

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЗ

Цель работы: научиться определять фокусные расстояния положительных и отрицательных линз.

Основные вопросы:

- 1) Преломление и отражение на сферической поверхности.
- 2) Вывод формулы для преломления светового луча сферической поверхности.
- 3) Линзы. Линзы собирающие. Линзы рассеивающие.
- 4) Тонкая линза. Вывод формулы тонкой линзы.
- 5) Фокус. Фокусное расстояние. Фокальная плоскость.
- 6) Построение изображения в собирающей линзе; в рассеивающей линзе.

Рассмотрим преломление луча на сферической границе раздела двух сред с разными показателями преломления (рис.1).

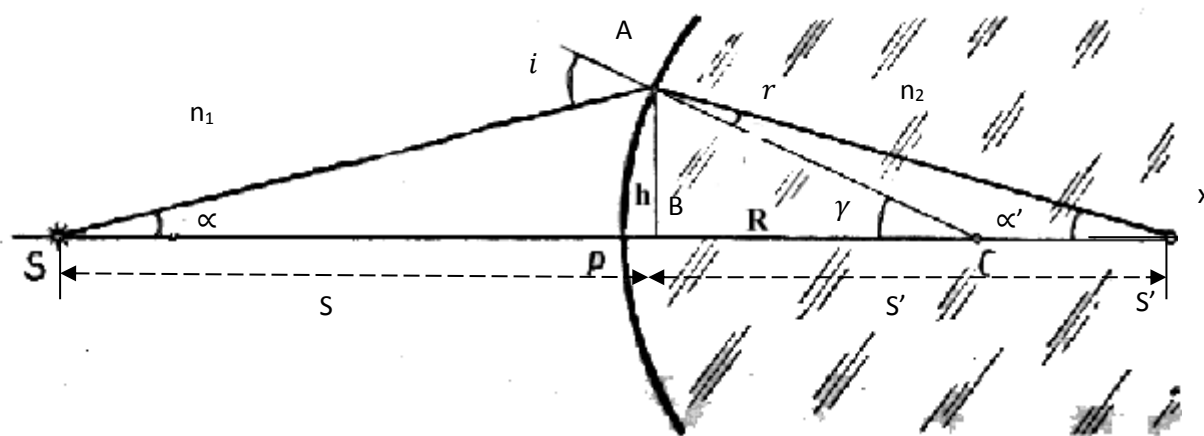


Рис.1

где R - радиус сферической поверхности, C - центр сферической поверхности, ось x проходит через источник и центр кривизны, S - источник излучения, S' - изображение источника излучения, n_1 и n_2 - показатели преломления первой и второй среды соответственно.

Радиус R сферической поверхности велик, т.е. кривизна границы невелика, поэтому можно считать, что точка B практически совпадает с точкой P . Началом отчета будет считать точку B . Таким образом расстояние S' (от B до изображения имеет знак «+»), а S (от источника до B) будет иметь знак «-». Луч от источника S падает на границу раздела сред в точке A под углом i , а преломляется во вторую среду под углом r . Радиус сферической

поверхности перпендикулярен к границе раздела и образует угол γ с осью x . преломленный луч образует угол α' с осью x .

Запишем закон преломления для луча SA :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Для лучей коаксиальных углы падения и преломления малы, поэтому:

$$\alpha \approx \sin \alpha \approx \tan \alpha$$

$$\alpha' \approx \sin \alpha' \approx \tan \alpha'$$

и т.д.

Углы $i = \alpha + \gamma$; $\gamma = r + \alpha'$ или $r = \gamma - \alpha'$ (как внешние углы треугольников по отношению, к внутренним, не смежным с ними).

Т.к. $\alpha = \frac{h}{S}$; $\alpha' = \frac{h}{S'}$ и $\gamma = \frac{h}{r}$, закон преломления можно написать в виде:

$$n_1 \left(\frac{h}{S} + \frac{h}{R} \right) = n_2 \left(\frac{h}{R} - \frac{h}{S'} \right) \quad \text{или}$$

$$\frac{n_1}{S} + \frac{n_1}{R} = \frac{n_2}{R} - \frac{n_2}{S'}, \quad \text{откуда}$$

$$\frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{S'} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (1)$$

Поскольку $\frac{n_2}{n_1} = n_{21} = n_{\text{отн}}$ (относительный показатель преломления) и учитывая, что S имеет знак «-», получим

$$-\frac{1}{S} + \frac{n_{\text{отн}}}{S'} = (n_{\text{отн}} - 1) \frac{1}{R}, \quad \text{отсюда}$$

$$\frac{1}{S} - \frac{n_{\text{отн}}}{S'} = (1 - n_{\text{отн}}) \frac{1}{R} \quad (2)$$

Формула тонкой линзы

Линзами называются тела с определенным показателем преломления, ограниченные двумя сферическими или цилиндрическими поверхностями. Линия, проходящая через центры кривизны обеих поверхностей называется главной оптической осью. Линза, у которой расстояние между ограничивающими поверхностями мало по сравнению с диаметром линзы, называется тонкой линзой.

На рис.2 изображена тонкая линза.

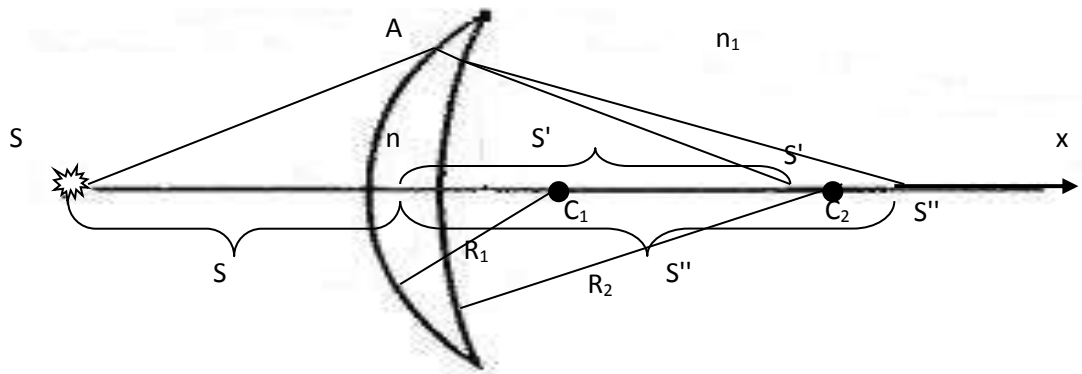


Рис.2

Материал линзы имеет показатель преломления n , n_1 - показатель преломления среды слева и справа от линзы.

$$n_{21} = n_{\text{отн}} = \frac{n}{n_1}$$

Пусть луч, упавший на кривую поверхность линзы, продолжает путь в среде линзы. Тогда S'' - изображение источника S в среде линзы. В этом случае можно записать формулу (2):

$$\frac{1}{S} - \frac{n_{\text{отн}}}{S''} = (1 - n_{\text{отн}}) \frac{1}{R_1} \quad (3)$$

При обратном ходе луча из «источника» S'' он попадет в точку S' . Тогда

$$\frac{1}{S'} - \frac{n_{\text{отн}}}{S''} = (1 - n_{21}) \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

Вычитая (4) из (3) и умножая на -1 , получаем формулу тонкой линзы:

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = (n_{\text{отн}} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

Величина $(n_{\text{отн}} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$ называется оптической силой линзы (Д).

Обратная величина – главным фокусным расстоянием F . Формула (5) может быть представлена в виде:

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{F} \quad (6)$$

Из формулы (6) следует: если источник света находится в бесконечности ($S = \infty$), т.е. на линзу падает параллельный главной оптической оси пучок лучей, то после прохождения линзы лучи сойдутся в фокусе ($F = S''$). Косые параллельные лучи будут сходиться в побочных фокусах. Все фокусы образуют фокальную плоскость. Фокусное расстояние измеряется в метрах, оптическая сила – в диоптриях $[D] = \frac{1}{\text{м}}$.

Если $\frac{1}{R_1} > \frac{1}{R_2}$, то главное фокусное расстояние положительно, линза собирающая (рис.3а). Если $\frac{1}{R_1} < \frac{1}{R_2}$, оптическая сила отрицательная, линза рассеивающая (рис.3б).

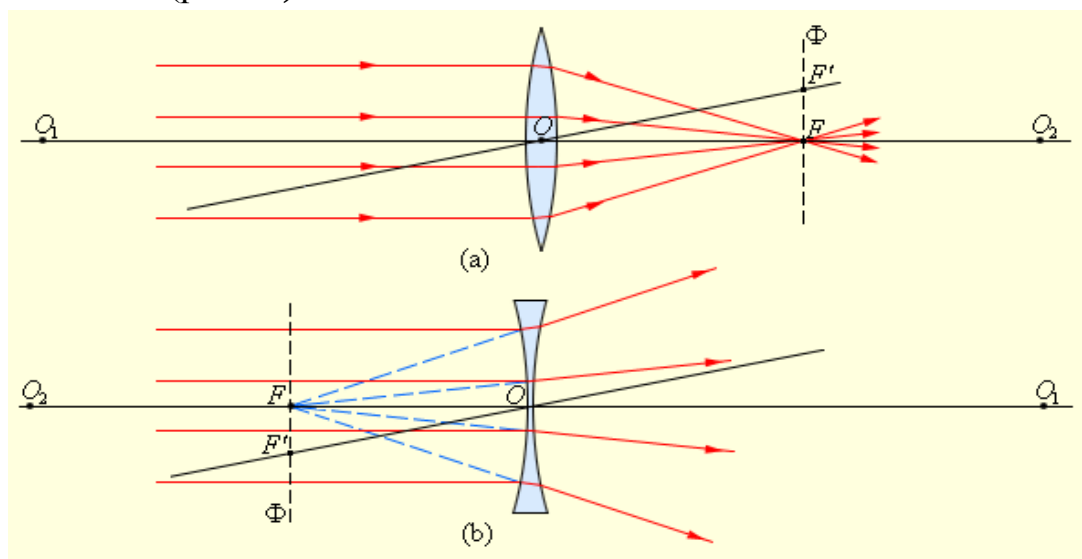


Рис.3

Построение изображения в собирающей линзе (положительной линзе)

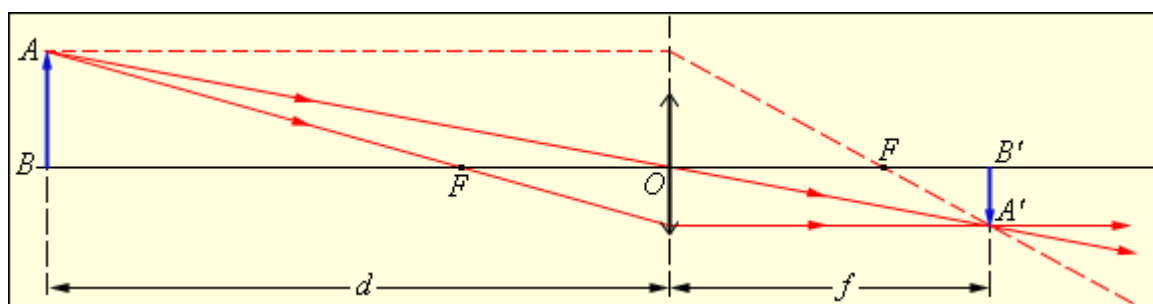


Рис.4

Построение изображения в рассеивающей линзе (отрицательной линзе)

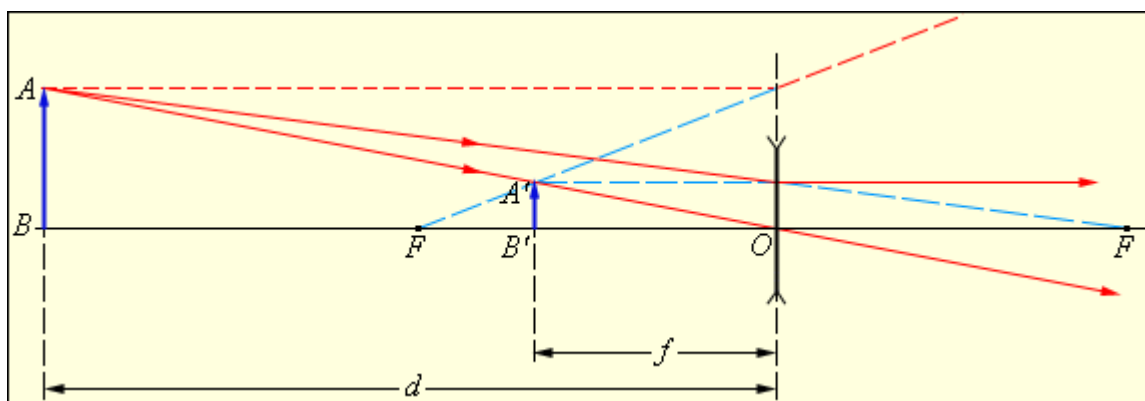


Рис.5

Практическая часть

Оборудование: оптическая скамья, набор рейтеров, лазер, линзы, делительная призма.

Задание 1. Определение фокусного расстояния положительной линзы.

1. Собрать на оптической скамье установку согласно рис.6.

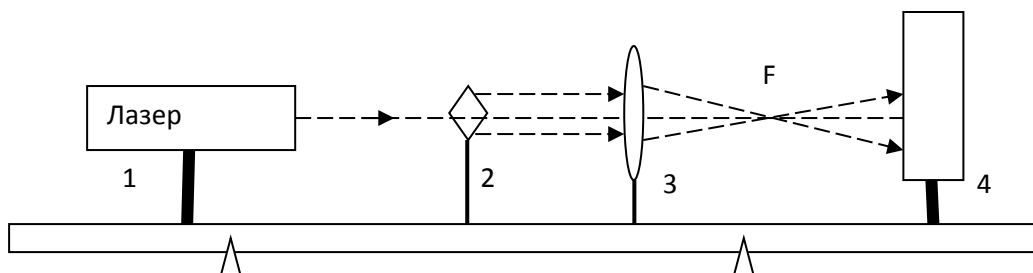


Рис.6

где 1 - лазер, 2 - делительная призма, 3 – линза, 4 – экран.

Делительная призма разделяет лазерный луч на два луча.

2. Перемещая призму по высоте добиться приблизительно одинаковой интенсивности обоих лучей.
3. Перемещая экран, получить четкое изображение светящейся точки.
4. Измерить расстояние от линзы до точки F (фокусное расстояние).
5. Опыт повторить 3-5 раз. Взять среднее значение.

Задание 2. Определение фокусного расстояния по формуле линзы.

1. Собрать на оптической скамье установку по схеме рис.7

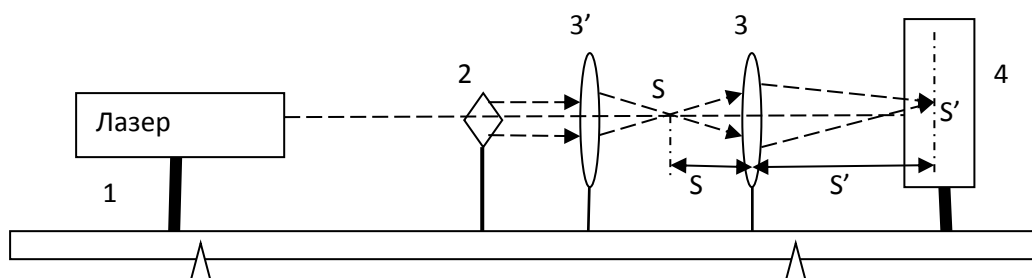


Рис.7

2. Лазер, 2 – делительная призма, 3' – вспомогательная линза (предметная) создает «источник» предмета. 3 – линза, фокусное расстояние которой нужно найти, 4 – экран.
3. Включить лазер.
4. Убрать линзу 3. Перемещая экран получить на нем четкое изображение источника S. Отметить его положение по отсчетной линейке.
5. Отодвинуть экран на конец оптической скамьи. Между S и экраном поместить линзу 3, фокусное расстояние которой нужно измерить. Перемещая линзу, получить на экране четкое изображение источника.
6. По шкале измерить расстояния S и S'.
7. По формуле $\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{F}$ рассчитать фокусное расстояние.

Задание 3. Определение фокусного расстояния отрицательной линзы.

1. На оптической скамье соберите установку по схеме рис.8:

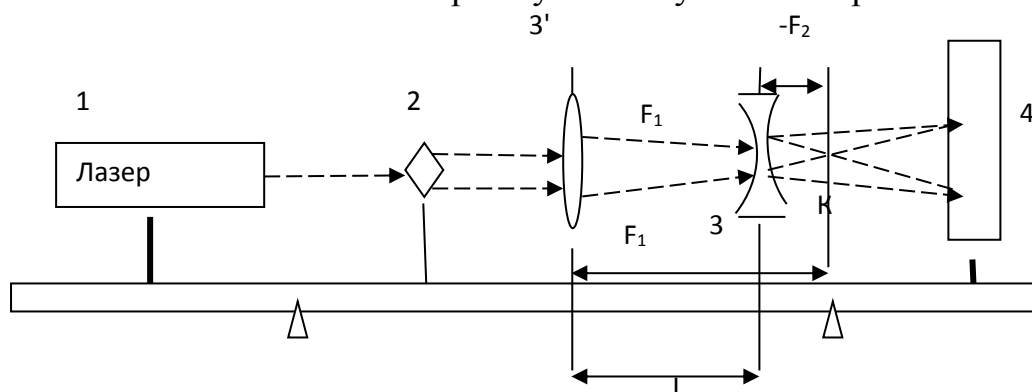


Рис.8

2. Включить лазер. Убрать линзу 3.

3. Перемещая экран, получить четкое изображение точки «К» на экране. Измерить F_1 .
4. Отодвинуть экран к краю скамьи. Поставить отрицательную линзу между точкой «К» и вспомогательной линзой $3'$.
5. Перемещая линзу 3, получить параллельные лучи. Измерить расстояние между линзами $3'$ и 3 (L). Найти $F_2 = F_1 - L$.
6. Опыт повторить 3-5 раз. Взять среднее значение F_2 .

ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ

Цель работы: исследование хроматической aberrации положения.

Основные вопросы:

- 1) Линзы: собирающая, рассеивающая. Фокус линзы.
- 2) Получение изображений в линзах.
- 3) Аберрации линз.
- 4) Сферическая aberrация.
- 5) Астигматизм.
- 6) Дисторсия.
- 7) Хроматическая aberrация.

Пучок лучей, исходящий из светящейся точки после преломления в линзе должен сходиться в определенной точке изображения. Такое изображение называется стигматическим. Стигматическое изображение получается только для узких пучков лучей, идущих вблизи главной оптической оси (параксиальных лучей). Для увеличения светосилы линзы надо увеличивать входной зрачок и использовать лучи, падающие под большими углами к поверхности, но тогда изображение перестает быть стигматическим. В реальных линзах наблюдаются различные искажения изображения – дефекты линз.

К основным дефектам относятся:

1. *Сферическая aberrация.*

На рис.1 изображен ход лучей, преломляющихся в собирающей линзе большой светосилы.

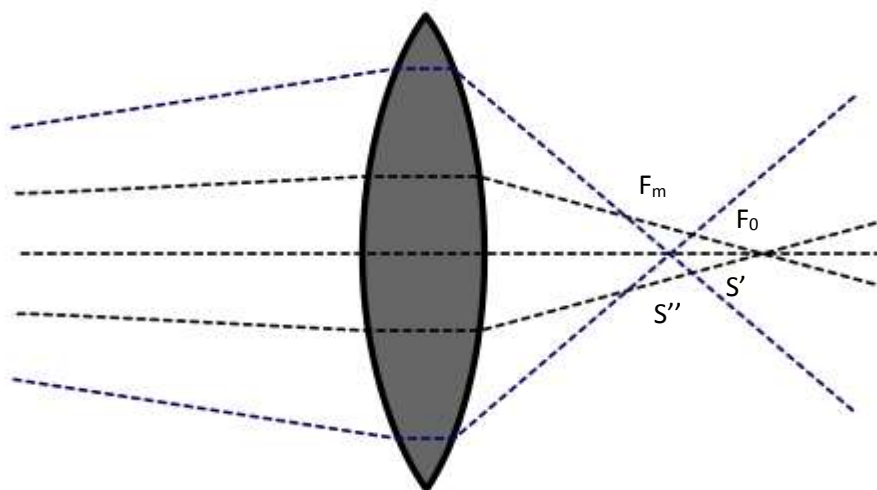


Рис.1. Сферическая aberrация

Параксиальные лучи пересекаются в точке $S' (F_0)$; $\sin \alpha \approx \alpha$, где α - угол падения; $\sin \beta \approx \beta$, где β – угол преломления; $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx \frac{\alpha}{\beta}$. Для лучей, отдаленных от главной оптической оси, углы падения увеличиваются, $\sin \alpha$ уже не равен α , $\sin \beta$ не равен β , но закон преломления должен выполняться, отношение синусов должно оставаться постоянным. Функция $\sin$ возрастает медленнее, чем угол, поэтому такие лучи преломляются сильнее. Самые крайние лучи после преломления пересекутся в точке S'' , а не в точке S' . Таким образом, получается после преломления в линзе не точечное изображение точечного источника, а целый отрезок $S'S''$. Этот отрезок $\delta = F_m - F_0$ является мерой сферической аберрации. Для собирающей линзы $\delta < 0$, а для рассеивающей $\delta > 0$. Понятие фокуса и фокальной плоскости линзы становится несколько неопределенным. На экране, перпендикулярном главной оптической оси, изображение будет не точечным, а будет иметь вид неравномерно освещенного кружка, диаметр которого будет минимальным не в точке S' , а несколько ближе к линзе.

Для уменьшения сферической аберрации можно:

- а) ограничить пучок лучами, близкими к параксиальным (диафрагмирование);
- б) комбинировать рассеивающую и собирающую линзы.

2. Астигматизм.

На рис.2 показано, что лучи, исходящие от источника О по радиусам имеют волновые поверхности, перпендикулярные к лучам, т.е. строго сферические. После преломления в линзе сферические поверхности искажаются и становятся поверхностями с двоякой кривизной. В результате такая поверхность будет иметь разные плоскости схождения для взаимноперпендикулярных направлений, т.е. линий горизонтальные будут резкими в одной фокальной плоскости, а вертикальные в другой.

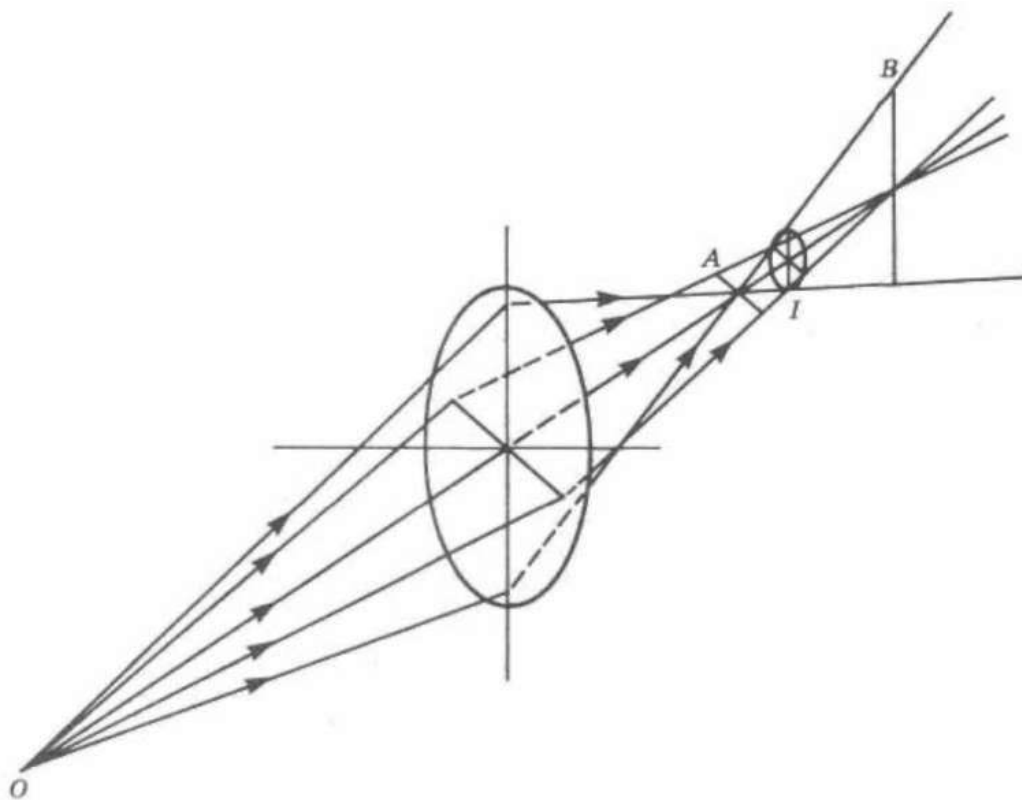


Рис.2. Астигматизм

Для устранения астигматизма соединяют несколько линз разной кривизны. У цилиндрических линз всегда нарушена осевая симметрия, т.е. это линза с ярко выраженным астигматизмом. Поэтому для резко выраженного природного астигматизма глаз применяются очки с компенсационными цилиндрическими линзами.

3. Дисторсия, кома.

Различное увеличение в центре и на периферии линзы приводит к искажению формы изображения. Этот дефект называется дисторсией.

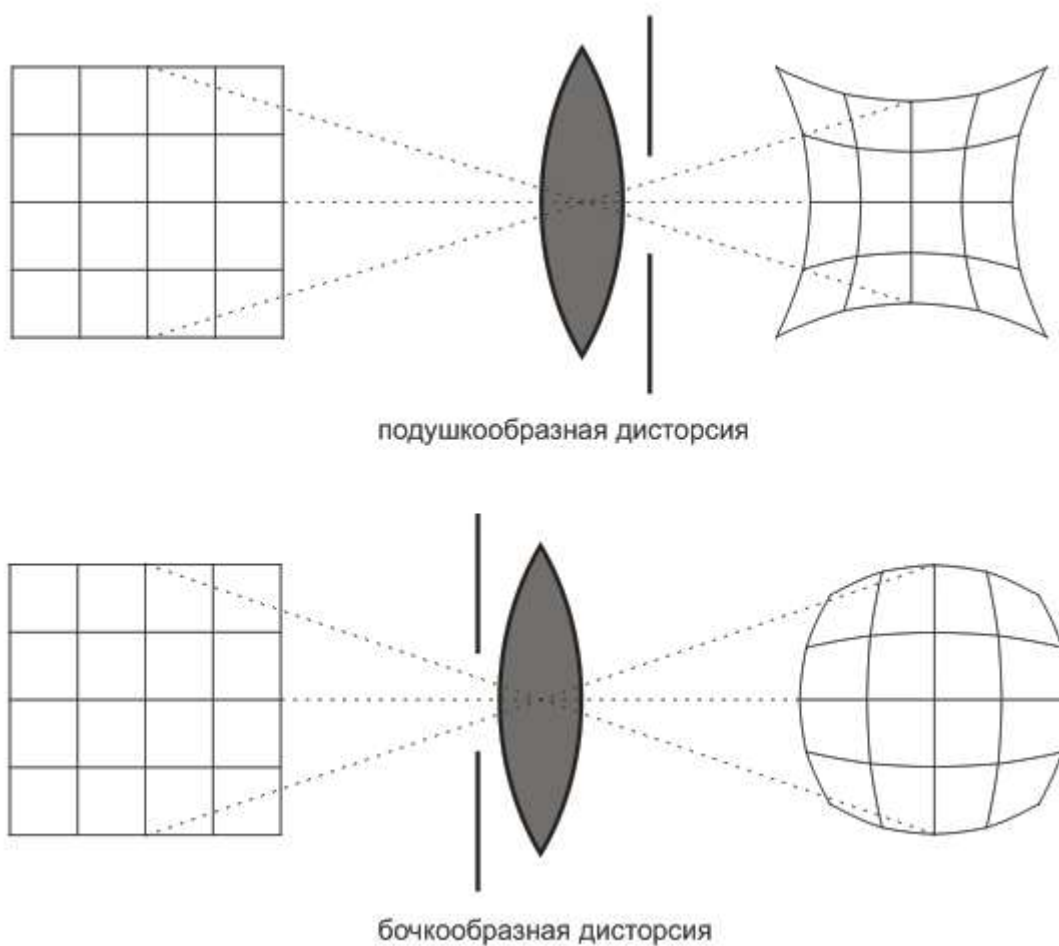


Рис.3. Дисторсия

Светящаяся точка, не расположенная на оптической оси, посылающая широкий пучок лучей, дает изображение в виде светящегося пятна с хвостиком, похожее на запятую это искажение называют комой. Рис.4.

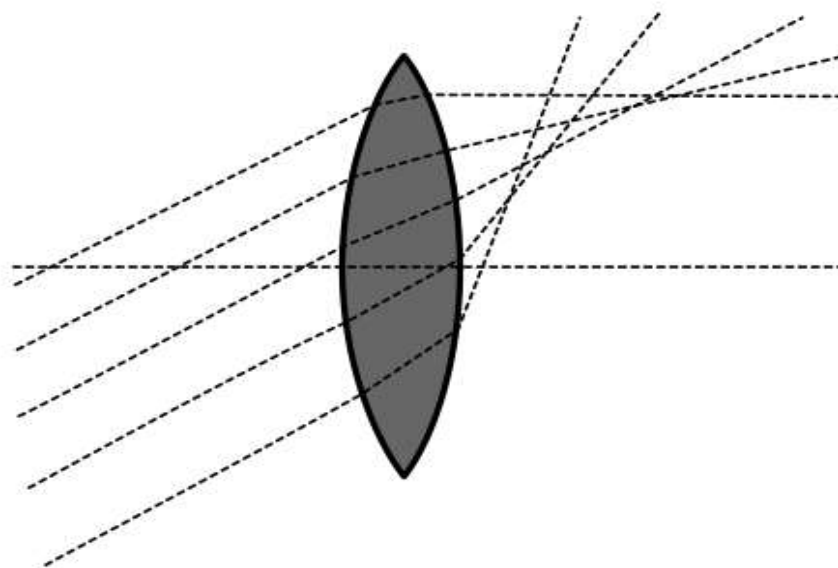


Рис.4. Кома

4. Хроматические aberrации.

Хроматические aberrации (хроматизм) – это проявление зависимости характеристик оптической системы от длины волны света. Хроматизм приводит к тому, что в изображениях неокрашенных предметов появляется окрашенность. Причина хроматических aberrаций заключается в том, что оптические системы изготавливаются из стекол с показателями преломления, зависящими от длины волны.

Существуют два основных вида хроматизма:

А. *Хроматизм положения.* При падении белого света на линзу отдельные монохроматические составляющие будут фокусироваться в разных точках, т.к. фокусные расстояния зависят от показателя преломления ($n_{отн}$), который, в свою очередь, зависит от длины волны. При нормальной дисперсии в стеклах слабее всего преломляются и имеют наибольшее фокусное расстояние (F_K) красные лучи, а ближе всего к оптической системе расположен фокус фиолетовых лучей (F_Φ). между ними расположены фокусы всех остальных монохроматических лучей видимого диапазона света (рис.5а).

Хроматизм положения – это aberrация, при которой изображения одной точки предмета расположены на разных расстояниях от оптической системы в зависимости от длины волны (рис.5б). На экране, перпендикулярном главной оптической оси системы, появляются изображения светящейся точки в виде радужного кружка, порядок расположения цветов в котором зависит от расположения экрана.

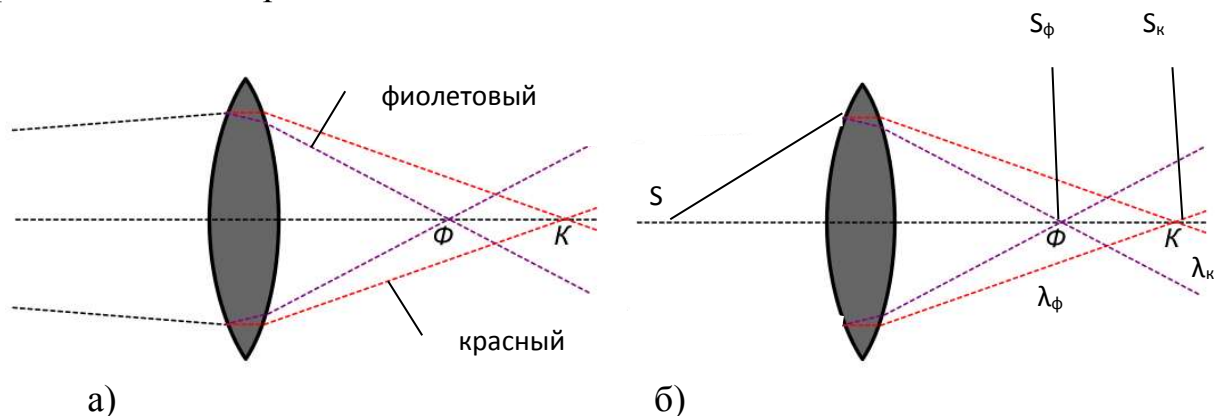


Рис.5. Хроматизм

Численно хроматизм положения определяется разностью плоскости изображения крайних длин волн (красная - λ_2 – фиолетовая - λ_1):

$$S'_{\lambda_\Phi - \lambda_K} = S'_{\lambda_\Phi} - S'_{\lambda_K}$$

Комбинируя собирающие и рассеивающие линзы, изготовленные из стекол с разной дисперсией, можно совместить фокусы двух (ахроматы) и трех (апохроматы) разных цветов и таким образом почти ликвидировать хроматическую aberrацию.

В. *Хроматизм увеличения* –

это aberrация, при которой увеличение оптической системы зависит от длины волны (рис.6).

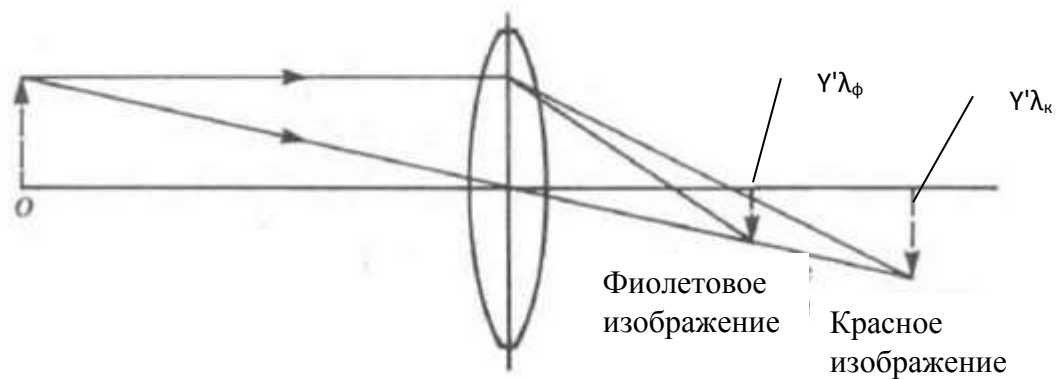


Рис.6. Хроматизм увеличения

Численно хроматизм увеличения определяется как:

$$y'_{\lambda_{\phi}} - y'_{\lambda_{\kappa}} = \Delta y'$$

Если линза тонкая, то хроматизм положения присутствует, а хроматизма увеличения нет.

Практическая часть

Оборудование: оптическая скамья, линзы разных типов.

В данной работе исследуется хроматизм как классических стеклянных линз, так и искусственных синтезированных голограммных линз. На рис. 7а для плосковыпуклой классической линзы показан хроматизм положения и на рис.7б для синтезированной голограммной линзы.

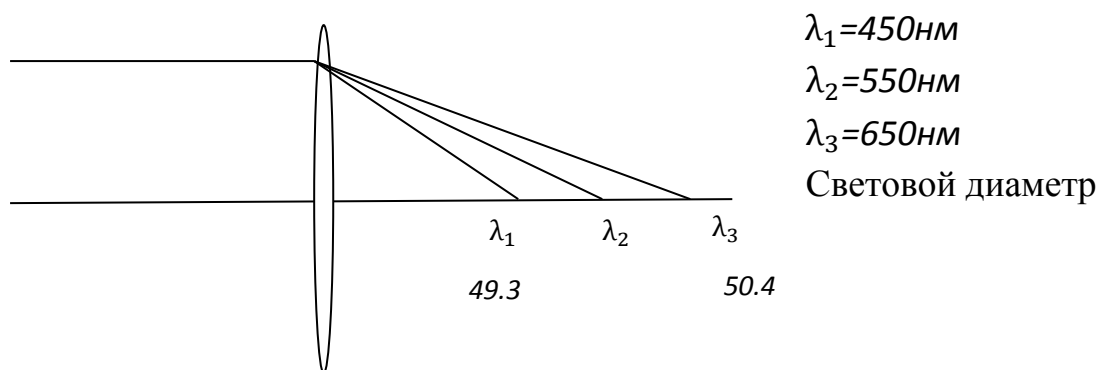


Рис.7а. Обычная стеклянная линза

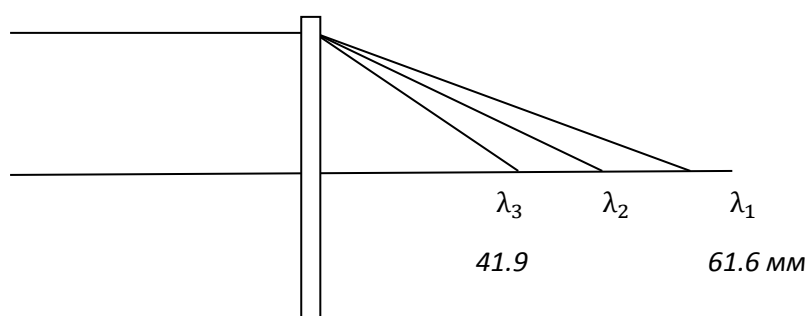


Рис. 7б. Голограммная линза

Синтезированная голограммная линза не только поменяла местами точки фокусировки света с длинами волн λ_3 и λ_1 , но и значительно увеличила их удаление от λ_2 (550 нм).

Засечь положение фокусов для излучений разной длины волны для стеклянной и голограммной линз.

Сделать вывод.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ

Цель работы: исследование хроматической аберрации положения.

Основные вопросы:

- 8) Линзы: собирающая, рассеивающая. Фокус линзы.
- 9) Получение изображений в линзах.
- 10) Аберрации линз.
- 11) Сферическая аберрация.
- 12) Астигматизм.
- 13) Дисторсия.

14) Хроматическая aberrация.

Пучок лучей, исходящий из светящейся точки после преломления в линзе должен сходиться в определенной точке изображения. Такое изображение называется стигматическим. Стигматическое изображение получается только для узких пучков лучей, идущих вблизи главной оптической оси (параксиальных лучей). Для увеличения светосилы линзы надо увеличивать входной зрачок и использовать лучи, падающие под большими углами к поверхности, но тогда изображение перестает быть стигматическим. В реальных линзах наблюдаются различные искажения изображения – дефекты линз.

К основным дефектам относятся:

5. Сферическая aberrация.

На рис.1 изображен ход лучей, преломляющихся в собирающей линзе большой светосилы.

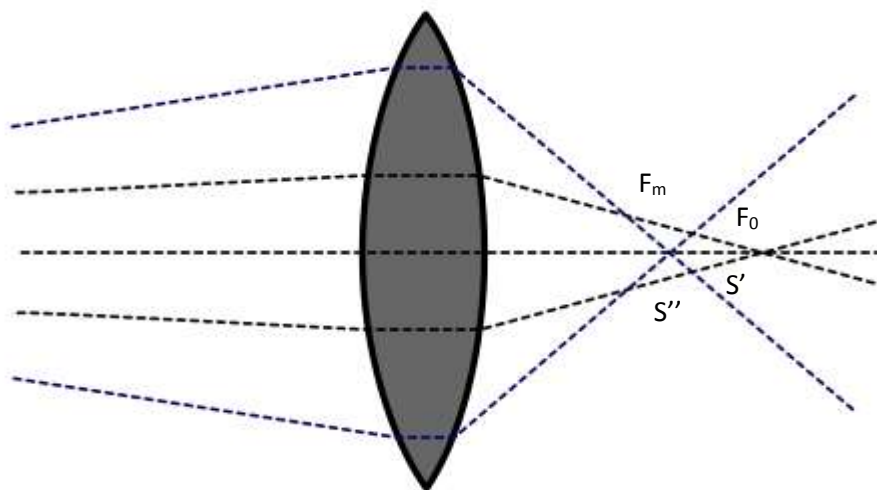


Рис.1. Сферическая aberrация

Параксиальные лучи пересекаются в точке S' (F_0); $\sin \alpha \approx \alpha$, где α - угол падения; $\sin \beta \approx \beta$, где β – угол преломления; $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx \frac{\alpha}{\beta}$. Для лучей, отдаленных от главной оптической оси, углы падения увеличиваются, $\sin \alpha$ уже не равен α , $\sin \beta$ не равен β , но закон преломления должен выполняться, отношение синусов должно оставаться постоянным. Функция $\sin$ возрастает медленнее, чем угол, поэтому такие лучи преломляются сильнее. Самые крайние лучи после преломления пересекутся в точке S'' , а не в точке S' . Таким образом, получается после преломления в линзе не точечное изображение точечного источника, а целый отрезок $S'S''$. Этот отрезок $\delta = F_m - F_0$ является мерой сферической aberrации. Для собирающей линзы $\delta < 0$, а для рассеивающей

$\delta > 0$. Понятие фокуса и фокальной плоскости линзы становится несколько неопределенным. На экране, перпендикулярном главной оптической оси, изображение будет не точечным, а будет иметь вид неравномерно освещенного кружка, диаметр которого будет минимальным не в точке S' , а несколько ближе к линзе.

Для уменьшения сферической аберрации можно:

- а) ограничить пучок лучами, близкими к параксиальным (диафрагмирование);
- б) комбинировать рассеивающую и собирающую линзы.

6. Астигматизм.

На рис.2 показано, что лучи, исходящие от источника O по радиусам имеют волновые поверхности, перпендикулярные к лучам, т.е. строго сферические. После преломления в линзе сферические поверхности искажаются и становятся поверхностями с двойкой кривизной. В результате такая поверхность будет иметь разные плоскости схождения для взаимноперпендикулярных направлений, т.е. линий горизонтальные будут резкими в одной фокальной плоскости, а вертикальные в другой.

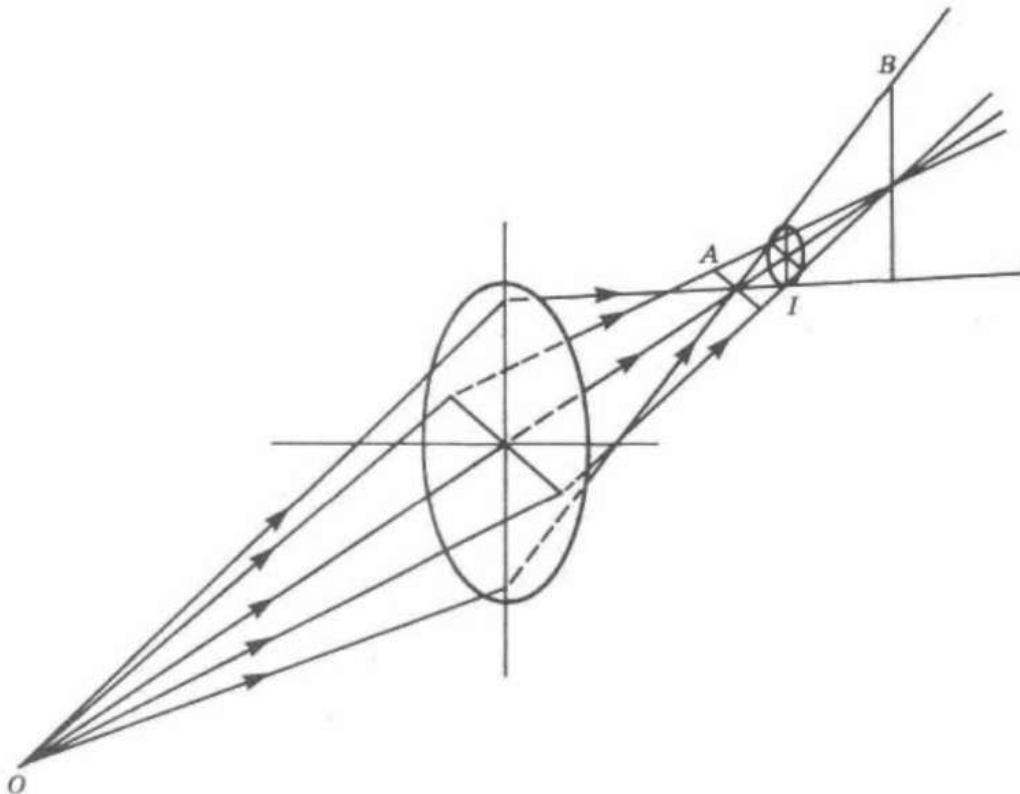


Рис.2. Астигматизм

Для устранения астигматизма соединяют несколько линз разной кривизны. У цилиндрических линз всегда нарушена осевая симметрия, т.е. это линза с ярко выраженным астигматизмом. Поэтому для резко выраженного

природного астигматизма глаз применяются очки с компенсационными цилиндрическими линзами.

7. Дисторсия, кома.

Различное увеличение в центре и на периферии линзы приводит к искажению формы изображения. Этот дефект называется дисторсией.

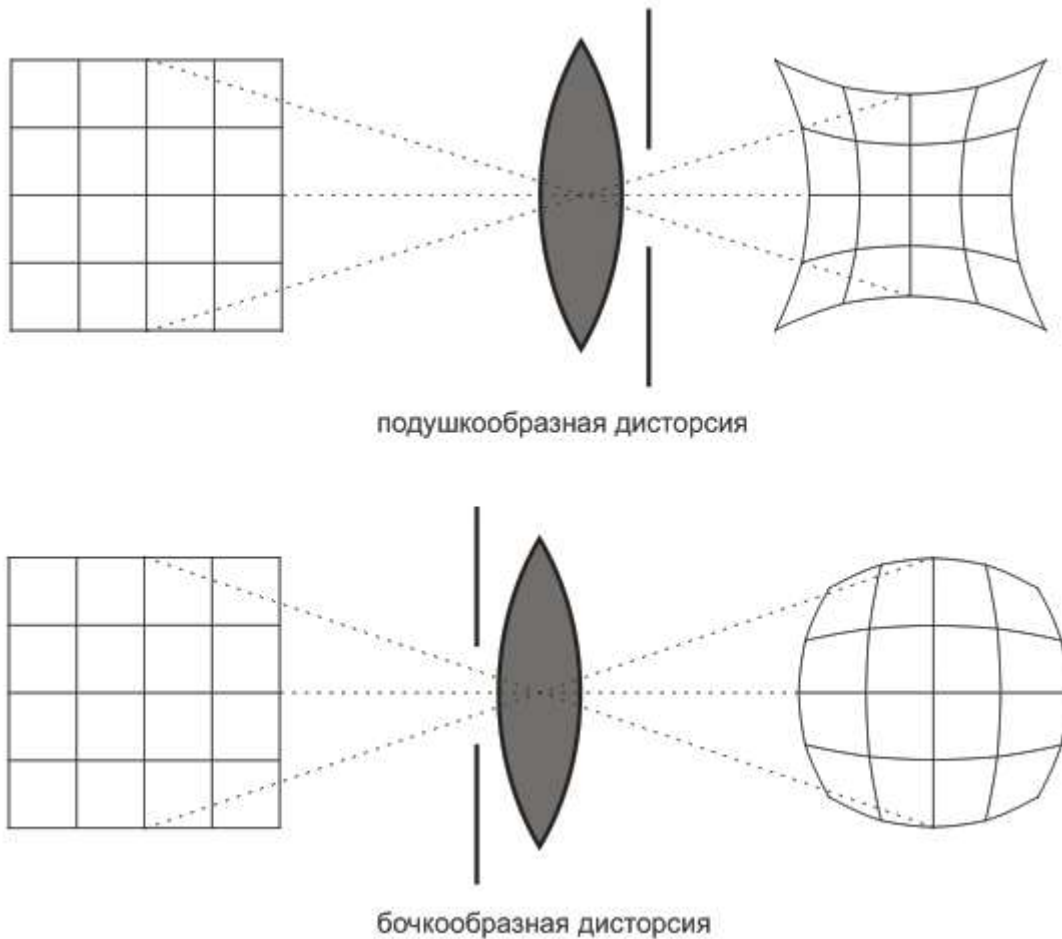


Рис.3. Дисторсия

Светящаяся точка, не расположенная на оптической оси, посылающая широкий пучок лучей, дает изображение в виде светящегося пятна с хвостиком, похожее на запятую это искажение называют комой. Рис.4.

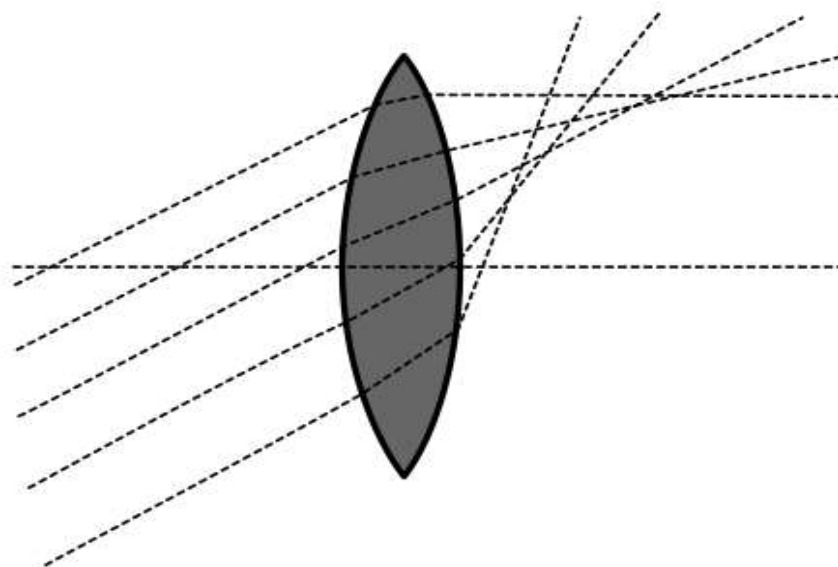


Рис.4. Кома

8. Хроматические aberrации.

Хроматические aberrации (хроматизм) – это проявление зависимости характеристик оптической системы от длины волны света. Хроматизм приводит к тому, что в изображениях неокрашенных предметов появляется окрашенность. Причина хроматических aberrаций заключается в том, что оптические системы изготавливаются из стекол с показателями преломления, зависящими от длины волны.

Существуют два основных вида хроматизма:

А. *Хроматизм положения.* При падении белого света на линзу отдельные монохроматические составляющие будут фокусироваться в разных точках, т.к. фокусные расстояния зависят от показателя преломления ($n_{\text{отн}}$), который, в свою очередь, зависит от длины волны. При нормальной дисперсии в стеклах слабее всего преломляются и имеют наибольшее фокусное расстояние ($F_{\text{к}}$) красные лучи, а ближе всего к оптической системе расположен фокус фиолетовых лучей ($F_{\text{ф}}$). между ними расположены фокусы всех остальных монохроматических лучей видимого диапазона света (рис.5а).

Хроматизм положения – это aberrация, при которой изображения одной точки предмета расположены на разных расстояниях от оптической системы в зависимости от длины волны (рис.5б). На экране, перпендикулярном главной оптической оси системы, появляются изображения светящейся точки в виде радужного кружка, порядок расположения цветов в котором зависит от расположения экрана.

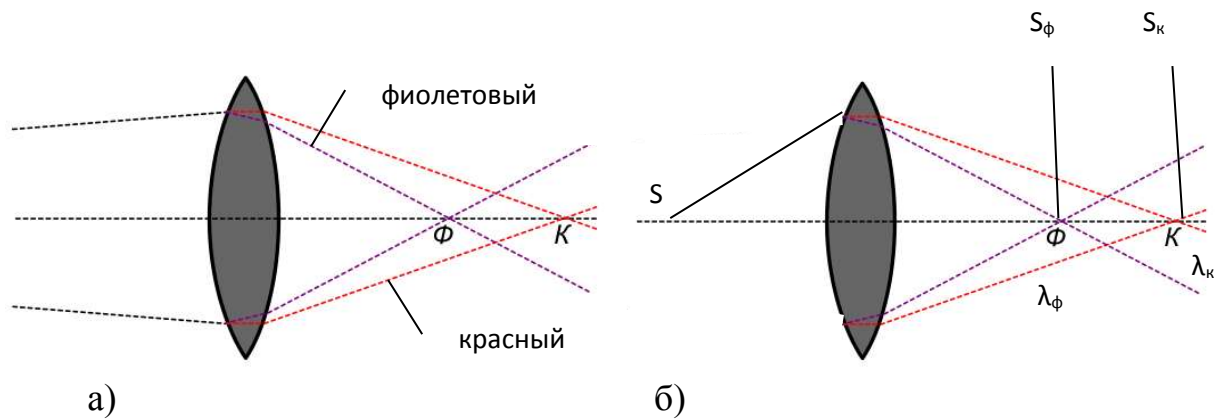


Рис.5. Хроматизм

Численно хроматизм положения определяется разностью плоскости изображения крайних длин волн (красная - λ_2 – фиолетовая - λ_1):

$$S'_{\lambda_{\phi}-\lambda_{\kappa}} = S'_{\lambda_{\phi}} - S'_{\lambda_{\kappa}}$$

Комбинируя собирающие и рассеивающие линзы, изготовленные из стекол с разной дисперсией, можно совместить фокусы двух (ахроматы) и трех (апохроматы) разных цветов и таким образом почти ликвидировать хроматическую aberrацию.

В. *Хроматизм увеличения* –

это aberrация, при которой увеличение оптической системы зависит от длины волны (рис.6).

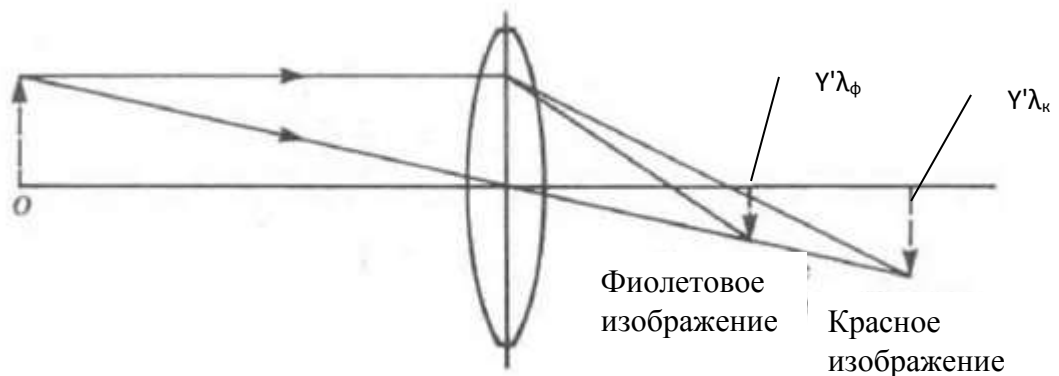


Рис.6. Хроматизм увеличения

Численно хроматизм увеличения определяется как:

$$y'_{\lambda_{\phi}} - y'_{\lambda_{\kappa}} = \Delta y'$$

Если линза тонкая, то хроматизм положения присутствует, а хроматизма увеличения нет.

Практическая часть

Оборудование: оптическая скамья, линзы разных типов.

В данной работе исследуется хроматизм как классических стеклянных линз, так и искусственных синтезированных голограммных линз. На рис. 7а для плосковыпуклой классической линзы показан хроматизм положения и на рис. 7б для синтезированной голограммной линзы.

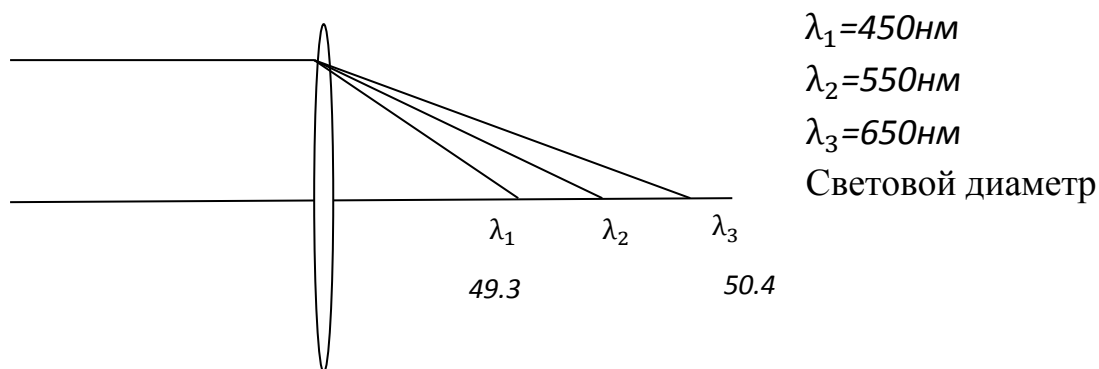


Рис. 7а. Обычная стеклянная линза

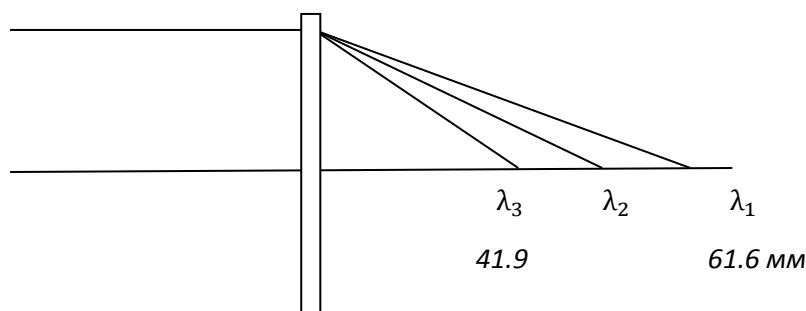


Рис. 7б. Голограммная линза

Синтезированная голограммная линза не только поменяла местами точки фокусировки света с длинами волн λ_3 и λ_1 , но и значительно увеличила их удаление от λ_2 (550nm).

Засечь положение фокусов для излучений разной длины волны для стеклянной и голограммной линз.

Сделать вывод.