

Цель работы

Экспериментальное определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз различными методами; изучение сферической и хроматической aberrаций линзы.

Идея эксперимента

Оптическая система, состоящая из одной или нескольких линз, позволяет получить на экране четкое изображение источника света. Измеряя линейные размеры системы, можно рассчитать фокусные расстояния и другие параметры используемых линз.

I. ТЕОРИЯ

1.1. Основные положения геометрической оптики

При практическом рассмотрении вопросов формирования изображений в оптических системах большая часть результатов может быть получена на основе представлений *геометрической оптики*. Одним из основных понятий геометрической оптики является понятие *луча* света как линии, вдоль которой распространяется энергия оптического излучения. Среда, в которой распространяется свет, характеризуется *абсолютным показателем преломления* n , равным отношению скорости распространения света в вакууме c к фазовой скорости распространения света в среде v : $n = c/v$.

Основными законами геометрической оптики являются:

1. **Закон прямолинейного распространения света** — в однородной среде свет распространяется по прямым линиям (отступление от закона — явление дифракции).

2. **Закон независимости световых пучков** — распространение всякого светового пучка в среде не зависит от наличия других пучков (отступление от закона — явление интерференции).

3. **Закон отражения света от поверхности раздела двух сред** — падающий и отраженный лучи света лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела двух сред в точке падения, называемой *плоскостью падения*, причем угол падения равен углу отражения.

4. **Закон преломления света на границе раздела прозрачных сред** — падающий и преломленный лучи лежат в плоскости падения*), причем для угла падения φ_1 и угла преломления φ_2 справедливо соотношение:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2,$$

где n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления света соответственно первой и второй оптически однородных и изотропных сред.

Законы геометрической оптики могут быть получены из уравнений Максвелла, если длину волны излучения λ устремить к нулю ($\lambda \rightarrow 0$).

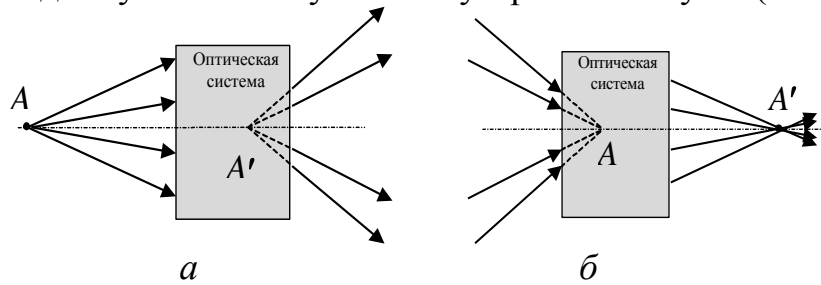


Рис.1. Схема прохождения лучей через оптическую систему:
 а) действительный источник A , мнимое изображение A' ;
 б) мнимый источник A , действительное изображение A' .

Источник света представляется как совокупность светящихся точек, каждая из которых является вершиной расходящегося пучка лучей, называемого *гомоцентрическим*, т.е. имеющим общий центр**). Если свет от точечного источника после прохождения оптической системы вновь собирается в одной точке, то эту точку называют точечным или *стигматическим* изображением источника. Две точки (источник и его изображение) называются *сопряженными* точками данной оптической системы. Вследствие обратимости хода световых лучей источник и его изображение можно поменять местами. Изображение называется *действительным*, если лучи действительно пересекаются в точке. Если пересекаются не сами лучи, а их продолжения, проведенные в направлении, противоположном направлению распространения света, то такое изображение называют *мнимым*. Аналогично действительным и мнимым может быть и точечный источник света (рис.1).

Основным элементом большинства оптических систем является сферическая *линза* — прозрачное однородное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями (или одной сферической и одной плоской), имеющими общую ось***). Линза считается *тонкой*, если ее толщина пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей. Таким образом, тонкую линзу можно считать лежащей в плоскости.

*) Отступление от этого закона наблюдается в двулучепреломляющих средах.

**) Оптическая система, в которой сохраняется гомоцентричность пучков, называется *идеальной*.

***) Линзы могут быть также параболическими, цилиндрическими и т.д.

Линия, проходящая через центры кривизны обеих сферических поверхностей линзы, называется *главной оптической осью*. Точка пересечения главной оптической оси с плоскостью, в которой расположена тонкая линза, называется *оптическим центром* линзы. Любой луч, проходящий через оптический центр тонкой линзы, не испытывает преломления и не меняет направления распространения. Любая линия, проходящая через оптический центр линзы, называется *оптической осью* линзы (*побочной оптической осью*).

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из одной тонкой линзы. Пусть свет от источников падает на линзу слева. Тогда полупространство слева от плоскости линзы (т.е. откуда идут лучи) называют *пространством источников* (или предметов), справа — *пространством изображений*.

Если на линзу направить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после прохождения линзы все лучи соберутся в одной точке, называемой *главным фокусом* линзы. Фокус линзы может быть как действительным, так и мнимым. *Фокусным расстоянием* F линзы называется расстояние от центра линзы до ее фокуса. Фокусное расстояние сферической линзы можно найти по формуле:

$$\frac{1}{F} = (n_{21} - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей линзы; n_{21} — относительный показатель преломления материала линзы, равный отношению абсолютных показателей преломления материала линзы и окружающей среды. При этом, если поверхность линзы выпуклая, то $R > 0$, если вогнутая, то $R < 0$, а если плоская, то $R = \infty$. Линза, у которой фокусное расстояние положительно, называется *собирающей*, линза с отрицательным фокусным расстоянием называется *рассеивающей*. Таким образом, при $n_{21} > 1$, если обе поверхности линзы — выпуклые, то $F > 0$ (линза собирающая), если вогнутые, то $F < 0$ (линза рассеивающая). Если одна из поверхностей выпуклая, а вторая — вогнутая, то линза в зависимости от соотношения радиусов кривизны может быть как собирающей, так и рассеивающей.

Каждая тонкая линза имеет два главных фокуса, находящихся на одинаковом расстоянии от центра линзы. В *заднем фокусе* линзы собираются лучи (для собирающей линзы) или их продолжения (для рассеивающей линзы) в случае, когда источник света действительный и находится на бесконечном расстоянии от линзы. Иными словами, задний фокус является сопряженной точкой для бесконечно удаленной точки в пространстве источников. Аналогично, *передний фокус* сопряжен с бесконечно удаленной точки в пространстве изображений. Таким образом, для собирающей линзы задний фокус находится в пространстве изображений (действительный), а для рассеивающей линзы — в пространстве источников (мнимый).

Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и находящаяся от центра линзы на расстоянии, равном $|F|$, называется *фокальной плоскостью* линзы. Таких плоскостей две — передняя и задняя. Если на линзу вдоль какой-

либо ее оптической оси направить параллельный пучок света, то все лучи или их продолжения соберутся в точке пересечения этой оси с фокальной плоскостью линзы (соответственно, передней или задней).

Вводится также понятие *оптической силы линзы* D как величины, обратной фокусному расстоянию F , выраженному в метрах: $D = 1/F$. Оптическая сила измеряется в *диоптриях* ($1 \text{ дптр} = \text{м}^{-1}$). Для собирающих линз $D > 0$, для рассеивающих $D < 0$.

В рамках геометрической оптики ограничиваются, как правило, рассмотрением центрированных систем и параксиальных лучей. Система называется *центрированной*, если центры кривизны всех сферических поверхностей расположены на одной прямой, т.е. главные оптические оси всех линз совпадают. *Параксиальными* называются лучи, образующие малые углы с главной оптической осью и нормальными к преломляющим поверхностям системы. Для идеальных центрированных систем можно доказать, что любой источник в виде *плоскости, прямой или точки* будет давать изображение также в виде соответственно *плоскости, прямой или точки*, за исключением источников в фокальной плоскости.

Для тонкой линзы справедлива следующая формула, называемая *формулой тонкой линзы*:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (1)$$

где a — расстояние от источника до линзы, b — расстояние от линзы до изображения. Величины a и b могут быть как положительными, так и отрицательными. Если источник и его изображение являются действительными, т.е. источник расположен в пространстве источников, а изображение — соответственно в пространстве изображений, то $a > 0$ и $b > 0$. Если же источник или его изображение — мнимые, то и соответствующие значения a или b отрицательны.

1.2. Способы построения изображения в линзах

При построении изображения точечного источника, получаемого с помощью линзы, необходимо провести как минимум два не совпадающих друг с другом луча, идущих от этого источника, тогда точка пересечения лучей (или их продолжений) даст положение изображения (действительного или мнимого). Обычно используют те лучи, направление распространения которых после прохождения линзы известно. Для таких лучей можно сформулировать следующие правила:

1) луч, параллельный главной оптической оси, после собирающей линзы пройдет через ее задний фокус (после рассеивающей линзы через задний фокус пройдет продолжение луча);

2) луч, идущий через оптический центр линзы в любом направлении, не испытывает преломления и пройдет без изменения направления;

3) луч, проходящий через передний фокус собирающей (или луч, нацеленный на передний фокус рассеивающей) линзы, пойдет параллельно главной оптической оси;

4) луч, параллельный какой-либо оптической оси собирающей линзы, пройдет через точку пересечения этой оси с задней фокальной плоскостью (для рассеивающей линзы через точку пересечения продолжения луча).

На рис. 2 и 3 для собирающей и рассеивающей линз приведены схемы построения изображения двух точечных источников A и B , один из которых (B) находится на главной оптической оси. На каждом из лучей, идущих от источников, указан номер одного из выше перечисленных правил, в соответствии с которым он построен. Для источника A проведены только лучи 1–3, которые пересекаются в одной точке. Для источника B , расположенного на главной оптической оси, лучи 1–3 совпадают с этой осью, поэтому для нахождения изображения следует воспользоваться правилом 4. Для этого следует провести от источника произвольный луч (луч 4), пересекающий плоскость линзы в точке B_0 , затем провести параллельный ему луч, проходящий через центр линзы (на данных рисунках этот луч совпадает с лучом 2). Точка пересечения этого луча с фокальной плоскостью (на рисунках обозначена B_f) и будет той точкой, в которой соберутся все лучи, параллельные лучу 2, в том числе и луч 4. Соединяя точку B_f с точкой B_0 , получим, что точка пересечения этой прямой с главной оптической осью и даст положение изображения B' .

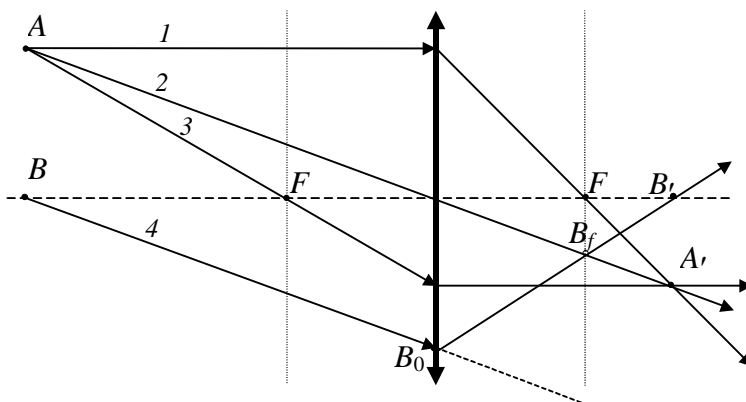


Рис. 2. Построение изображения в случае собирающей линзы

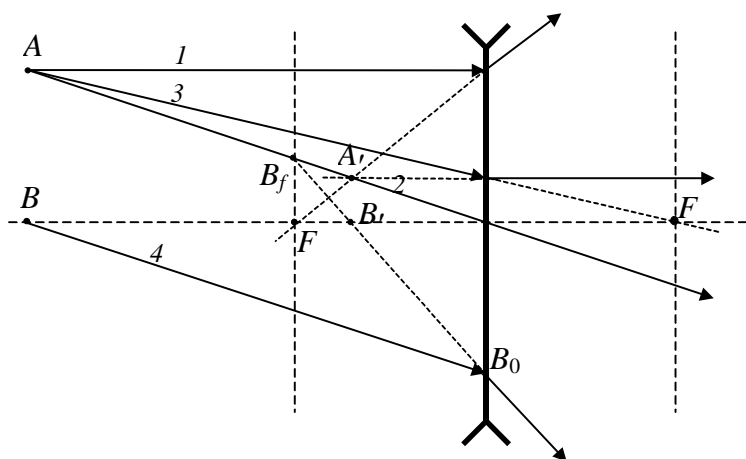


Рис.3. Построение изображения в случае рассеивающей линзы

С помощью тех же правил 1–4 можно построить изображение в случае мнимого источника. На рис. 4 приведены примеры такого построения для собирающей и рассеивающей линз, когда мнимый источник A находится в пространстве изображений. Для построения изображения проведем через точку A два луча, один из которых параллелен главной оптической оси, а второй проходит через центр линзы (соответственно лучи 1 и 2). Используя правила 1 и 2, можно найти положение изображения A' точки A . Из рис. 4 видно, что в случае собирающей линзы изображение будет действительным, а в случае рассеивающей — мнимым*).

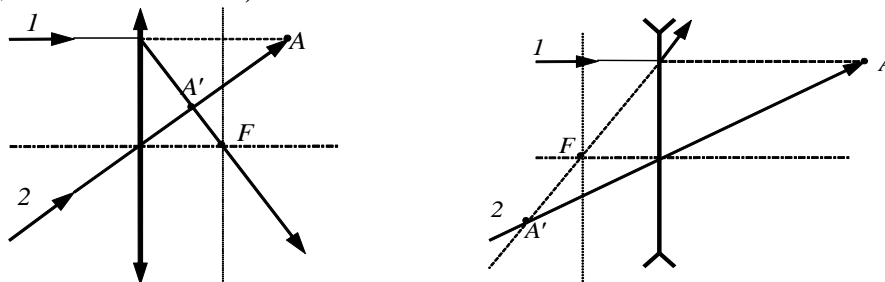


Рис. 4. Построение изображения в случае мнимого источника для собирающей и рассеивающей линз: A — мнимый источник, A' — изображение, F — фокус линзы

Выше уже отмечалось, что для протяженного источника в виде отрезка прямой линии изображением является также отрезок прямой, поэтому для его нахождения достаточно построить изображения двух крайних точек источника, а затем соединить их прямой. Если прямолинейный источник расположен параллельно плоскости линзы, то и его изображение также будет параллельным этой плоскости. Отношение поперечных размеров изображения и источника называют *увеличением системы*. Нетрудно получить, что для увеличения d справедлива формула:

$$d = \frac{|b|}{|a|}. \quad (2)$$

В зависимости от соотношения между расстояниями от источника до линзы a и фокусного расстояния линзы F изображение может быть действительным или мнимым; увеличенным, равным или уменьшенным; прямым или обратным (неперевернутым или перевернутым). В таблицах 1 и 2 приводятся данные о характеристике изображения, получаемого с помощью собирающей и рассеивающей линз.

Таблица 1. Характеристика изображения источника в зависимости от положений источника и изображения в случае собирающей линзы ($F > 0$).

№	Положение источника, a	Положение изображения, b	Характеристика изображения
1	$a > 2F$	$F < b < 2F$	Обратное, действительное, уменьшенное
2	$a = 2F$	$b = 2F$	Обратное, действительное, равное

*) В случае собирающей линзы изображение всегда будет действительным, а в случае рассеивающей — может быть как мнимым, так и действительным (см. ниже).

3	$F < a < 2F$	$b > 2F$	Обратное, действительное, увеличенное
4	$0 < a < F$	$b < 0$	Прямое, мнимое, увеличенное
5	$a < 0$	$b > 0$	Прямое, действительное, уменьшенное

Таблица 2. Характеристика изображения источника в зависимости от положений источника и изображения в случае рассеивающей линзы ($F < 0$).

№	Положение источника, a	Положение изображения, b	Характеристика изображения
1	$a > 0$	$b < 0$	Прямое, мнимое, уменьшенное
2	$- F < a < 0$	$b > 0$	Прямое, действительное, увеличенное
3	$-2 F < a < - F $	$b < -2 F $	Обратное, мнимое, увеличенное
4	$a = -2 F $	$b = -2 F $	Обратное, мнимое, равное
5	$a < -2 F $	$-2 F < b < - F $	Обратное, мнимое, уменьшенное

Если оптическая система состоит из нескольких линз, то при построении изображения можно поступить следующим образом. Сначала строится изображение в первой линзе, которое затем становится «источником» для следующей линзы и т.д. На рис. 5 приведен пример построения изображения для системы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз. Собирающая линза с фокусным расстоянием F_1 дает обратное действительное изображение $A'B'$ источника AB . Рассеивающая линза с фокусным расстоянием F_2 установлена таким образом, что для нее «источник» $A'B'$ является мнимым ($a < 0$) и выполняется условие $|a| < |F_2|$. Тогда изображение $A''B''$ мнимого «источника» $A'B'$, выполненное аналогично построению, проведенному на рис. 4, будет действительным. Применение такой оптической системы позволяет определить фокусное расстояние рассеивающей линзы по результатам измерения расстояний от рассеивающей линзы до точек B' и B'' .

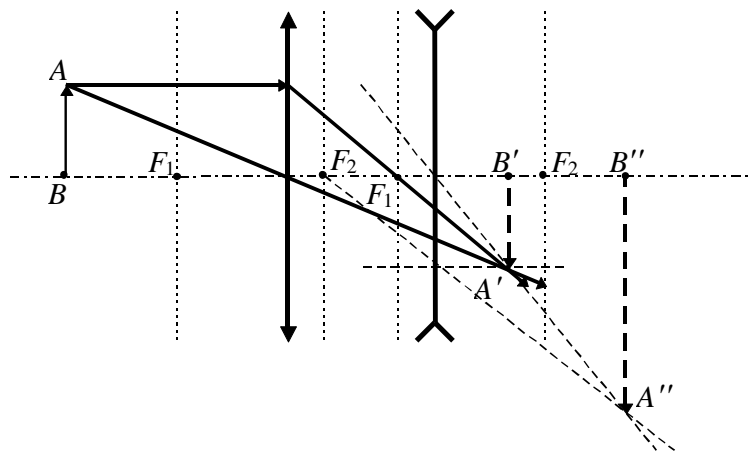


Рис. 5. Построение изображения для оптической системы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз: A — мнимый источник, A' — изображение, F — фокус линзы

1.3. Определение фокусного расстояния линзы

1.3.1. Собирающая линза

Существует большое количество методов экспериментального определения фокусного расстояния линзы. Остановимся лишь на трех из них, применяемых при выполнении данной работы.

Метод I. Фокусное расстояние линзы F можно определить, исходя из формулы (1) для тонкой линзы:

$$F = \frac{a \cdot b}{a + b} \quad (3)$$

Расстояния a и b измеряются на установке, состоящей из собирающей линзы, источника света, объекта и экрана для наблюдения изображения. Так как на экране можно наблюдать только действительное изображение, то для собирающей линзы должно быть выполнено условие $a > F$ (см. табл.1).

Недостатком такого способа определения фокусного расстояния линзы является то, что на самом деле любая линза не является тонкой, и расстояния следует отсчитывать от соответствующих главных плоскостей линзы, определение которых довольно затруднительно.

Метод II. Если источник света и экран находятся на расстоянии L , более чем в 4 раза превышающее F , то всегда найдутся два таких положения линзы с соответствующими расстояниями до объекта и изображения (a_1, b_1) и (a_2, b_2) , при которых на экране будут наблюдаться четкие изображения.

Так как

$$L = a_1 + b_1 = a_2 + b_2,$$

то, исходя из формулы (1), можно получить, что

$$a_1 = b_2 \quad \text{и} \quad a_2 = b_1.$$

Обозначим через s расстояние, на которое следует переместить линзу для перехода от первого изображения ко второму:

$$s = a_2 - a_1 \quad \text{или} \quad s = b_1 - b_2$$

(пусть для определенности $a_2 > a_1$). Тогда из соотношений

$$L = a_1 + b_1 = a_1 + s + b_2 = 2 \cdot a_1 + s$$

и

$$L = a_2 + b_2 = b_1 + b_1 - s = 2 \cdot b_1 - s$$

следует, что

$$a_1 = \frac{L - s}{2} \quad \text{и} \quad b_1 = \frac{L + s}{2}.$$

Тогда из формулы тонкой линзы получим:

$$F = \frac{(L - s) \cdot (L + s)}{4L} \quad (4)$$

Описанный способ определения фокусного расстояния линзы является наиболее общим и применимым как для тонких, так и для толстых линз, так как,

в отличие от первого способа, измеряются не расстояния до линзы, а ее перемещение.

Метод III. Если при проведении измерений вторым способом уменьшать расстояние L между объектом и экраном, то оба положения линзы, дающие четкое изображение, будут сближаться, и при $L = 4F$ сольются друг с другом. Найдя это положение, можно также найти фокусное расстояние:

$$F = \frac{L}{4} \quad . \quad (5)$$

Однако визуально различить случаи, когда при перемещении линзы будет наблюдаться только одно изображение или два близко расположенных изображения, довольно затруднительно, поэтому при измерениях, проводимых указанным способом, возможны существенные погрешности.

1.3.2. Рассеивающая линза

Из табл. 2 следует, что с помощью рассеивающей линзы действительное изображение можно получить только когда $a < 0$ и $|a| < |F|$, т.е. источник света должен быть, во-первых, мнимым, и, во-вторых, находиться от линзы на расстоянии, меньшем ее фокусного расстояния. Добиться выполнения обоих условий можно, если перед рассеивающей линзой установить собирающую (рис. 5). Эта линза даст действительное изображение $A'B'$, которое станет «источником» света для рассеивающей линзы. Если установить рассеивающую линзу так, чтобы были выполнены вышеуказанные условия, то будет сформировано действительное изображение $A''B''$, которое можно наблюдать на экране. Измерив расстояния от рассеивающей линзы до точки B' (обозначим его a , при этом $a < 0$) и до точки B'' (обозначим его b , при этом $b > 0$), из формулы тонкой линзы получим:

$$F = \frac{a \cdot b}{a + b} = -\frac{|a| \cdot b}{b - |a|} \quad (6)$$

т.е. фокусное расстояние рассеивающей линзы отрицательно.

1.4. Аберрации оптических систем

В реальных оптических системах получаемые изображения обычно не точно соответствуют источникам, не вполне отчетливы, оказываются окрашенными и т.п. Такие искажения называются *геометрическими* или *лучевыми аберрациями* оптической системы. Различают несколько видов аберраций:

1) *астигматизм* — прошедшая от точечного источника волна перестает быть сферической, т.е. изображение не является стигматичным, а представляет собой две взаимно перпендикулярные линии, расположенные в разных плоскостях на некотором расстоянии друг от друга (подробнее см. [1], §83);

2) *кома* — изображение точечного источника, расположенного не на главной оптической оси системы, имеет вид неравномерно освещенного пятнышка, напоминающего комету (подробнее см. [1], §82);

3) *сферическая aberrация* — исходящие из точечного источника лучи, прошедшие вблизи главной оптической оси системы и прошедшие через отдаленные от оси части системы, не собираются в одну точку;

4) *хроматическая aberrация* — aberrация, связанная с зависимостью показателя преломления материала линзы от длины волны света.

В данной работе изучаются сферическая и хроматическая aberrации.

1.4.1. Сферическая aberrация

Если на линзу направить пучок света, параллельный главной оптической оси, то лучи, прошедшие через различные участки линзы соберутся в разных точках на оси (рис. 6). Поэтому на экране, установленном перпендикулярно оси, даже в случае идеального точечного источника будут наблюдаться изображения в виде диска с неоднородным распределением освещенности. Если перед линзой поместить маску, имеющую форму узкого кольца, то сферическая aberrация практически исчезнет, но существенно уменьшится и интенсивность прошедшего света. В качестве меры для сферической aberrации берут разность фокусных расстояний линзы для ее центральной части (маска в этом случае имеет вид небольшого отверстия) и для зоны, расположенной на краю линзы.

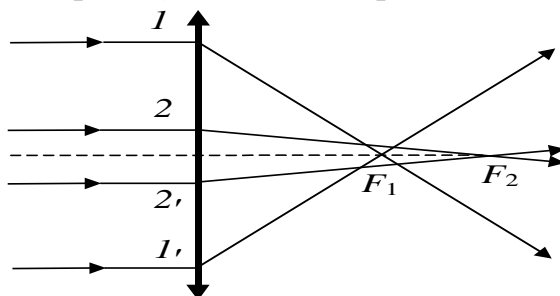


Рис. 6. Сферическая aberrация в линзе

Сферическая aberrация сильнее проявляется для линз с малым фокусным расстоянием, причем она, в отличие от всех других aberrаций, сохраняется в монохроматическом свете даже при расположении идеального точечного источника строго на главной оптической оси системы.

1.4.2. Хроматическая aberrация

В прозрачных средах показатель преломления n растет с уменьшением длины волны света λ . В видимой области спектра существует эмпирическая формула, описывающая зависимость показателя преломления n от длины волны света λ :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

где A, B, C, \dots — константы, характерные для данного вещества.

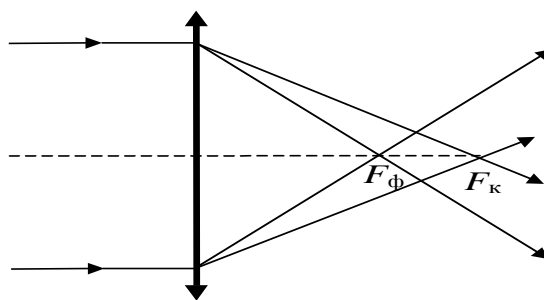


Рис. 7. Хроматическая aberrация в линзе

Так как в формулу для фокусного расстояния линзы входит показатель преломления, то F является функцией от λ . Поэтому изображение точечного немонахроматического источника уже не является точечным, а представляет собой совокупность пространственно разделенных точек разных цветов (рис. 7). Для протяженного источника это приводит к тому, что края изображения окрашиваются. В качестве меры хроматической aberrации принято брать разность фокусных расстояний линзы для крайних цветов видимого диапазона (красного и фиолетового).

II. ЭКСПЕРИМЕНТ

2.1. Схема экспериментальной установки

На скамье стационарно установлен источник света (лампа накаливания), на корпусе которого закреплен специальный держатель для объектов (рис.8). Объекты представляют собой нанесенные на прозрачной пленке с помощью лазерного принтера рисунки — слайды, вставленные в рамки. Прозрачные участки слайдов выполняют роль источников света при проведении экспериментов. В работе используются различные слайды, выбираемые в соответствии с заданием. Держатель также имеет гнездо для установки светофильтров.

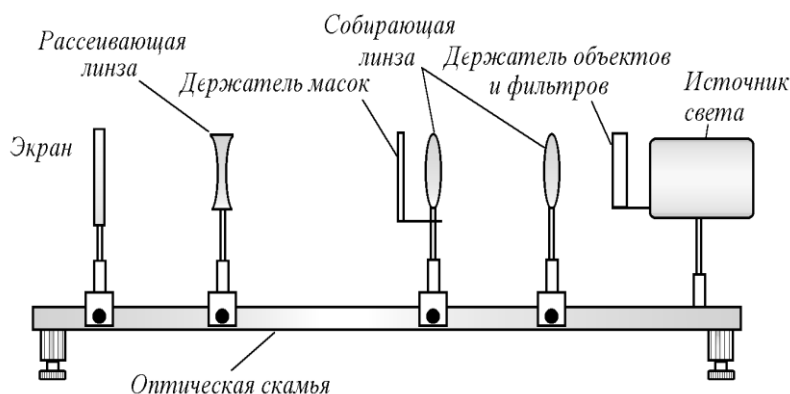


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

По скамье могут перемещаться рейтеры, в которых закрепляются линзы (в комплект входят две собирающие и одна рассеивающая) в специальных оправках и экран для наблюдения изображения. Для изучения сферической аберрации на оправе одной из линз могут размещаться маски, позволяющие выделять определенные участки линзы (центральную или периферийную части линзы). Кроме этого, имеется маска, представляющая собой маленькое, сделанное иглой, отверстие в черной непрозрачной бумаге.

Все объекты должны устанавливаться таким образом, чтобы их центры находились на одной высоте, плоскости линз и экраны были перпендикулярны к оптической скамье, т.е. оптическая система должна быть центрированной. Расстояние между объектами определяется по шкале (масштабу), укрепленной на скамье.

2.2. Проведение эксперимента

Перед началом измерений проведите небольшой эксперимент. Установите в держатель какой-либо из слайдов и включите лампу накаливания. Поместите экран на расстоянии 10–15 см от слайда. Возьмите маску с маленьким отверстием в черной бумаге и поместите ее между слайдом и экраном. На экране будет наблюдаться перевернутое изображение, размер которого будет изменяться с изменением расстояния между маской и экраном. На основе представлений геометрической оптики, объясните наблюдаемые явления.

Упражнение **1. Нахождение фокусного расстояния собирающей линзы**

В данном упражнении определяется фокусное расстояние F собирающей линзы тремя методами, описание которых представлено в §1.3.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы первым методом

1. Установите в держатель на источнике света слайд с латинской буквой F .
2. Установите на оптической скамье на расстоянии $a \approx 10 \div 20$ см от слайда (объекта) одну из собирающих линз, на оправе которой отсутствует приспособление для закрепления маски.
3. Перемещая экран по оптической скамье, получите четкое изображение объекта.
4. Измерьте с помощью линейки на оптической скамье расстояние от объекта до линзы a и от линзы до изображения b . Полученные результаты занесите в табл.3.
5. Не меняя положения линзы, сместите экран вдоль скамьи, а затем вновь найдите четкое изображение объекта. Определите расстояние b .

6. Повторите (для повышения точности) измерения п.5 не менее 3–5 раз. Из полученным результатов измерений определите среднее значение $\langle b \rangle$ и оцените среднеквадратичную погрешность δb^* .

7. По формуле (3) вычислите фокусное расстояние линзы F и оцените погрешность δF . Результаты запишите в табл.3.

8. Сместите линзу вдоль оптической скамьи на расстояние $a \approx 20 \div 30$ см от слайда (объекта) и повторите измерения и вычисления в соответствии с пп. 3–7 для этого положения линзы. Результаты измерений и вычислений запишите в табл.3.

Таблица 3. Результаты измерений для нахождения фокусного расстояния собирающей линзы различными методами

Метод	N из м.	Устанавл. параметр	Измеряемый параметр					Среднее и оценка погрешности		Фокусное расстояние	
								$\langle b \rangle$	δb	F	δF
I		a	b					$\langle b \rangle$	δb	F	δF
	1										
	2										
II		L	s					$\langle s \rangle$	δs	F	δF
	1										
	2										
III			L					$\langle L \rangle$	δL	F	δF

9. Проведите сравнение полученных результатов.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы вторым методом.

1. Установите экран от слайда (объекта) на расстояние $L \approx 4F + (30 \div 40)$ см, где F — фокусное расстояние линзы, определенное первым способом. Значение L запишите в табл.3.

2. Перемещая линзу вдоль скамьи, найдите два таких положения линзы, при которых изображение будет четким[†]. Определите расстояние между этими положениями линзы $s = (a_1 - a_2)$.

3. Повторите измерения не менее 3–5 раз. Вычислите среднее арифметическое $\langle s \rangle$ и оцените среднеквадратичную погрешность δs .

4. По результатам измерений с помощью формулы (4) вычислите фокусное расстояние линзы F и получите оценку погрешность измерения δF . Результаты внесите в табл.3.

* Так как четкость изображения определяется «на глаз», т.е. погрешность субъективная, то для оценки погрешности δb можно определить диапазон перемещения экрана, при котором изображение остается четким.

† Так как четкость при уменьшенном размере изображения определить «на глаз» довольно сложно, можно для рассматривания изображения на экране использовать другую собирающую линзу в качестве лупы.

5. Сместите экран вдоль оси в положение $L \approx 4F + (15 \div 20)$ см и повторите измерения и вычисления в соответствии с пп. 2—4 для этого положения экрана. Результаты внесите в табл. 3.

6. Сравните полученные результаты.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы третьим методом.

1. Уменьшая расстояние между экраном и объектом, найдите такое положение экрана, при котором четкое изображение будет наблюдаться лишь при одном положении линзы. Измерьте найденное расстояние L .

2. Проведите измерения не менее 3—5 раз, найдите среднее значение $\langle L \rangle$ и оцените погрешность измерений δL .

3. По формуле (5) вычислите фокусное расстояние линзы F и оцените погрешность измерений δF . Запишите результаты в табл. 3.

Сравните значения фокусного расстояния собирающей линзы, определенные тремя способами (табл. 3). В случае несовпадения результатов постарайтесь дать объяснение этому и выскажите мнение о том, какому из результатов следует больше доверять.

Упражнение 2. Изучение сферической аберрации линзы

1. Установите в держатель слайд с латинской буквой F .

2. Установите на произвольном расстоянии от слайда собирающую линзу, на оправе которой есть приспособление для закрепления маски.

3. Перемещая экран, получите четкое изображение объекта.

4. Установите на линзу маску в виде круглого отверстия (диафрагмы) малого диаметра таким образом, чтобы оси линзы и отверстия совпадали. Получите четкое изображение объекта. Объясните наблюдаемое изменение четкости и освещенности изображения.

5. Найдите фокусное расстояние линзы с маской, воспользовавшись любым из способов, предложенным в упр. 1.

6. Перемещая диафрагму в направлении, перпендикулярном к главной оси линзы, обратите внимание на изменение четкости изображения и дайте этому объяснение.

7. Не меняя положения линзы, установите маску, открывающую периферийные участки линзы. Передвигая экран вдоль скамьи, обратите внимание на то, что изображение раздваивается. Объясните наблюдаемый эффект.

8. Найдите положение экрана, при котором изображение будет четким. Найдите фокусное расстояние линзы с данной маской, воспользовавшись любым из способов, предложенных в упр. 1.

9. Рассчитайте величину сферической аберрации линзы, равной разности фокусных расстояний для центрального и периферийного участков линзы.

Упражнение **3. Изучение хроматической аберрации линзы**

1. Установите в держатель слайд с буквой F .

2. Установите экран для наблюдения изображения и собирающую линзу с маской, открывающей периферийную часть линзы. Экран должен находиться от слайда на расстоянии, немного большем, чем четырехкратное фокусное расстояние, именно в этом случае проявление хроматической аберрации будет более заметным.

3. Установите синий светофильтр и, перемещая линзу, найдите два положения, при которых будут наблюдаться четкие изображения объекта. Так как в этом спектральном диапазоне малы как интенсивность излучения лампы накаливания, так и чувствительность сетчатки глаза, то получение четкого изображения затруднительно. Установленная маска позволяет в качестве критерия правильного определения местоположения экрана выбрать отсутствие раздвоения изображения.

4. Проведите измерения расстояний от объекта до экрана L и перемещения линзы s и с помощью формулы (4) вычислите фокусное расстояние линзы для синего цвета F_c (длина волны около 450 нанометров). Измерения провести не менее 3–5 раз. Вычислите среднее значение $\langle F_c \rangle$ и оцените погрешность δF_c .

5. Установите вместо синего светофильтра красный. При этом изображение должно немного раздвоиться. Не меняя положения экрана, вновь найдите два четких изображения. Проведя необходимые измерения, рассчитайте фокусное расстояние линзы для красного цвета $F_{кр}$ (длина волны около 650 нанометров). Измерения провести не менее 3–5 раз. Вычислите среднее значение $\langle F_{кр} \rangle$ и оцените погрешность $\delta F_{кр}$.

6. Рассчитайте величину хроматической аберрации линзы, равной разности фокусных расстояний для синего и красного цветов $\Delta F = |F_{кр} - F_c|$.

7. В соответствии с **Дополнением** получите оценку для разности показателей преломления материала линзы для двух длин волн.

Упражнение **4. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы**

1. Установите на произвольном расстоянии от объекта одну из собирающих линз (при желании можно также установить светофильтр и (или) маску) и, перемещая экран, получите четкое изображение объекта. Для того, чтобы последующие измерения были более точными, это изображение должно быть уменьшенным*).

2. Установите рассеивающую линзу между собирающей линзой и экраном. Определите расстояние рассеивающей линзы до экрана a .

3. Перемещая экран, получите четкое изображение объекта. Определите расстояние от рассеивающей линзы до изображения b . Рассчитайте по формуле (6)

*) В случае не выполнения этого условия измените положение линзы.

фокусное расстояние рассеивающей линзы F . Оцените погрешность определения фокусного расстояния δF .

4. Проведите измерения и вычисления согласно пп.2,3 для другого положения рассеивающей линзы.

5. Проведите измерения и вычисления согласно пп.1–4 с другой собирающей линзой.

6. Сравните полученные результаты измерения фокусного расстояния рассеивающей линзы с использованием различных собирающих линз.

Упражнение 5. Определение размеров объекта по размерам его изображения для различных оптических систем

Оптическая система из одной линзы

1. Установите в держатель слайд с текстом малого размера. При желании можно также установить светофильтр.

2. Зная фокусное расстояние одной из собирающих линз, рассчитайте местоположения линзы и экрана, при которых коэффициент увеличения d будет принимать значение в диапазоне от 5 до 10 (точное значение выбирается самостоятельно).

3. Установите линзу и экран в положения на оптической скамье, соответствующие рассчитанным значениям. При правильности расчетов должно наблюдаться четкое увеличенное изображение объекта.

4. Измерьте высоту букв на изображении и зная коэффициент увеличения системы, найдите высоту букв в тексте слайда. Оцените погрешность измерений.

Оптическая система из двух линз

1. Получите формулу для расчета коэффициента увеличения системы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз (как в упр.4). Определите положения линз и экрана, при которых этот коэффициент принимает значение в диапазоне от 5 до 10 (по выбору).

2. Установите линзы и экран в положения на оптической скамье, соответствующие рассчитанным значениям. При правильности расчетов должно наблюдаться четкое увеличенное изображение объекта.

3. Измерьте высоту букв на изображении и зная коэффициент увеличения системы, найдите высоту букв в тексте слайда. Оцените погрешность измерений.

Оптическая система, формирующая прямое изображение объекта

1. Для оптических систем, рассмотренных выше, изображение является обратным (перевернутым). Предложите такую оптическую схему, состоящую из любого количества линз, используемых при выполнении данной задачи, чтобы возможно было получить увеличенное прямое изображение. Рассчитайте коэффициент увеличения данной системы.

2. Установите линзы и экран в положения на оптической скамье, соответствующие рассчитанным значениям. При правильности расчетов должно наблюдаться четкое увеличенное изображение объекта.

3. Измерьте высоту букв на изображении и зная коэффициент увеличения системы, найдите высоту букв в тексте слайда. Оцените погрешность измерений.

В отчете о выполнении данного упражнения должны быть представлены результаты измерений размера букв в тексте, проведенные тремя способами, с указанием погрешности, а также схемы хода лучей в оптических системах, применяемых для каждого из способов.

Основные итоги работы

В процессе выполнения работы должны быть определены фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз несколькими методами. Экспериментально должны быть исследованы сферическая и хроматическая aberrации реальных оптических систем.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение оптической оси, фокальной плоскости и главных фокусов линзы.

2. При каких условиях система из собирающей и рассеивающей линз будет давать действительное изображение?

3. Для каких лучей применима формула линзы?

4. В чем заключается явление хроматической aberrации, сферической aberrации?

5. Для какой цели применяются при фотографировании светофильтры?

6. Опишите методику измерения фокусного расстояния для рассеивающей линзы.

7. Покажите, что если расстояние между объектом и экраном превышает $4F$, то изображение на экране может быть получено при двух различных положениях линзы.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976, гл. XII–XIII.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1985, гл. II.

Дополнение

Для нахождения оценки дисперсии стекла, из которого изготовлена линза, воспользуемся формулой

$$\frac{1}{F} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1Д)$$

где R_1 и R_2 - радиусы кривизны поверхностей линзы; n - показатель преломления материала линзы.

С изменением длины волны излучения меняется показатель преломления n и, как следствие, фокусное расстояние линзы F . Возьмем дифференциал от обеих частей соотношения (1Д) по переменным F и n :

$$\begin{aligned} d\left(\frac{1}{F}\right) &= d(n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \\ -\frac{dF}{F^2} &= dn \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \end{aligned} \quad (2Д)$$

Поделив (2Д) на (1Д), получим:

$$-\frac{dF}{F} = \frac{dn}{n-1}. \quad (3Д)$$

Для экспериментального определения относительного изменения $\frac{dF}{F}$ фокусного расстояния линзы с изменением длины волны прибегнем ко второму методу определения фокусного расстояния.

Установив один из светофильтров (красный или синий) и экран на расстоянии L от объекта, получим с помощью линзы четкое изображение объекта на экране. Переместив линзу на некоторое расстояние s , получим второе четкое изображение.

Заменив светофильтр, вновь проведем аналогичные измерения, не изменяя расстояния L . Это означает, что в формуле для определения фокусного расстояния

$$F = \frac{L^2 - s^2}{4L}$$

изменились F и s :

$$dF = -\frac{2s}{4L} ds = -\frac{s}{2L} ds.$$

Подставляя найденное соотношение в (3Д), для изменения показателя преломления dn получим:

$$dn = -(n-1) \cdot \frac{dF}{F} = (n-1) \cdot \frac{s}{2FL} ds. \quad (4Д)$$

При расчетах по формуле (4Д) взять средние значения F и s , полученные с разными светофильтрами, показатель преломления стекла считать равным $n \approx 1,5$. Обратим внимание, что для нахождения правильного знака dn необходимо учесть знак ds .

