

РАБОТА № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАТЕЛЬНОЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ

Цель работы: Определение фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз с помощью различных методов.

Принадлежности: Осветитель с лампой накаливания и шкалой, рейтер с собирающей и рассеивающей линзами, рейтер с экраном, зрительная труба, измерительная линейка.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В геометрической оптике, в отличие от волновой, оперируют светящейся точкой как бесконечно малым источником излучения света и исходящими из этой точки пучками световых лучей, представляющих собой нормали к волновой поверхности световой волны.

Пучок лучей, имеющий общую точку пересечения, называют гомотрическим, а саму точку – центром пучка. Центр пучка, входящего в оптическую систему, называют предметной точкой, а центр пучка, выходящего из системы – изображением предметной точки. С таких позиций любой предмет и его изображение можно представить совокупностью предметных точек и их изображений.

Пространство перед оптической системой называют пространством предметов, а за оптической системой – пространством изображений. В геометрической оптике принято следующее правило знаков: отрезкам, откладываемым против направления движения света и вниз от оси симметрии системы (если свет идет слева), приписывают знак минус (-). Отрезки вправо и вверх имеют знак плюс (+). Углы, отсчитываемые против часовой стрелки, считаются отрицательными, по часовой – положительными. Если какая-либо точка или отрезок в пространстве предметов обозначены некоторой буквой, то соответствующие точки в пространстве изображений обозначают той же буквой с добавлением штриха (например, F и F').

Часть сферической волны (рис. 1), испущенной светящейся точкой A , вступив в идеальную оптическую систему I , выйдет в виде сферической волны, сходящейся в точке A' . Последняя является идеальным изображением точки A .

Оптическая система состоит из некоторого числа оптических элементов, размеры которых ограничены. Вследствие этого в изображении, как видно из рисунка, участвует не вся сферическая волна, выходящая

из точки на оси, а только ее некоторая часть, размер которой определяется наименьшей оправой системы или наименьшей диафрагмой, называемой действующей или апертурной диафрагмой. Она может находиться перед системой, внутри или позади нее. На рисунке показан случай, когда апертурная диафрагма P_1 расположена внутри. Ее изображение оптической системой в пространстве предметов называется входным зрачком P . Изображение этой диафрагмы в пространстве изображений называется выходным зрачком P' . Из всех лучей, испускаемых точкой A , в систему попадут только те, которые находятся внутри конуса, опирающегося на входной зрачок.

Половина угла при вершине этого конуса u_m называется апертурным уг-

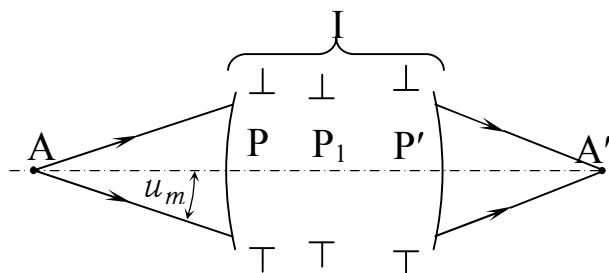


Рис. 1

лом.

При наличии оптической системы лучи гомоцентрического пучка либо действительно проходят через его вершину, либо через центр проходят воображаемые продолжения лучей. В первом случае центр называется действительной точкой, во втором – мнимой. Возможные варианты действительных и мнимых точек и их изображений показаны на рис. 2, где многолинзовая оптическая система представлена двумя крайними преломляющими поверхностями.

Здесь A, A', B, C' – действительные точки; B', C, D, D' – мнимые точки; I – оптическая система.

Если пучок лучей, параллельных оптической оси, после прохождения оптической системы со стороны пространства предметов сходится в одной точке (или в этой точке пересекаются продолжения лучей) то эта точка является задним фокусом системы и обозначается F' . Аналогично передний фокус F – это точка на оси, характерная тем, что вышедший из нее расходящийся пучок лучей после оптической системы станет параллельным. Плоскости, проведенные через фокусы перпендикулярно оптической оси, называются передней и задней фокальными плоскостями. На рис. 3 оптическая система, условно представленная первой (I) и последней (II) поверхностями, образует изображение $A'B'$.

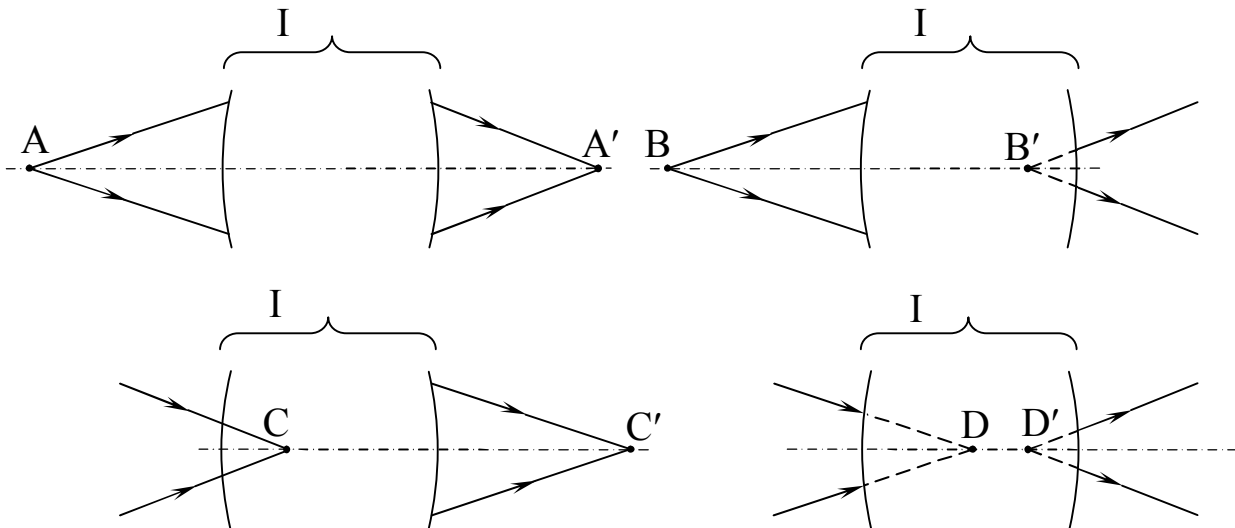


Рис. 2

Отношение размера изображения к размеру предмета называется *линейным увеличением* β идеальной системы:

$$\beta = \frac{y'}{y}. \quad (1)$$

Существует пара сопряженных плоскостей, для которых линейное увеличение равно плюс единице. Эти плоскости называют *передней* и

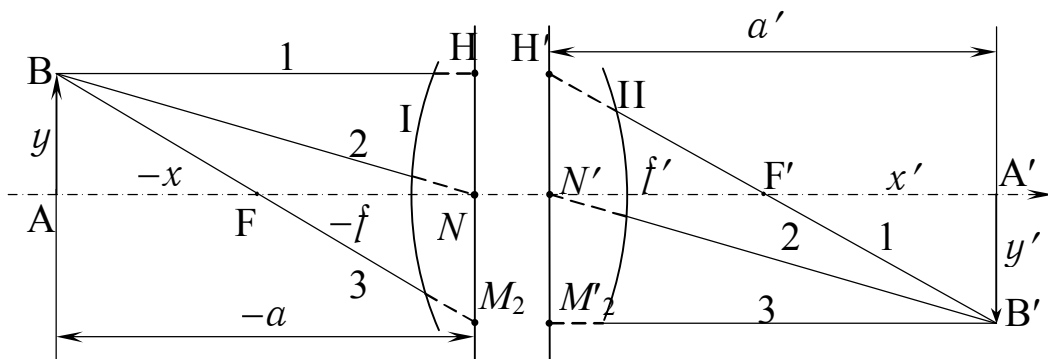


Рис. 3. Построение изображения оптической системой

задней главными плоскостями N и N' . Их особенность в том, что луч, пересекающий плоскость N на некотором расстоянии при входе в оптическую систему, пересечет плоскость N' , выйдя из системы на том же расстоянии от оси. У тонкой линзы главные плоскости N и N' почти совпадают друг с другом.

Удаление фокуса F от передней главной плоскости N – это *переднее фокусное расстояние* f , а удаление точки F' от плоскости N' – *заднее фокусное расстояние* f' оптической системы.

Для того, чтобы построить изображение точки B , надо воспользоваться двумя из трех лучей, показанных на рисунке. Луч 1 проведен параллельно оптической оси, и по выходе из системы он пройдет через ее

задний фокус. Луч 2 проведен в переднюю главную точку пересечения плоскости Н с оптической осью, после системы он пройдет из задней главной точки параллельно входящему (если показатели преломления сред по обе стороны оптической системы одинаковые). Наконец, луч 3, проведенный через передний фокус системы, после нее будет параллелен оптической оси. $A'B'$ есть изображение предмета АВ.

Взаимное расположение предмета и изображения связаны формулой Ньютона

$$xx' = ff', \quad (2)$$

а линейное увеличение (или просто увеличение) системы дается формулой

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}, \quad (3)$$

где $(-x)$ – расстояние от переднего фокуса до предмета, x' – расстояние от заднего фокуса до изображения.

Обозначив $a' = x' + f'$, $a = x + f$, т. е. a и a' суть расстояния от передней, и задней главных плоскостей до предмета и изображения соответственно, можно привести формулы (2) и (3) к виду

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1. \quad (4)$$

Если оптическая система окружена воздухом, ее переднее и заднее фокусные расстояния отличаются лишь знаком: $f = -f'$. Формулу (4) тогда можно переписать в виде

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}. \quad (5)$$

В оптических приборах применяются главным образом призмы, зеркала и линзы со сферическими поверхностями. Фокусное расстояние линзы определяется показателем преломления n материала линзы, ее толщиной d , радиусами кривизны r_1 первой и r_2 второй поверхности

$$f = -f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + d(n-1)]}. \quad (6)$$

Фокусное расстояние двух линз (или двух оптических систем), установленных друг за другом, определяется выражением

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}, \quad (7)$$

где Δ – расстояние от заднего фокуса первой линзы до переднего фокуса второй линзы, называемое оптическим интервалом или оптической длиной, f_1 и f_2 – фокусные расстояния первой и второй линзы соответствен-

но.

Если оптическая система превращает параллельный пучок лучей в сходящийся, то она называется положительной или собирающей, если в расходящийся – отрицательной или рассеивающей.

Реальная оптическая система обладает недостатками, искажающими изображение в той или иной мере. Эти недостатки называются аберрациями и проявляются в том, что изображение предмета становится нерезким, деформированным или окрашенным. При конструировании оптических систем количество линз, их форма и размеры, сорта стекол и расстояния между линзами подбирают таким образом, чтобы остаточные аберрации были малы и вызываемые ими дефекты изображения не имели бы практического значения. Аберрации бывают следующих типов.

- *Сферическая аберрация*. Если световая волна после прохождения оптической системы не имеет сферической формы (но симметрична), то ее нормали не пересекутся в одной точке. Следовательно, каждая точка предмета изображается не в виде точки, а в виде кружка рассеяния большего или меньшего размера. Изображения соседних точек накладываются друг на друга, и изображение всего предмета становится не-резким.
- *Астигматизм* проявляется в том, что изображение точки, лежащей не на оптической оси системы, представляется не точкой, а двумя очень короткими, взаимно перпендикулярными отрезками, расположенными в разных плоскостях. Посредине между этими плоскостями световой пучок имеет форму круга весьма малого диаметра. Считается, что такой круг лежит в плоскости наилучшей фокусировки. Свободную от астигматизма систему называют *анастигматической*.
- *Кома* заключается в нарушении симметрии светового пучка, идущего из внеосевой точки, в результате чего появляется односторонняя деформация точки.

Если кома и сферическая аберрация устранены, такую систему называют *апланатической*.

Кривизна поля изображения приводит к тому, что изображение плоского предмета расположено не на плоской, а на кривой поверхности вращения. Поэтому при фокусировке на центр плоского поля зрения края поля остаются нерезкими, и наоборот.

- *Дисторсия* возникает в тех случаях, когда линейные увеличения в центре и на краях поля зрения не равны друг другу. Это приводит к нарушению подобия между предметом и его изображением. Оптиче-

скую систему, в которой дисторсия отсутствует, называют *ортоскопической*.

Все перечисленные aberrации имеют место при любой длине световой волны. Так как материалы, из которых изготавливают оптические детали, обладают дисперсией, то существуют также хроматические aberrации.

– *Хроматическая aberrация* состоит в том, что изображение, созданное зелеными лучами, не совпадает с изображениями, созданными красными и синими лучами. Несовпадение изображений приводит к тому, что контуры контрастных объектов имеют нерезкую окрашенную кайму. Если aberrация исправлена так, что изображения двух цветов приведены в одну плоскость, то систему называют *ахроматической*, если трех цветов – *апохроматической*. У апохроматической системы цветная кайма практически отсутствует.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

На расположенной горизонтально оптической скамье установлены последовательно осветитель со шкалой, линза, экран или зрительная труба. Все элементы оптической схемы установить так, чтобы их центры лежали примерно на одной прямой, плоскость экрана была перпендикулярна к длине оптической скамьи, а ось линзы – ей параллельна. Расстояния между элементами схемы отсчитываются по шкале, расположенной вдоль скамьи.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы

Определение фокусного расстояния собирающей линзы производится следующими способами.

СПОСОБ 1. Определение фокусного расстояния по расстояниям от линзы до предмета и его изображения

Если обозначить буквами a и a' расстояния от линзы до предмета и его изображения, то ее фокусное расстояние выразится формулой

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}. \quad (8)$$

(Следует помнить, что отрезок a откладывается против направления распространения света и поэтому отрицателен), или

$$f' = \frac{aa'}{a - a'}. \quad (9)$$

Измерения проводятся в следующем порядке.

Поместив рейтер с экраном на дальний от осветителя край скамьи, ставят к нему вплотную рейтер с собирающей линзой и, перемещая линзу от экрана, получают на экране отчетливое изображение сетки осветителя. Отсчитав по линейке, расположенной вдоль скамьи, положение линзы, экрана и сетки, следует определить по формуле (9) оценочное значение f . Затем установить экран на расстоянии, примерно на 20% большем, чем $4f$, от сетки осветителя. При таком положении экрана проделать аналогичное измерение десять раз, часть при уменьшенном изображении сетки, часть при увеличенном.

СПОСОБ 2. Определение фокусного расстояния по величине предмета и его изображения, по расстоянию от линзы до изображения

Обозначим величину предмета через l , v , величину его изображения l' , расстояния до них от линзы соответственно через a и a' . Эти величины связаны между собой соотношением

$$\frac{l'}{l} = \frac{a'}{a}.$$

Выразив отсюда a (расстояние от линзы до предмета) и подставив его в (8), легко получить (учитывая, что отрезок l' отрицателен)

$$f' = \frac{a'l}{l-l'}. \quad (10)$$

Измерения по данному способу проводятся следующим образом. Несколько сдвинув экран (по сравнению с положением в предыдущем способе), получить на нем сильно увеличенное изображение сетки. Измерить a' по линейке на скамье. Зная l' , рассчитать f' , изменяя расстояние от плоскости сетки до экрана; повторяют опыт несколько раз.

СПОСОБ 3. (Способ Бесселя). Определение фокусного расстояния по величине перемещения линзы

Если расстояние от предмета до изображения, которое обозначим через A , более $4f'$, то всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получается отчетливое изображение предмета: в одном случае уменьшенное, в другом – увеличенное. При этом оба положения линзы будут симметричны относительно середины расстояния между предметом и изображением. Действительно, воспользовавшись уравнением (9), можно написать для первого положения линзы (рис. 4)

$$f' = \frac{(A-b-a')(a'+b)}{A}.$$

и для второго положения

щие из переднего фокуса линзы лучи идут после линзы параллельно ее оптической оси. На этом свойстве и основан четвертый способ.

Убрать рейтер с экраном со скамьи. Поставить на скамью зрительную трубу, установленную на бесконечность путем наводки ее на достаточно удаленный предмет. Линзу установить на расстоянии от сетки осветителя, примерно равном f' . Приблизив зрительную трубу к линзе (для удобства настройки), перемещением линзы получить отчетливое изображение сетки в зрительной трубе. Измеряют расстояние от сетки до линзы, которое будет равно искомому фокусному расстоянию.

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

СПОСОБ 1. Определение фокусного расстояния при помощи зрительной трубы

Если на пути лучей, выходящих из точки А и сходящихся в точке D после преломления в собирающей линзе L_1 (рис. 5), поставить рассеивающую линзу L_2 так, чтобы расстояние CD было меньше (или равно) ее фокусному расстоянию, то изображение точки А удалится от линзы L_1 . Пусть, например, оно переместится в точку Е. В силу оптического принципа взаимности мы можем теперь мысленно представить лучи света, распространяющиеся из точки Е в обратную сторону. Тогда точка D будет мнимым изображением точки Е после прохождения лучей через рассеивающую линзу L_2 . Если точка Е находится на бесконечности (параллельный пучок света), то точка D находится в фокусе рассеивающей линзы.

Измерения проводятся следующим образом. Поставить между собирающей линзой и зрительной трубой рассеивающую линзу. Пере-

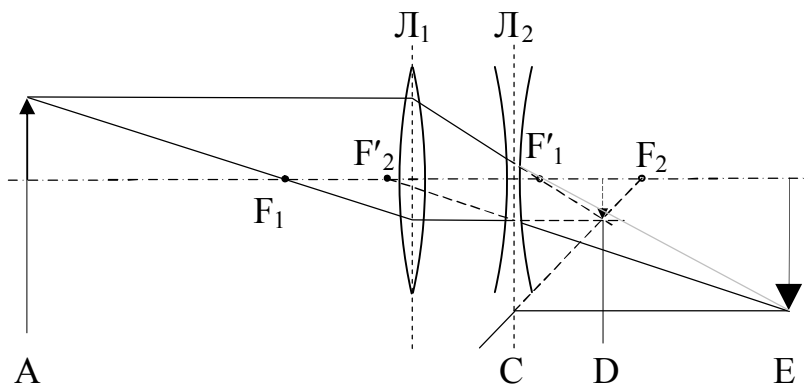


Рис. 5. К измерению фокусного расстояния рассеивающей линзы

двигая обе линзы, получить четкое изображение в зрительной трубе (при этом зрительную трубу, возможно, придется несколько отодвинуть от линз). Заметив по линейке положение рассеивающей линзы, закре-

пить неподвижно собирающую линзу. Убрав зрительную трубу и рассеивающую линзу, поставить экран и, перемещая его, получить отчетливое изображение сетки, даваемое собирающей линзой. Расстояние от положения, которое занимала рассеивающая линза до экрана, есть CD (рис. 5). Поскольку рассеивающая линза строила изображение на бесконечности, точка D находилась в фокусе отрицательной линзы, и $CD = -f'$. Измерения повторить несколько раз. Собирающую линзу оставить в том же положении для следующего способа.

СПОСОБ 2. Определение фокусного расстояния по расстояниям от предмета и его изображения до линзы

Обозначая расстояние CD (рис. 5) буквой a , CE – через a' (оба положительные)

Измерения по данному способу проводятся в следующем порядке. По линейке снять отсчет X_D положения экрана. Не меняя положения собирающей линзы, поставить между ней и экраном рассеивающую линзу. Экран сдвинуть от осветителя и, изменяя положение рассеивающей линзы, получить отчетливое изображение сетки. Снять отсчет X_C положения рассеивающей линзы и X_E положения экрана. Измерения повторить несколько раз. Поскольку

$$CD = X_D - X_C = a, \quad CE = X_E - X_C = a',$$

остается применить формулу (9):

$$f' = \frac{aa'}{a - a'}.$$

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные свойства и кардинальные элементы оптических систем.
2. Как строятся изображения в оптических системах?
3. Вносит ли линза, стоящая на пути пучка, разность хода?
4. Как определяется фокусное расстояние рассеивающей линзы? Сравните оба способа.
5. Сформулируйте и объясните принцип обратимости хода лучей.

Библиографический список

1. Сивухин Д.В. Оптика. – М. : Наука, 1980. – 751 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.