична сила системи дорівнюватиме сумі оптичних сил обох лінз. Система двох лінз буде або збіркою, або розсіювальною залежно від того, чия оптична сила зі лінз, що складаються, більша за модулем.

Для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи, до неї можна приєднати збірну лінзу таку, щоб отримана комбінація була збіркою. Для цього оптична сила збірної лінзи має бути за модулем більшою, ніж оптична сила розсіювальної.

Між предметом (роль якого виконує освітлювач S з сіткою для зручності наведення на різкість) і екраном ставлять спочатку тільки збірну лінзу L_1 і відзначають те положення екрана B , при якому на ньому виходить зображення предмета.

Далі екран відсувається, і позаду збірної лінзи поміщають розсіювальну лінзу L_2 (рис. 4). При цьому чітке зображення предмета пропадає. Відсуваючи екран і зміщуючи розсіювальну лінзу, знову домагаються чіткого зображення предмета, що дається комбінацією двох лінз.

Для лінзи L_2 «предметом» є зображення B дане лінзою L_1 від предмета S . Вимірюють відстань від розсіювальної лінзи до першого положення екрана B . Нехай воно буде d_1 .

Далі вимірюють відстань від розсіювальної лінзи до другого положення екрана C . Ця відстань дорівнює f_1 .

Користуючись оборотністю променів світла при проходженні крізь лінзи, будемо вважати джерелом світла зображення предмета в площині C , тоді положення уявного зображення, що дає лінза L_2 , буде знаходитися ну фокальній площині B .

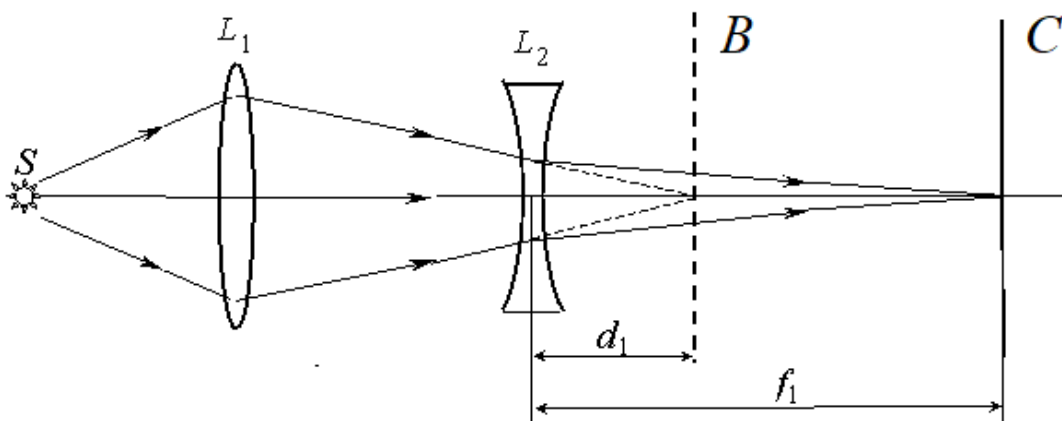


Рис. 4

Користуючись правилом знаків, отримаємо формулу для визначення головної фокусної відстані F_1 двовгнутої лінзи:

$$\frac{1}{f_1} - \frac{1}{d_1} = \frac{1}{F_1},$$

Звідси

$$F_1 = \frac{d_1 f_1}{d_1 - f_1}. \quad (6)$$

Порядок виконання роботи

1. Поміщаючи між освітлювачем зі сітчастою стрілкою, яка грає роль предмета, і екраном тільки одну збірну допоміжну лінзу L_1 №5 і отримують на екрані чітке збільшене дійсне зображення стрілки. Відзначають за шкалою на оптичній лаві і записують положення екрана B (рис. 4).

2. Потім, між збіркою лінзою і екраном поміщають розсіювальну лінзу L_2 №13 і, віддаляючи від неї екран, знову отримують на ньому чітке зображення сітки. Нове положення екрана C також відзначають за шкалою на оптичній лаві.

3. Записують поділку шкали L_2 , на якій на лаві встановлена розсіювальна лінза.

4. Розраховують значення величин d_1 та f_1 для кожного досліду. За формулою (6) розраховують фокусну відстань F .

5. Дослід виконують 3 рази, вибираючи різні положення екрана при отриманні зображення за допомогою однієї збірної лінзи.

6. За стандартною процедурою (див. Додаток) проводять обробку результатів вимірювання та визначають граничну похибку ΔF .

Результат записують у вигляді

$$F = \langle F \rangle \pm \Delta F, \text{ (м) при } \alpha =$$

Таблиця 3

N за/п	B см	C см	L_2 см	$d_1 = B - L_2$ см	$f_1 = C - L_2$ см	F_i за (5) см	$\langle F \rangle$	ΔF_i	$S_{\langle F \rangle}$	α	$t_{\alpha, n}$	ΔF	$E\%$
1.													
2.													
3.													
4.													

Завдання 3. Визначення сферичної аберації збиральної лінзи

Настроїти лінзу № 6 для одержання зображення сітки на екрані ($d = 18 - 21$ см). Чіткість зображення контролювати шляхом переміщення лінзи від екрана до освітлювача. Установити на оправу лінзи кільцеву діафрагму й, пересуваючи екран, знайти чітке зображення шкали (точка S_1 на рис. 3). Виміряти відстань OS_1 від лінзи до екрана. Повторити ще два рази вимір, зміщаючи трохи екран. Знайти середнє значення OS_1 . Замінити кільцеву діафрагму на дискову й аналогічно визначити OS_2 . За формулою (3) визначити сферичну аберацію $\langle \delta \rangle$ збірної лінзи.

Завдання 4. Визначення хроматичної аберації збиральної тонкої лінзи

Прибрати діафрагму. Настроїти лінзу № 6 для одержання зображення сітки на екрані ($d = 12-15$ см). Установити в оправу сітки освітлювача червоний світлофільтр й, пересуваючи екран (на кінці лави), знайти чітке зображення шкали й визначити фокусну відстань лінзи $F_{\text{черв}}$ за формулою (5).

Повторити ще два рази вимір, зміщаючи трохи лінзу або екран. Обчислити середнє значення $\langle F_{\text{черв}} \rangle$.

Замінити червоний світлофільтр на синій й аналогічно визначити $\langle F_{\text{син}} \rangle$. За формулою (4) обчислити хроматичну аберацію $\langle \delta' \rangle$.

Контрольні питання

1. Які лінзи називають тонкими? Збиральними? Розсіювальними?
2. Що називається головною оптичною віссю лінзи? Фокусом? Побічним фокусом? Фокальною площиною?
3. Запишіть й поясніть формулу лінзи. У чому полягає правило знаків?
4. Побудуйте зображення предмета в лінзі при його положенні на осі перед фокусом.
5. Яке зображення предмета називають дійсним? Уявним?
6. Чим обумовлені сферична й хроматична аберації лінз? Як їх визначити?
- 7 Збірна лінза створює не збільшене дійсне зворотне зображення предмета, який поміщений на деякій відстані від лінзи. Як слід змінити цю відстань, щоб зображення вийшло теж зворотним і дійсним, але збільшеним в два рази?

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.3: Оптика. Квантова фізика. Навчальний посібник для студентів вищих технічних та педагогічних закладів освіти – К.; "Техніка", 2006, -520 с
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є).. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики. Кн.2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. «Либідь», 2001. – 422 с.
4. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 5 Хвильова оптика. - Д. НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. - 58 с. -

Укладачі Гаркуша І.П., Лютий О.І.