

## Лабораторная работа №

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕЙВАЮЩЕЙ ЛИНЗ

## Теоретическое введение

Для описания распространения и взаимодействия электромагнитного излучения с веществом используют различные приближения: геометрической оптики, физической (волновой) оптики и квантовой оптики.

Приближение геометрической оптики используется в тех случаях, когда длиной волны электромагнитного излучения можно пренебречь по сравнению с размерами приборов, с помощью которых изучается это излучение. В рамках этого приближения рассматриваются законы распространения в прозрачных средах электромагнитного излучения видимой части спектра, т.е. света ( $\lambda_0 = 0,4 - 0,76$  мкм). Это рассмотрение проводится на основе представлений о свете как о совокупности световых лучей – линий, вдоль которых распространяется энергия световых электромагнитных волн. Пучки световых лучей, пересекаясь, не взаимодействуют и распространяются после пересечения независимо друг от друга.

Отношение скорости света в вакууме  $c$  к скорости света  $V$  в данной среде  $n = c/V = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$  называется (абсолютным) показателем преломления этой среды, здесь  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды,  $\mu \approx 1$  – для неферромагнитных сред. Среда называется оптически однородной, если показатель преломления ее везде одинаков. В оптически однородной среде лучи прямолинейны.

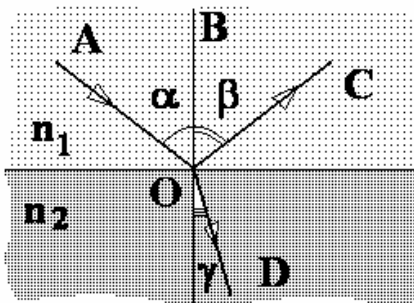


Рис. 1

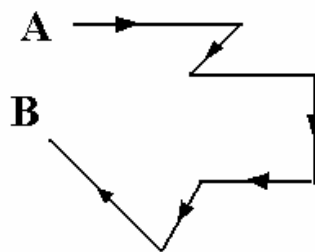


Рис. 2

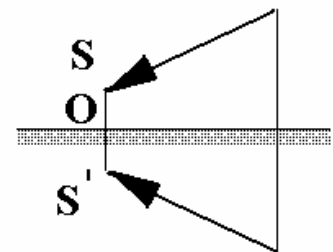


Рис. 3

### **Законы отражения света (рис. 1):**

Падающий ( $AO$ ) отраженный ( $OC$ ) лучи и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча ( $BO$ ), лежат в одной плоскости; 2) угол отражения равен углу падения  $\beta = \alpha$ .

### **Законы преломления света (рис. 1).**

Лучи падающий ( $AO$ ), преломленный ( $OD$ ) и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча ( $BO$ ), лежат в одной плоскости.

Отношение синусов углов падения и преломления есть величина постоянная, равная отношению показателю преломления данных двух сред

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Световые лучи обладают свойством обратимости хода. Если световой луч, испущенный из точки  $A$  (рис. 2), двигаясь в прозрачной среде, попадет в точку  $B$ , в которой его направление распространения изменяют на противоположное, то он вновь попадет в исходную точку  $A$ , пройдя по той же самой траектории.

Каждая точка  $S$  источника света (монохроматического) в геометрической оптике считается центром расходящегося пучка лучей, который называется гомоцентрическим. Если после отражений и преломлений в различных средах пучок остается гомоцентрическим, то его центр  $S'$  называется изображением точки  $S$  в оптической системе. Изображение  $S'$  называется действительным, если в точке  $S'$  пересекаются сами лучи пучка, и мнимым, если в ней пересекаются продолжения этих лучей (в направлении, противоположном направлению распространения лучей).

Простейшая оптическая система — плоское зеркало. Для того чтобы найти изображение точки ( $S$ ) в плоском зеркале, достаточно на продолжении перпендикуляра ( $OS$ ), опущенного из точки на зеркало, отложить за зеркалом такой же отрезок прямой ( $OS'$ ) (рис. 3). Геометрические размеры протяженного источника света и его мнимого изображения в плоском зеркале одинаковы.

Линза — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Прямую, проходящую через центры сферических поверхностей, называют главной оптической осью. Линза считается тонкой (тонкая линза), если ее толщина много меньше, чем радиус ее поверхностей. Можно считать, что главная оптическая ось пересекает тонкую линзу в одной точке, называемой оптическим центром линзы. Оси,

проходящие через центр линзы и не совпадающие с главной оптической осью, называются побочными осями. Во всех оптических инструментах используются тонкие пучки (т.е. пучки с малым углом раствора), идущие вблизи оптической оси системы. Такие пучки называются параксиальными.

Лучи параксиального светового пучка, распространяющегося параллельно главной оптической оси, пересекаются в точке, лежащей на этой оси и называемой главным фокусом линзы (слово «главный» часто опускают в тексте). У всякой тонкой линзы имеются два фокуса по обе стороны от нее на равных расстояниях от центра линзы. Плоскость, проведенная через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси, называется фокальной. Расстояние от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется фокусным расстоянием линзы  $F$ . Величина, обратная фокусному расстоянию  $D = 1/F$ , называется оптической силой линзы. Она измеряется в диоптриях [дптр] (дптр =  $M^{-1}$ ). Лучи, падающие на линзу параллельно какой-либо побочной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в точке, лежащей на фокальной плоскости (побочный фокус).

Тонкие линзы по своим свойствам делятся на собирающие (рисунки 4 а) и рассеивающие (рисунки 4 б). Особенности прохождения лучей в собирающих линзах показаны на рисунках 4 а).

Луч  $1-1'$ , проходящий через оптический центр тонкой линзы, не преломляется. Луч  $2-2'$ , падающий параллельно главной оптической оси  $OO'$ , после преломления пересекает главную оптическую ось в фокусе  $F$ . Если падающий луч  $3-3'$  проходит через оптическую ось в фокусе, то после преломления он распространяется параллельно главной оптической оси. Параллельные лучи  $1-1'$  и  $4-4'$  после преломления пересекаются в точке  $A$ , лежащей на фокальной плоскости  $MN$  за линзой.

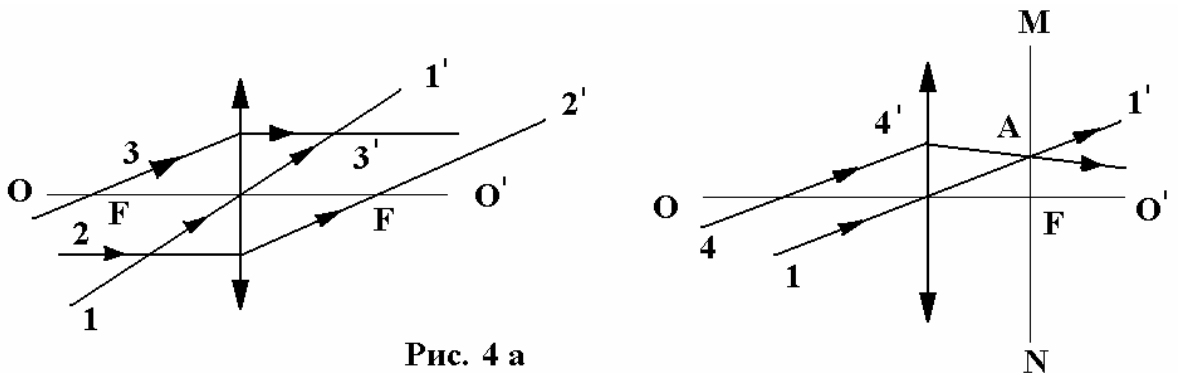


Рис. 4 а

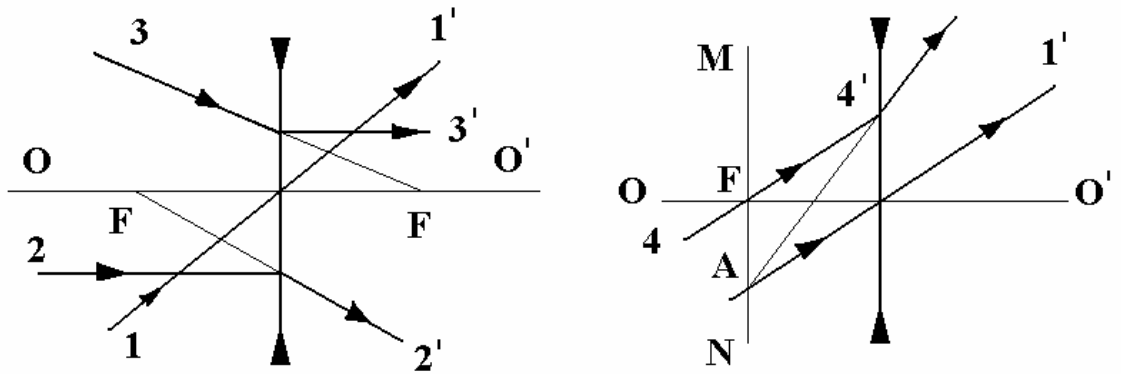


Рис. 4 б

Особенности прохождения лучей в рассеивающих линзах показаны на рисунках 4 б. Луч  $1-1'$ , проходящий через оптический центр тонкой линзы, не преломляется. Луч  $2-2'$ , падающий параллельно главной оптической оси  $OO'$ , после преломления распространяется таким образом, что его продолжение в противоположном направлении пересекает фокус, лежащий перед линзой. Если продолжение падающего луча  $3-3'$  в направлении распространения пересекает фокус, лежащий за линзой, то после преломления луч распространяется параллельно главной оптической оси. Параллельные лучи  $1-1'$  и  $4-4'$  после преломления распространяются таким образом, что их продолжение в противоположном направлении пересекаются в точке  $A$  на фокальной плоскости  $MN$  перед линзой.

Изображение  $S'$  источника света  $S$ , получаемое с помощью тонкой рассеивающей линзы, — всегда мнимое (рис. 5 а). Изображение, получаемое с помощью тонкой собирающей линзы, может быть как мнимым (рис. 5 б), так и действительным (рис. 5 в).

Важное свойство тонкой линзы: изображением отрезка прямой линии является также отрезок прямой; отрезок прямой линии, ортогональный главной оптической оси, имеет в качестве изображения отрезок прямой, также ортогональный главной оптической оси (рис. 6).

Линейным (поперечным) увеличением тонкой линзы  $\Gamma$  называется отношение:

$$\Gamma = \frac{A'B'}{AB}$$

где  $A'B'$  — изображение отрезка  $AB$ . По построению  $\Gamma = b/a$ , где  $a$  и  $b$  — расстояние от линзы до предмета ( $AB$ ) и до его изображения ( $A'B'$ ) соответственно (рис. 6).

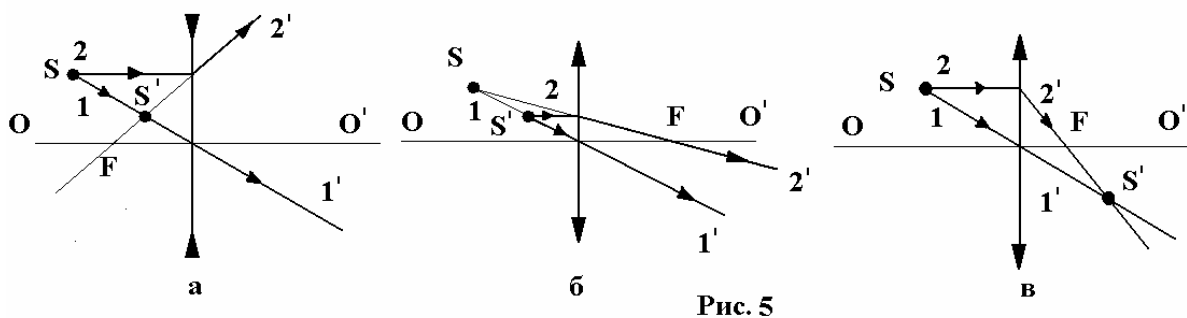


Рис. 5

Формула тонкой линзы:

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

где  $F$  – фокальное расстояние линзы. В левой части знак «+» берется для собирающей линзы и знак «-» – для рассеивающей. Первое слагаемое в правой части берется со знаком «+» для реального предмета (источника расходящего пучка световых лучей) и знак «-» — для мнимого, т.е. сходящего пучка (сформированного в некоторой оптической системе), лучи которого (точнее их продолжения) пересекаются за линзой на расстоянии  $a$  от нее. Второе слагаемое в правой части берется со знаком «+», если изображение, формируемое линзой, — действительное и знак «-», если изображение — мнимое.

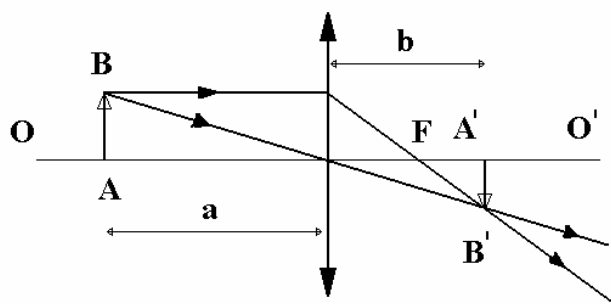


Рис. 6

## СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

*Способ 1. Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы.*

Для вычисления фокусного расстояния собирающей линзы достаточно опытным путем измерить расстояние  $a$  от предмета до линзы и расстояние  $b$  от

его изображения до линзы (рис. 6) и воспользоваться формулой (1), которую в рассматриваемом случае можно переписать в виде

$$f = \frac{ab}{a+b}$$

*Способ 2. Определение фокусного расстояния по величине перемещения линзы.*

Если расстояние  $L$  от предмета (рис. 7) до изображения больше четырех фокусных расстояний линзы, то, как следует из принципа оптической обратимости лучей, всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получится отчетливое изображение предмета, в одном случае уменьшенное, в другом - увеличенное.

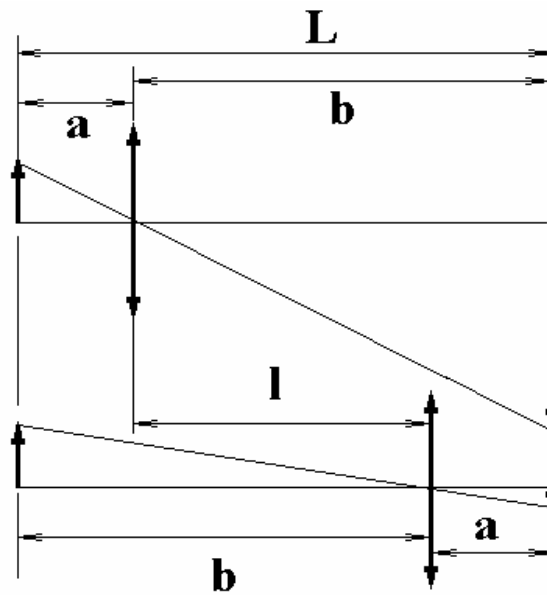


Рис. 7

Как видно из рисунка, достаточно передвинуть линзу на расстояние  $l$  так, чтобы  $a$  и  $b$  поменялись местами. Измерив расстояние  $l$  и расстояние между предметом и экраном  $L$  и решив систему уравнений

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

$$b = a + l,$$

$$a + b = L,$$

нетрудно получить, что

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

**Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы**

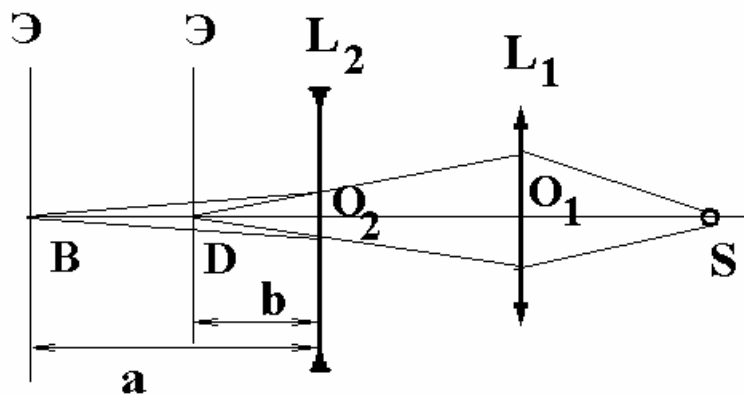


Рис. 8

Разместим на оптической скамье осветитель  $S$ , собирающую линзу  $L_1$  и экран  $\mathcal{E}$  (рис. 8). Если на пути лучей, выходящих из точки  $S$  и сходящихся в точке  $D$  после преломления в собирающей линзе  $L_1$  поставить рассеивающую линзу  $L_2$  так, чтобы расстояние  $O_2D$  было меньше фокусного расстояния рассеивающей линзы, то изображение источника  $S$  переместится из точки  $D$  в точку  $B$ . Вследствие обратимости лучей можно рассматривать лучи света как распространяющиеся из точки  $B$ . Тогда точка  $D$  будет мнимым изображением точки  $B$  после преломления лучей в рассеивающей линзе  $L_2$ .

Обозначим  $BO_2$  через  $a$ ,  $O_2D$  через  $b$  и учитывая, что  $f$  и  $b$  имеют отрицательный знак для рассеивающей линзы, согласно формуле (1) получим

$$f = \frac{ab}{a - b}.$$

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На расположенной горизонтально оптической скамье (MN) могут перемещаться на рейтерах следующие приборы: собирающая ( $L_1$ ) и рассеивающая ( $L_2$ ) линзы, экран ( $\mathcal{E}$ ), электрическая лампочка в специальном кожухе  $\Pi$  (рис. 9). Последний имеет вырез, в виде стрелочки, который, будучи освещен помещенной внутри него лампочкой, рассматривается как предмет.

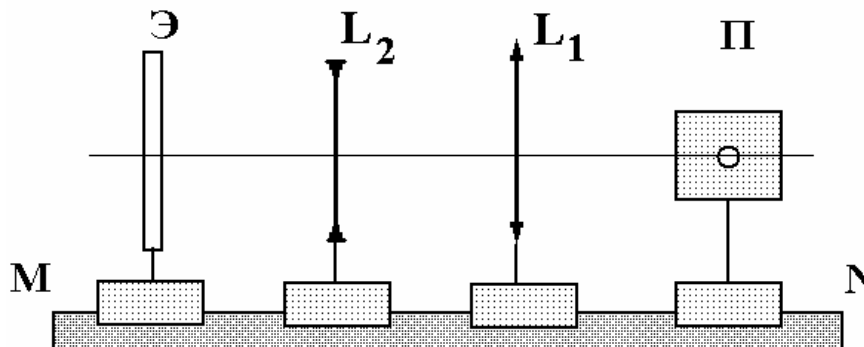


Рис. 9

Все эти приборы установлены так, чтобы их центры лежали на одной высоте, плоскость экрана была перпендикулярна к оптической скамье, а главная оптическая ось - ей параллельна. Расстояние между приборами отсчитывается линейкой с миллиметровыми делениями при помощи указателей, укрепленных на рейтерах. Ввиду неточности визуальной оценки резкости изображения измерения рекомендуется повторить не менее трех раз.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

### Определение фокусного расстояния собирающей линзы

*Способ 1. Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы.*

1. Помещают экран на расстоянии 40-50 см от осветителя. Включают осветитель.
2. Ставят собирающую линзу  $L_1$  на оптическую скамью между экраном и осветителем вплотную к экрану.
3. Передвигают линзу в сторону до тех пор, пока не получат на экране отчетливое изображение выреза в осветителе.
4. Отсчитывают расстояние от осветителя до линзы ( $a$ ) и расстояние от линзы до экрана ( $b$ ) (рис. ).
5. Меняя положения экрана и линзы, повторяют измерения три раза.
6. Подставляя в формулу () значения  $a$  и  $b$ , рассчитывают величину фокусного расстояния собирающей линзы для каждого из трех измерений. Все измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу 1 и вычисляют среднее значение фокусного расстояния.

№	a	b	F	$\langle F \rangle$
1				
2				
3				

*Способ 2. Определение фокусного расстояния собирающей линзы по величине перемещения линзы.*

1. Устанавливают осветитель и экран на расстоянии  $L > 4F$ . Значение фокусного расстояния берут из предыдущих опытов. Значение  $L$  заносят в таблицу 2.
2. Помещают собирающую линзу  $L_1$  между осветителем и экраном вплотную к осветителю.
3. Передвигая линзу, добиваются получения на экране отчетливого увеличенного изображения предмета (рис. ).



4. Определяют положение линзы  $a$ .
5. Передвигая линзу к экрану, получают уменьшенное изображение предмета (рис. ).
6. Определяют новое положение линзы  $b$ .
7. Вычисляют  $l$  - величину перемещения линзы.
8. По формуле ( ) вычисляют фокусное расстояние собирающей линзы.
9. Меняя положение линзы и экрана, повторяют измерения три раза.
10. Все измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу 2.

№	$L$	$a$	$b$	$l$	$F$	$\langle F \rangle$
1						
2						
3						

#### Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

1. Между экраном и осветителем помещают собирающую линзу. Получают на экране отчетливое изображение стрелки в вырезе осветителя
2. Определяют положение экрана  $D$ .
3. Между экраном и собирающей линзой  $L_1$  помещают рассеивающую линзу  $L_2$ .
4. Передвигая экран от осветителя, вновь получают отчетливое изображение стрелки.
5. Определяют положение рассеивающей линзы  $O_2$  и новое положение экрана  $B$ .
6. Вычисляют величины  $a$  и  $b$
7. По формуле ( ) вычисляют фокусное расстояние линзы.
8. Меняя положение собирающей линзы  $L_1$  и осветителя, повторяют измерения три раза.
9. Все измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу 3.

№	$D$	$O_2$	$B$	$a$	$b$	$F$	$\langle F \rangle$
1							
2							
3							

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Какое изображение называется действительным? Мнимым?
3. Что называют оптическим центром линзы? Главной и побочными оптическими осями линзы?
4. Построить ход трех характерных лучей через собирающую линзу.
5. Построить ход трех характерных лучей через рассеивающую линзу.
6. Написать формулу тонкой линзы в соответствии с правилом знаков. Вывести формулу Ньютона.
7. Можно ли с помощью рассеивающей линзы получить: а) действительное изображение действительного предмета? б) увеличенное изображение предмета?
8. Какая точка, лежащая на главной оптической оси собирающей линзы «переводится»

линзой сама в себя?

9. На каком расстоянии надо поместить предмет перед собирающей линзой, чтобы расстояние от предмета до его действительного изображения было наименьшим?
10. Что такое принцип оптической обратимости?
11. Почему, оставляя предмет и экран неподвижными и передвигая между ними линзу, можно получить на экране два отчетливых изображения предмета? Верно ли, что одно из них будет увеличенным, а другое уменьшенным?
12. Как следует расположить две собирающие линзы, чтобы входящий параллельный пучок света после прохождения через них остался параллельным?  
Как следует взаимно расположить собирающую и рассеивающую линзы, чтобы входящий параллельный пучок света после прохождения