

ЗАОЧНАЯ ШКОЛА CARL ZEISS

2. Геометрическая оптика

(продолжение)

Эквивалентная оптическая сила и фокусное расстояние

Если сферическая линза имеет толщину в центре d (мм) и показатель преломления материала n_1' , то эквивалентная оптическая сила этой линзы F равна:

$$F = F_1 + F_2 - \delta F_1 F_2 \quad (2.1)$$

где $\delta = d/n_1'$ – толщина линзы, нормированная на ее показатель преломления.

Для бесконечно тонкой линзы толщиной в центре можно пренебречь:

$$F = F_1 + F_2 \quad (2.2)$$

Если эта бесконечно тонкая линза находится в воздухе, то получим:

$$F = (n_1' - 1)(1/r_1 - 1/r_2) \quad (2.3)$$

Если на линзу падают лучи, параллельные оптической оси линзы, то после преломления эти лучи соберутся в одной точке (в пространстве изображений) на оптической оси, называемой фокальной точкой F' пространства изображений (задним фокусом). Если пучок лучей, выходящих из линзы, параллелен оптической оси, то падающие на линзу лучи исходят из одной точки на оптической оси, называемой фокальной точкой F пространства объекта (передним фокусом).

Если эквивалентная оптическая сила положительна, то обе фокусные точки реальные, т.е. в них пересекаются реальные лучи (рис.2.1).

Если эквивалентная оптическая сила отрицательна, то обе фокусные точки мнимые, т.е. в них пересекаются не реальные лучи, а их воображаемые продолжения (рис.2.2).

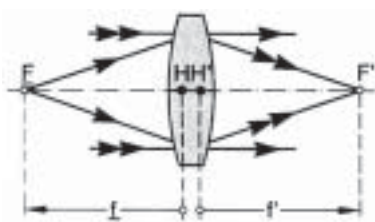


Рис. 2.1. Фокальные точки (фокусы) собирающей линзы

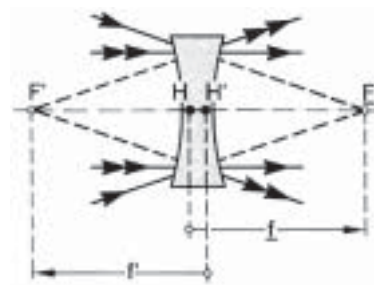


Рис. 2.2. Фокальные точки (фокусы) рассеивающей линзы

Для определения фокусных расстояний вводятся понятия передней и задней главных плоскостей и главных точек оптической системы, состоящей из двух преломляющих поверхностей (т.е. модели реальной линзы) (рис.2.3). Определим точку N' пересечения падающего на линзу луча BN с сопряженным лучом, проходящим через задний фокус F' . Тогда через точку N' перпендикулярно оптической системе будет проходить плоскость H' , называемая **задней главной плоскостью линзы**. Точка пересечения плоскости H' с оптической осью (точка H' на рисунке) называется **задней главной точкой линзы**. Аналогично определяется передняя главная точка линзы (точка H). В случае бесконечно тонкой линзы главные точки H' и H совпадают с оптическим центром линзы O .

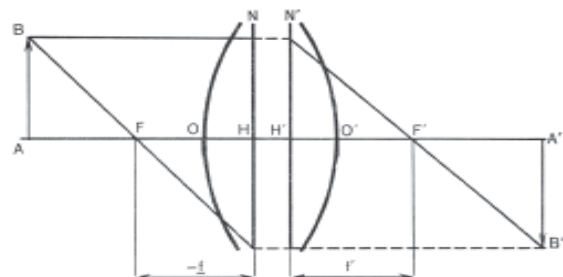


Рис. 2.3. Главные плоскости и главные точки оптической системы

Расстояние между главной точкой H' и фокусом F' называется задним фокусным расстоянием (f'), а расстояние между точками H и F – передним фокусным расстоянием (f).

Эквивалентная оптическая сила линзы и фокусное расстояние связаны между собой следующим соотношением:

$$F = n_2' / f' = -n_1 / f \quad (2.4)$$

Если среда по обе стороны линзы одинакова, то $n_2' = n_1$, и

$$f' = -f \quad (2.5)$$

Для линзы в воздухе ($n_2' = n = 1$) имеем:

$$F = 1/f' = -1/f \quad (2.6)$$

Чтобы эквивалентную оптическую силу выразить в диоптриях, фокусное расстояние следует измерять в метрах.

Вершинная рефракция и вершинное фокусное расстояние

Расстояния от вершины задней поверхности линзы (точка A_2 на рис.2.4, 2.5) до заднего фокуса называется задним вершинным фокусным расстоянием (f'_v). Аналогично определяется переднее вершинное фокусное расстояние $-f_v$.

В оптике оптическую силу линзы принято характеризовать величиной задней вершинной рефракции F'_v :

$$F'_v = 1/f'_v \quad (2.7)$$

Если f'_v приводится в метрах, то F'_v будет выражаться в диоптриях.

Разница между эквивалентной оптической силой F и задней вершинной рефракцией F'_v (или между задним фокусным расстоянием f' и задним вершинным фокусным расстоянием f'_v) будет тем заметнее, чем больше кривизна линзы (при постоянстве толщины линзы в центре). Соотношение между F и F'_v задается коэффициентом увеличения формы S :

$$S = F'_v / F = 1 / (1 - \delta F_1) \quad (2.8)$$

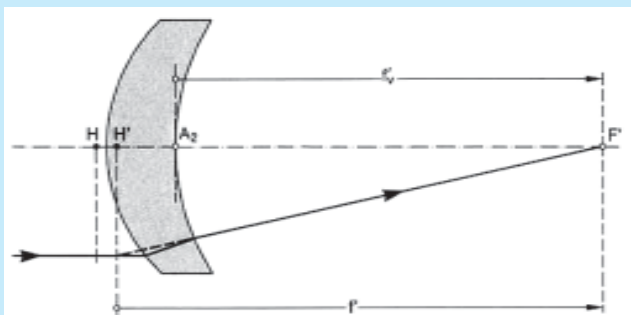


Рис. 2.4. Заднее вершинное фокусное расстояние f'_v и заднее фокусное расстояние f' для положительной линзы

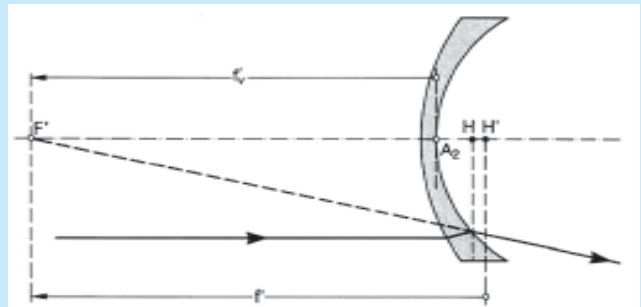


Рис. 2.5. Заднее вершинное фокусное расстояние f'_v и заднее фокусное расстояние f' для отрицательной линзы

Эквивалентная оптическая сила F и задняя вершинная рефракция F'_v совпадают ($F'_v = F$), только когда линза бесконечно тонкая ($\delta=0$).

Главные точки линзы

Главными точками линзы называются точки пересечения с оптической осью ее главных плоскостей. Положение главных точек линзы зависит от толщины линзы в центре, формы линзы (ее «изогнутости») и показателя преломления материала линзы. Чем больше форма линзы отличается от симметричной, тем больше сдвигаются главные точки по направлению к более изогнутой поверхности линзы.

Для линзы, находящейся в воздухе, расстояние от передней главной точки H до вершины передней поверхности равно:

$$e = \delta F_2 / F \quad (2.9)$$

а расстояние от задней главной точки H' до вершины задней поверхности:

$$e' = \delta F_1 / F \quad (2.10)$$

Главные точки симметричных линз лежат внутри линз (жирные точки на рис.2.1 и 2.2). Если линза не слишком толстая и $n' = 1,5$, то главные точки делят толщину линзы на 2 практически равные части (так как $F_1 = F_2 \cong F/2$). В плоско-вогнутых и плоско-выпуклых линзах (F_1 или $F_2 = 0$) одна главная точка лежит на вершине изогнутой кривой, а другая – примерно на 1/3 толщины в центре вне линзы.

Точки на рис. 1.9 и 1.10 в первой публикации показывают примерное положение главных точек в линзах разной формы.

Астигматические линзы

Линзы, имеющую хотя бы одну цилиндрическую, торическую или аторическую поверхность, несимметричны относительно оптической оси и имеют разную оптическую силу в каждой меридианной плоскости. Две плоскости, соответствующие наибольшей и наименьшей рефракции,

взаимно перпендикулярны и называются главными меридианными плоскостями линзы. Лучи, которые проходят через обе меридианные плоскости, после преломления уже не лежат в одной плоскости. По этой причине оптическая сила астигматической линзы может быть измерена только в двух главных меридианах, и для астигматической линзы указывается два значения эквивалентной или вершинной оптической силы F'_{v1} и F'_{v2} . Разница между этими двумя значениями оптической силы называется астигматической разницей (или цилиндром): $C = F'_{v2} - F'_{v1}$. Простейшей астигматической линзой является плоскоцилиндрическая линза (рис.2.6).

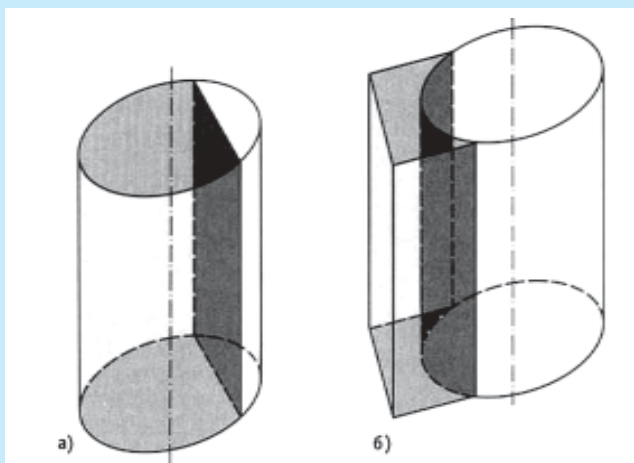


Рис. 2.6. Плоско-цилиндрические линзы: а) положительная; б) отрицательная

Торическая поверхность получается вращением части окружности вокруг оси, которая не проходит через центр этой окружности. У торической поверхности различные радиусы кривизны (r_1 и r_2 на рис.2.7) в двух главных меридианах (экваториальном и поперечном). У аторической поверхности форма поперечного и экваториального меридианов отличается от окружности.

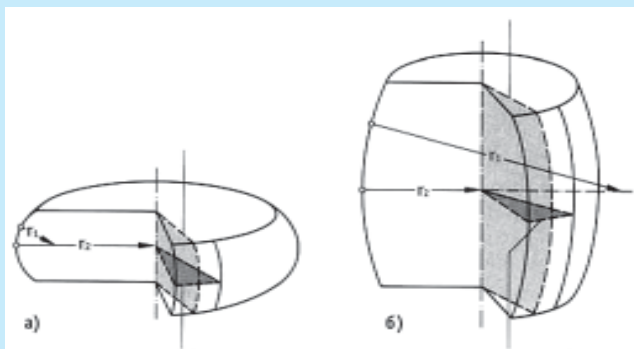


Рис. 2.7. Торические поверхности: а) форма шины; б) форма бочки

Астигматические линзы применяют для коррекции астигматизма.

Формирование линзой изображений Построение изображения

Если падающие на линзу лучи после преломления собираются в пространстве за линзой, то в точке их пересечения формируется реальное изображение. Если лучи расходятся, то изображение получается мнимым (его образуют продолжения лучей в пространстве перед линзой).

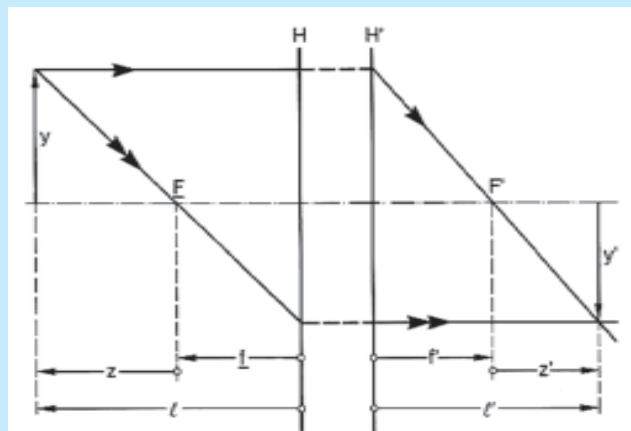


Рис. 2.8. Положительная линза: реальное изображение с отрицательным увеличением m

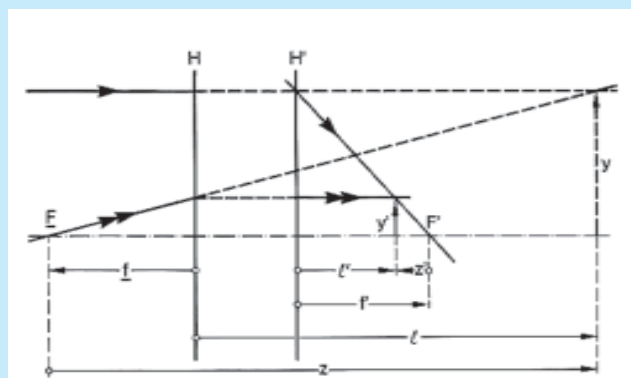


Рис. 2.9. Положительная линза: реальное изображение с положительным увеличением m

Расстояние по оптической оси от главной точки H до объекта на рис.2.8 и 2.9 обозначено как l , а расстояние от главной точки H' до изображения - l' .

Для построения изображения используются 2 вспомогательных луча:

1. Луч, идущий параллельно оптической оси в пространстве объекта, преломляется главной плоскостью H', так что после нее он будет проходить через фокус F' (фокальный луч).

2. Фокальный луч, проходящий через F, после преломления главной плоскостью H становится параллельным оптической оси.

Положение изображения рассчитывается из уравнения:

$$F = n_2' / \ell' - n_1 / \ell \quad (2.11)$$

В воздухе ($n_2' = n_1 = 1$) согласно 2.6 имеем

$$1/f' = 1/\ell' - 1/\ell \quad (2.12)$$

Размер изображения зависит от поперечного увеличения m , определяемого как отношение размера изображения h' к размеру объекта h :

$$m = h' / h \quad (= \ell' / \ell \text{ в воздухе}) \quad (2.13)$$

Если m больше 1, то имеет место увеличение.

Если m положительно, то объект и изображение находятся по одну сторону от линзы. Если m отрицательно, то объект и изображение находятся по разные стороны от линзы.

Если u – угол пересечения оптической оси падающим на линзу лучом (в пространстве объекта), а u' – угол, образованный преломленным лучом с оптической осью, то угловое увеличение γ' равно:

$$\gamma' = u' / u \quad (2.14)$$

Узловыми точками называют сопряженные точки (N' и N) на оптической оси, в которых угловое увеличение равно 1. Узловые, главные точки и фокусы называют кардинальными точками оптической системы (линзы). Плоскости, перпендикулярные оптической оси и проходящие через эти точки, также называют кардинальными (узловыми, главными или фокальными).

Формула Ньютона

Пусть расстояние по оптической оси от фокуса F до объекта будет x , а от F' до изображения – x' . Тогда имеет место формула Ньютона:

$$x x' = f f' \quad (2.15)$$

С учетом этой формулы поперечное увеличение равно:

$$\beta' = -f/x = -x'/f' \quad (2.16),$$

а угловое увеличение:

$$\gamma' = f/x' = x/f' \quad (2.17)$$

Формирование изображения астигматическими линзами

Астигматические линзы для точечного объекта формируют изображение не в виде точки, а в виде двух линейных отрезков, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Причем эти отрезки взаимно перпендикулярны (рис.2.10) и перпендикулярны оптической оси. Пучок лучей, имеющий сферическое сечение в любой точке перед линзой, после преломления имеет в сечении эллипс. Размер и форма эллипса зависит от его положения. Два линейных отрезка, о которых говорилось выше, являются крайними случаями поперечного сечения. Между ними находится единственная точка, в которой сечение будет окружностью (а не точкой). Эта окружность называется кругом (диском) наименьшего рассеивания (C_r). Фигуру, образуемую преломленными астигматической

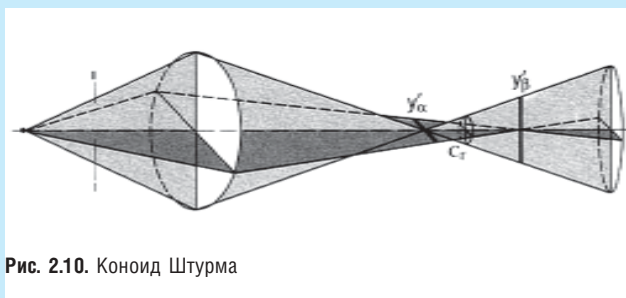


Рис. 2.10. Коноид Штурма

линзой лучами, иногда называют коноидом Штурма (по имени немецкого математика, активно занимавшегося оптикой цилиндрических линз).

Главный меридиан, имеющий меньшую (по абсолютной величине) оптическую силу F_β , называют первым главным меридианом β , а другой меридиан (с большей оптической силой F_α) – вторым главным меридианом α . Линейный отрезок, образуемый первым главным меридианом, лежит в плоскости второго главного меридиана (y_β' на рис.2.10), и наоборот.

Расстояние до круга наименьшего рассеивания ℓ_c' (для объекта, удаленного от линзы на ℓ) можно найти из уравнения:

$$(F_1 + F_2)/2 = n_2' / \ell_c' - n_1 / \ell \quad (2.18)$$

В следующей публикации будет рассказано об aberrациях оптических систем и изложены основные понятия волновой оптики, необходимые для понимания таких понятий, как просветляющие покрытия, поляризационные линзы и др.

Контрольные вопросы по материалу, опубликованному в прошлом номере журнала (Геометрическая оптика. Часть 1)

1. Дисперсия света – это:
 - А) отклонение призмой светового луча
 - Б) расщепление призмой белого света на монохроматические компоненты
 - В) отражение света от поверхности призмы
2. В какую сторону отклоняются призмой (в воздухе) световые лучи?
 - А) к основанию призмы
 - Б) к вершине призмы
 - В) луч не отклоняется
3. Положительная очковая сферическая линза – это:
 - А. двояковогнутая линза
 - Б. собирающая линза
 - В. рассеивающая линза
4. Оптическая сила поверхности линзы зависит от:
 - А) радиуса кривизны поверхностей линзы
 - Б) показателя преломления материала линзы
 - В) верно А и Б

Ответы присылать по факсу: (495) 933-51-50, по электронной почте dyadina@zeiss-msk.ru или по почте: 105005, Москва, Денисовский пер., 26, ООО «Карл Цейсс» с пометкой на конверте «Заочная школа».

На сообщении для факса также следует сделать пометку: «Заочная школа». Обязательно укажите свои координаты (ФИО, адрес, телефон для связи), номер журнала, в котором был напечатан материал, к которому даны вопросы, и номера вопросов и ответов на них.

Образец ответов: Иванова А. Т., почтовый адрес, номер телефона, №6 2005, 1.А, 2.В, 3.Б, 4.В