

Работа 4.1.1

ИЗУЧЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Подлесный Артём
группа 827

5 июля 2020 г.

Цель работы: изучить методы определения фокусных расстояний линз и сложных оптических систем; определить характеристики оптической системы, составленной из тонких линз; изучить недостатки реальных линз сферическую и хроматическую аберрации.

Оборудование: измерительный оптическая скамья с набором рейтеров, положительные и отрицательные линзы, экран, осветитель с ирисовой диафрагмой, зрительная труба, светофильтры, кольцевые диафрагмы, линейка.

1 Определение фокусных расстояний тонких линз с помощью зрительной трубы

Перед началом работы все оптические системы были отцентрированы. Всего в измерениях участвуют 5 линз, каждая из которых соответствующе пронумерована. Качественно было определено, что все линзы с 1 по 4 являются собирающими, с увеличивающимся фокусным расстоянием от порядкового номера. 5 линза – рассеивающая.

Экспериментальная установка представлена на рис.1. Показанные на схеме величины снимались после получения четкого изображения источника в зрительной трубе.

Зрительная труба предварительно установлена на бесконечность (с помощью куртки Булата и коридора). На схеме видно, какие данные снимались для определения фокусного расстояния f линз. Для каждой линзы аналогичные измерения проведены, когда ее повернули другой стороной к источнику

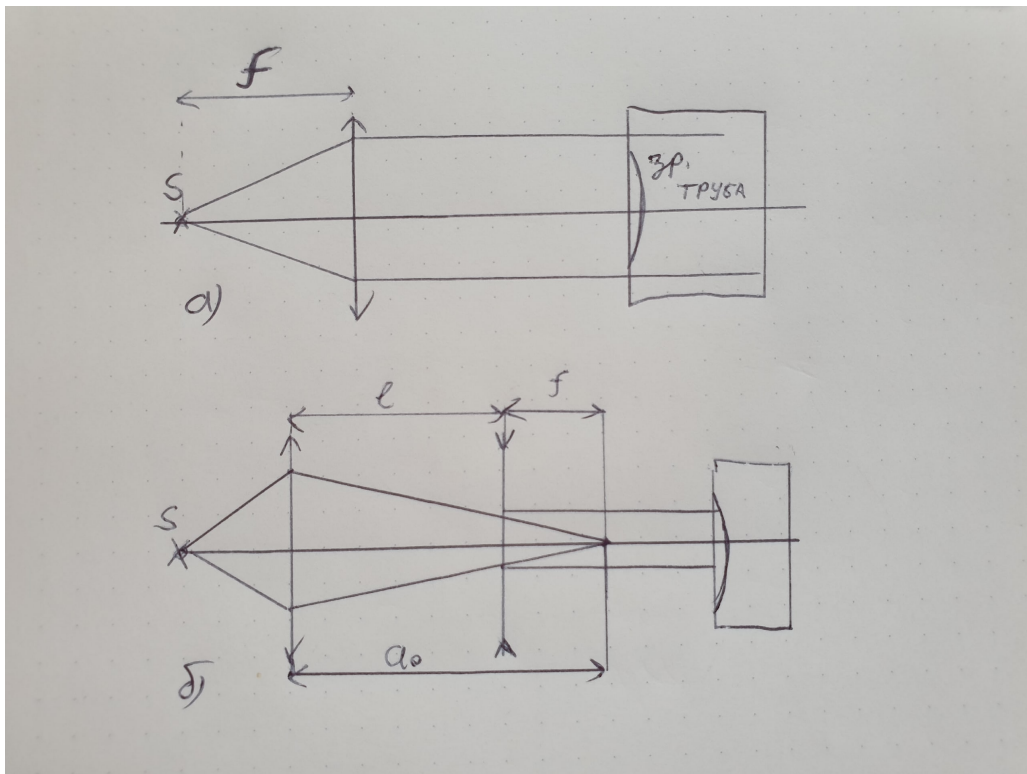


Рис. 1: Экспериментальная установка для определения фокусного расстояния тонкой а)собирающей и б)рассеивающей линз с помощью зрительной трубы.

(для исключения влияния толщины линз). Данные по измерению каждого фокуса показаны на таблице 1.

Линза	$f_{\text{стр}}, \text{ см}$	$f_{\text{опп}}, \text{ см}$	$f, \text{ см}$	$\sigma_f, \text{ см}$
1	7.8	7.8	7.8	0.1
2	10.8	10.5	10.7	0.2
3	19.6	19.1	19.4	0.2
4	28.4	28.8	28.6	0.1
5	-8.8	-9.1	-9.0	0.3

Таблица 1: $f_{\text{стр}}$ и $f_{\text{опп}}$ – фокусы, посчитанные для разных сторон линз. Для рассеивающей линзы были соответственно померяны l и a_0 , я лишь опустил расчеты.

2 Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи экрана

2.1 С помощью метода Бесселя

Схема метода показана на рис.2.

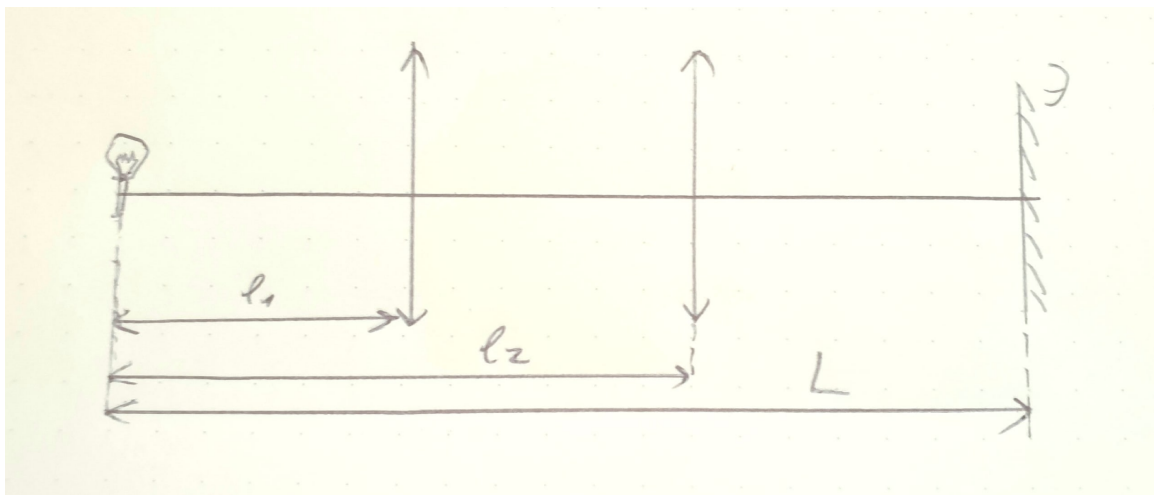


Рис. 2: Схема определения фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя. В данных обозначениях $l = l_2 - l_1$.

Суть метода в следующем: пусть L – расстояние между источником и экраном. Тогда если l – расстояние между двумя положениями линзы, при котором наблюдается четкое изображения источника на экране, то из формулы тонкой линзы следует, что:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}. \quad (1)$$

Так как таким методом можно определить лишь действительные значения фокусов, то измерялись лишь собирающие линзы. Результаты - на таблице 2.

Линза	L , см	l_1 , см	l_2 , см	f , см	σ_f , см
1	43.6	9.8	33.4	7.7	0.1
2	49.8	15.1	34.3	10.6	0.1
3	84.1	29.3	55.3	19.0	0.1
4	120.8	44.6	76.4	28.1	0.1

Таблица 2: Фокусные расстояния линз, измеренные методом Бесселя. Погрешность измерений определяется погрешностью измерений линейки, но в реальности она, конечно, выше.

2.2 По формуле тонкой линзы

В данном эксперименте использовались линзы под номерами 1 и 5 – с положительным и отрицательным фокусом соответственно. Схема эксперимента представлена на рис.3.

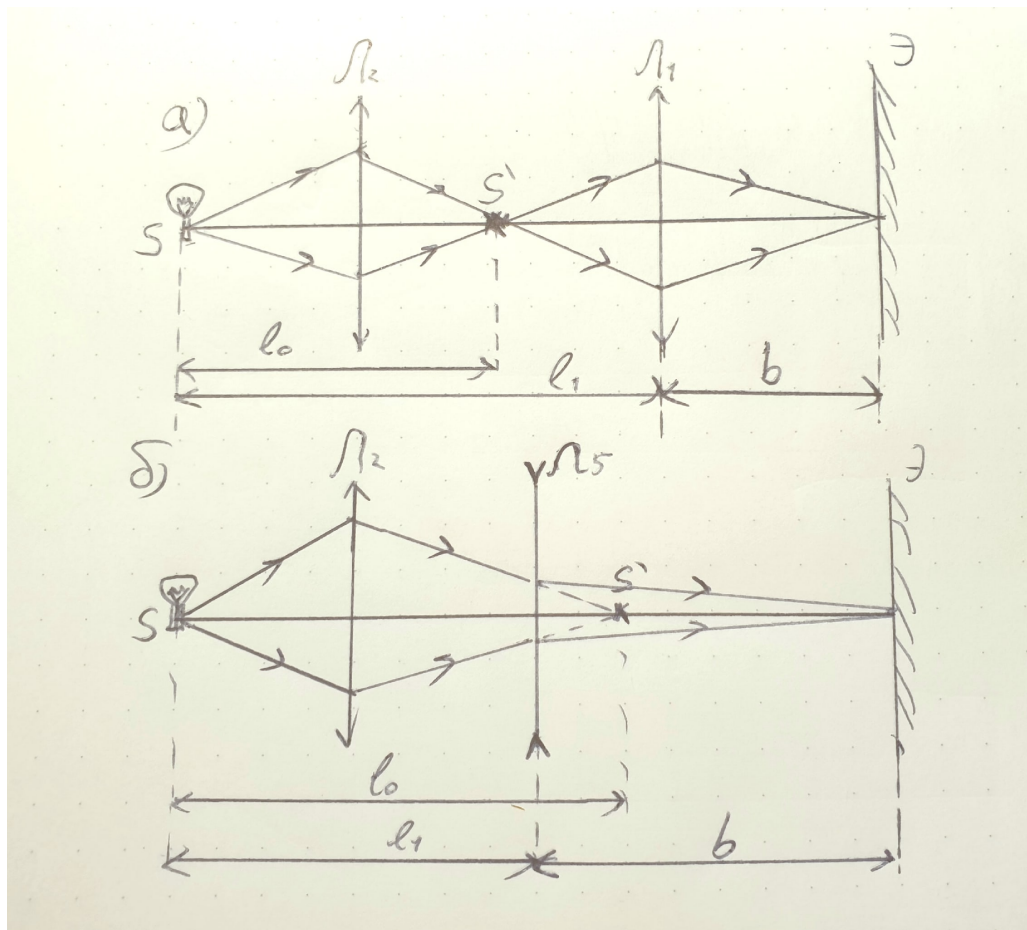


Рис. 3: Схема определения фокусного расстояния а)собирающей линзы, и б)рассеивающей линзы. С помощью линзы 2 на фиксированном расстоянии l_0 фокусируется мнимый источник. Далее изображение фокусируют путем изменения положения экрана.

Расстояние $l_0 = 42.3$ см определяется непосредственно с помощью экрана, и после этого линза 2 не меняет положение. С помощью формулы тонкой линзы, в данных величинах получаем зависимость:

$$f = \frac{b(l_1 - l_0)}{b + l_1 - l_0}. \quad (2)$$

Экспериментальная зависимость $b(l_1)$ представлены на таблице 3.

Фокусы можно найти по усреднению этих зависимостей из формулы 2. Получаем:

$$f_1 = 7.60 \pm 0.08 \text{ см},$$

Линза 1	l_1 , см	61.4	58.5	57.3	54.5	53
	b , см	12.6	14.8	15.5	20.6	22.8
Линза 5.	l_1 , см	38.5	38.2	36.7	34.9	33.8
	b , см	8.3	8.7	15.8	43.1	60.5

Таблица 3: Зависимость $b(l_1)$.

$$f_5 = -8.5 \pm 0.5 \text{ см.}$$

Стоит прокомментировать разброс значений для фокуса 5 линзы. Если посчитать отдельно f по самому первому измерению для Л5, то он получался верным, а все остальные – нет. Это наводит на мысль, что во время первого измерения изменилось положение линзы Л2, из-за чего остальные результаты недостоверны.

2.3 Сравнение всех результатов

Будет удобно сравнить фокусные расстояния линз, измеренные разными способами, показав их на одном графике $f(n)$ от номера линзы n . Эта зависимость показана на рисунке 4.

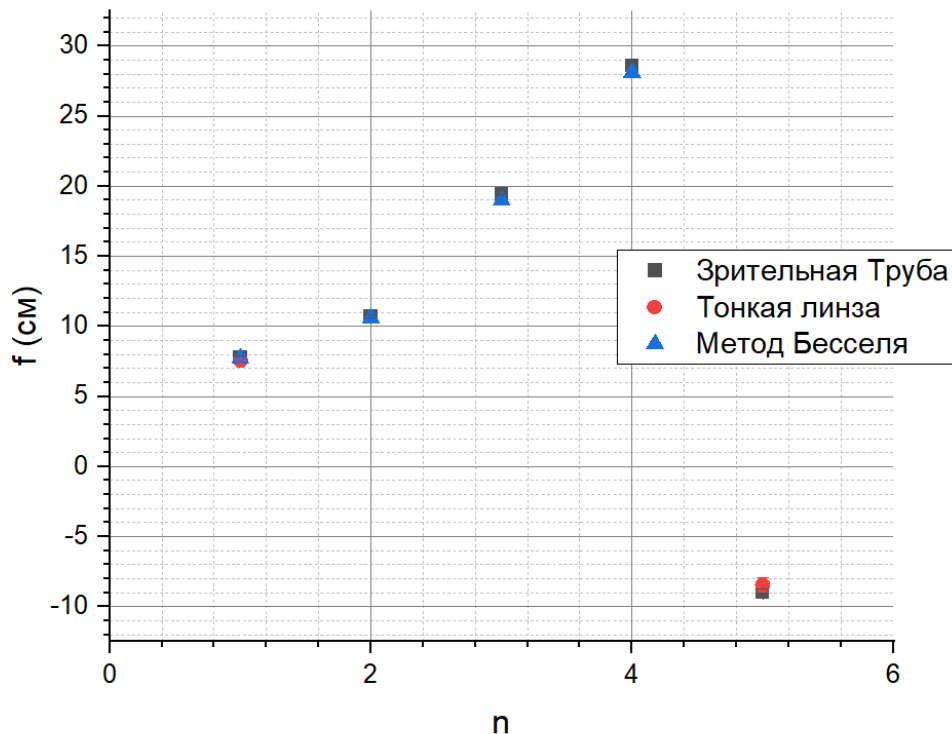


Рис. 4: Значения фокусов для линз, измеренных разными методами.

Из этого графика видно, что сходимость результатов всех линз достаточно хорошая, что подтверждает, что приближение тонкой линзы работает в нашем эксперименте.

3 Аберрации оптических систем

3.1 Сферическая аберрация

Зависимость сферической аберрации выглядит следующим образом:

$$s(h) = \frac{R}{n-1} \left(1 - \frac{n^2 h^2}{2R^2} \right). \quad (3)$$

Характеристической кривой сферической аберрации называют зависимость

$$\delta s(h) = -\frac{1}{2} \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \left(\frac{h}{f} \right)^2 f. \quad (4)$$

При $h = r$ (r — радиус линзы) формула (4) определяет продольную сферическую аберрацию линзы.

Для исследования сферической аберрации использовались 3 диафрагмы диаметром $2h$, которые ставились перед линзой, и с помощью нониусной шкалы линзы, можно было измерить величину сферической аберрации $s(h)$. Данные, как водится, на таблице. 4.

s , см	h , см
0.84	0.5
1	1
1.4	2

Таблица 4: Зависимость s от ширины диафрагмы (по модулю).

Построим график $s(h^2)$, из (3) он является прямой. Тогда экстраполировав его на точку $h = r = 2.5$ см — радиус линзы, получим сферическую аберрацию. График представлен на рис.5.

Из графика получаем значения для коэффициентов в уравнении

$$s(h) = bh^2 + a,$$

откуда получаем, что

$$\delta s = br^2 = 0.91 \text{ см.}$$

Так как значение в большей степени оценочное, погрешности не существенны.

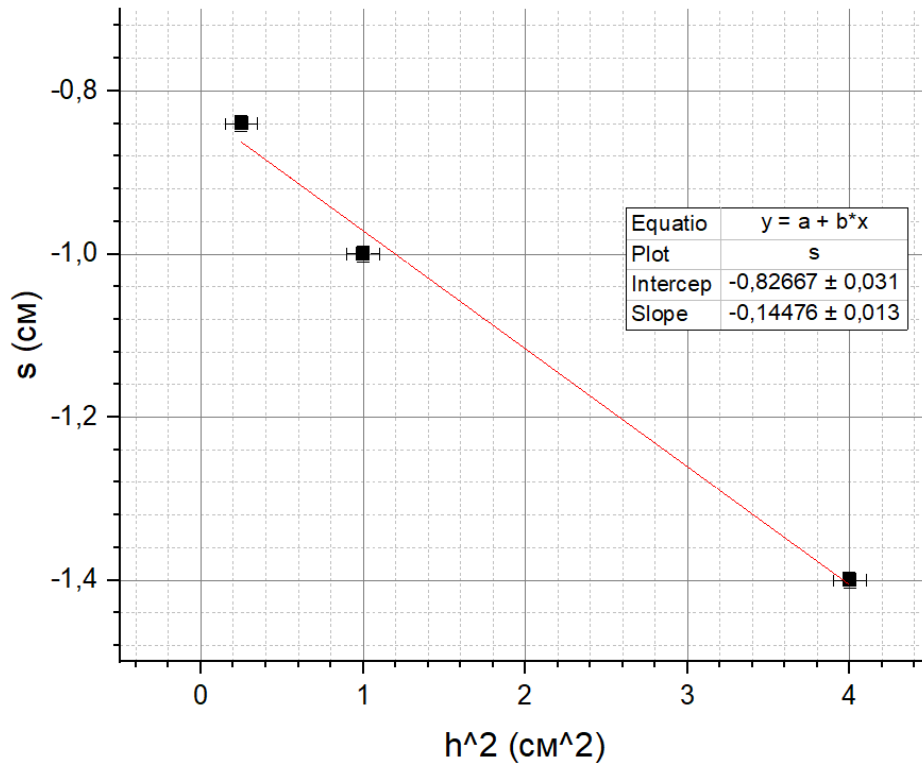


Рис. 5: Зависимость продольной аберрации от h^2 . Знаменитая прямая по 3 точкам.

3.2 Хроматическая аберрация

Хроматическая аберрация (зависимость фокусного расстояния линзы от длины волны) возникает вследствие дисперсии показателя преломления стёкол, т. е. из-за того, что показатель преломления $n = n(\lambda)$. Хроматическую аберрацию принято характеризовать разностью фокусных расстояний для двух характерных спектральных линий водорода, расположенных в крайних частях видимой области спектра: $\lambda_F = 486,1$ нм (голубая линия F водорода), $\lambda_C = 656,3$ нм (красная линия C водорода):

$$\delta f_{\text{хр}} = f_F - f_C. \quad (5)$$

Для характеристики дисперсионных свойств стёкол часто пользуются так называемым коэффициентом дисперсии, или числом Аббе ν , которое выражается через продольную хроматическую аберрацию так:

$$\delta f_{\text{хр}} = -\frac{1}{\nu} f_D, \quad (6)$$

где f_D – фокусное расстояние для желтой линии натрия D $\lambda_D = 589.3$ нм.

Используя 3 светофильтра из комплекта, можно получить фокусные расстояния для каждой спектральной линии, что мы собственно сделали. Таким образом получаем:

$$\delta f_{\text{xp}} = -1.5 \text{ мм},$$

$$\nu \approx 47.$$

4 Вывод

Полученные значения фокусов линз разными методами оказались одинаковыми, что свидетельствует о хорошей применимости геометрической оптики в нашей работе.

Были изучены понятия сферической и хроматической аберраций, и они были достаточно достоверно измерены для участвующей в эксперименте линзы.

Все здорово и жизнь прекрасна.

$$x = \frac{\sqrt{2\hbar/m\nu}}{2}(a + a^+) = X_1\sqrt{2\hbar/m\nu}$$

$$p = \frac{\sqrt{2\hbar m\nu}}{2i}(a - a^+) = X_2\sqrt{2\hbar m\nu}$$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{m\beta}{2}$$