

4.1.1 (5.1). Изучение центрированных оптических систем

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

20-11-2017 г.

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

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. Предметом служит транспарант с изображением вертикальной стрелки ($l = 2$ см), закреплённый на стекле осветителя. Ирисовая (переменного диаметра) диафрагма позволяет менять величину поля зрения. Яркость поля зрения регулируется ручкой трансформатора осветителя.

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).

ЗАДАНИЕ

А. Определение фокусных расстояний тонких линз и характеристик сложной оптической системы

В этом упражнении предлагается определить фокусные расстояния тонких собирающих и рассеивающих линз, рассчитать их светосилу и оптическую силу, а также определить фокусное расстояние и положения главных плоскостей сложной оптической системы, состоящей из двух тонких линз.

Не следует касаться поверхности линз пальцами, так как пылинки и жирные пятна на стекле рассеивают световые лучи и ухудшают чёткость изображения.

1. Центровка элементов оптической системы

1. Из имеющегося набора отберите собирающие линзы. Для этого, держа линзу в одной руке, получите на ладони другой руки изображение любого удалённого объекта (окна, лампочки) и оцените на глаз фокусное расстояние линзы. Линза, которая не даёт действительного изображения, — рассеивающая. Запишите номера линз и приближённые значения фокусных расстояний.
2. Соберите и отцентрируйте установку. Для этого на одном конце оптической скамьи установите осветитель со стрелкой (предмет) и вплотную к нему — экран на рейтере. Отрегулируйте высоту экрана так, чтобы его центр совпадал с центром яркого пятна от осветителя. Эта операция должна выполняться при плотно затянутом винте, закрепляющем рейтер на оптической скамье.

Для перемещения рейтера вдоль скамьи винт следует только слегка ослабить, чтобы не допустить перпендикулярного скамье смещения центра. Перемещая рейтер, прижимайте его к скамье со стороны, противоположной винту.

3. Отцентрируйте собирающую линзу. Для этого отодвиньте экран от осветителя и разместите в промежутке рейтер с собирающей линзой № 1.

Оптические оси линз устанавливаются параллельно ребру оптической скамьи на глаз. Легко убедиться на опыте, что при небольших увеличениях, получаемых в настоящей работе, такая установка является достаточной.

Передвигая линзу и экран вдоль скамьи, получите на экране чёткое изображение предмета – стрелки. Закрепите рейтеры. Смещая линзу с помощью поперечных салазок и по высоте, приведите центр изображения к центру экрана.

4. Отцентрируйте все положительные линзы, добавляя их последовательно к системе (не убирая уже отцентрированные).

Для центрировки рассеивающих линз следует воспользоваться уже отцентрированной положительной линзой, расположив её впереди отрицательной. Дальнейшие действия продумайте самостоятельно.

II. Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи экрана

Измерения проводятся для одной собирающей и одной рассеивающей линзы. Линза № 3 используется только для изучения аберраций.

Определите фокусное расстояние собирающей линзы, используя либо метод Аббе либо метод Бесселя и формулу тонкой линзы (по указанию преподавателя).

5. **Метод Аббе.** Закрепите собирающую линзу № 1 между осветителем и экраном. Перемещая осветитель вдоль скамьи, получите на экране резкое изображение предмета (стрелки размером 2 см) при двух различных положениях осветителя и соответственно экрана (рис. 1).

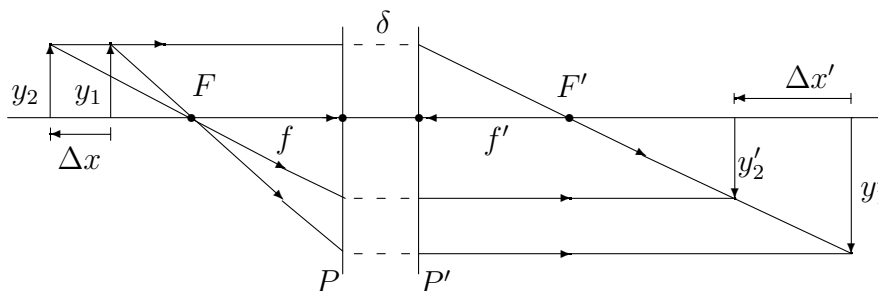


Рис. 1. Измерение фокусного расстояния по методу Аббе

Для повышения точности измерений размеры изображений должны заметно отличаться друг от друга. Зарегистрируйте размер предмета, перемещения предмета Δx и изображения $\Delta x'$ и соответствующие двум положениям предмета размеры изображений y_1' и y_2' . Рассчитайте фокусное расстояние линзы по формулам (1), оцените точность результата.

6. **Метод Бесселя.** Установите линзу № 1 между осветителем и экраном. Расположите экран на расстоянии $L > 4f$ от предмета (рис. 2). Перемещая линзу вдоль скамьи, получите на экране увеличенное и уменьшенное изображения предмета (стрелки размером 2 см). Посмотрите, как влияют на чёткость изображения размер диафрагмы и яркость источника.

С помощью линейки измерьте расстояния от центра линзы до предмета и до изображения (a_1 , a_2 , a_1' , a_2' на рис. 2).

Средняя плоскость линзы и положение предмета отмечены на оправках проточками.

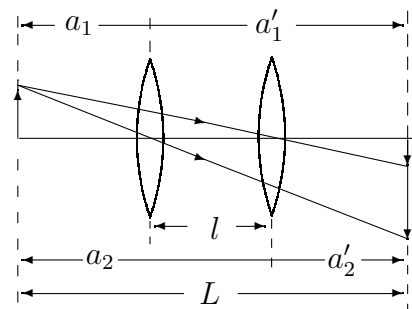


Рис. 2. Измерение фокусного расстояния по методу Бесселя

При фиксированном расстоянии L между осветителем и экраном, слегка перемещая линзу, повторите измерения несколько раз.

Независимо при фиксированном расстоянии L измерьте перемещение линзы (рейтера) l несколько раз.

По результатам нескольких измерений с различными расстояниями L определите среднее значение фокусного расстояния, используя сначала формулу (6), а затем — формулу (7).

Оцените среднеквадратическую случайную погрешность $\sigma_{\text{отд}}$ однократного измерения F и сравните её с толщиной линзы. Сделайте вывод, нужны ли многократные измерения в этом эксперименте.

7. Для определения фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы сначала с помощью одной собирающей линзы (№ 1) получите на экране увеличенное изображение предмета и измерьте расстояние от центра линзы до экрана (a_0 на рис. 3). Затем между собирающей линзой и экраном разместите рассеивающую линзу и, отодвигая экран от линзы, найдите действительное изображение предмета, образованное системой линз.

Если изображение недостаточно чёткое, сделайте пучок параксиальным: наденьте диафрагму диаметром 1 см на собирающую линзу и заново проведите настройку с экраном (диафрагма уменьшит сферические aberrации и повысит чёткость изображения). Подберите оптимальную яркость источника.

Измерьте расстояние a' от рассеивающей линзы до экрана и расстояние между линзами l .

Рассчитайте величину $a = a_0 - l$ и определите фокусное расстояние рассеивающей линзы с помощью формулы (7). При вычислении фокусного расстояния нужно приписать величинам a_2 и a'_2 правильные знаки ($a > 0$, $a' > 0$).

III. Определение фокусных расстояний тонких линз с помощью зрительной трубы

Измерения проводятся для двух собирающих (№ 1 и № 2) и одной рассеивающей линзы.

8. Для определения фокусных расстояний линз с помощью зрительной трубы необходимо настроить трубу на бесконечность. Эту настройку проще всего осуществить, наведя трубу на удалённый объект (например, на окно в конце длинного коридора). Предварительно вращением глазной линзы окуляра трубы настройтесь на резкое видение окулярной шкалы (если окулярная шкала отсутствует — совместите штрих на глазной линзе с точкой на тубусе).
9. Поставьте собирающую линзу № 1 на расстоянии от предмета примерно равном фокусному. На небольшом расстоянии от линзы закрепите трубу, настроенную на бесконечность, и отцентрируйте её по высоте. Передвигая линзу вдоль скамьи и, если необходимо, перемещая линзу с помощью *поперечных* салазков, получите в окуляре зрительной трубы чёткое изображение предмета. При этом расстояние между предметом и серединой тонкой линзы (между проточками на оправе) равно фокусному.

Поверните линзу другой стороной к источнику и повторите измерения фокусного расстояния. По результатам измерений сделайте вывод, можно ли считать

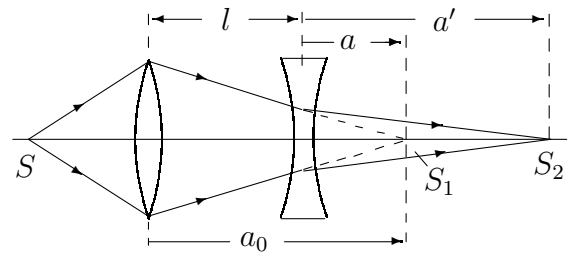


Рис. 3. Измерение фокусного расстояния отрицательной линзы

линзу тонкой.

10. Измерьте фокусное расстояние собирающей линзы № 2 при помощи зрительной трубы.
11. Для определения фокусного расстояния тонкой рассеивающей линзы используйте схему, изображённую на рис. 3. Сначала получите на экране увеличенное изображение предмета при помощи короткофокусной положительной линзы. Измерьте расстояние a_0 между линзой и экраном (Рекомендуется $a_0 \simeq 30$ см).

Разместите сразу за экраном трубу, настроенную на бесконечность, и закрепите её. Уберите экран и поставьте на его место исследуемую рассеивающую линзу. Отцентрируйте световой пучок с помощью листа бумаги. Перемещая рассеивающую линзу, найдите в окуляре зрительной трубы резкое изображение предмета.

Если изображение недостаточно чёткое — задиафрагмируйте положительную линзу и заново проведите настройку с экраном. Подберите оптимальную яркость источника.

Измерив расстояние l между линзами, рассчитайте фокусное расстояние рассеивающей линзы в пространстве предметов: $f = l - a_0$.

Поверните рассеивающую линзу другой стороной к источнику и повторите измерения. Оцените, можно ли считать линзу тонкой.

12. Составьте таблицу результатов экспериментального определения фокусных расстояний линз, включив в неё дополнительную колонку значений оптической силы каждой линзы.

Сравните результаты определения фокусных расстояний и оцените случайные ошибки измерений. При значительном расхождении результатов попытайтесь понять причину расхождения.

IV. Определение фокусного расстояния и положения главных и фокальных плоскостей сложной оптической системы

13. Для создания сложной оптической системы установите в центре оптической скамьи две тонких собирающих линзы (№ 1 и № 2), сблизив их на минимальное расстояние – до соприкосновения рейтеров (платформы рейтеров укорочены с одной стороны). Закрепите рейтеры и измерьте расстояние l_{12} между центрами линз.

Для определения фокусного расстояния системы методом Аббе расположите экран на дальнем конце скамьи.

Перемещая осветитель вдоль скамьи, получите на экране резкое изображение предмета. Измерьте расстояние от предмета до первой линзы и величину изображения y'_1 (см. рис. 1).

Отодвиньте источник (или систему линз как целое) на несколько сантиметров от прежнего положения и, передвигая экран, вновь получите резкое изображение предмета. Для повышения точности размеры изображений y'_1 и y'_2 должны заметно отличаться друг от друга. Зарегистрируйте перемещения предмета Δx и изображения $\Delta x'$ и соответствующие двум положениям предмета размеры изображений y'_1 и y'_2 . Рассчитайте фокусное расстояние системы по формулам (1') и (1.40):

$$f_{2\Sigma} = \frac{\Delta x}{y_1/y'_1 - y_2/y'_2} = -\frac{\Delta x'}{y'_1/y_1 - y'_2/y_2}, \quad (1')$$

$$-\frac{1}{f_{2\Sigma}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{|l_{12}|}{f_1 f_2}. \quad (1.40)$$

14. Для нахождения положения главных фокусов системы уберите экран, закрепите зрительную трубу за второй линзой, подвиньте осветитель к первой линзе и отцентрируйте систему с помощью листа бумаги.

Медленно отодвигая осветитель от системы, сначала найдите резкое изображение поверхности стекла в окуляре зрительной трубы, а затем, последовательно уменьшая размер пятна и перемещая пятно с помощью винта поперечных салазок линзы, настройтесь на изображение предмета.

Для точной настройки задиафрагмируйте первую линзу и подберите подходящую яркость пучка. Определите положение переднего главного фокуса системы $F_{1\Sigma}$ относительно первой линзы, измерив расстояние x_1 от этой линзы до предмета.

15. Поменяйте линзы местами (сохранив неизменным расстояние l_{12} между центрами линз!) и повторите измерения п. 14. Измерьте расстояние x_2 от предмета до ближней линзы, определив таким образом положение главного фокуса системы $F_{2\Sigma}$.

16. На миллиметровой бумаге постройте в масштабе чертёж оптической системы. Укажите на нём положения фокусов каждой из линз.

Постройте ход луча, вошедшего в систему слева параллельно главной оптической оси, последовательно через каждую из линз. Точка пересечения луча, вышедшего из системы, с оптической осью определяет положение одного из главных фокусов системы $F_{2\Sigma}$. Определите расстояние x_2 от него до ближайшей линзы.

Точка пересечения вышедшего луча с продолжением входящего определяет положение задней главной плоскости системы (P_2). Расстояние от точки H_2 пересечения задней главной плоскости с оптической осью до заднего главного фокуса $F_{2\Sigma}$ равно фокусному расстоянию системы $f_{2\Sigma}$ в пространстве изображений.

Аналогичное построение проведите для луча, вошедшего в систему справа и сравните определённые графически величины x_1 и x_2 с экспериментальными, а величины фокусных расстояний — с расчётами по формулам (1') и (1.40).

А. Основные aberrации оптических систем

(По указанию преподавателя)

ЗАДАНИЕ

В этом упражнении предлагается исследовать aberrации плосковыпуклой линзы: набор кольцевых диафрагм позволяет исследовать продольную сферическую aberrацию (зависимость фокусного расстояния от радиуса кольцевого пучка, падающего на линзу), а набор светофильтров — хроматическую aberrацию (зависимость фокусного расстояния от длины волны).

1. Сферическая aberrация

1. Для качественного наблюдения сферической aberrации расположите осветитель и экран на дальних концах скамьи. Установите плосковыпуклую линзу № 3 (продольная нониусная шкала обращена к наблюдателю) на расстоянии a_1 от предмета чуть больше фокусного и наденьте на неё маску минимального размера (диафрагму диаметром $2h = 1$ см). Перемещая линзу, получите на удалённом экране резкое изображение предмета.

Установите маску максимального диаметра ($2h = 4$ см), передвигая экран, снова получите резкое изображение предмета и убедитесь, что при неизменном расстоянии a расстояние a' от линзы до изображения заметно изменилось.

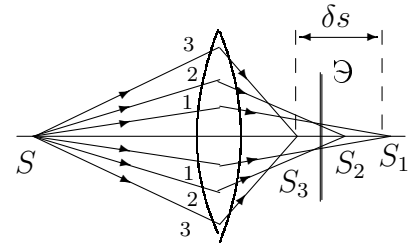


Рис. 4. Сферическая aberrация

2. Для количественной оценки aberrаций установите нониусную шкалу продольного перемещения линзы на 0.

Используя зрительную трубу, получите параллельный пучок от линзы для параксиальных лучей (h_{\min}) и запишите отсчёт по нониусной шкале линзы. Увеличивая диаметр маски и подстраиваясь к новому положению фокуса при помощи нониусного винта, регистрируйте соответствующие отсчёты по нониусной шкале.

3. По результатам измерений рассчитайте отклонения $\delta s(h)$ от начального положения, соответствующего параксиальным лучам. Постройте график $\delta s(h^2)$ и, экстраполируя кривую к величинам $h = r$ (радиус линзы) и $h = 0$, рассчитайте продольную aberrацию линзы $\delta s(r) = s(r) - s(0)$, а по наклону прямой найдите показатель преломления стекла линзы n .

Поясните, почему aberrация зависит от того, какой стороной линза обращена к источнику, — плоской или сферической.

II. Хроматическая aberrация

4. Используя зрительную трубу и три светофильтра (красный, жёлтый и синий), определите по нониусной шкале положения плосковыпуклой линзы, соответствующие резкому изображению предмета. Фильтры следует располагать в параллельном пучке (за окуляром зрительной трубы), чтобы они не изменяли хода лучей.

Фокусное расстояние f_D линзы № 3, измеренное с жёлтым светофильтром, указано на оправе линзы, индексы F и C соответствуют голубому и красному фильтрам.

5. Рассчитайте хроматическую aberrацию по формуле (1.54):

$$\delta f_{\text{хр}} = f_F - f_C \quad (1.54)$$

и число Аббе ν по формуле (1.55)

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (1.55)$$

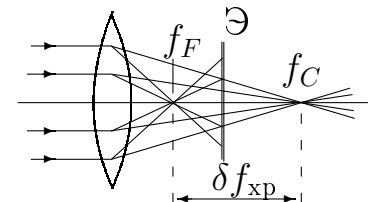


Рис. 5. Хроматическая aberrация

По таблицам определите марку стекла, из которого сделана линза.

20-II-2017 г.