



Внимание! Перед выполнением задачи укажите в работе номер, нанесенный на вашу линзу!

В задаче требуется оценка погрешностей.

Теоретическая справка

Расстояние между источником и тонкой линзой d и расстояние между изображением этого источника и линзой f связаны между собой формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1)$$

где F - фокусное расстояние линзы.

Фокусное расстояние линзы определяется радиусами кривизны ее поверхностей и показателем преломления материала. Для вашей двояковыпуклой линзы с одинаковыми радиусами кривизны поверхностей R фокусное расстояние определяется как:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \frac{2}{R}, \quad (2)$$

где n - показатель преломления.

Свет - электромагнитная волна, длина которой лежит в определенном диапазоне. Наиболее короткие волны имеют фиолетовый цвет, наиболее длинные – красный. Излучение светодиода состоит из множества волн, все длины которых мало отличаются друг от друга. Поэтому можно считать, что излучение светодиода практически монохроматично, то есть может быть описано одной длиной волны.

Показатель преломления материала линзы меняется в небольших пределах для света разных длин волн, то есть для светодиодов разного цвета показатель преломления будет различным.

Задание

1. Измерьте максимально точно радиус кривизны линзы геометрическим методом. Оцените погрешность измерений.

2. Соберите источник света таким образом, как указано на схеме.

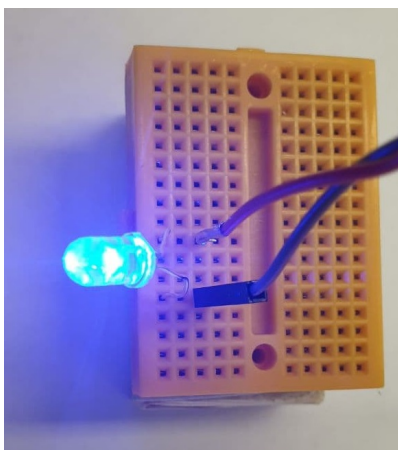
Используя синий светодиод как источник света, измерьте зависимость расстояния между источником света и серединой линзы от расстояния между изображением светодиода и серединой линзы. Определите с помощью исследованной зависимости фокусное расстояние линзы. Оцените случайную погрешность измерений.

3. На основе предыдущих измерений определите показатель преломления материала линзы. Определите погрешность измерений.

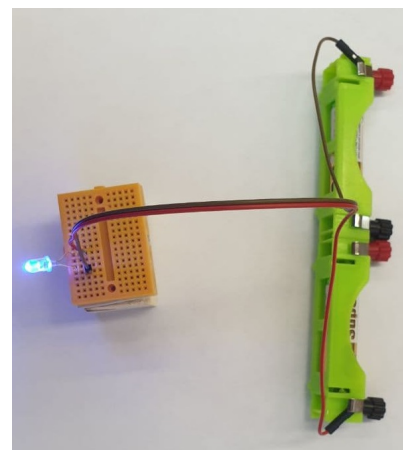


(a) Беспаячная плата.

Черной линией указаны соединенные между собой контакты.



(b) Способ подключения светодиода.



(c) Общий вид схемы источника.

4. Между линзой и синим светодиодом поставьте тонкий плоский объект из фольги так, чтобы его плоскость была параллельна плоскости линзы. Рекомендуется использовать объект следующей формы (см. рис. 2). Препятствие должно быть как можно более плоским и перпендикулярным главной оптической оси линзы. Найдите сфокусированное изображение объекта. Измерьте расстояния между объектом и линзой а также между линзой и изображением объекта для нескольких положений линзы. Для каждого случая рассчитайте фокусное расстояние линзы. Усредните результаты, оцените случайную погрешность измерений.



Рис. 2: Препятствие из фольги.

5. Повторите измерения пункта 4 для красного светодиода. Рассчитайте разность фокусных расстояний линзы для красного и синего светодиодов.

6. Рассчитайте разность показателей преломления линзы для красного и синего света от светодиодов. Оцените погрешность измерения. Укажите, для какого света показатель преломления больше.

Примечание. Используйте выданный лист картона, чтобы затенять изображение на экране от окружающей засветки для удобства измерений.

Оборудование. Светодиод красный, светодиод синий, два батарейных отсека, две батарейки, беспаячная плата, соединительные провода, деревянная подставка под плату, брусок-экран, измерительный метр, линза, канцелярский пластилин, две канцелярские клипсы, фольга, бумага, ножницы, лист картона.

Решение

Положим линзу на стол и нажмем пальцем на ее край. Линза повернется так, чтобы плоскость стола стала касательной к поверхности линзы у ее края (см. рис. 3). Измерим высоту поднятия противоположного края линзы над поверхностью стола $h = (8.5 \pm 0.5)$ мм, а также диаметр линзы ($D = 60.0 \pm 0.5$) мм. Запишем связь между величиной радиуса кривизны поверхности линзы R , углом α , характеризующим угловой размер поверхности, и измеренными величинами:

$$\begin{aligned} D &= 2 \sin \frac{\alpha}{2} R \approx \alpha R \\ h &= R(1 - \cos \alpha) \approx R \frac{\alpha^2}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда, исключая угловой размер поверхности линзы, получим для радиуса ее кривизны

$$R = \frac{D^2}{2h} = (212 \pm 16) \text{ мм}. \quad (4)$$

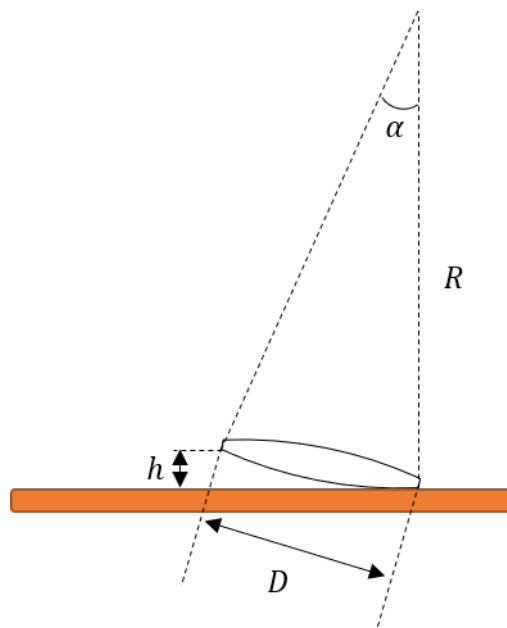


Рис. 3: Измерение радиуса кривизны поверхности линзы.

Соберем установку, в которой источником света будет являться светодиод, излучение которого будет фокусироваться линзой на экране (см. рис. 4). С помощью подставки и пластины отцентрируем систему для получения наилучших результатов. Будем считать наиболее резким изображением четкое изображение кристалла светодиода.

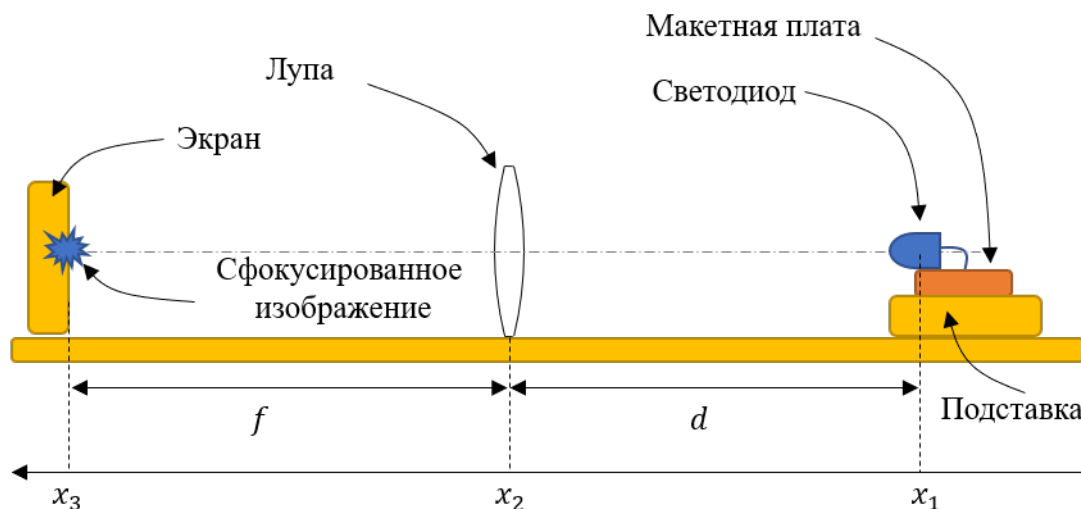


Рис. 4: Определение фокусного расстояния линзы.

Измерим зависимость расстояния между изображением и линзой от расстояния между источником и линзой. Рассчитаем в каждом случае фокусное расстояние линзы.

x_1 , см	x_2 , см	x_3 , см	d , см	f , см	F , см
8.5	40.0	96.5	31.5	56.5	20.22
8.5	45.0	90.0	36.5	45.0	20.15
8.5	50.0	89.5	41.5	39.5	20.24
8.5	55.0	90.5	46.5	35.5	20.13
8.5	60.0	94.0	51.5	34.0	20.48
8.5	65.0	98.5	56.5	33.5	21.03
8.5	70.0	100.5	61.5	30.5	20.39
8.5	75.0	105.0	66.5	30.0	20.67
8.5	80.0	108.5	71.5	28.5	20.38

Усредним значение:

$$F = 204 \text{ мм.}$$

Случайную погрешность оценим как среднее квадратичное отклонение $\Delta F_{\text{сл}} = 1$ мм. Кроме всего прочего положение источника может быть определено с точностью не выше 2 мм. Положение линзы также определяется с некоторой погрешностью. Полную приборную погрешность оценим приблизительно в $\Delta F_{\text{пр}} = 2$ мм. Суммарная погрешность определения фокусного расстояния в данном эксперименте не ниже 3 мм. Итого для фокусного расстояния имеем:

$$F = 204 \pm 3 \text{ мм.}$$

По полученным данным рассчитаем показатель преломления линзы:

$$n = 1 + \frac{R}{2F} = 1.52 \pm 0.04. \quad (5)$$

Поскольку показатель преломления линзы зависит от длины волны света, то для светодиодов разного цвета фокусное расстояние линзы будет различно. Несмотря на высокую точность измерения фокусного расстояния, для оценки разницы фокусных расстояний подобная установка не подходит. Причина состоит в том, что светодиод нельзя считать точечным источником при таких характерных расстояниях. Однако, если перед светодиодом расположить тонкий объект, то каждую точку его границы можно считать точечным источником вторичного излучения. Положение такого объекта можно определить с более высокой точностью, чем положение светящегося источника в светодиоде. Также, в случае использования препятствия из фольги, положение вторичного источника (края фольги) становится независимым от положения светодиода, и не изменяется при смене светодиода. Измерим таким образом фокусные расстояния для синего и красного светодиодов. Рассчитаем в каждом эксперименте разницу этих расстояний.

x_1 , см	x_2 , см	$x_{зкрасн}$, см	$x_{зсин}$, см	$F_{красн}$, см	$F_{син}$, см	ΔF , см
14.0	43.2	116.0	110.0	20.84	20.32	0.52
14.0	48.0	101.8	97.8	20.83	20.20	0.63
14.0	49.5	100.0	97.3	20.85	20.36	0.48
14.0	52.0	98.5	96.5	20.91	20.50	0.41
14.0	54.0	97.8	96.0	20.90	20.49	0.41
14.0	56.0	97.3	95.5	20.82	20.36	0.47
14.0	58.0	97.5	96.3	20.81	20.48	0.34

Усредним значение фокусного расстояния для синего светодиода:

$$F' = 204 \text{ мм.}$$

Видно, что полученное значение с высокой степенью точности совпадает с измеренным ранее. Оценим случайную погрешность измерений фокусного расстояния в этом случае.

$$\Delta F'_{сл} = 0.4 \text{ мм.}$$

Видно, что в данном методе измерений, разброс результатов для фокусного расстояния существенно меньше, чем в методе, подразумевающим поиск изображения самого светодиода.

Рассчитаем для каждого положения линзы разность фокусных расстояний и усредним

результаты измерений.

$$\Delta F = 4.7 \pm 0.3 \text{ мм.}$$

Свяжем разность показателей преломления и разность фокусных расстояний

$$\Delta n = (n - 1) \frac{\Delta F}{F} = 0.012 \pm 0.001. \quad (6)$$