ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Тема: Вивчення основних характеристик тонких лінз.

Мета: Опанувати метод визначення основних характеристик тонких лінз.

Обладнання: оптична направляюча в комплекті; набір лінз; освітлювач; екран; набір кольорових світлофільтрів (синій, зелений, жовтий); набір кільцевих діафрагм; лінійка.

1.1 Теоретична частина

1.1.1 Визначення фокусної відстані збиральної лінзи

Лінза (оптична лінза) – найпростіший оптичний елемент, виготовлений з прозорого матеріалу (оптичного безкольорового скла або органічного скла), обмежений двома заломлюючими поверхнями, які мають спільну вісь, або взаємно перпендикулярні площини симетрії. Лінзу називають **тонкою**, якщо її товщина мала у порівнянні з радіусами сферичних поверхонь, що її обмежують. Сферичні тонкі лінзи бувають опуклі й увігнуті. Опуклі лінзи збирають заломлене світло, тому їх називають збиральними (ширина по осі більша за ширину по краям). Увігнуті лінзи розсіюють світло після заломлення, їх називають розсіювальними (ширина по осі менша за ширину по краям). **Оптичний центр лінзи** – точка, проходячи через яку промінь світла не змінює свого напряму.

Головна фокусна відстань збиральної лінзи визначається за формулою:

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f'}, \qquad (1.1)$$

де f' – фокусна відстань лінзи; a – відстань від оптичного центру до предмету; a' – відстань від оптичного центру до зображення.

Оптична сила тонкої лінзи в повітрі визначається формулою (1.2):

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right), \qquad (1.2)$$

де r_1 і r_2 - радіуси кривизни поверхонь лінзи, n - показник заломлення матеріалу лінзи.

У формулах (1.1) і (1.2) при розрахунках необхідно користуватися правилами знаків.

Фокусну відстань лінзи f' можна визначити за формулою (1.1), якщо відомі ***a*** й ***a'***. Але на практиці ***a*** й ***a'*** визначити важко, оскільки оптичний центр лінзи в загальному випадку не співпадає з геометричним центром системи. Якщо у формулі (1.2) величини ***a*** й ***a'*** поміняти місцями, то (1.2) не змінить свій вигляд. Практично це означає, що якщо на місці зображення встановити предмет, то його зображення буде сформовано на тому місці, де раніше був розміщений предмет.

Це можна трактувати і так: якщо, одержавши різке, обернене і збільшене зображення ***A'E'*** предмету ***AE*** на екрані (рис.1.1), виміряти ***a*** й ***a'***, а потім, не зміщуючи предмет і екран, пересунути лінзу ***Л*** в ***Л'*** так, аби відстань між ***Л'*** і ***A'E'*** дорівнювала ***a***. Тоді на екрані ми побачимо різке, обернене і зменшене зображення ***A'E'*** предмету ***AE***, яке знаходитиметься від ***Л'*** на відстані ***a***.

Таким чином, за допомогою лінзи можна сформувати два зображення: збільшене, що знаходиться на відстані ***a'*** від центру лінзи, і зменшене – на відстані ***a***, причому величини ***a*** й ***a'*** пов’язані виразом (1.1). Позначимо

величину, на яку змістився при цьому оптичний центр лінзи ***O***, через ***Δa***. Цю величину можна виміряти переміщенням будь-якої точки лінзи ***Л***, оскільки під час її переміщення положення оптичного центру всередині лінзи не змінюється. Таким чином можна замінити вимірювання переміщення оптичного центру ***O*** вимірюванням переміщення будь-якої відмітки на штативі цієї лінзи.

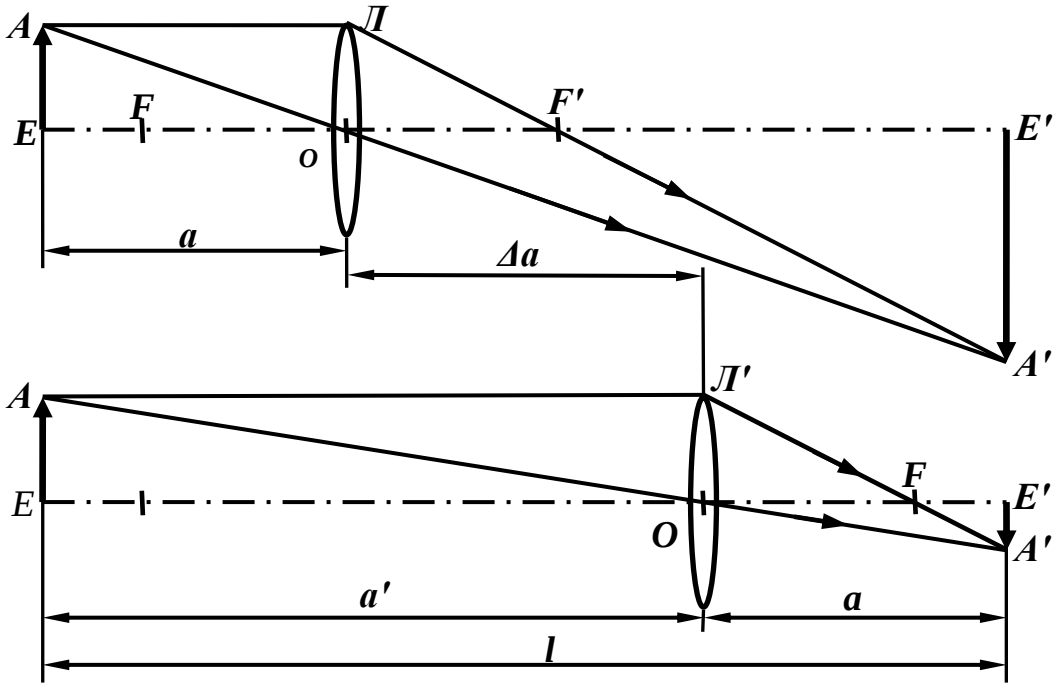


Рисунок 1.1 Визначення головної фокусної відстані збиральної лінзи

З рис.1.1 видно, що $l = a + a'$; $\Delta a = a' - a$. Виразимо ***a*** та ***a′*** через ***l*** та ***Δa***:

$$a' = \frac{l + \Delta a}{2}, a = \frac{l - \Delta a}{2}.$$

Підставивши отримані значення в формулу (1.1), маємо:

$$f' = \frac{l^2 + (\Delta a)^2}{4l}. \qquad (1.3)$$

1.1.2 Оптичні похибки лінз (аберації)

1.1.2.1 Хроматична аберація

Показник заломлення речовини ***n*** залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання та дисперсії $n = f(\lambda)$. Оскільки фокусна відстань лінзи залежить від показника заломлення, що видно з виразу (1.2), то для кожного з монохроматичних променів лінза матиме свою фокусну відстань. Якщо предмет, який освітлюється білим світлом, помістити на певній відстані від лінзи, то його різке зображення знаходитиметься на різних відстанях для різних монохроматичних променів. Причому при переміщенні екрану зображення предмету буде не чітким, а розмитим та забарвленим.

Похибки лінз, обумовлені залежністю головної фокусної відстані від довжини хвилі, називаються **хроматичною аберацією положення.** Усунення хроматичної аберації здійснюється комбінуванням лінз, завдяки чому різні кольорові зображення поєднуються, формуючи у фокальній площині зображення без забарвлення. Виконаємо розрахунок для простого випадку - системи двох лінз з оптичними силами:

$$\Phi_1 = \frac{1}{f_1'} = (n_1 - 1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right), \qquad (1.4)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{f_2'} = (n_2 - 1)\left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right). \qquad (1.5)$$

Якщо лінзи розміщенні впритул одна до одної, то оптична сила системи визначається:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 . \qquad (1.6)$$

Хроматична аберація буде відсутня, якщо оптична сила системи Φ не

залежить від довжини хвилі, тобто $\Phi = const$ і $\frac{d\Phi}{d\lambda} = 0$:

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{dn_1}{d\lambda}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) + \frac{dn_2}{d\lambda}\left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right) = 0$$

або

$$dn_1\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = -dn_2\left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right). \qquad (1.7)$$

Неможливо розрахувати систему, ахроматичну для всіх довжин хвиль. Можливо поєднання лише двох різноколірних зображень, які відповідають двом вибраним довжинам хвиль. Для візуальних приладів обираються наступні довжини хвиль $\lambda_C = 656.3 нм$ і $\lambda_F = 486.1 нм$. Кольори, які відповідають цим хвилям, – зелено-блакитний і червоний – є додатковими і при накладенні дають сприйняття білого кольору. Для матеріалу лінз можна записати:

$$dn_1 = (n_F - n_C)_1,$$

$$dn_2 = (n_F - n_C)_2.$$

Записавши формули (1.4) і (1.5) для $\boldsymbol{n_1}$ і $\boldsymbol{n_2}$ для відповідної довільної довжини хвилі, наприклад, $\lambda_D = 589.3 нм$, і підставляючи значення dn_1 і dn_2 в (1.7), одержимо систему трьох рівнянь:

$$\Phi_1 = (n_D - 1)_1\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right), \qquad (1.8)$$

$$\Phi_2 = (n_D - 1)_2\left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right), \qquad (1.9)$$

$$(n_F - n_C)_1\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = -(n_F - n_C)_2\left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right). \qquad (1.10)$$

Розділимо обидві части останнього рівняння на $\Phi_1\Phi_2$, після перетворень

отримаємо:

$$\frac{(n_F - n_C)_1}{\Phi_2 (n_D - 1)_1} = -\frac{(n_F - n_C)_2}{\Phi_1 (n_D - 1)_2}$$

або

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = -\frac{\partial_1}{\partial_2}, \qquad (1.11)$$

де $\partial_1 = \left(\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}\right)_1$ і $\partial_2 = \left(\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}\right)_2$ – коефіцієнти дисперсії скла лінз. Формула (1.11) виражає умову ахроматизації двох лінзового об'єктиву. Оскільки коефіцієнти дисперсії мають однакові знаки, то знак «–» у формулі (1.11) показує, що Φ_1 та Φ_2 мають різні знаки, тобто ахроматизація може бути досягнута шляхом поєднання збиральної та розсіювальної лінз.

1.1.2.2 Сферична аберація

Нехай діафрагма ***ДД*** з невеликим круглим отвором в центрі (рис.1.2) виділяє вузький пучок параксіальних променів, що виходять з точки ***А***. Замінимо її діафрагмою ***Д₁Д₁*** з кільцевим отвором. Краєві промені сильніше відхиляються в лінзі, ніж параксіальні, і при незмінному положенні джерела ***А*** його зображення буде сформоване на меншій відстані від лінзи, ніж в першому випадку.

Величина $f_1' - f_2'$ називається **поздовжньою сферичною аберацією**. Вона обумовлена тим, що різні кільцеві хвилі мають різні фокусні відстані а, отже, різні значення ***a'*** при заданому ***a***. Внаслідок сферичної аберації зображення предмету виходить розмитим.

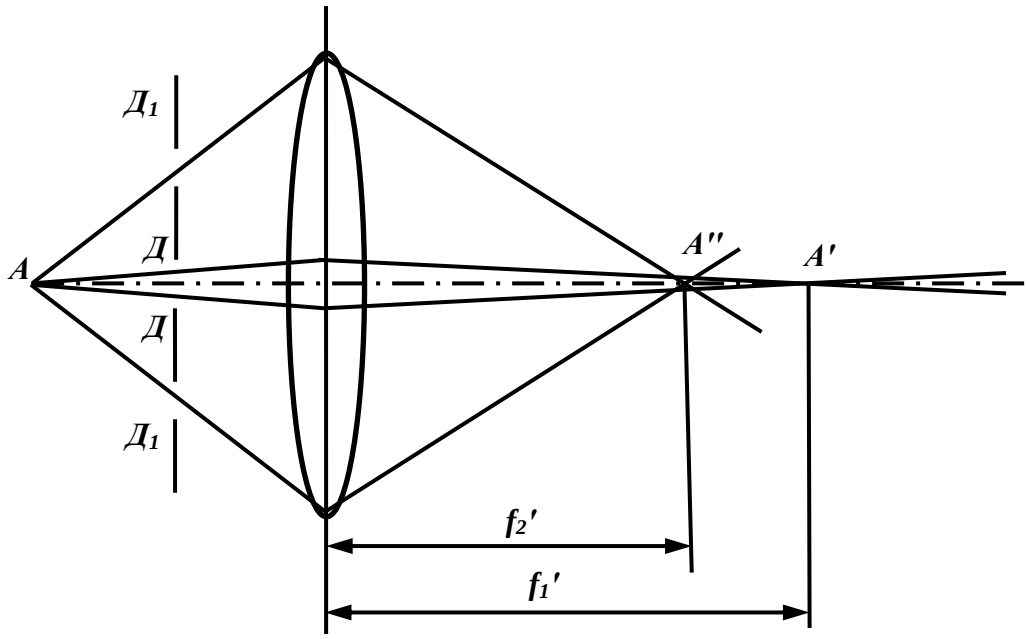


Рисунок 1.2 До визначення сферичної аберації

Промені від джерела ***A***, заломлені різними кільцевими зонами лінзи, перетинають головну оптичну вісь в різних точках (***A'*** і ***A''***) і, в якому б місці не помістили екран, точка ***A*** зображується у вигляді розмитого кружка. У одному з положень ***A'*** і ***A''*** діаметр світлової плями буде найменшим, що відповідає найбільш різкому зображенню.

1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Визначення головної фокусної відстані оптичних систем

1.2.1.1 Визначення головної фокусної відстані збиральної лінзи

1. Встановити на оптичній лаві 1 рейтер з освітлювачем 2, рейтер з предметом 3, рейтер зі збиральною лінзою 4 та рейтер з екраном 5 (рис.1.3).

Обрати базу ***l*** таку, аби на екрані виходили чіткі зображення предмету (літери «Т») при двох положеннях лінзи: перший раз - збільшене, другий раз - зменшене.

2. При обраній фіксованій базі переміщенням рейтеру з лінзою 4 добитися різкого зображення предмету на екрані. За допомогою шкали на оптичній лаві 1 визначити положення лінзи щодо екрану 5 або освітлювача 2.

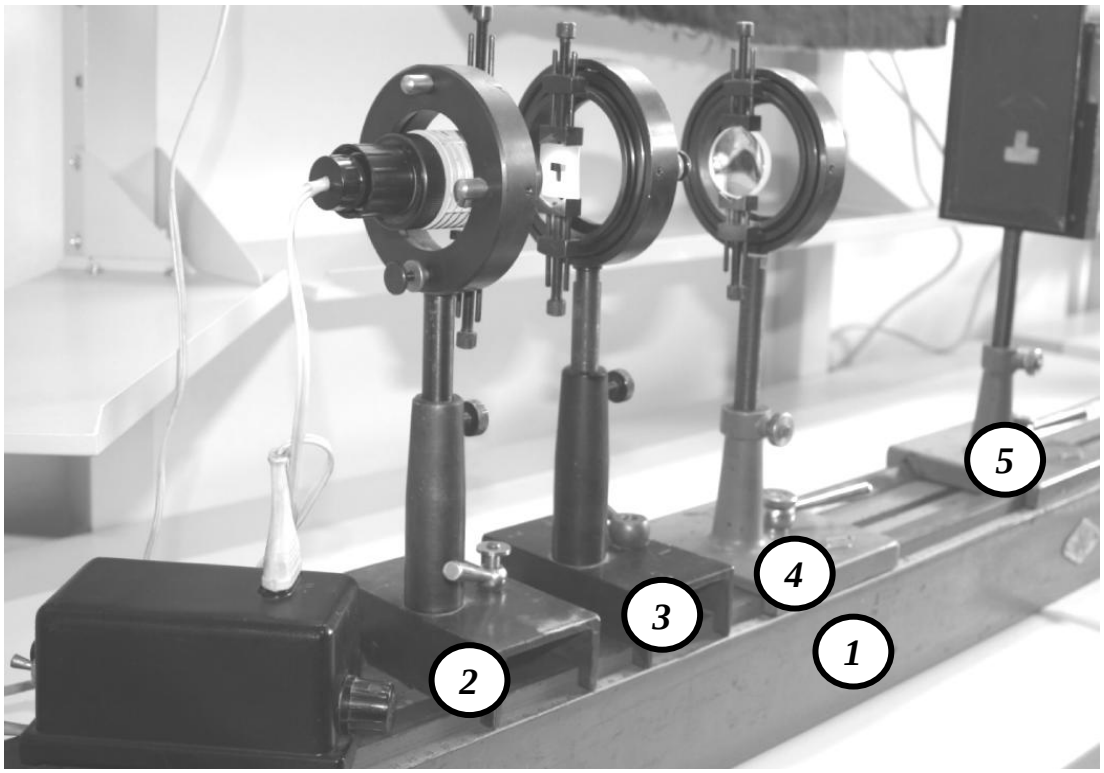


Рисунок 1.3 Установка для визначення фокусної відстані збиральної лінзи:
1 – оптична лава; 2 – освітлювач; 3 – предмет; 4 – збиральна лінза; 5 – екран

3. Перемістити рейтер з лінзою 4 при заданій базі до отримання нового зображення предмету на екрані 5. Виміряти відстань від лінзи 4 до екрану 5 або джерела 2. За допомогою одержаних значень ***a*** та ***l*** (рис.1.1) за формулою (1.3) обчислити f'. Повторити вимірювання для однієї лінзи три рази. Результати вимірювань занести до таблиці 1.1.

4. Повторити вимірювання для другої збиральної лінзи. Результати вимірювань усереднити, розрахувати фокусні відстані обох лінз, оцінити довірчі інтервали знайдених значень f'. Результати занести до таблиці 1.1.

1.2.1.2 Визначення головної фокусної відстані системи з двох збиральних лінз

1. Скласти систему з лінз (рис.1.4), фокусні відстані яких були визначені в п.п. 1.2.1.1. Аналогічним способом визначити фокусну відстань системи лінз. Отримані результати занести в таблицю 1.1. Розрахувати f' за формулою (1.3).

2. Розрахувати оптичну силу системи за формулою:

$$\Phi_C = \frac{1}{f'_C}. \qquad (1.12)$$

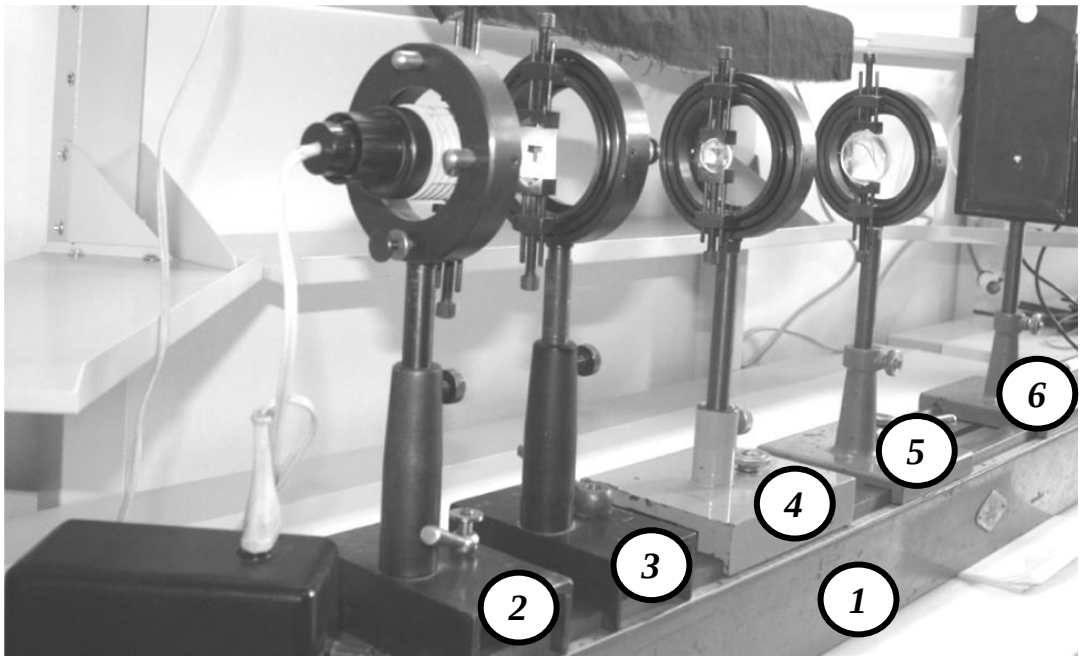
3. Розрахувати оптичну силу системи за формулою:

$$\Phi_C = \Phi_1 + \Phi_2 - \Delta \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2. \qquad (1.13)$$

де $\boldsymbol{\Phi_1}$ – оптична сила першої лінзи; $\boldsymbol{\Phi_2}$ – оптична сила другої лінзи; $\boldsymbol{\Delta}$ – відстань між центрами лінз, які складають дану систему (визначається на шкалі на оптичній лаві за положенням відповідних рейтерів).

4. Розрахувати похибки при визначенні $\boldsymbol{\Phi_C}$, порівняти значення,

одержані за допомогою формул (1.12) і (1.13). Зробити висновок про застосовність формули (1.13) для розрахунку оптичної сили системи лінз.



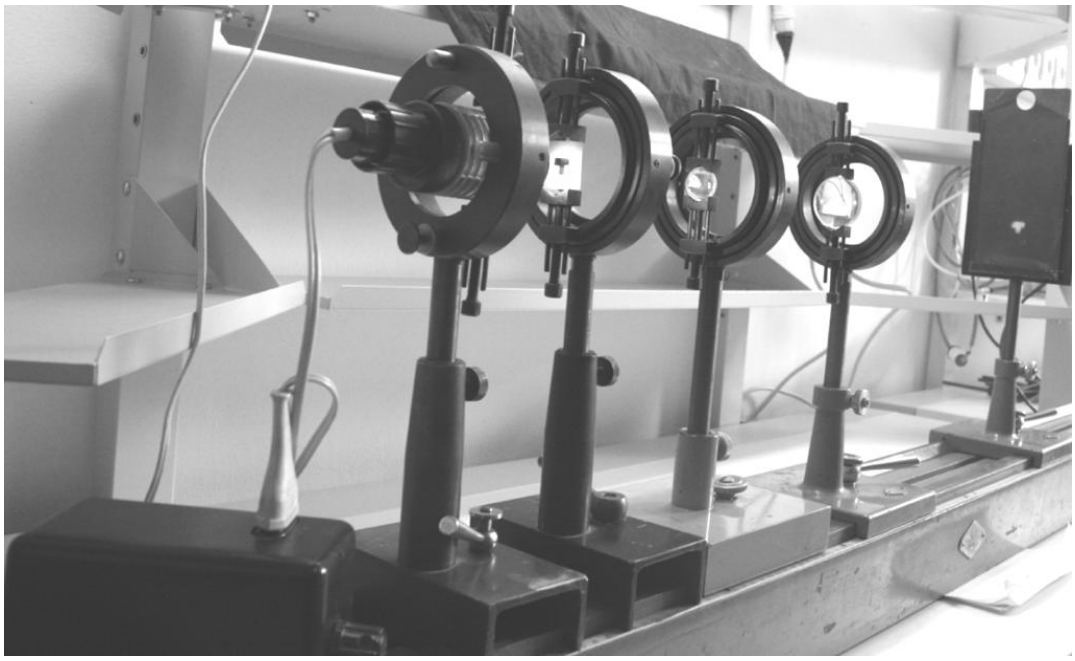


Рисунок 1.4 Установка для визначення головної фокусної відстані системи з двох збиральних лінз; 1 – оптична лава; 2 – освітлювач; 3 – предмет; 4 – збиральна (для п.п. 1.2.1.3 – розсіювальна)лінза; 5 – збиральна лінза; 6 – екран

1.2.1.3 Визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи

Розсіювальна лінза не дає дійсного зображення, тому визначити її фокусну відстань методом, описаним в п.п. 1.2.1.1., неможливо.

Для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи складають систему з двох лінз: розсіювальної лінзи з фокусною відстанню f'_2 та збиральної лінзи з фокусною відстанню f_1'. Утворена ними система повинна давати дійсне зображення.

Далі необхідно визначити фокусну відстань цієї системи f_C', перерахувати фокусні відстані f_C' і f_1' в оптичні сили і за формулою (1.13) розрахувати оптичну силу і фокусну відстань розсіювальною лінзи. Отримані результати занести в таблицю 1.1.

1.2.2 Дослідження аберацій

1.2.2.1 Визначення величини хроматичної аберації положення

Для визначення хроматичної аберації вивчається залежність фокусної відстані лінзи від довжини хвилі падаючого світла. Для цього необхідно встановити тримач для світлофільтрів одразу після джерела випромінювання. З формули (1.1) видно, що якщо залишати постійною відстань ***a***, то величини ***a'*** і f' будуть пропорційні одна одній. Це дозволяє спростити вимірювання і розрахунки в даному завданні. Оскільки нас цікавить характер залежності f' від λ, то замість величини f' можна вимірювати пропорційну їй величину ***a'***. При цьому ***a*** залишається постійною, а екран переміщується до отримання

різкого зображення. Змінюючи світлофільтри, переміщують екран до отримання чіткого зображення, відповідного даному значенню довжини хвилі λ. Виміряні значення f' занести до таблиці 1.2 і побудувати графік залежності $f'(\lambda)$.

1.2.2.2 Визначення поздовжньої сферичної аберації

1. На оптичну лаву встановити джерело випромінювання А, діафрагму з круглим отвором ДД та збиральну лінзу з великим діаметром.

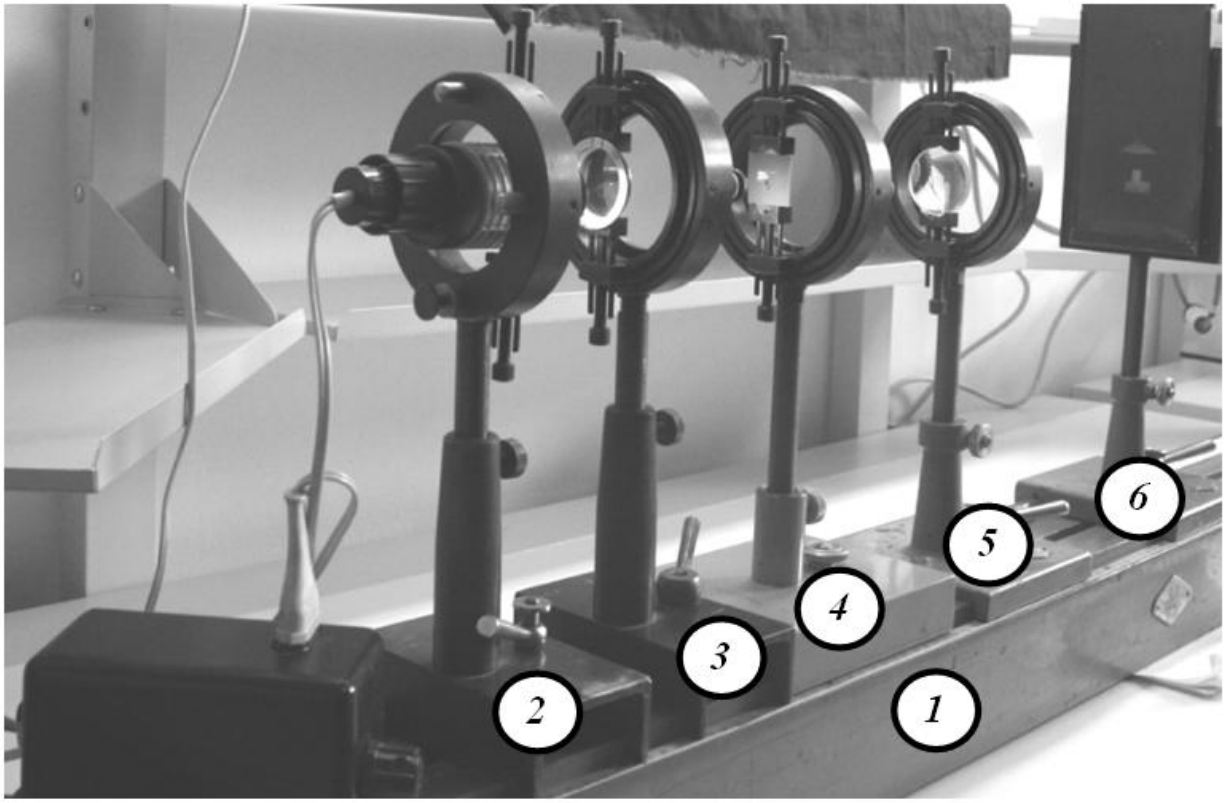


Рисунок 1.5 Установка для визначення хроматичної аберації:
1 – оптична лава; 2 – освітлювач; 3 – світлофільтр; 4 – предмет;
5 – лінза; 6 – екран

2. Пересуваючи екран, добитися різкого зображення предмету. Встановити діафрагму з кільцевим вирізом. Пересуваючи екран, знову одержати найбільше чітке зображення предмету.

3. Повторити експеримент для різних кільцевих діафрагм, вимірюючи відповідні значення f'. Отримані результати занести до таблиці 1.3. Побудувати на міліметрівці графік залежності $f'(r)$, де r - радіус діафрагми.

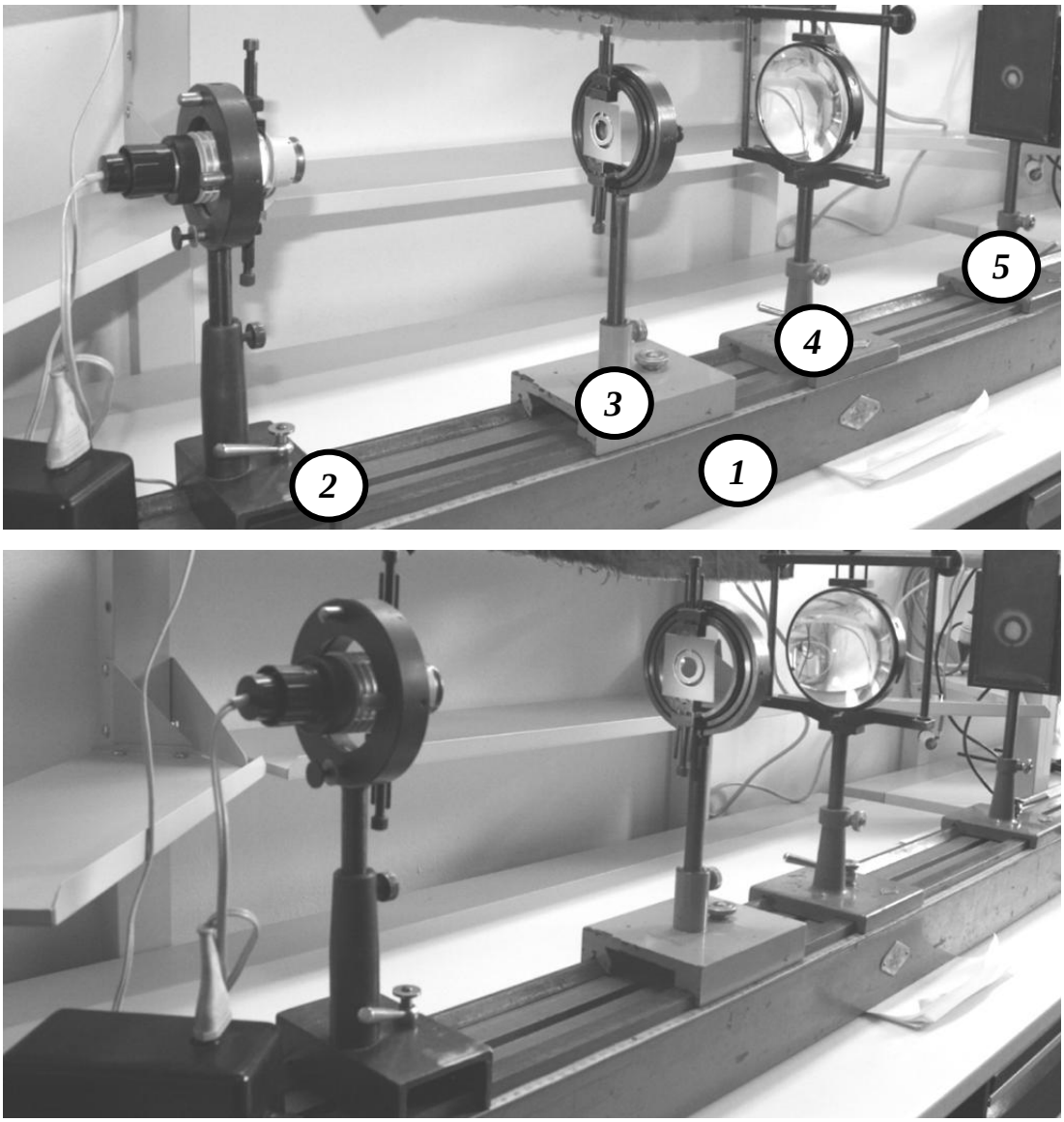


Рисунок 1.6 Установка для визначення поздовжньої сферичної аберації:
1 – оптична лава; 2 – освітлювач; 3 – діафрагма; 4 – лінза; 5 – екран

1.3 Обробка результатів

1.3.1 Розрахунок головної фокусної відстані оптичних систем

Розрахувати оптичну силу системи двох збиральних лінз за формулою (1.12):

$$\Phi_C = \frac{1}{f'_C} =$$

Розрахувати оптичну силу системи двох збиральних лінз за формулою (1.13):

$$\Phi_C = \Phi_1 + \Phi_2 - \Delta \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 =$$

Таблиця 1.1 Результати та розрахунки фокусних відстаней

Тип лінзи	***№***	***a, мм***	***l, мм***	***f ', мм***	***f '$_{сер}$, мм***
Збиральна лінза 1					
Збиральна лінза 2					
Система з двох збиральних лінз					
Система з збиральної та розсіювальної лінзи					

Висновок_____

_____

_____

_____

Розрахувати оптичну силу системи, що складається із збиральної та розсіювальної лінз за формулою (1.12):

$$\Phi_C = \frac{1}{f'_C} =$$

Визначити та розрахувати фокусну відстань розсіювальної лінзи з формули (1.13):

$$\Phi_C = \Phi_1 + \Phi_2 - \Delta \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 =$$

Висновок_____

_____

_____

_____

1.3.2 Розрахунок аберацій

1.3.2.1 Хроматична аберація положення

Таблиця 1.2 Дані по хроматичній аберації положення

Світлофільтр	зелений	оранжевий	фіолетовий	червоний
f'				

1.3.2.2 Поздовжня сферична аберація

Таблиця 1.3 Дані по поздовжній сферичній аберації

Розмір діафрагми	№___	№___	№___	№___
f'				

1.4 Контрольні запитання

1. Що таке головна фокусна відстань оптичної системи? Виведення формули для практичного визначення фокусної відстані збиральної лінзи.

2.Описати методику визначення фокусної відстані збиральної лінзи та системи двох лінз.

3. Що таке оптична сила системи? Її визначення.

4. Описати методику визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи

5. Що таке дисперсія світла?

6. Що таке хроматична аберація?

7. Описати методику визначення хроматичної аберації для системи двох лінз.

6. Усунення хроматичної аберації.

8. Що таке поздовжня сферична аберація?

9. Методика визначення та розрахунку сферичної аберації.