

ТОНКИЕ ЛИНЗЫ

ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

НАСРЕДИНОВ Ф.С., ХРУЩЕВА Т.А., ШТЕЛЬМАХ К.Ф.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определить фокусное расстояние тонких собирающей и рассеивающей линз различными методами.

ЗАДАЧИ:

1. Оценить фокусное расстояние собирающей линзы с помощью удаленного источника.
2. Определить фокусное расстояние собирающей линзы.
3. Определить фокусное расстояние рассеивающей линзы.

ВВЕДЕНИЕ

Многие оптические приборы (лупа, очки, бинокль, телескоп, микроскоп, фотоаппарат) состоят из сферических линз, то есть прозрачных тел, ограниченных двумя центрированными сферическими плоскостями (в частности одна из поверхностей может быть плоской), преломляющими световые лучи. Кроме сферических у линзы могут быть цилиндрические и параболические поверхности.

Самая старая из известных линз - линза Nimrud, которая относится ко времени древней Ассирии и имеет возраст более 3000 лет. Но широкое распространение линзы получили лишь с появлением очков в 13 веке в Италии.

Описывая распространение света в линзах, удобно пользоваться законами геометрической оптики и понятием светового луча. Согласно закону прямолинейного распространения света волновой пакет, или цуг световых волн, распространяется в однородной среде по прямой. Любая такая прямая, указывающая направление распространения световых волн, называется световым лучом.

Описывая оптические свойства линзы, чаще всего рассматривают лучи, падающие на нее под малым углом (то есть практически параллельно) к главной оптической оси, так называемый *параксиальный пучок* лучей. Действие линзы на эти лучи определяется положением ее главных точек. На рисунке 1 схематично представлено расположение главных точек тонкой линзы.



Рис. 1 Главные точки, оси и плоскости линзы

Тонкая линза описывается следующими характеристиками:

- *главная оптическая ось линзы* – прямая, проведенная через центры кривизны обеих поверхностей линзы;

- *оптический центр линзы* (точка O на рис.1) – точка пересечения оптической оси с плоскостью линзы;
- *побочные оптические оси* – прямые, проходящие через оптический центр линзы и не совпадающие с главной оптической осью.
- *главный фокус линзы* (точка F на рис.1) – точка, лежащая на главной оптической оси, в которой падающие на линзу лучи, параллельные главной оптической оси, собираются после преломления их линзой, их два – слева и справа от линзы;
- *фокальная плоскость* – плоскость, проведенная через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси, их также две;
- *фокусное расстояние f* – расстояние OF от плоскости линзы до ее главного фокуса;
- *побочные фокусы линзы* – точки пересечения побочных оптических осей с фокальными плоскостями линзы;
- *радиус кривизны линзы* – радиус искривленной поверхности линзы.

Эти характеристики определяются следующими величинами: радиусами сферических поверхностей, расстояниями между точками пересечения сферических поверхностей с оптической осью (если система состоит из двух и более линз) и показателями преломления всех сред, разделяемых сферическими поверхностями.

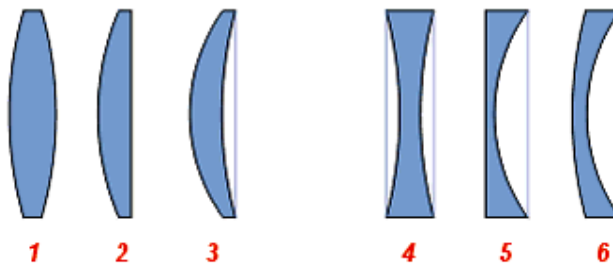


Рис. 2 Типы собирающих и рассеивающих линз

Линзы могут быть *собирающими* (в середине толще) и *рассеивающими* (толще по краю). Собирающие (они же положительные) линзы (см. рис. 2) по форме делятся на двояковыпуклые, плосковыпуклые и выпукло-вогнутые (1, 2 и 3); рассеивающие (отрицательные) – на двояковогнутые, плосковогнутые и вогнуто-выпуклые (4, 5 и 6). Это верно, только если показатель преломления материала линзы больше, чем у окружающей среды. Если показатель преломления линзы меньше, ситуация будет обратной (см. формулу 2). Например, пузырёк воздуха в воде является двояковыпуклой рассеивающей линзой.

Ход лучей в собирающей линзе и некоторые свойства этих лучей показаны на рис. 3. Важным свойством собирающей линзы является *способность собирать параллельные параксиальные пучки лучей в одной точке на фокальной плоскости*. Лучи, параллельные главной оптической оси, собираются в главном фокусе.

Лучи, падающие на рассеивающую линзу параллельно ее главной оси, по выходе из неё будут преломляться в сторону краёв линзы, то есть рассеиваться. Если эти лучи продолжить в обратном направлении так, как показано на рисунке 4 пунктирной линией, то они сойдутся в одной точке – фокусе F . Этот фокус будет мнимым. Продолжения лучей других параллельных пучков также будут пересекаться в одной точке на фокальной плоскости – в побочных фокусах.

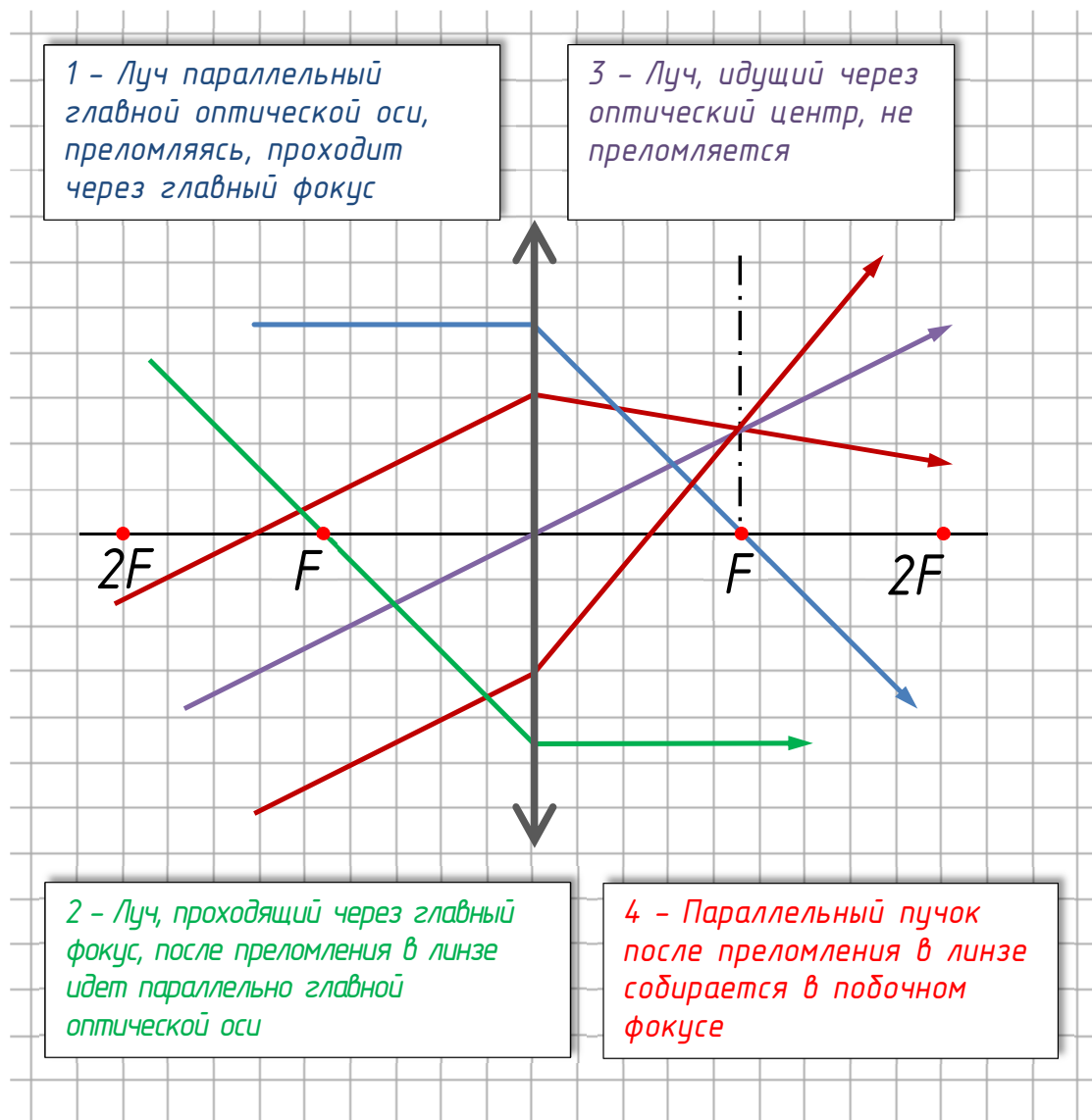


Рис. 3 Ход лучей через собирающую линзу

Описанные свойства прохождения лучей через линзу позволяют получать изображения излучающих или рассеивающих свет объектов. Полученные изображения могут быть *действительными и мнимыми*. Изображение действительное, если после всех преломлений лучи, вышедшие из одной точки объекта, сходятся в одной точке. Его нельзя видеть непосредственно, но можно спроецировать его на экран. Например, такое изображение создаётся объективом фотоаппарата на фотопленке или ПЗС матрице. Мнимое изображение можно видеть непосредственно глазом. Каждой точке объекта соответствует выходящий из линзы пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке с другой стороны от линзы, так что возникает иллюзия, что пучок выходит именно оттуда. Примерами мнимых изображений являются изображения в лупе или зеркале.

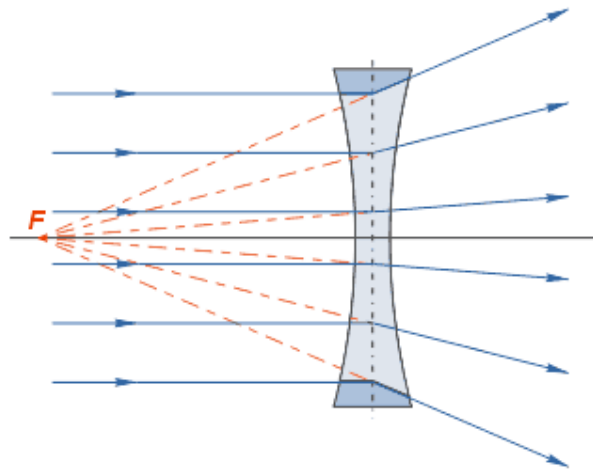


Рис. 4 Ход лучей через рассеивающую линзу

Схемы получения изображений показаны на рис. 5 (а, б и в) на примере собирающей линзы. Чтобы найти положение и размер изображения, следует сделать следующее построение. Из точки В объекта АВ проводят два луча: один (ВО) проходит через центр линзы и не преломляется, второй (ВВ'') идет параллельно главной оптической оси и, преломившись, проходит главный фокус. Точка пересечения этих лучей или их продолжений и определяет положение и размер изображения А'В'. Из рассмотрения пар подобных треугольников $\triangle ABO \sim \triangle A'B'O$ и $\triangle FB''O \sim \triangle FB'A'$ получаются соотношения:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \pm \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \frac{A'B'}{AB} \quad (2)$$

где $a = AO$ - расстояние от линзы до объекта, $b = A'O$ - расстояние от линзы до изображения, Γ - линейное увеличение линзы (соотношение размеров изображения и объекта).

Формула (1) называется *формулой линзы*. Она справедлива как для собирающей, так и для рассеивающей линзы. В ее правой части стоит величина $D = \pm \frac{1}{f}$, которая называется

оптической силой линзы. Она положительна для собирающих и отрицательна для рассеивающих линз. Единицей измерения оптической силы является диоптрия ($[D] = \text{дптр} = 1/\text{м}$). Величины a и b одинаковым образом входят в формулу линзы, это означает, что, если объект поместить на место изображения, то при прежнем же положении той же линзы новое изображение будет на месте первоначального положения объекта. Это правило называется *принципом взаимности* и очень полезно при рассмотрении свойств оптических систем.

При получении изображения с помощью линзы могут иметь место следующие ситуации:

- 1) линза собирающая, $f < a < 2f$, рис.5а, изображение действительное, перевернутое, увеличенное ($\Gamma > 1$, $A'B' > AB$, $b > a$), реализуется в проекторах;

- 2) линза собирающая, $a > 2f$, рис.5б, изображение действительное, перевернутое, уменьшенное ($\Gamma < 1$, $A'B' < AB$, $b < a$), реализуется в фотоаппаратах;

Действительные изображения могут быть получены только при условии, что расстояние между объектом и экраном, на котором возникает изображение больше $4f$.

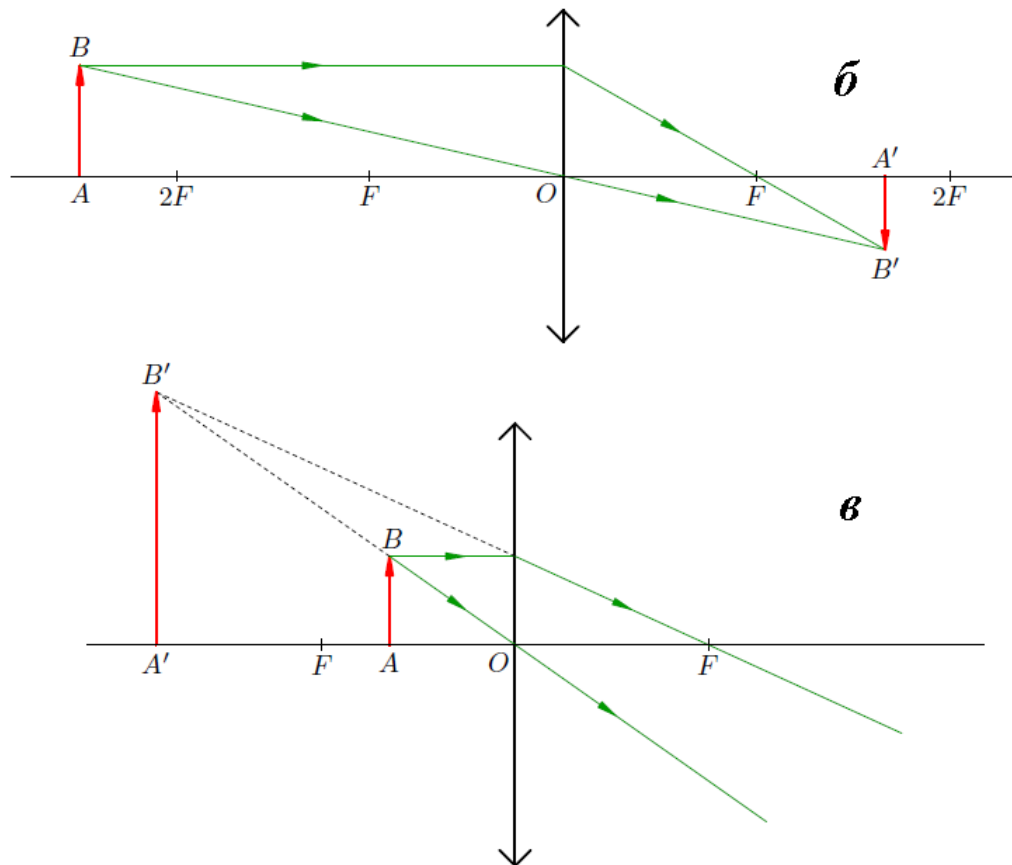


Рис. 5 Построение изображения в собирающей линзе

- 3) линза собирающая, $a < f$, рис.5в, изображение мнимое, прямое, увеличенное ($\Gamma > 1$, $A'B' > AB$, $|b| > a$, $b < 0$ согласно формуле линзы, это означает, что расстояние отсчитывается от линзы в сторону, противоположную ходу лучей), реализуется в лупах;
- 4) линза рассеивающая, изображение при любых a мнимое, прямое, уменьшенное ($\Gamma < 1$, $|b| < a$, $b < 0$ согласно формуле линзы, это означает, что расстояние отсчитывается от линзы в сторону, противоположную ходу лучей), реализуется в очках для близоруких.

Фокусное расстояние линзы зависит от ее формы и оптических свойств материала линзы:

$$D = \frac{1}{f} = (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

где n_2 – показатель преломления материала линзы, n_1 – показатель преломления окружающей линзу среды, R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы.

В работе изучаются *тонкие линзы*, то есть такие, у которых толщина мала по сравнению с радиусами кривизны преломляющих поверхностей.

Существует большое количество способов измерения фокусного расстояния линз, некоторые из которых используются в этой работе:

а) Определение фокусного расстояния собирающей линзы по расстояниям от объекта и его изображения до линзы.

На достаточно большом расстоянии от экрана размещают объект (в качестве которого выгодно использовать светящуюся нить лампы накаливания или яркий светодиод), ставят линзу между ними и передвигают ее до тех пор, пока не получают на экране отчетливого изображения предмета. Измерив с помощью линейки расстояния от объекта до линзы a и от экрана до линзы b , вычисляют фокусное расстояние по соотношению:

$$f = \frac{ab}{a+b}, \quad (4)$$

которое непосредственно следует из формулы линзы (1).

Если при этом измерять размеры объекта и его изображения, то фокусное расстояние можно получить из соотношения:

$$f = b \frac{\ell}{\ell + L} \quad (5)$$

где ℓ и L – размеры объекта и его изображения. Оно получается из (4) с учетом того, что $\frac{a}{\ell} = \frac{b}{L}$.

Разновидностью этого способа является определение фокусного расстояния с помощью удаленного (т.е. далеко расположенного) источника. Собирающую линзу следует расположить относительно удаленного источника света так, чтобы свет падал на линзу примерно параллельно ее главной оптической оси. Перемещая линзу, находят такое ее положение, при котором на каком-либо экране, например, на листе бумаги, будет видно четкое изображение лампы. Расстояние от линзы до экрана будет согласно формуле линзы ($a \gg b$) фокусным расстоянием линзы f .

б) Определение фокусного расстояния по величине перемещения собирающей линзы (способ Бесселя).

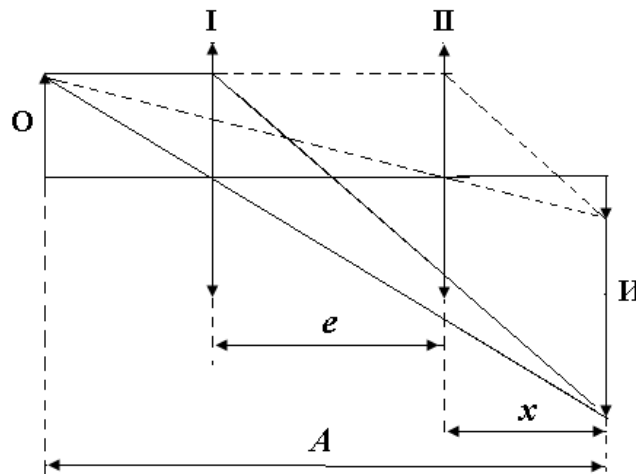


Рис. 6 Положение линзы в методе Бесселя

Если фиксированное расстояние A от предмета до изображения больше $4f$, то всегда найдутся два таких положения линзы с расстоянием e между ними, при которых на экране получается отчетливое изображение предмета: в одном случае увеличенное (рис. 6, положение I), в другом – уменьшенное (рис. 6, положение II).

Из принципа взаимности следует, что расстояния от объекта до линзы в положении I и от линзы в положении II до изображения на экране равны. Тогда $a = \frac{1}{2}(A - e)$ и $b = \frac{1}{2}(A + e)$, и из формулы линзы получается:

$$f = \frac{A^2 - e^2}{4A} \quad (6)$$

в) Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью собирающей.

Если объект A поместить вблизи главной оптической оси вспомогательной собирающей линзы B на расстоянии больше фокусного, то его изображение получится на экране в положении D (рис. 7, чтобы не загромождать рисунок, показаны только лучи, выходящие из точек на оптической оси). Рассеивающую линзу C , фокусное расстояние которой подлежит определению, следует поставить между линзой B и экраном. Рассеивающая линза преломляет лучи так, что после нее они сходятся под меньшими углами, и изображение смещается в новое положение E , в которое нужно передвинуть экран.

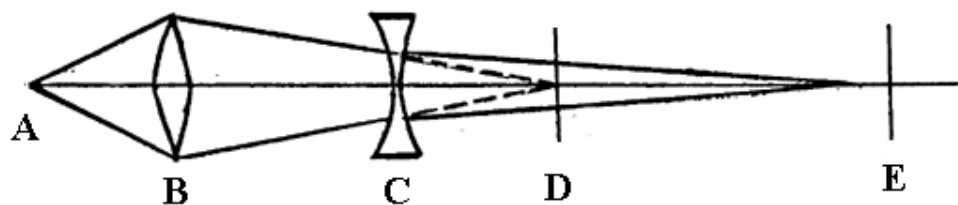


Рис. 7 Положения линз и экрана в опыте по определению фокусного расстояния рассеивающей линзы

В соответствии с принципом взаимности изображение в плоскости D можно рассматривать, как полученное с помощью линзы C мнимое изображение объекта, который находится в положении E . Применяя к ним формулу линзы, можно получить выражение для фокусного расстояния линзы C :

$$f = \frac{EC \cdot DC}{EC - DC} \quad (7)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

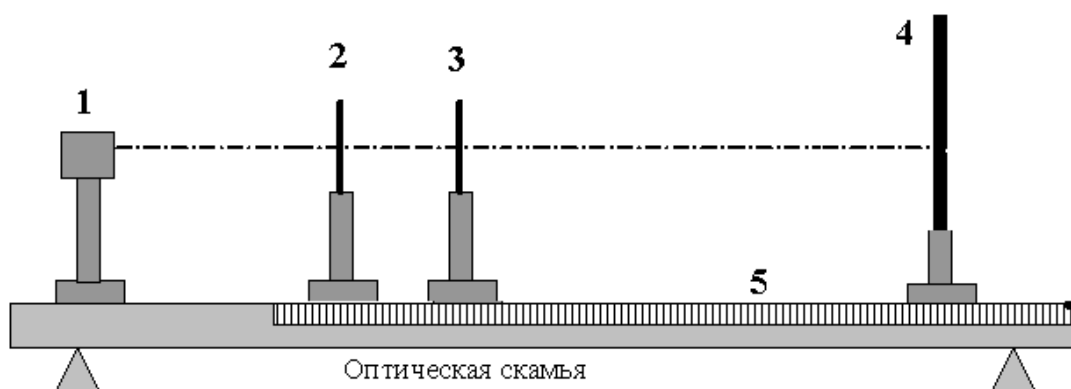


Рис. 8 Схема установки

Установка состоит из *оптической скамьи*, по которой могут перемещаться *рейтеры* (рис. 8). На рейтерах установлены и могут перемещаться вместе с ними светящийся объект 1, линзы 2 и 3, экран 4 для наблюдения изображений объекта. Установка снабжается линейкой 5 для измерения расстояний и размеров объектов и изображений. В качестве светящегося объекта используются 2 светодиода разных цветов для распознавания прямых и перевернутых изображений. Вся оптическая система центрируется, то есть все приборы устанавливаются так, чтобы центры их лежали на одной высоте, главные оптические оси линз были параллельны оптической скамье и совпадали друг с другом, а плоскость экрана была перпендикулярна скамье.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для оценки фокусного расстояния собирающей линзы удаленным источником света служит лампа накаливания настенного светильника. Собирающую линзу расположите так, чтобы ее главная оптическая ось была ориентирована на лампу. Перемещая линзу относительно экрана (листа бумаги), найдите такое ее положение, при котором на нем будет видно четкое изображение нити лампы накаливания. Расстояние от линзы до экрана измерьте с помощью линейки и занесите в столбец f таблицы 1. Измерения повторите 5 раз. Используйте первые 5 строк таблицы, в первых столбцах проставляя прочерки.
2. Для определения фокусного расстояния собирающей линзы по расстояниям от линзы до объекта и его изображения разместите на оптической скамье в соответствии с рис.8 источник света 1, собирающую линзу 2 и экран 4. Рейтер 3 со второй линзой в этой части работы не используется. Перемещая линзу и/или экран вдоль луча, добейтесь появления на экране четкого изображения источника света.

Таблица 1

Результаты измерения расстояний от линзы до объекта и его изображения.

№ измерения	a , мм	b , мм	Изображение	f , м

3. С помощью линейки измерьте расстояния от источника света до линзы а, от линзы до экрана b. Полученные значения занесите в таблицу 1. Обратите внимание на размер изображения и проставьте в таблице значок «+», если изображение увеличенное, и значок «-», если уменьшенное. Обратите внимание на расположение изображений светодиодов разного цвета. Если порядок их расположения (выше - ниже) тот же, что на источнике, то изображение прямое и в таблице проставляется значок «↑». Если порядок обратный, то изображение перевернутое и в таблице проставляется значок «↓».
4. Повторите 5 раз измерения по п.п.2 и 3 при разных положениях экрана и линзы.
5. Для определения фокусного расстояния собирающей линзы по размерам объекта и его изображения и по расстоянию от линзы до изображения разместите на оптической скамье источник света 1, собирающую линзу 2 и экран 4, как и в п.2. Добейтесь появления на экране четкого изображения источника света.
6. При помощи линейки измерьте расстояние между линзой и экраном b, размер объекта l (расстояние между центрами зеленого и красного светодиодов) и его изображения L. Полученные значения занесите в таблицу 2.
7. Повторите 5 раз измерения по п.п.5 и 6 при разных положениях экрана и линзы.

Таблица 2

**Результаты измерения размеров источника света и его изображения, а также
расстояния от линзы до изображения**

№ измерения	b , мм	l , мм	L , мм	f , м

8. Для определения фокусного расстояния собирающей линзы по методу Бесселя поместите источник света 1 и экран 4 на противоположных концах оптической скамьи. Установите между ними собирающую линзу 2 и, перемещая ее вдоль луча, добейтесь появления на экране увеличенного изображения источника света. При помощи линейки измерьте расстояния между линзой и экраном x_1 (см. рис.6) и между источником света и экраном А. Результаты занесите в таблицу 3.
9. Переместите линзу в сторону экрана и добейтесь появления на экране уменьшенного изображения источника света. При помощи линейки измерьте расстояние между линзой и экраном x_2 (см. рис.6). Результат занесите в таблицу 3.
10. Сместите экран в сторону источника на несколько сантиметров и повторите измерения по п.п.8 и 9 (всего 5 раз).
11. Постепенно смещая экран к источнику света, отыщите такое его положение, при котором не удастся получить четкого изображения источника света. Занесите соответствующее значение расстояния А в последнюю строку таблицы 3. В ячейках x_1 и x_2 поставьте прочерки.

Таблица 3

Результаты измерения расстояний от линзы до экрана и от экрана до линзы по методу Бесселя.

№ измерения	x_1 , м	x_2 , м	A , м	$e = x_1 - x_2$, м	f , м

12. Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью собирающей, разместите на оптической скамье источник света 1, вспомогательную собирающую линзу 2 и экран 4, как и в п.2. Расстояние от источника до экрана установите близким к минимальному (4 фокусных расстояния вспомогательной линзы). Добейтесь появления на экране увеличенного изображения источника света. При помощи линейки измерьте расстояние от источника до экрана (AD на рис.7) и занесите его в таблицу 4.

13. Отодвиньте экран на край оптической скамьи, противоположный источнику света, и затем поместите между экраном 4 и вспомогательной линзой 2 рассеивающую линзу 3. Перемещая рассеивающую линзу вдоль луча, добейтесь появления на экране изображения источника света. При помощи линейки измерьте расстояния от источника света до рассеивающей линзы (AC на рис.7) и от рассеивающей линзы до нового положения экрана (CE на рис.7). Полученные значения занесите в таблицу 4.

14. Повторите 5 раз измерения по п.13 при небольших смещениях экрана и рассеивающей линзы.

Таблица 4

Результаты измерения положений экрана и линзы при определении фокусного расстояния рассеивающей линзы

№ измерения	AD , мм	AC , мм	CE , мм	$CD = AD - AC$, мм	f , м

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. В качестве оценки фокусного расстояния собирающей линзы, вычислите среднее значение первых 5 строк столбца f таблицы 1.
2. По данным следующих 5 строк таблицы 1 с помощью формулы (4) вычислите значения фокусного расстояния собирающей линзы. Занесите их в столбец f . Вычислите среднее значение фокусного расстояния и его погрешность.
3. По данным таблицы 2 с помощью формулы (5) вычислите значения фокусного расстояния собирающей линзы. Занесите их в столбец f . Вычислите среднее значение фокусного расстояния и его погрешность.
4. По данным таблицы 3 вычислите расстояние e между 2 положениями линзы, при которых получается изображение на экране, а затем с помощью формулы (6) вычислите значения фокусного расстояния собирающей линзы. Занесите их в столбец f . Вычислите среднее значение фокусного расстояния и его погрешность.
5. Сравните полученные значения фокусных расстояний собирающей линзы, полученные разными способами. Результаты сравнения отразите в отчете в разделе «Выводы».
6. По данным таблицы 4 вычислите расстояние CD между рассеивающей линзой и первым положением экрана, а затем с помощью формулы (7) значения фокусного расстояния рассеивающей линзы. Занесите их в столбец f . Вычислите среднее значение фокусного расстояния и его погрешность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить, к какому типу относится линза?
2. Назовите основные характеристики тонкой линзы.
3. Постройте изображение в линзе по заданным преподавателям параметрам.
4. Каким образом свойства линзы зависят от оптических свойств окружающей ее среды?
5. Перечислите возможные области применения линз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бегунов Б.Н. Геометрическая оптика. М.: МГУ, 1966 (<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/optics.htm>)
2. В.И. Иверонова. Физический практикум. Электричество и оптика (2-е изд.), М., Наука, 1968 (<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/lectures.htm>).