

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ИЗУЧЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Выполнил:
Деревянченко Михаил
Группа:
Б03-106

Долгопрудный, 2023

1. Теоретические сведения

I. Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы

С п о с о б 1. Фокусное расстояние тонкой положительной линзы можно определить, исходя из формулы линзы. Для этого достаточно измерить расстояния a_1 и a_2 (рис. 2), полагая $\delta \rightarrow 0$, и затем вычислить f по формуле (1).

Проведя измерения при увеличенном и при уменьшенном изображении (рис. 3), а также при различных положениях предмет a и изображения, можно найти среднее значение фокусного расстояния. Точность определения фокусного расстояния по формуле линзы зависит от расстояния между предметом и изображением. Используя соотношение (1), самостоятельно решите вопрос, какое положение предмет a и экрана позволяет получить наиболее точное значение f .

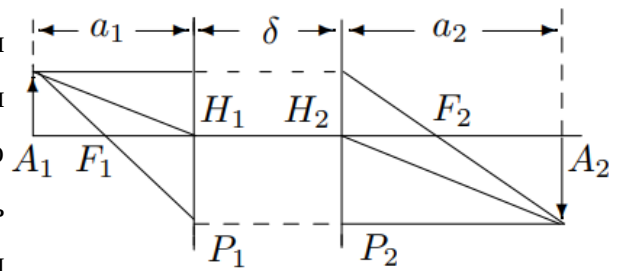


Рис. 2. Построение изображения в толстой линзе

С п о с о б 2. Пусть расстояние между предметом и экраном превышает $4f$. Нетрудно убедиться, что при этом всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получают отчётливые изображения предмет a (в одном случае уменьшенное, в другом — увеличенное). Из соображений симметрии ясно, что $a_1 = a_2'$ и $a_2 = a_1'$ (рис. 3). Обозначая расстояние между предметом и экраном через L , а расстояние между двумя положениями линзы через l , получим: $L = a_1 + a_2$;

$l = a_1' - a_1 = -a_2' + a_2$. Отсюда

$$a_1 = \frac{L-l}{2}; a_2 = \frac{L+l}{2};$$

Подставляя в формулу линзы, найдём после несложных преобразований:

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

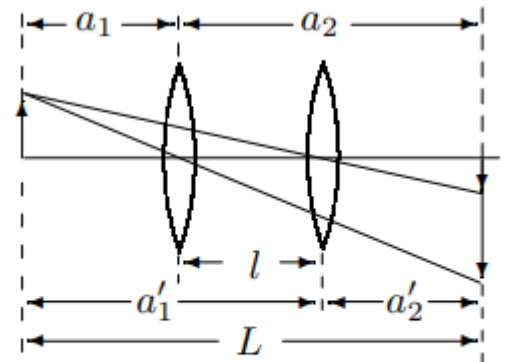


Рис. 3. Измерение фокусного расстояния тонкой положительной линзы

Для определения фокусного расстояния достаточно, таким образом, измерить расстояние L между предметом и экраном и расстояние l между двумя положениями линзы, при которых на экране видны чёткие изображения.

С п о с о б 3. Фокусное расстояние тонкой положительной линзы можно определить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность, то есть на параллельный пучок лучей. Разместив между предметом и зрительной трубой положительную линзу и перемещая её вдоль оси системы, можно найти резкое изображение предмета в окуляре зрительной трубы. При этом расстояние от середины линзы до предмета равно фокусному расстоянию тонкой линзы. Для толстой линзы зрительная труба позволяет определить только положение главного фокуса.

II. Определение фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы

С п о с о б 1. Определение фокусного расстояния отрицательной линзы затруднено тем, что изображение предмета получается мнимым (при действительном источнике) и поэтому не может быть получено на экране. Эту трудность легко обойти с помощью вспомогательной положительной линзы.

Сначала с помощью положительной линзы получают на экране действительное изображение предмета S (точка S_1 на рис. 4). Затем на пути лучей, выходящих из положительной линзы, располагают исследуемую отрицательную линзу и, отодвигая экран, получают четкое изображение предмета на экране, образованное двумя линзами. Точка S_1 пересечения сходящихся лучей играет по отношению к отрицательной линзе роль мнимого источника. Изображение источника переместится теперь в точку S_2 .

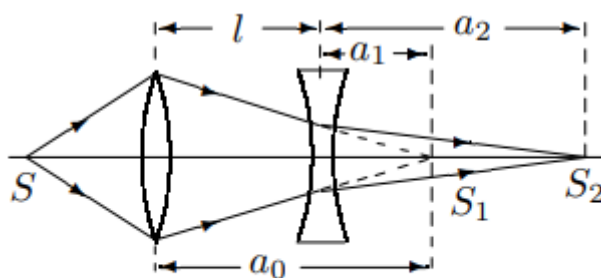


Рис. 4. Измерение фокусного расстояния отрицательной линзы

Определив расстояния a_1 ($a_1 = a_0 - l$) и a_2 , рассчитывают фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле (1).

С п о с о б 2. Если расстояние a_1 (рис. 4) совпадает с фокусным расстоянием отрицательной линзы, то изображение перемещается в бесконечность, т. е. лучи выходят из линзы параллельным

пучком. Параллельность пучка можно установить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность. Зная расстояние от первой линзы до точки S_1 и расстояние между линзами, нетрудно определить фокусное расстояние тонкой отрицательной линзы. Для толстой отрицательной линзы этот метод позволяет определить только положение главного фокуса.

III. Определение фокусного расстояния и положения главных плоскостей сложной оптической системы

Ни один из описанных выше способов не позволяет определить фокусное расстояние и положение главных плоскостей толстой линзы, т. е. такой оптической системы, толщина которой не мала по сравнению с фокусным расстоянием.

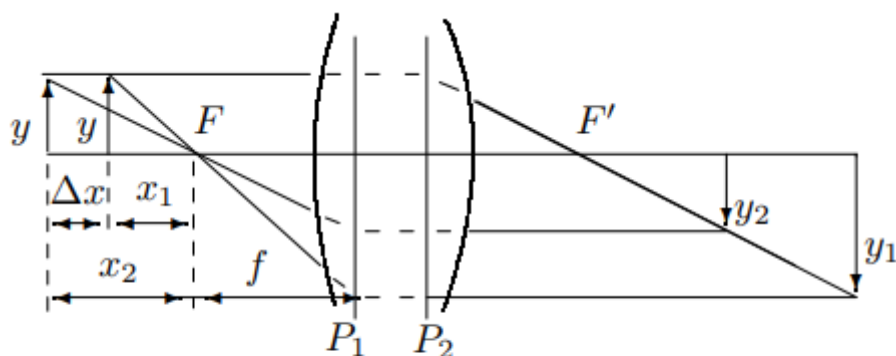


Рис. 5. Измерение фокусного расстояния оптической системы по методу Аббе

Фокусное расстояние толстой положительной линзы определяют по методу Аббе (рис. 5). Пусть предмет, линейный размер которого равен y , находится на расстоянии x_1 от главного фокуса F положительной оптической системы. Изображение предмета имеет размер y_1 . Линейное увеличение β_1 равно

$$\beta_1 = \frac{y_1}{y} = \frac{f}{x_1}$$

Если теперь отодвинуть предмет от линзы на расстояние Δx , то линейное увеличение β_2 окажется равным:

$$\beta_2 = \frac{y_2}{y} = \frac{f}{x_2}$$

Отсюда:

$$f = \frac{x_2 - x_1}{\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2}}$$

Таким образом, для определения фокусного расстояния толстой положительной линзы нужно измерить линейное увеличение системы при двух положениях предмет а и расстояние между этими двумя положениями. Для нахождения главных плоскостей системы недостаточно знать фокусное расстояние, нужно определить ещё положения главных фокусов. Это можно сделать при помощи зрительной трубы, настроенной на бесконечность. Отложив от главных фокусов отрезки, равные фокусному расстоянию, можно найти положения главных плоскостей системы. Теоретически фокусное расстояние f' сложной системы, состоящей из двух тонких положительных линз, можно рассчитать, если известны фокусные расстояния каждой линзы и расстояние между их центрами.

2. Экспериментальная установка

Оптическая скамья с осветителем, набор линз, экран и зрительная труба позволяют определить параметры оптических систем всеми описанными способами. Все оптические элементы устанавливаются на скамье при помощи рейтеров. Важную роль играет правильная центровка элементов системы. Проходя через плохо отцентрированную систему, лучи света могут отклониться и пройти мимо экрана или глаза наблюдателя. Центрировать линзы следует как по высоте, так и в поперечном направлении (для чего линзы установлены на поперечных салазках)

3. Проведение измерений и обработка результатов

3.1 Измерение фокусных расстояний тонких линз

1) С помощью метода Аббе определим фокусное расстояние линзы 1.

y , мм	y_1' , мм	y_2' , мм	Δx , мм	$\Delta x'$, мм
20.0	23.0	18.0	21.4	22.5

Отсюда получаем фокусное расстояние:

$$f_1^1 = \frac{\Delta x}{y(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1})} = 87 \pm 9 \text{ мм} \quad f_1^2 = \frac{-y \Delta x'}{y_2' - y_1'} = 90 \pm 9 \text{ мм}$$

Полученные значения совпадают с указанными параметрами линзы в пределах инструментальной погрешности.

2) С помощью собирающей линзы определим фокусное расстояние линзы 4.

a₀, мм	a', мм	l, мм	a₀ - l, мм
20.0	23.0	18.0	21.4

Отсюда получаем фокусные расстояния:

$$f = \frac{aa'}{a - a'} = -119 \pm 5 \text{ мм}$$

3) С помощью зрительной трубы определим фокусные расстояния линз 1, 2, 4.

$f_1, \text{мм}$	$f_1^{rot}, \text{мм}$	$f_2, \text{мм}$	$f_2^{rot}, \text{мм}$	$ f_4 , \text{мм}$	$ f_4^4 , \text{мм}$
95±1.0	103±1.0	130±1.0	125±1.0	107±1.4	108±1.4

Где f_1^{rot} - измерение при развороте линзы.

3.2 Измерение параметров сложной оптической системы

Определим фокусное расстояние для сложной оптической системы.

y, мм	y₁', мм	y₂', мм	Δx, мм	Δx', мм	l₁₂, мм
20.0	20.0	16.0	20.0	13.0	63.0

Аналогично предыдущему пункту 1) найдем:

$$f_1^1 = 80 \pm 9 \text{ мм} \quad f_1^2 = 65 \pm 9 \text{ мм}$$

Откуда получаем:

$$f = -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{|l_{12}|}{f_1 f_2}\right)^{-1} = 77 \pm 11 \text{ мм}$$

Наконец, с помощью зрительной трубы измерим положение переднего главного фокуса системы:

$$x_1 = 45.0 \text{ мм}$$

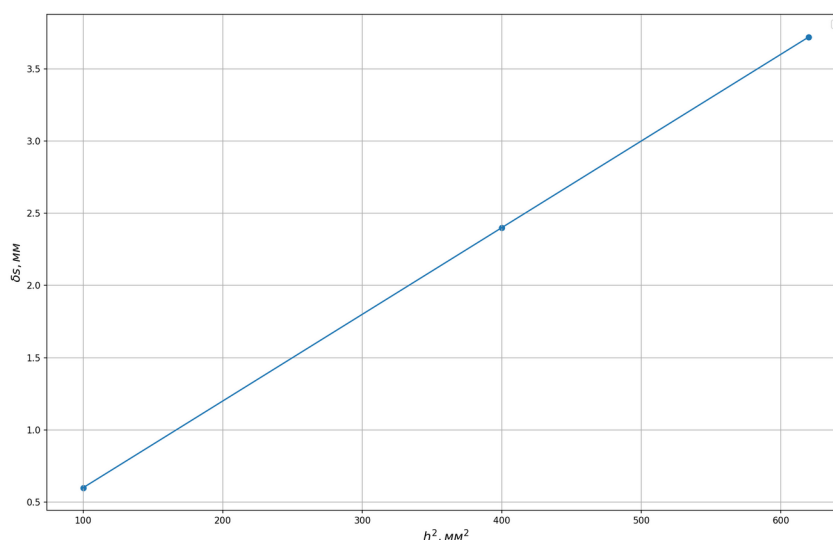
$$x_2 = 42.0 \text{ мм}$$

3.3 Измерение продольной сферической абберации

В данном пункте используем линзу 3.

При значениях диафрагм $h_1 = 0.5 \text{ мм}$ и $h_2 = 2.0 \text{ мм}$ расстояние между резкими изображениями равно $\Delta a = 1.7 \text{ мм}$. Строя график и интерполируя его в точках $h = 0$ и $h = r = 25 \text{ мм}$, находим значение продольной сферической абберации для линзы 3:

Зависимость величины продольной абберации от ширины диафрагмы



Откуда получаем:

$$\delta s = 3.5 \pm 0.2 \text{ мм}$$

Зная δs и f , находим показатель преломления среды линзы $3f$

$$n = 1.5 \pm 0.1$$

3.4 Измерение хроматической абберации

Получим хроматическую абберацию и число Аббе с использованием красного и синего стекол.

f_F , мм	f_C , мм	δf , мм
68	71	68-71=-3±1

Число Аббе:

$$\nu = \frac{-f_D}{\delta f} = 23 \pm 12 \text{ мм}$$

4. Вывод

В данной работе были рассмотрены центрированные оптические системы. Параметры элементов установок, рассчитанные экспериментально во всех случаях, в пределах инструментальной погрешности сходятся к указанным на них значениям. При исследовании продольной сферической абберации получили $n = 1.5$, что свидетельствует о том, что материал, из которого сделана линза 3, является либо обычным стеклом ($n = 1.52$), либо стеклом Крона. На примере плосковыпуклой сферической линзы исследованы различные виды аббераций, возникающих при работе с реальными оптическими приборами.