

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

4.1.1/4.1.2

Геометрическая оптика

Автор:
Б05-208

Долгопрудный 2024

1 Цель работы

Изучение свойств оптических систем: определение фокусных расстояний линз, определение фокусных расстояний и положения главной и фокальной плоскостей сложной оптической системы, изучение аббераций оптических систем.

2 В работе используются

Оптическая скамья с набором рейтеров, положительные и отрицательные линзы, экран, осветитель с ирисовой диафрагмой, зрительная труба, кольцевые диафрагмы, линейка.

3 Теоретическая справка

Центрированная оптическая система - однородные преломляющие или отражающие среды, отделённые одна от другой сферическими поверхностями, центры кривизны которых лежат на одной прямой, называемой **главной оптической осью**

Идеальной оптической системой называют систему, в которой имеет место гомоцентричность пучков и изображение подобно предмету. Если изображение в центрированной оптической системы формируется лучами, составляющими малые углы с главной оптической осью (**праксиальные лучи**), её можно считать идеальной.

Главными оптическими плоскостями называем плоскости, переходящие одна в другую с поперечным увеличением $(\frac{y'}{y})$, где y, y' - координаты точки и её изображения по оси y) равным 1, точки их пересечения с главной оптической осью - главные точки системы.

Теорема Лагранжа-Гельмгольца $ny\alpha = \text{const}$,

где n - коэффициент преломления,

α - угол между лучом и главной оптической осью.

Фокальные плоскости

1. Передняя - любая точка изображается бесконечно удалённой точкой
2. Задняя - лучи, вышедшие из бесконечно удалённой точки пространства предметов, пересекаются в некоторой её точке.

Оптическая сила системы $\Phi = \frac{n}{f}$

Узловыми называют точки, переходящие друг в друга с угловым увеличением $(\frac{\alpha'}{\alpha})$ равным 1, плоскости, проходящие через них - **узловыми**. Луч, прошедший через узловую точку, после прохождения системы параллелен своему исходному направлению и проходит через 2ую узловую точку.

Продольное увеличение $\frac{\delta x'}{\delta x} = \frac{\alpha y'}{\alpha' y} = \frac{n' y'^2}{n y^2}$

Сложение оптических систем

Пусть имеются 2 системы с фокусными расстояниями F_1, F'_1, F_2, F'_2 , расположенные на расстоянии Δ между передним фокусом 2ой и задним фокусом первой, они эквиваленты системе с $F_\Sigma = \frac{F_1 F'_1}{\delta}$

Телескопическая система - оптическая система без фокальных плоскостей (получается как сложная система при $\Delta = 0$)

3.1 Определения фокусных расстояний

Формула тонкой линзы имеет вид

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

где f - фокусное расстояние, a - расстояния от предмета до линзы, b - расстояние от изображения до линзы. Для измерения фокусного расстояния тонкой собирающей линзы может использоваться схема с рис. 1. и формула (2).

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

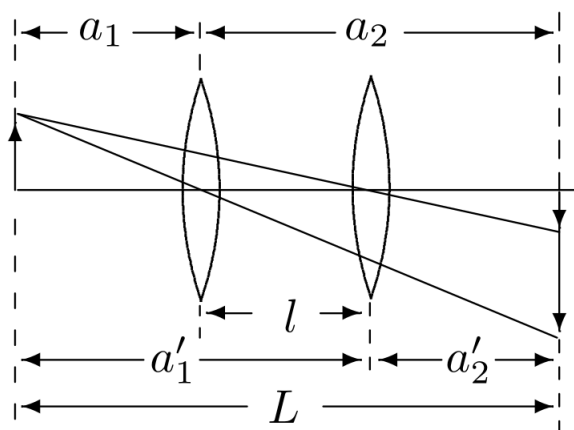


Рис. 1: Схема измерения фокуса тонкой собирающей линзы

Также фокусное расстояние тонкой собирающей линзы можно измерить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность. Если расположить линзу между предметом и трубой и найти четкое изображение предмета, то расстояние от линзы до предмета будет равно фокусному.

Для определения расстояния тонкой рассеивающей линзы воспользуемся схемой на рис. 2 и формулой тонкой линзы. Также можно воспользоваться зрительной трубой, настроенной на бесконечность. Если расположить предмет у нее в фокусе, то изображение переместится в бесконечность, что можно проверить с помощью зрительной трубы.

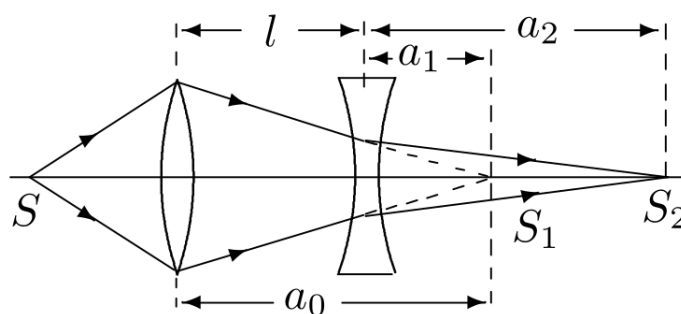


Рис. 2: Схема измерения фокуса тонкой рассеивающей линзы

Для определения фокусного расстояния и положения главных плоскостей сложной оптической системы может использоваться метод Аббе: схема на рис. 3 и формула (3).

$$f = \frac{\Delta x}{y/y_1 - y/y_2} \quad (3)$$

4 Ход работы

Определение фокусных расстояний линз с помощью подзорной трубы

Собирающая линза

После настройки трубы на бесконечность поместили её после источника и собирающей линзы линзы:

$$\begin{aligned} F_{5.1} &= 73\text{мм}, F'_{5.1} = 76\text{мм}, \\ F_{5.2} &= 47\text{ мм}, F'_{5.2} = 53\text{мм} \end{aligned}$$

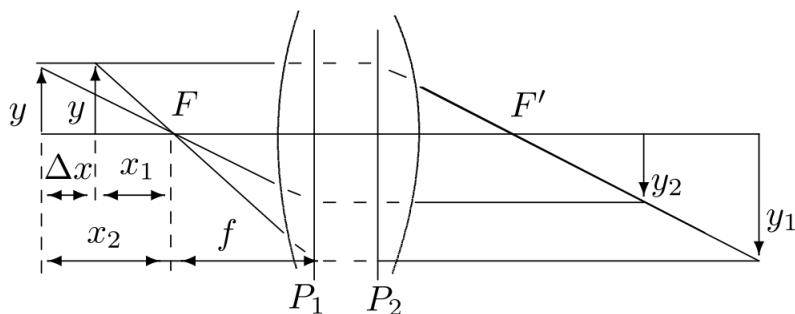


Рис. 3: Схема определения фокусного расстояния и положения главных плоскостей сложной оптической системы

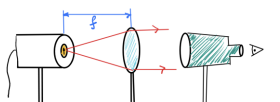


Рис. 4: Схема установки

$$F_{5.3} = 203 \text{ мм}, F'_{5.3} = 203 \text{ мм}, \\ F_{5.4} = 297 \text{ мм}, F'_{5.4} = 299.5 \text{ мм},$$

Поскольку разница фокусных расстояний составляет менее 1го процента от среднего фокусного расстояния (для всех линз кроме 5,2), их можно считать плоскими.

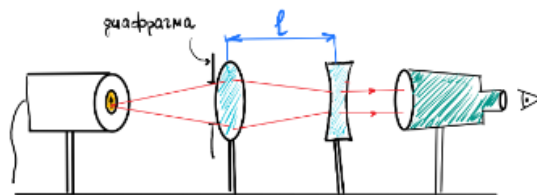
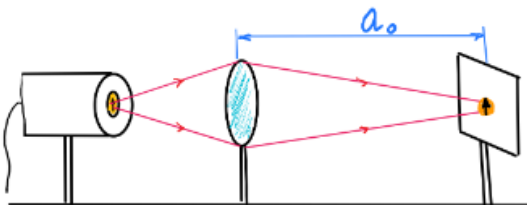
Определим σ_f

$F_{5.4}$
297 мм
295 мм
296 мм
297 мм

$$\langle F \rangle = 296.25 \text{ мм}$$

$$\sigma_F = 0.82 \text{ мм}$$

4.1 Рассеивающая линза

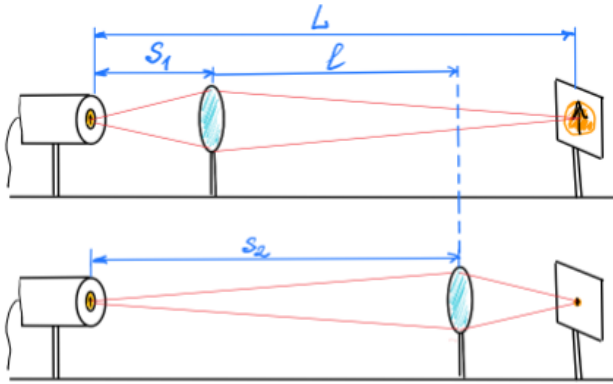


$a_0 = 103 \pm 0.5 \text{ мм}$ - расстояние от собирающей линзы до экрана при наиболее чётком изображении предмета.

$l = 220 \pm 0.5 \text{ мм}$ - расстояние между линзами, при котором в трубу видно изображение предмета.

$$F_{5.5} = 117 \pm 0.5 \text{ мм}$$

4.2 Метод Бесселя



Используя линзу 5,1, получили:

$s_1 = 106$ мм, $L - s_1 = 275$ мм, $s_2 = 266$ мм $\Rightarrow l = 160$ мм, согласуется с измеренным непосредственно

По формуле тонкой линзы:

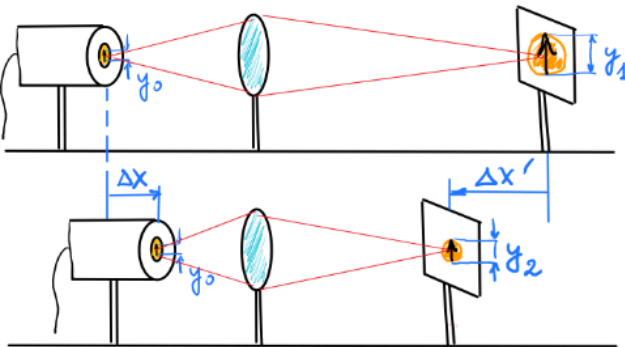
$$f = \frac{s(L-s)}{L} = 76.5 \pm 0.5 \text{ мм}$$

По формуле Бесселя:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L} = 78.4 \pm 0.5 \text{ мм},$$

а значит, в пределах погрешности результаты совпадают.

4.3 Метод Аббе



$$y_1 = 3.6 \pm 0.5 \text{ мм}, \Delta x = 2.7 \text{ см}, y_2 = 1.5 \pm 0.5 \text{ мм}, \Delta x' = 9.3 \text{ см}$$

$$f = \sqrt{\frac{\Delta x \Delta x' y_1 y_2}{(y_1 - y_2)^2}} = 69 \pm 5 \text{ мм},$$

что вновь совпадает с полученными ранее результатами в пределах погрешности.

Получаем:

Способ	результат
Подзорная труба	76 ± 0.2 мм
Формула тонкой линзы	76.5 ± 0.5 мм
Метод Бесселя	78.4 ± 0.5 мм
Метод Аббе	69 ± 5 мм

В пределах погрешности результаты совпадают.

Результаты для развёрнутой другой стороной линзы так же сопали в пределах погрешностей.

5 Подзорная труба Галилея

5.1 Сборка

В качестве коллиматора мы взяли линзу с фокусным расстоянием ≈ 295 мм, объектива - 5,3, окуляра - 5,5.

5.2 Измерения

Угловой размер исходного предмета составил 0.73 ± 0.01 , а при наблюдении в подзорную трубу Галилея - 1.37 ± 0.01 .

Поэтому экспериментальное увеличение:

$$\gamma_{\text{эксперимент}} = 1.88 \pm 0.02$$

По расчётам получаем:

$$\gamma_{\text{теор}} = 1.73 \pm 0.02$$

Диаметр объектива был равен 1 см, диаметр окуляра - 2 см, Поэтому увеличение составило 2. Поскольку измерены диаметры были с большими погрешностями, расхождение результатов было ожидаемо.

6 Сложная оптическая система

Сложная оптическая система была составлена из линз 5.1 и 5.5

При измерении с подзорной трубой получили

$$\begin{aligned} F_1 &= 95 \text{ мм} \\ F_2 &= 109 \text{ мм} \end{aligned}$$

Раскрыв скобки в формуле Бесселя, Получаем:

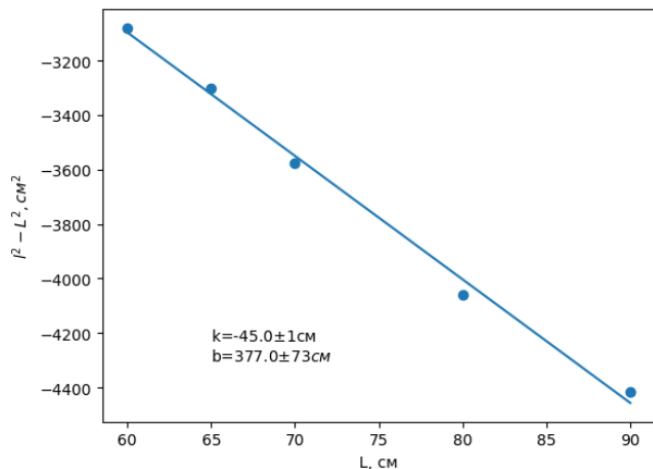
$$l^2 - L^2 = -L(2\delta + 4f) + \delta^2 + 4f\delta$$

Поэтому, производя замену переменных и вводя обозначения:

$$y = l^2 - L^2, x = L, k = -(2\delta + 4f), b = \delta^2 + 4f\delta$$

Приходим к линейной зависимости.

Расчёт по полученным нами данным дал:



$$\begin{aligned} \delta &= b / -k = 8.37 \pm 1.63 \text{ см} \\ f &= -\frac{2\delta + k}{4} = 15.93 \pm 1.52 \text{ см} \end{aligned}$$

Вывод: Мы рассмотрели несколько способов определения фокусного расстояния линзы и сделали выводы об их точности. Мы исследовали подзорную трубу Галилея и сделали вывод о применимости теоретических расчётов для определения углового увеличения. И кроме того, Мы исследовали оптическую систему, состоящую из 2 линз, и рассчитали для неё фокусное расстояние и положения главных плоскостей.