

ЗАОЧНАЯ ШКОЛА CARL ZEISS

Публикация 3 Геометрическая оптика (окончание)

Аберрации

Требования к оптическим изображениям

- оптические изображения должны быть четкими
- форма объекта не должна изменяться
- оптические изображения не должны иметь цветовых дефектов (окрашенных контуров)

Отклонения от этих требований называются аберрациями.

Сферические аберрации

У сферической линзы концентрические зоны, удаленные от оптической оси на разные расстояния, обладают различной преломляющей силой. В фокусе F'_0 собираются только световые лучи, параллельные оптической оси и проходящие через линзу вблизи ее оптического центра (в так называемом параксиальном пространстве). Лучи, параллельные оптической оси, но проходящие через периферию линзы, не проходят через фокус линзы. Они образуют в пространстве изображений световое пятно (гало) в фокальной плоскости (рис.3.1, 3.2). Такое размытие изображения называется сферическими аберрациями.

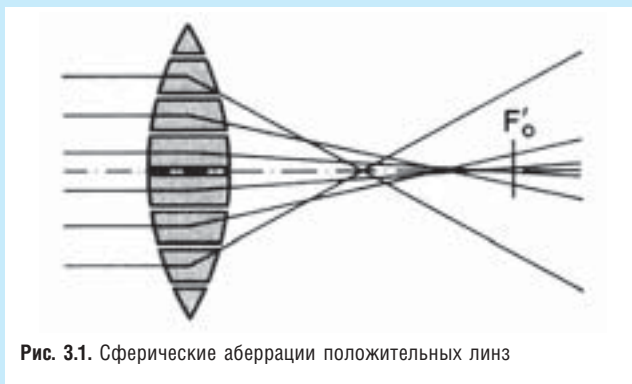


Рис. 3.1. Сферические аберрации положительных линз

Кома

Если точечный объект, расположенный на бесконечном удалении от линзы (от него идет пучок параллельных лучей), находится не на оптической оси линзы, а смещен относительно нее в

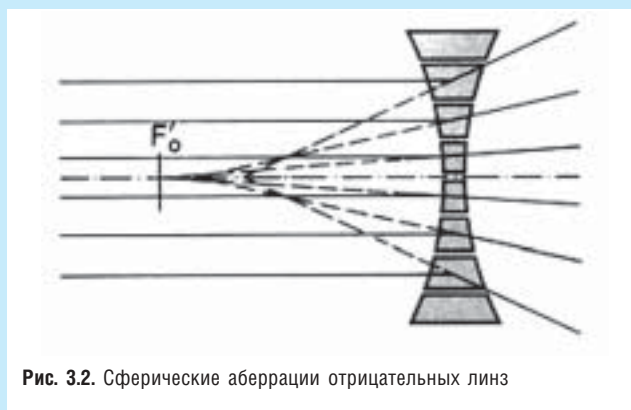


Рис. 3.2. Сферические аберрации отрицательных линз

сторону, то изображение этой точки будет иметь вид размытого пятна в форме, напоминающей запятую или хвост кометы. Асимметричная составляющая этого дефекта, включающего в себя и сферические аберрации, известна, как кома (рис.3.3.). Лучи, проходящие через центральную зону линзы, становятся стигматическими, т.е. фокусируются в одной точке.

Астигматизм косых пучков

По мере удаления объекта в сторону от оптической оси (например, если смотреть через периферию линзы) стигматический пучок лучей становится все в большей степени астигматическим.

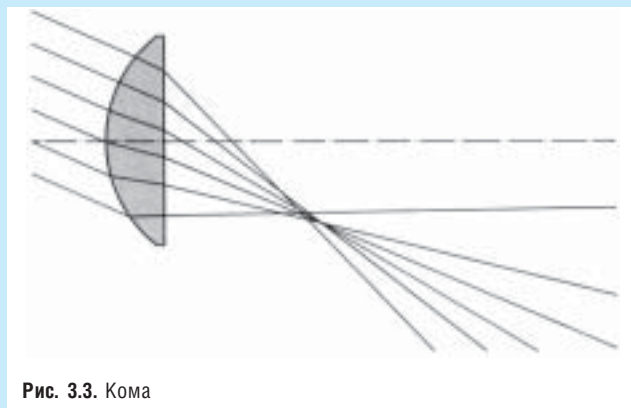


Рис. 3.3. Кома

Две главные плоскости сечения пучка называются тангенциальной и сагиттальной (Т и S на рис.3.4). Тангенциальным сечением называют плоскость, образованную осью системы и главным лучом (проходящим через оптический центр линзы). Сагиттальное сечение перпендикулярно тангенциальному. Астигматизм наклонных пучков зависит от вида линзы, положения объекта, а также от размера очковой оправы, в которую вставлена линза. При наличии этого типа астигматизма изображения отдельных точек на плоскости объекта, перпендикулярной оптической оси, будут принадлежать не одной плоскости, а двум искривленным плоскостям. По этой причине этот тип aberrаций иногда называют радиальным астигматизмом.

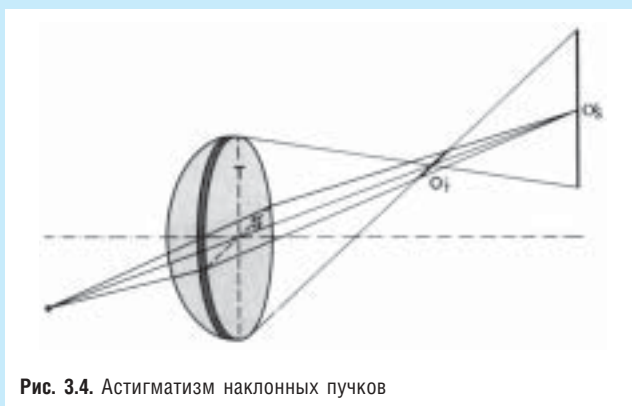


Рис. 3.4. Астигматизм наклонных пучков

Кривизна поля

Если при корригированном астигматизме наклонных пучков (астигматическая разница равна 0 для всех наклонных пучков) плоскость объекта остается все равно искривленной, то такая aberrация называется кривизной поля.

Дисторсия

Указанные выше aberrации характеризуют дефекты изображения точечного объекта, и они приводят к ухудшению четкости изображения. Кроме этих дефектов, изображение протяженного объекта, лежащего в плоскости, перпендикулярной оптической оси, может формироваться с искажением масштаба. Это происходит из-за того, что поперечное увеличение линзы зависит от расстояния от ее оптической оси. Для положительных (собирающих) линз имеет место дисторсия типа «подушки», а для отрицательных (рассеивающих) – типа «бочки» (рис.3.5).

Если линза астигматическая, то поперечное увеличение будет разным в двух главных меридианах. В этом случае изображение круга, перпендикулярного оптической оси, будет иметь форму эллипса, а квадрата – параллелограмма (или прямоугольника, если стороны квадрата параллельны главным меридианам).

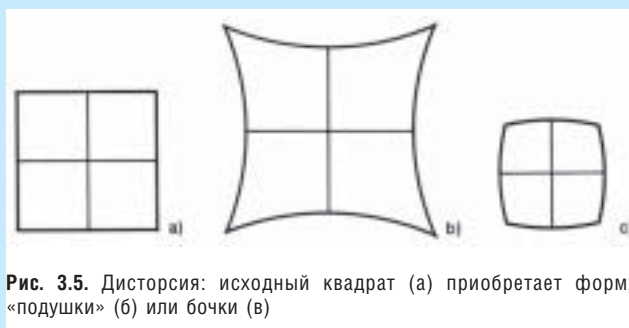


Рис. 3.5. Дисторсия: исходный квадрат (а) приобретает форму «подушки» (б) или бочки (в)

Хроматические aberrации

Из-за эффекта дисперсии линза имеет разную оптическую силу для разных длин волн (т.е. цветов). Это приводит к хроматическим aberrациям при формировании изображения белым (т.е. полихроматическим) светом (рис.3.6.1). Фокусное расстояние для коротковолнового светового излучения (волн синего диапазона) меньше, чем длинноволнового излучения (красный цвет). На рис.3.6.2 этот эффект показан для лучей, параллельных оптической оси линзы (продольные хроматические aberrации). Однако, если лучи падают на линзу наклонно, то после преломления в линзе лучи разного цвета будут иметь различные углы наклона к оптической оси. Эти поперечные хроматические aberrации приводят к неодинаковому для разных цветов поперечному увеличению в плоскости изображения.

Рис.3.6.1. Хроматические aberrации

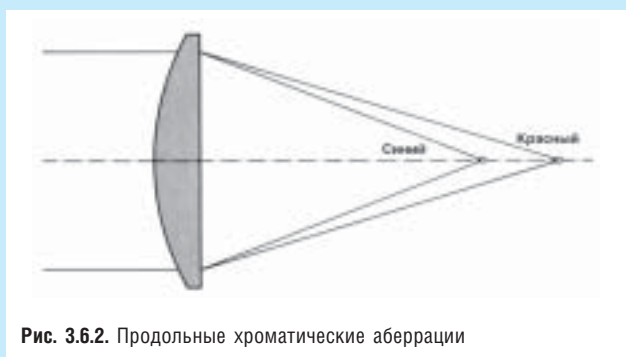


Рис. 3.6.2. Продольные хроматические aberrации

Волновая оптика

Электромагнитные излучения

Свет

Свет – это та часть спектра электромагнитных излучений, которая воспринимается глазом (рис.3.7). Видимый диапазон лежит между длиной волны $\lambda = 380$ нм и $\lambda = 780$ нм в воздухе (1 нм = 10^{-9} м).

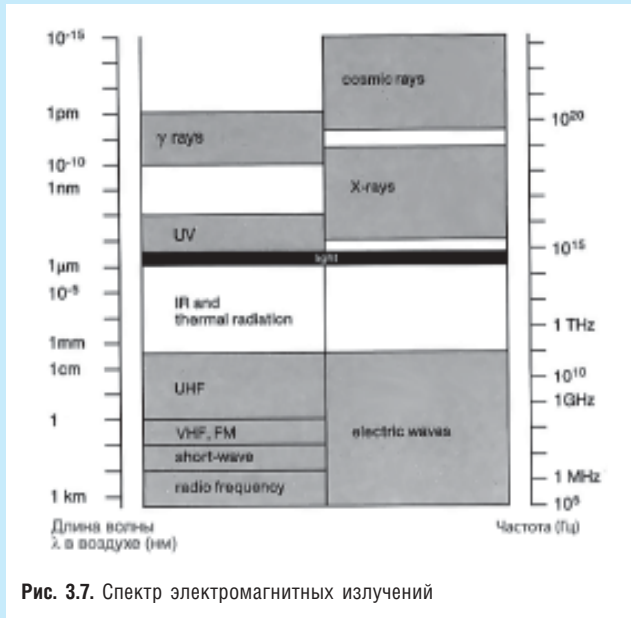


Рис. 3.7. Спектр электромагнитных излучений

Электромагнитные волны колеблются в направлении, перпендикулярном направлению их распространения (рис.3.8). Частотой ν называется количество колебаний в секунду, и она измеряется в герцах: 1 Гц = 1/с (т.е. одно колебание в секунду). Частота электромагнитных волн не зависит от среды, в которой волны распространяются. Поэтому характеристикой цвета является частота, а не длина волны (таблица 3.1).



Рис. 3.8. Поперечная волна

В среде с показателем преломления n скорость распространения волны c_n и длина волны связаны следующим соотношением:

$$c_n = \nu \lambda_n \quad (3.1)$$

Если частота дана в герцах, а длина волны в км, то скорость c_n получится в км/с. Скорость распро-

Таблица 3.1. Характеристики длин волн света видимого диапазона

Цвет	Частота 10^{14} Гц	Длина волны в воздухе (нм)
Красный	4,0...4,7	750...640
Оранжевый	4,7...5,0	640...600
Желтый	5,0...5,4	600...555
Зелёный	5,4...6,2	555...485
Голубой	6,2...7,0	485...430
Фиолетовый	7,0...8,0	430...375

странения света в вакууме является константой, и она равна:

$$c_0 = 299792, 46 \text{ км/с.}$$

В среде с показателем преломления n скорость света c_n и длина волны λ_n будут меньше, чем в вакууме (рис.3.9), тогда как частота волны и ее цвет остаются неизменными.



Рис. 3.9. Изменение скорости (с) и длины волны (λ) при переходе из вакуума в среду с показателем преломления n

Интерференция и просветляющие покрытия

Интерференция – это явление взаимодействия двух или более волн в одной точке пространства в один момент времени. Если две волны имеют одинаковую частоту, амплитуду (высоту) и совпадают по фазе, то происходит сложение, если в противофазе – вычитание (нейтрализация) этих двух волн (рис.3.10).

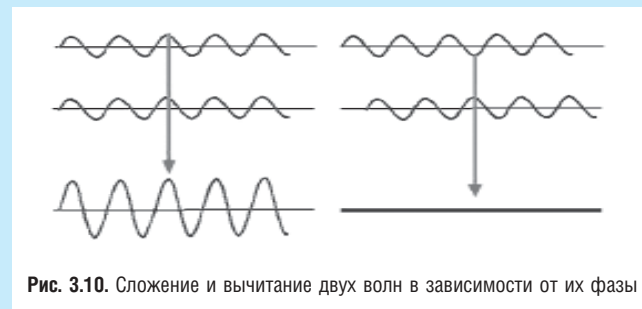


Рис. 3.10. Сложение и вычитание двух волн в зависимости от их фазы

Явление интерференции применяется для уменьшения отражения света от поверхностей линзы путем нанесения специальных так называемых просветляющих (иногда говорят «антирефлексных») покрытий. С

этой целью на поверхность линзы в глубоком вакууме наносятся несколько слоев из не поглощающих свет материалов с низким показателем преломления. При отражении световой волны от линзы будет происходить взаимодействие двух волн: отраженной от границы раздела воздух-просветляющий слой и отраженной от границы просветляющий слой-материал линзы (рис.3.11). При выполнении следующих условий происходит нейтрализация этих двух волн:



Рис. 3.11. Сложение двух волн, совпадающих по фазе

1. Волны должны совпадать по фазе. Для этого толщина покрытия должна быть кратна четверти длины волны в покрытии

$$d = 1/4 \lambda / n_2 \quad (3.2)$$

2. Амплитуды двух волн должны быть равны. Это произойдет, если квадрат показателя преломления покрытия (n_2) равен показателю преломления материала линзы (n_3):

$$n_2^2 = n_3 \quad (3.3)$$

Отражение света от линзы эффективно уменьшается, если покрытие имеет несколько просветляющих слоев с разными показателями преломления, так как записанные выше условия нейтрализации волн выполняются только для определенной длины волны (λ). Примерами таких многослойных просветляющих покрытий являются покрытия, применяемые для своих линз компанией Carl Zeiss: многослойное просветляющее Super ET и многофункциональное покрытие последнего поколения LotuTec с несколькими просветляющими слоями (цвет остаточного отражения – морской волны).

Просветляющие покрытия увеличивают светопропускание линзы и контраст изображения.

Поляризация света

Естественный свет не поляризован, т.е. поперечные колебания (перпендикулярные направлению распространению волны) волн не имеют предпочтительного направления. Когда неполяризованный свет падает на границу раздела воздух-не электропроводящий материал с показателем преломления n' , то при его отражении от поверхности происходит поляризация света (одно направление поперечных колебаний выражено сильнее остальных) (рис. 3.12). Если тангенс угла падения (i_B) равен показателю преломления материала n' (закон Брюстера):

$$\tan i_B = n', \quad (3.4)$$

то все волны (100%) отраженного света будут поляризованными. Поперечные колебания световых



Рис. 3.12. Поляризация света при отражении (воздух)

волн происходят в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

Для кронового стекла $i_B = 56,7^\circ$, для водных поверхностей $i_B = 53^\circ$. Примерно такой же угол i_B для дорожных покрытий, заснеженных полей, блестящих крашенных поверхностей (например, капот автомобиля) и т.п. При падении света под углами, отличными от i_B , поляризация света будет неполной, но все равно достаточно заметной.

Ослепляющие блики, вызванные отражением света от различных поверхностей, ухудшают качество зрения, снижают остроту зрения и контраст, вызывают астенопию (утомляемость глаз). Для устранения бликов используют специальные поляризационные линзы, которые не пропускают горизонтально поляризованный свет, лежащий в основе ослепляющих бликов.

Контрольные вопросы по материалу, опубликованному в прошлом номере журнала (Геометрическая оптика. Часть2)

1. Оптическую силу линзы принято характеризовать:
 - А) эквивалентной оптической силой
 - Б) задней вершинной рефракцией
 - В) задним вершинным фокусным расстоянием
2. У астигматических линз:
 - А) обе поверхности сферические
 - Б) обе поверхности асферические
 - В) хотя бы одна поверхность торическая
3. Для астигматической линзы указываются:
 - А) задняя вершинная рефракция
 - Б) два значения задней вершинной рефракции
 - В) задняя и передняя вершинная рефракция
4. Астигматическая линза дает изображение точки в виде:
 - А) точки
 - Б) запятой
 - В) двух взаимно перпендикулярных отрезков

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 сообщения 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