

Микроскопы обычно снабжаются сменными объективами и окулярами. Например, биологический микроскоп имеет объективы $8\times$, $40\times$ и $90\times$ и окуляры $7\times$, $10\times$ и $15\times$. Такой микроскоп позволяет получать различные увеличения от $56\times$ до $1350\times$. Вид микроскопа в разрезе показан на рис. 98.

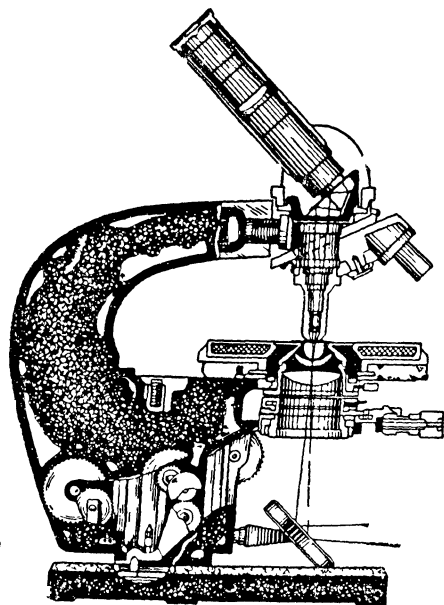
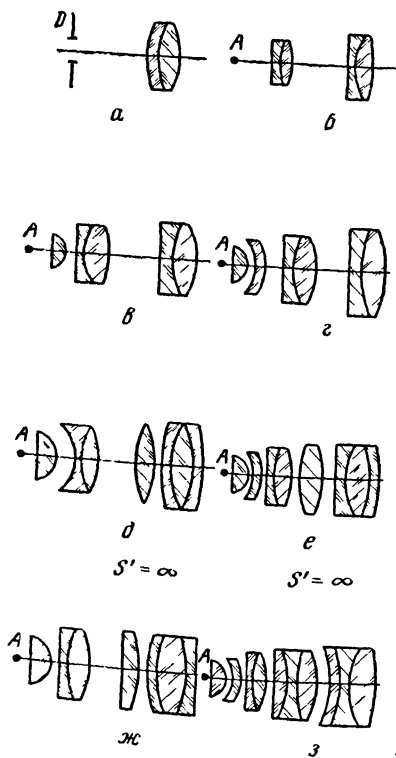


Рис 98 Биологический микроскоп

Рис. 97 Микрообъективы: *a* — от $1\times 0,0016$ до $6\times 0,18$, *б* — от $7\times 0,17$ до $10\times 0,25$; *в* — от $10\times 0,3$ до $70\times 0,8$, *г* — от $20\times 0,7$ до $40\times 0,75$, $95\times 1,25$; *д* — $20\times 0,65$ (апохромат); *е* — $90\times 1,35$; *ж* — $30\times 0,65$, *з* — $90\times 1,3$

тивов и окуляров микроскопов приведены в табл. IV и V в приложении.

К оптической системе микроскопа относятся не только собственно микроскопы, биологические, отсчетные, поляризационные и т. п. К таким системам относятся вообще все визуальные оптические приборы, предназначенные для рассмотрения близко расположенных предметов — компараторы, стереометры и т. п. Данные для некоторых микрообъек-

§ 56. ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ

Фотографическим объективом называется оптическая система, образующая действительное изображение, фиксируемое каким-либо светочувствительным слоем. Развитие фотохимии обусловило появление оптических систем, предназначенных для фотографиче-

ских съемок в различных лучах спектра. Широкое внедрение методов фотографии в различные отрасли науки и техники потребовало создания различных оптических систем для этой цели.

Оптическая схема фотографического объектива показана на рис. 99.

В большинстве случаев изображение должно образовываться на плоскости, так как фотографические пластинки или пленки имеют плоскую форму. Но иногда объектив образует изображение на шаровой поверхности, цилиндрической или криволинейной. В этих случаях светочувствительному слою необходимо придавать такую же форму.

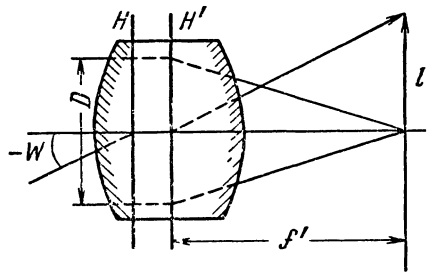


Рис. 99. Фотографический объектив

Фотографические объективы обычно имеют плоское поле изображения, большую светосилу и большое поле зрения. Простая оптическая система в виде двухлинзового объектива не может образовать такое изображение достаточно высокого качества. Поэтому фотографические объективы состоят из нескольких линз. Наиболее часто встречаются четырех- и шестилинзовые объективы.

Основными оптическими характеристиками фотографического объектива являются: 1) фокусное расстояние, f' , 2) относительное отверстие, $1:n$, 3) поле зрения, 2ω .

Если объектив предназначен для фотографирования близко расположенных предметов, то к числу его основных характеристик также относится линейное увеличение (или масштаб съемки) β . Дополнительными характеристиками объектива являются: 1) разрешающая способность, 2) интегральный коэффициент пропускания света, 3) коэффициент светорассеяния, 4) контраст изображения, 5) распределение освещенности по полю изображения, 6) спектральная характеристика пропускания света, 7) состояние абберационной коррекции (ахроматизация, ортоскопичность) и др.

В зависимости от условий эксплуатации все фотографические объективы можно разбить на группы: 1) объективы для художественной фотографии, 2) аэрофотосъемочные, 3) кино съемочные, 4) инфракрасные, 5) ультрафиолетовые, 6) рентгеновские, 7) микрофотографические; 8) репродукционные*, 9) регистрационные, 10) телевизионные, 11) гидросъемочные, 12) астрофотографические и др. Фотографические объективы по принципу устройства разделяются на: 1) нормальные, 2) телеобъективы, 3) обратные телеобъективы, 4) залинзовые, 5) панкратические, 6) зеркальные, 7) зеркально-линзовые, 8) дисторзирующие, 9) концентрические.

* Репродукционные объективы относят к фотографическим, так как процесс репродукции, связанный с получением типографских форм печати, относится к фотографии.

Фокусное расстояние и линейное увеличение определяют масштаб изображения. Масштаб находится из отношения фокусного расстояния к расстоянию от объектива до снимаемых предметов. Например, если объектив имеет фокусное расстояние 1 м, а съемка производится с расстояния 10 км, то масштаб изображения 1 : 10 000. При съемках близко расположенных предметов масштаб изображения определяется линейным увеличением.

На практике можно встретить объективы с фокусными расстояниями от нескольких миллиметров до 1800 мм, причем для специальных целей применяют объективы и до $f' = 8000$ мм.

Относительное отверстие объектива характеризует светосилу. В зависимости от величины относительного отверстия объективы разделяются на: 1) ультрасветосильные, от 1 : 1,1 и более (например, 1 : 0,9 и т. д.), 2) светосильные, от 1 : 1,1 до 1 : 3,5, 3) нормальные от 1 : 3,5 до 1 : 6,3 и 4) малосветосильные, менее 1 : 6,3 (например, 1 : 6,8; 1 : 15 и т. п.).

Светосила объектива снижается потерями света. Относительное отверстие объектива, определенное с учетом коэффициента пропускания света, называется *эффективным* и обозначается n_3 ,

$$n_3 = \frac{n}{\sqrt{\tau}} . \quad (56,1)$$

Относительные отверстия объективов встречаются от 1 : 0,5 до 1 : 15. Наиболее часто встречаются объективы с относительными отверстиями 1 : 2—1 : 6,3.

Величина поля зрения определяет формат изображения. По величине угла поля зрения объективы разделяются на: 1) узкоугольные, с полем зрения не более $2\omega = 40^\circ$, 2) нормальные, с полем зрения от $2\omega = 40^\circ$ до $2\omega = 65^\circ$, 3) широкоугольные, с полем зрения от $2\omega = 65^\circ$ до $2\omega = 104^\circ$, 4) сверхширокоугольные, с полем зрения свыше $2\omega = 104^\circ$. Величина поля зрения объективов колеблется от $2\omega = 2^\circ$ до $2\omega = 210^\circ$.

Разрешающая способность объективов является основным параметром, характеризующим качество изображения. Ее оценивают в линиях (штрихах) на миллиметр. Очевидно, что разрешаемое расстояние в фокальной плоскости равно произведению фокусного расстояния объектива на тангенс разрешаемого угла, определяемого уравнением (40,1):

$$\delta' = f' \operatorname{tg} \psi . \quad (56,2)$$

Учитывая малые значения углов, заменим тангенс на синус, затем, применив формулу (40,1), перейдем к числу линий на миллиметр

$$N = \frac{1}{\delta'} = \frac{D}{1,22\lambda f'} .$$

Учитывая выражение (28,4) и принимая $\lambda = 0,00056$ мм, полу-

$$N_0 = \frac{1473}{n}, \quad (56,3)$$

т. е. разрешающая способность фотографического объектива зависит от относительного отверстия.

Разрешающая способность, определяемая уравнением (56,3), имеет место при визуальном наблюдении изображения, образованного фотографическим объективом. Обычно фотографическое изображение является результатом воздействия оптического изображения на светочувствительный слой, разрешающая способность которого R влияет на разрешающую способность системы: объектив+слой. Тогда ожидаемая разрешающая способность при испытании объективов с помощью мир абсолютного контраста определяется формулой

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + \frac{1}{R}. \quad (56,4)$$

Опыт показывает, что фотографические объективы не достигают и этого предела. Основной причиной являются их аберрации.

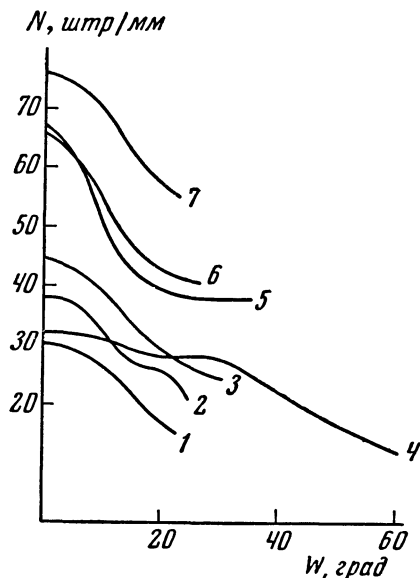


Рис 100. Разрешающая способность различных фотографических объективов: 1—Юпитер 8; 2—Индустар-50; 3—Мир-1; 4—Руссар-30; 5—ОКС1-56; 6—ОКС2-40; 7—ОКС2-15

Характерным недостатком всех объективов является падение разрешающей способности от центра к краю. На рис. 100 показаны характеристические кривые разрешающей способности некоторых фотографических объективов. Наивысшую разрешающую способность: 45÷75 штрихов на миллиметр в центре поля, и около 40 штрихов на краю поля имеют кино-съёмочные объективы. Объективы же для бытовых целей (любительские) обычно имеют разрешающую способность в центре поля 25÷40 штрихов на миллиметр и 10÷15 на краю поля.

Хорошим объективом считается тот, который имеет для края поля разрешающую способность не менее 16 штрихов на миллиметр, а в центре не менее 35 (съёмка на панхроматических эмульсиях со светофильтром). Разрешающая способность в центре поля определяется сферохроматической аберрацией.

В таблицах VI и VII в приложении приводятся основные оптические характеристики некоторых фотографических и аэрофотографических объективов. В таблице VIII представлены характеристики киносъёмочных объективов.

Коэффициент пропускания света приобретает важное значение в связи со сложностью объективов. Большие потери света на отражение и поглощение значительно понижают физическую светосилу объектива. Просветление оптики повышает коэффициент светопропускания. Например, объектив «Индустар-4», $f' = 210$ мм, до просветления пропускал 72,5% падающего света, а после просветления 84%*.

Коэффициент светорассеяния определяет действие паразитного рассеянного света, не принимающего непосредственного участия в организации оптического изображения, но снижающего контраст изображения. Коэффициентом светорассеяния называется отношение освещенности образуемого объективом изображения черного предмета, расположенного на равномерно ярком фоне, к освещенности изображения фона. В фотографических объективах этот коэффициент достигает значений от 0,6% до 5% и возрастает с уменьшением относительного отверстия объектива и с увеличением угла поля зрения.

Контраст изображения определяют в зависимости от частоты штрихов испытательной миры. Эта зависимость называется частотно-контрастной характеристикой. Она определяется коэффициентом передачи контраста C для определенной частоты штрихов миры

$$C = \frac{K_{\text{изобр}}}{K_{\text{предм}}}$$

где K — контраст изображения или предмета, определенный по формуле

$$K = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{E_{\text{макс}} + E_{\text{мин}}}.$$

Распределение освещенности по полю изображения зависит от угла поля зрения и виньетирования.

Оптическая плотность фотографического изображения от центра к краю часто падает в 10—20 раз. Кроме действия фактора косинуса угла четвертой степени здесь имеет значение и само геометрическое виньетирование. Для нормальных, по углу зрения, объективов стремятся, чтобы светопропускание наклонных пучков для края поля не было менее 50% осевого пучка, т. е. $K_w = 0,5$. Для широкоугольных и сверхширокоугольных объективов необходимо повышать светопропускание. Для сверхширокоугольного объектива «Руссар-29» K_w достигает 2.

Знание величин аберраций объектива позволяет предопреде-

* Сб. «Оптика в военном деле». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1945, стр. 304.

лить качество изображения и на основании характеристических кривых aberrаций сделать выбор объектива для решения определенных задач

Обычно большое поле зрения и большая светосила создают большие трудности в исправлении aberrации и остаточные aberrации достигают значительной величины. Поэтому aberrации объектива резко снижают теоретическую разрешающую способность. Спектральный состав используемого света определяет вид ахроматизации объектива, а условия использования изображения — ортоскопичность.

Обычно рассматривают 1) вторичный спектр, 2) сферические aberrации различных лучей спектра, 3) астигматизм, 4) aberrации наклонных лучей различных лучей спектра, 5) дисторсию.

Характеристические кривые aberrаций полиграфического репродукционного объектива «Полигмар», $f' = 600$ мм, показаны на рис 101.

Особое значение имеет дисторсия для объективов, предназначенных для измерительных целей. Таковыми, например, являются аэрофотосъемочные картографические объективы. Для этих объективов дисторсия не должна превосходить 0,01—0,05 мм.

Тип объектива определяется формой линз, их числом и взаимным расположением друг по отношению к другу. Различные типы фотографических объективов показаны на рис 102.

Четырехлинзовые объективы типа «Тессар» (рис 102) широко применяются в Советском Союзе и известны под названием «Индустар» (И-11, И-23, И-50, И-51, И-60 и др.)

Объективы этого типа позволяют получить поле зрения не более $2\omega = 63^\circ$. Для них является характерным резкое падение разрешающей способности от центра к краю — 30 штрихов на миллиметр в центре и 5—10 с краю.

Особое место среди фотографических объективов занимают телеобъективы. Они отличаются тем, что их общая длина L от первой поверхности до фокальной плоскости короче фокусного расстояния f' . Это достигается тем, что объектив состоит из двух компонентов, из которых задний имеет отрицательное фокусное расстояние. Степень укорочения будем характеризовать коэффициентом телеобъектива k_t .

$$k_t = \frac{L}{f'} . \quad (56,5)$$

Оптическая схема телеобъектива, составленного из бесконечно тонких компонентов, показана на рис 103. Установим зависимость между оптическими силами компонентов Φ_1 и Φ_2 , расстоянием между компонентами d и коэффициентом телеобъектива k_t . Применяя известные формулы углов (48,3) и высот (48,4) и полагая $h_1 = 1$, $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_3 = 1$, получим

$$\alpha_2 = \Phi_1,$$

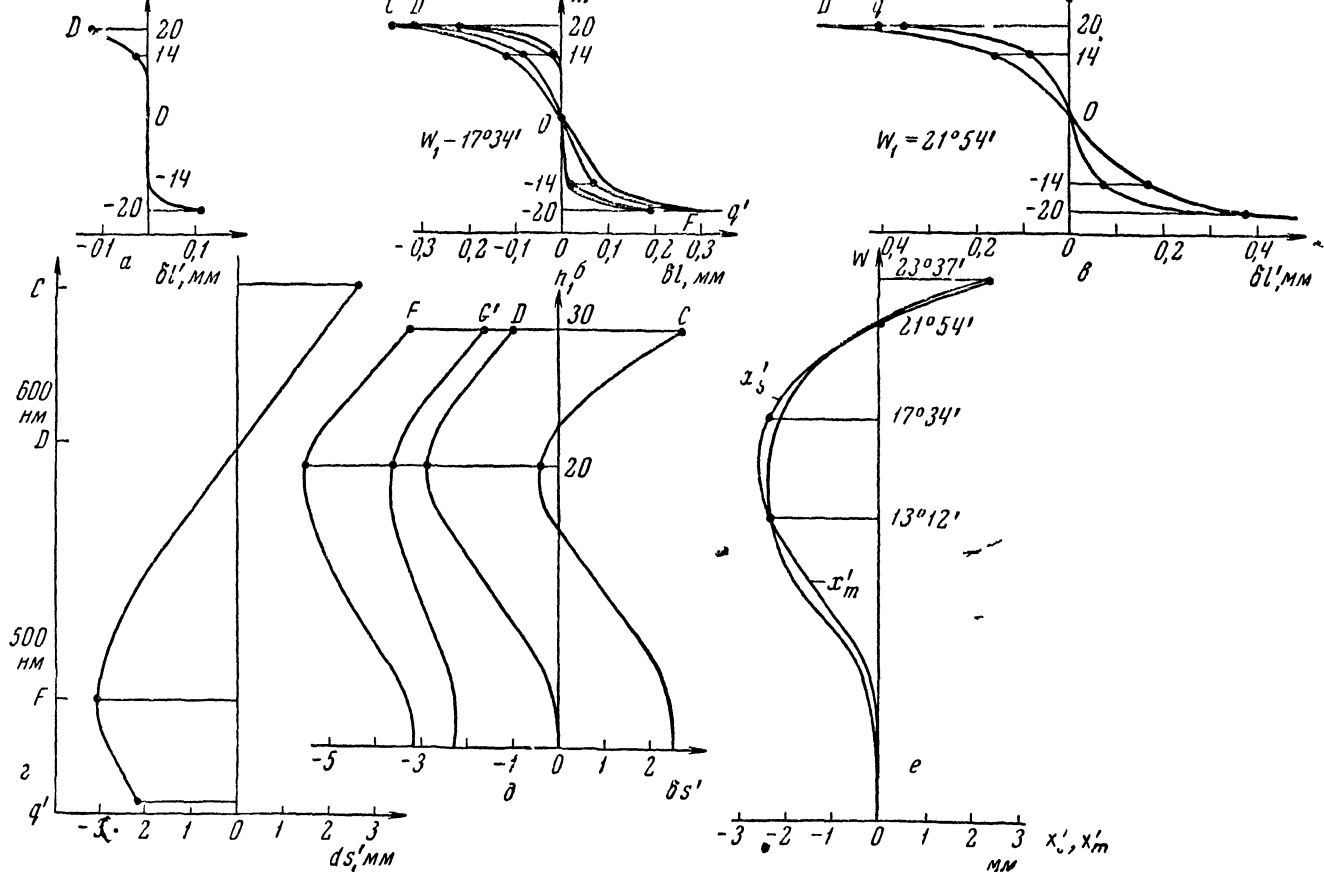


Рис 101 Аберрация репродукционного объектива «Полиграм» $f'=60$ см, 1 10, $2\omega=45^\circ$, 1 1 ($\beta=-1$)
 а, б, в — аберрация паклонных лучей, г — вторичный спектр, д — сферохроматическая аберрация, е — астигматизм

Из формулы суммы оптических сил (49,5) при $f'=1$ имеем

$$\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_2}{1 - d\Phi_2}. \quad (56,7)$$

Уравнение (56,7) подставим в (56,6), тогда получим

$$k_t - d = \frac{1 - d\Phi_2 - (1 - \Phi_2)d}{1 - d\Phi_2},$$

откуда

$$\Phi_2 = \frac{1 - k_t}{d^2 - dk_t}. \quad (56,8)$$

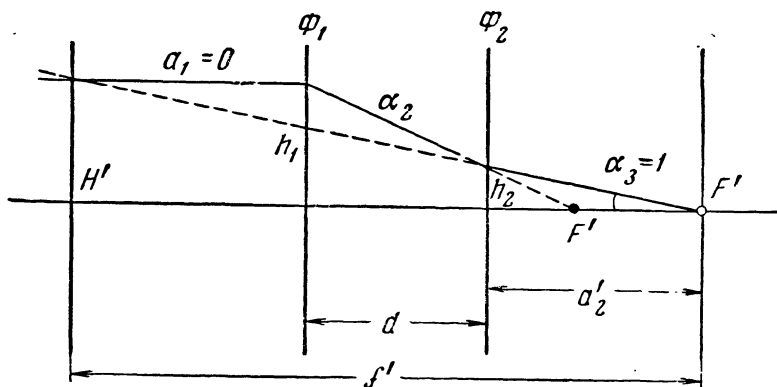


Рис. 103. Оптическая схема телеобъектива

Среди телеобъективов наибольшее распространение получили четырехлинзовые объективы типа «Теликон», известные под названием «Телемар».

В пределах данного типа различные объективы могут отличаться конструктивными элементами. Конструкция объектива определяется четырьмя параметрами: 1) радиусами кривизны преломляющих поверхностей, 2) толщинами линз, 3) расстояниями между линзами, 4) марками стекол линз. В зависимости от определенной конструкции объектив отличается тем или иным качеством изображения. Тип объектива обуславливает возможности его в части достижения определенного поля зрения и светосилы.

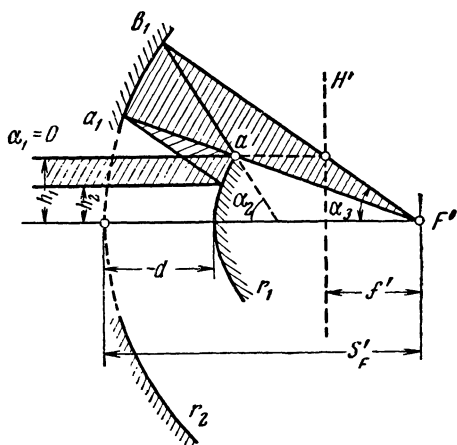


Рис. 104. Сложная зеркальная система

Из формулы суммы оптических сил (49,5) при $f'=1$ имеем

$$\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_2}{1 - d\Phi_2}. \quad (56,7)$$

Уравнение (56,7) подставим в (56,6), тогда получим

$$k_t - d = \frac{1 - d\Phi_2 - (1 - \Phi_2)d}{1 - d\Phi_2},$$

откуда

$$\Phi_2 = \frac{1 - k_t}{d^2 - dk_t}. \quad (56,8)$$

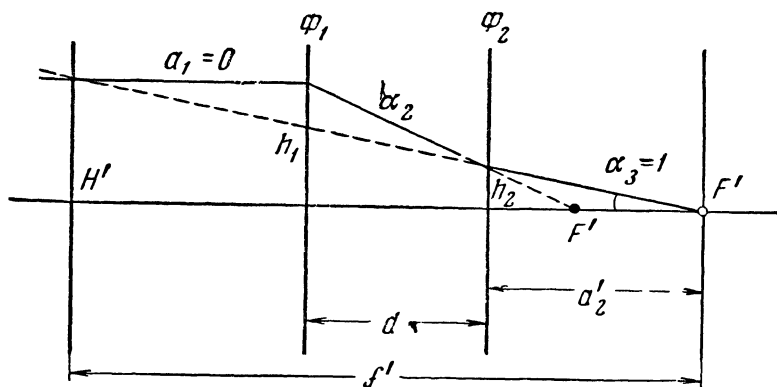


Рис 103 Оптическая схема телеобъектива

Среди телеобъективов наибольшее распространение получили четырехлинзовые объективы типа «Теликон», известные под названием «Телемар».

В пределах данного типа различные объективы могут отличаться конструктивными элементами. Конструкция объектива определяется четырьмя параметрами: 1) радиусами кривизны преломляющих поверхностей, 2) толщинами линз, 3) расстояниями между линзами, 4) марками стекол линз. В зависимости от определенной конструкции объектив отличается тем или иным качеством изображения. Тип объектива обуславливает возможности его в части достижения определенного поля зрения и светосилы.

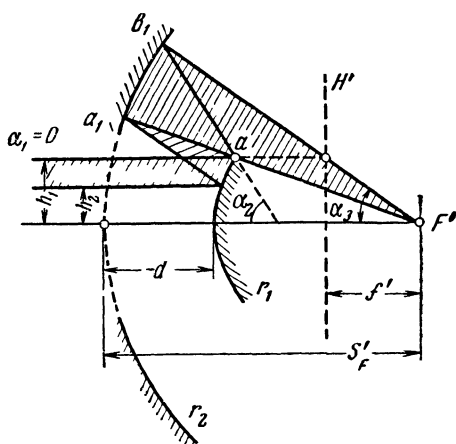


Рис 104 Сложная зеркальная система

Оптические системы, состоящие из сферических отражающих поверхностей, имеют преимущество перед системами из преломляющих поверхностей в том, что в первых отсутствует хроматическая aberrация и поглощение света стеклом. В последнее время находят значительное распространение сложные зеркальные системы из двух сферических зеркал. Такие системы применяются в качестве объективов и специальных осветительных систем.

Система состоит из двух сферических зеркал (рис. 104), обращенных выпуклостями в одну сторону. Параллельный пучок света имеет вид кольца. Первое выпуклое (рассеивающее) зеркало с радиусом кривизны r_1 направляет часть пучка ab на второе вогнутое (собирающее) зеркало с радиусом кривизны r_2 . Второе зеркало в плоскости чертежа имеет размер a_1b_1 . На рис. 104 показан только параллельный пучок лучей. Наклонный пучок увеличит размеры второго зеркала.

Конструктивные данные двухзеркальной системы зависят от принятых значений: f' , s'_F и d . Допустим, что из пространства предметов луч идет под углом $\alpha_1=0$, между зеркалами под углом α_2 , а в пространстве изображений $\alpha_3=1$. Тогда при $f'=1$ и $h_1=1$, $h_2=s'_F$, и на основании формулы (48,4) можем записать

$$d_2 = \frac{1 - s'_F}{d}. \quad (56,10)$$

Использование же формулы (13,16) при $n_1=1$; $n_2=-1$ и $n_3=1$ даст

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} \quad (56,11)$$

и

$$r_2 = \frac{2s'_F}{1 + \alpha_2}. \quad (56,12)$$

Так, например, если $f'=62,5$, $s'_F=175$ мм и $d=-45$ мм, при $f'=1$, соответственно будем иметь $s'_F=2,8$ и $d=-0,72$. Тогда использование формул (56,10), (56,11) и (56,12) даст $r_1=0,8$ и $r_2=1,6$, что на $f'=62,5$ мм дает $r_1=50$ мм и $r_2=100$ мм.

Так как отрезок s'_F показывает положение точки фокуса и является конструктивным параметром, то воздушный промежуток d может быть использован как aberrационный параметр.

Если же заданы конструктивные параметры двухзеркальной системы: r_1 , r_2 и d , то фокусное расстояние может быть найдено по формуле оптической силы двух линз (49,5).

Учитывая, что оптическая сила каждого зеркала равна $\Phi=2/r$, получим

$$f' = \frac{r_1 r_2}{2(r_1 - r_2 - 2d)}. \quad (56,13)$$

Положение точки фокуса F' от зеркала с радиусом кривизны r может быть найдено по известной формуле зеркала

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}. \quad (56,14)$$

Если предмет расположен в бесконечности, т. е. $s_1 = -\infty$, то $s_1' = r_1/2$, тогда $s_2 = \frac{r_1}{2} - d$ и искомая величина s_2' найдется после преобразований по формуле

$$s_2' = \frac{r_2(r_1 - 2d)}{2(r_1 - r_2 - 2d)}. \quad (56,15)$$

Например, если $r_1 = 50$ мм, $r_2 = 100$ мм и $d = -45$ мм, получим $f' = +62,5$ мм и $s_2' = 175$.

Если предмет находится на конечном расстоянии от системы, то величина s_2' находится по формуле отрезков, последовательно примененной к обеим поверхностям. Например, если задано положение предмета s_1 , то

$$s_2' = \frac{r_2[r_1 s_1 - d(2s_1 - r_1)]}{2s_1(r_1 - r_2) + r_1 r_2 - 2d(2s_1 - r_1)}. \quad (56,16)$$

Так, если $s_1 = -100$, то $s_2' = 216,6$ мм.

При определении относительного отверстия такой зеркальной системы учитывается кольцеобразная форма входного зрачка. Площадь входного зрачка находится по формуле

$$S = \pi(h_1^2 - h_2^2). \quad (56,17)$$

Приводя это выражение к площади круглого зрачка, найдем радиус условного зрачка входа

$$\frac{D_3}{2} = \sqrt{h_1^2 - h_2^2}. \quad (56,18)$$

Такие системы отличаются большой светосилой. Они находят себе применение в тех случаях, когда необходимы относительные отверстия $1 : 0,5 - 1 : 2$.

Зеркальные системы имеют значительную остаточную сферическую аберрацию. Но сочетание отражающих и преломляющих поверхностей позволяет создать оптическую систему с высоким качеством изображения. Такие системы получили наименование зеркально-линзовых объективов. Современный зеркально-линзовый объектив состоит из трех частей: линзового компенсатора (I), зеркальной системы (II) и дополнительного двухлинзового склеенного объектива (III) (рис. 105).

Данные о некоторых зеркально-линзовых объективах собраны в табл. IX в приложении.

Известны компенсаторы различных конструкций (рис. 106).

В Советском Союзе большей частью применяется компенсатор в виде менисковой линзы, использование которой в известной астрономической зеркальной системе Кассегрена позволило создать новый тип фотографического объектива — зеркально-линзового менискового объектива.

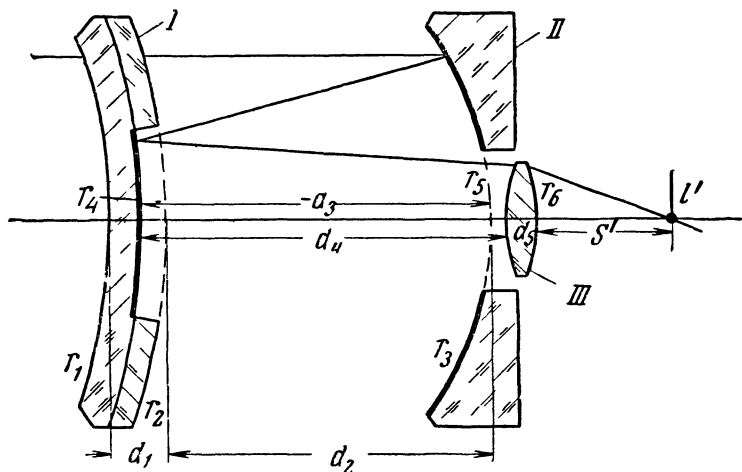


Рис. 105 Упрощенная схема зеркально-линзового объектива

В настоящее время во многих отраслях техники, в фотографии, кинематографии, астрономии, геодезии, военной оптике находят себе применение подобные объективы.

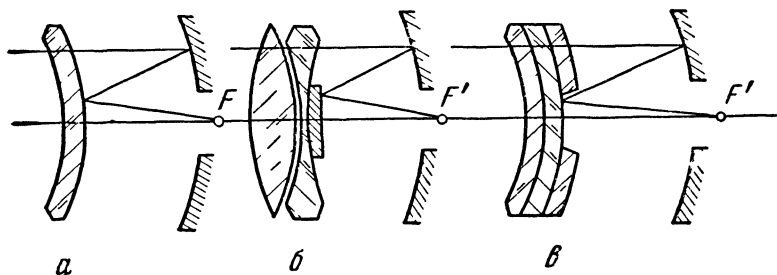


Рис 106 Зеркально-линзовые системы с различными компенсаторами

Расщепление мениска Максутова на две линзы с воздушной прослойкой между ними создало афокальный компенсатор нового типа (Волосов, Гальперн и Печатникова, 1945 г.). Превращение менисковой одиночной линзы в двухлинзовую ахроматическую систему позволило получить еще лучшую коррекцию хроматических aberrаций (Бегунов и Новик, 1952 г.) и осуществить киносъемочный объектив с $f' = 500$ мм с высокой разрешающей способностью.

В приложении в табл. X и XI приводятся некоторые данные об объективах, нашедших применение в телевидении и репродукционной фотографии. Панкратические объективы, позволяющие плавно изменять фокусное расстояние в 3—6 раз, также относятся к ряду фотографических.

§ 57. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Осветительные системы служат для освещения предмета, рассматриваемого или проектируемого с помощью оптического прибора. Они должны позволить наилучшим образом использовать

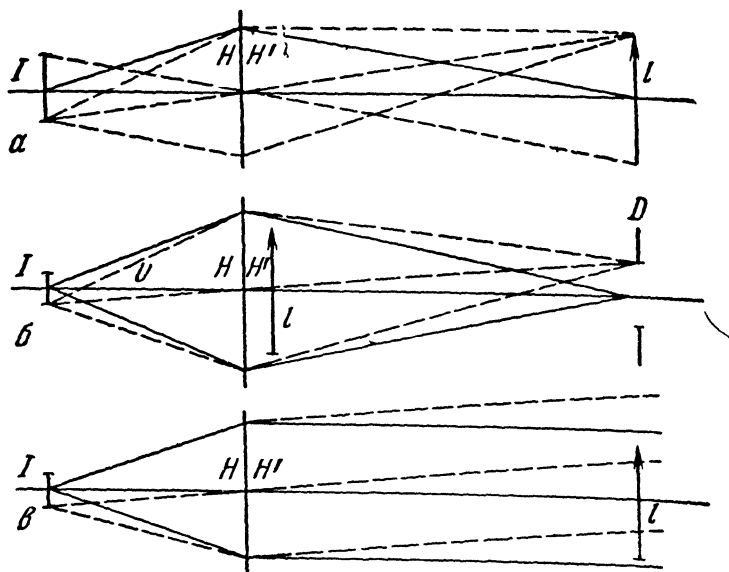


Рис. 107. Схемы освещения конденсором HH' предмета l , I — источник света

световой поток, даваемый источником света, для достижения наибольшей освещенности и получить равномерную освещенность изображения. Осветительные системы бывают линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

Конденсором называется линза или система линз, предназначенная для освещения предмета. Она сама не образует изображение этого предмета. Но так как изображение образуется с лучами, прошедшими через конденсор, и только этими лучами, то конденсор приобретает важное значение в общем образовании изображения последующей оптической системы. Встречаются три схемы применения конденсора:

1. Конденсор HH' проектирует изображение источника света в плоскость предмета (рис. 107, а). В этом случае изображение