

Лабораторная работа 4.1.1

Геометрическая оптика

Балдин Виктор Б01-303

4 марта 2025 г.

Цель работы: изучение свойств оптических систем: определение фокусных расстояний линз, определение фокусных расстояний и положения главной и фокальной плоскостей сложной оптической системы, изучение aberrаций оптических систем.

В работе используются: оптическая скамья с набором рейтеров, положительные и отрицательные линзы, экран, осветитель с ирисовой диафрагмой, зрительная труба, кольцевые диафрагмы, линейка.

1. Введение

Определения фокусных расстояний

Формула тонкой линзы имеет вид

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

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).

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

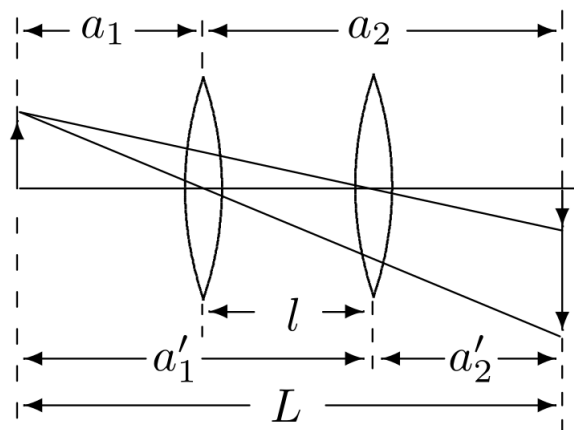


Рис. 1: Схема измерения фокуса тонкой собирающей линзы

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.

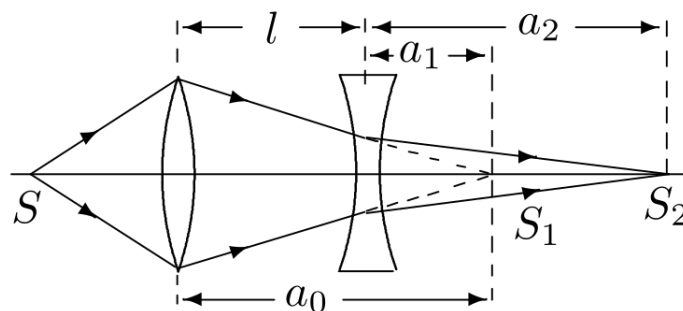


Рис. 2: Схема измерения фокуса тонкой рассеивающей линзы

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

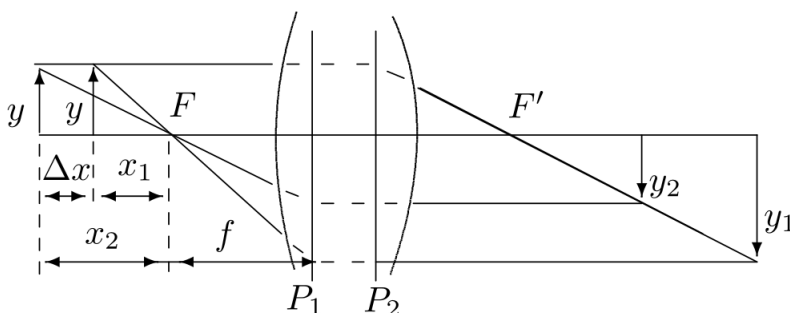


Рис. 3: Схема определения фокусного расстояния и положения главных плоскостей сложной оптической

$$f = \frac{\Delta x}{y/y_1 - y/y_2}$$

Пусть пучок света, попадающий в объектив, составляет с оптической осью угол φ_1 , а пучок, выходящий из окуляра, — угол φ_2 . Увеличение γ зрительной трубы по определению равно

$$\gamma = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1},$$

но также из рис. 3 следует, что

$$\gamma_K = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2},$$

где D_1 - ширина пучка, прошедшего через объектив, а D_2 - ширина пучка, вышедшего из окуляра

1.1. Моделирование трубы Галилея

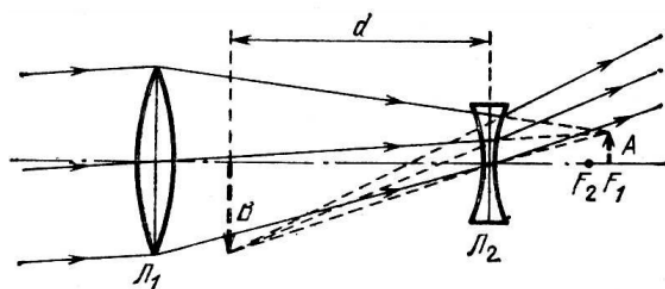


Рис. 4: Ход лучей в трубе Галилея

1.2. Моделирование микроскопа

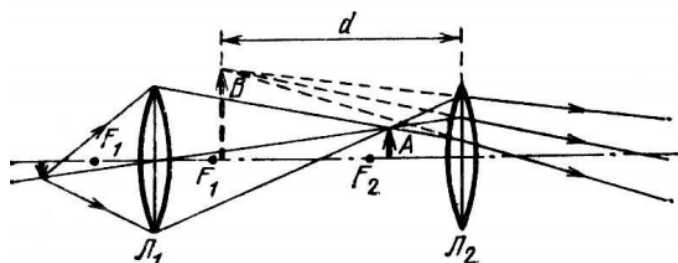


Рис. 5: Ход лучей в микроскопе

Ход лучей в микроскопе показан на рис. 6. Увеличение микроскопа вычисляется по формуле

$$\gamma_M = \Gamma_{ob} \Gamma_{oc} = \frac{\Delta}{f_1} \frac{L}{f_2},$$

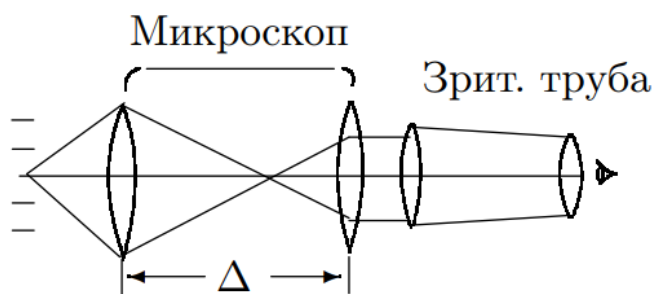


Рис. 6: Схема микроскопа

Ход работы

Определения фокусных расстояний

Юстировка сначала разделим имеющийся набор на собирающие и рассеивающие линзы и отцентрируем установку. Собирающие линзы: 1, 2, 3; рассеивающие линзы: 4.

Определение фокусных расстояний линз с помощью экрана Воспользуемся сначала схемой на рис. 1 и формулой (2) для определения фокусного расстояния линзы 1. При измерении расстояний получаем $L = 48.0 \pm 0.2$ см, $l = 25.1 \pm 0.2$ см. Отсюда ее фокусное расстояние $f = 8.7 \pm 0.3$ см.

Также мы можем воспользоваться формулой тонкой линзы для определения фокусного расстояния: $a = 31.0 \pm 0.3$, $b = 14.0 \pm 0.3$. Тогда $f = 10.0 \pm 0.5$ см.

Теперь воспользуемся схемой на рис. 2 и формулой тонкой линзы для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы 4: $a_0 = 31 \pm 0.3$ см, $l = 24.2 \pm 0.3$ см, $a_2 = 17.5$ см. Отсюда $f = 8.5 \pm 4$ см.

Определение фокусных расстояний линз с помощью зрительной трубы Фокусные расстояния, определенные с помощью зрительной трубы, составляют

- для линзы 1 $f = 10.5 \pm 0.3$ см, что существенно отличается от значения $f = 8.7 \pm 0.3$ см, полученного ранее, поэтому линзу нельзя считать тонкой.
- для линзы 2 $f = 13.4 \pm 0.3$ см.
- для линзы 4 $f = 9.0 \pm 0.4$ см.

Определение фокусного расстояния сложной оптической системы воспользуемся схемой на рис. 3 и формулой (3) для определения фокусного расстояния и положения главных плоскостей системы методом Аббе. Для этого сначала соберем установку согласно рис. 3, расположив линзы 1 и 2 на расстоянии $l_{12} = 30$ см друг от друга. Измерив необходимые расстояния, получаем: $\Delta x = 2.4 \pm 0.3$ см, $y_1 = 5.1 \pm 0.1$ см, $y_2 = 12.3 \pm 0.1$ см, $y = 2.0$ см. Отсюда фокусное расстояние системы $f = 10.5 \pm 0.5$ см. С помощью зрительной трубы найдем главные фокусы системы: для этого закрепим трубу за второй линзой и будем отодвигать источник, пока не увидим четкое изображение. Для определения второго фокуса поменяем линзы местами, не меняя расстояний в системе. Полученные значения главных фокусов $F_{1\Sigma} = 5.1 \pm 0.3$ см, $F_{2\Sigma} = 4.5 \pm 0.3$ см.

Аберрации реальных оптических систем

Сферические аберрации для качественного наблюдения сферических аберраций расположим осветитель и экран на дальних концах скамьи. Линзу 3 расположим на расстоянии чуть большем фокусного от источника. На источник наденем маску минимального размера. Перемещая линзу, получим на экране четкое изображение. При смене маски наблюдаем, что при неизменном расстоянии от источника до линзы расстояние от линзы до изображения заметно меняется. Это объясняется сферической аберрацией.

Для количественной оценки сферической аберрации сначала получим параллельный пучок от линзы для параксиальных лучей. Затем, увеличивая диаметр маски, будем менять положение линзы с помощью нониусного винта и измерять расстояния по нониусной шкале d . Результаты измерений представлены в табл. 1. Погрешность измерения d составляет 0.1 мм.

Таблица 1: Сферические абберации

h , мм	0	5	20
d , мм	0	0.8	2.9

По результатам этих измерений построим зависимость $\delta s(h)$, представленную на рис. 4. Экстраполируя эту зависимость до $h = r$, где r – радиус линзы, найдем продольную абберацию $\delta s(r) = \Delta f(r) = 3.6$ мм.

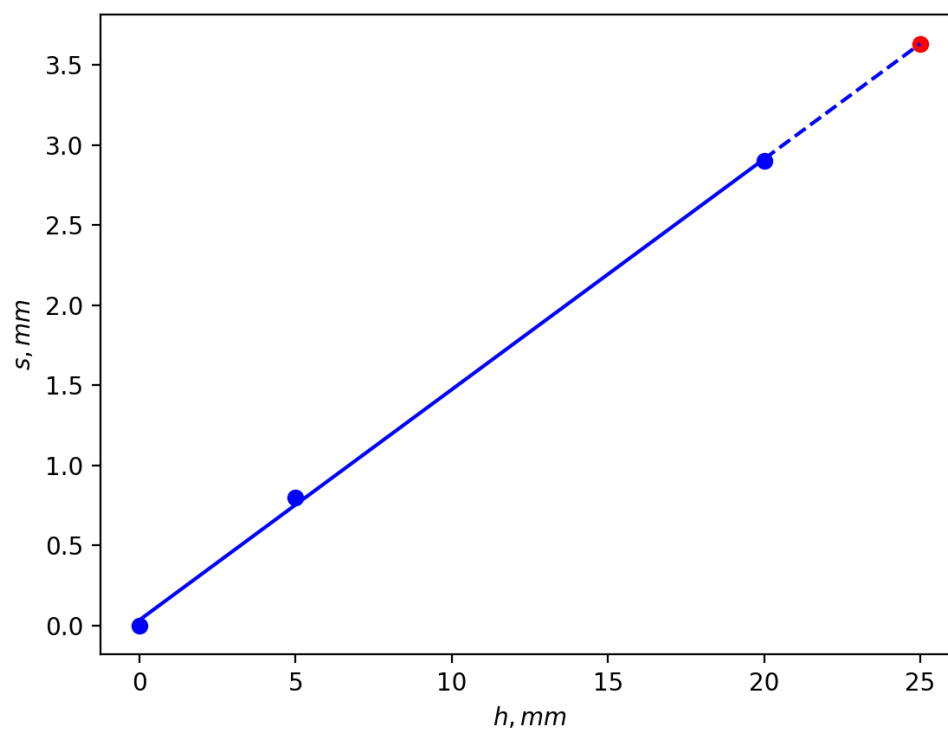


Рис. 7: Сферические абберации

Хроматические aberrации пользуясь тремя светофильтрами, найдем значения $f_D = 13.5$ мм, $f_F = 13.9$ мм, $f_C = 13.3$ мм. Отсюда, пользуясь формулами (5) и (7), находим $\nu \approx 23$, $\delta f_{\text{хр}} = 0.6$ мм.

Вывод

Мы измерили фокусные расстояния нескольких линз, а также системы линз. Получены значения:

- для линзы 1 фокусное расстояние $f = 10.5 \pm 0.3$ см, линзу нельзя считать тонкой
- для линзы 2 фокусное расстояние $f = 13.4 \pm 0.3$ см
- для линзы 4 фокусное расстояние $f = 9.0 \pm 0.4$ см при измерении с помощью трубы, $f = 8.5 \pm 0.4$ см при измерении с помощью экрана. Линзу можно считать тонкой
- для системы из линз 1 и 2 фокусное расстояние составляет $f = 10.5 \pm 0.5$ см, положения главных фокусов $F_{1\Sigma} = 5.1 \pm 0.3$ см, $F_{2\Sigma} = 4.5 \pm 0.3$ см

Также качественно пронаблюдали и оценили сферические и хроматические aberrации. Получены значения продольной сферической aberrации $\delta s(r) = 3.6$ мм и хроматической aberrации $\delta f_{\text{хр}} = 0.6$ мм, а также оценено число Аббе $\nu \approx 23$.