

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

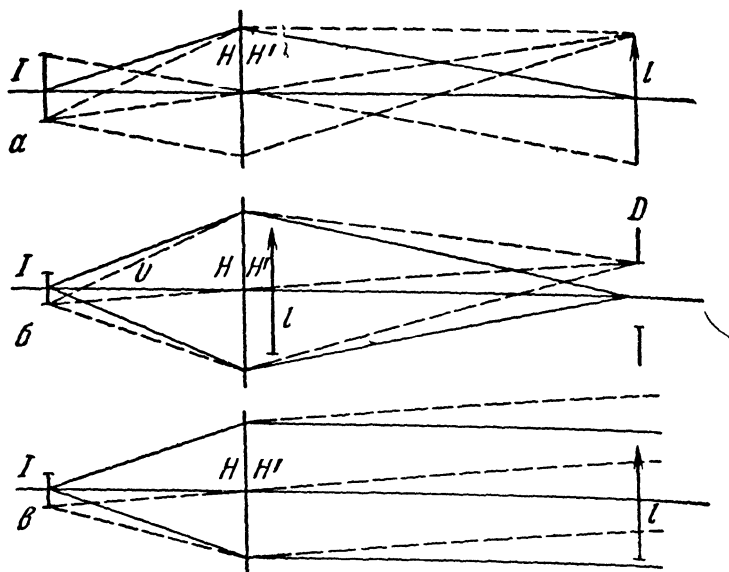


Рис. 107. Схемы освещения конденсором HH' предмета I , I — источник света

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

источника света совмещается с самим предметом. Примерами такого освещения являются кинопроекторные аппараты и спектральные приборы.

2. Конденсор HH' проектирует изображение источника света во входной зрачок объектива последующей оптической системы (рис. 107, б). В этом случае освещенный предмет располагается как можно ближе к конденсору. Примерами такого освещения являются диапроекторы, трансформаторы, спектральные приборы. Этот вид освещения является наиболее распространенным.

3. Конденсор HH' проектирует изображение источника света в бесконечность (рис. 107, в). Примерами такого освещения являются прожекторы и коллиматоры фотореле.

Оптическими характеристиками конденсора являются: 1) фокусное расстояние, f' , 2) линейное увеличение, β , 3) относительное отверстие, $1:n$, 4) угол охвата, $2u$, 5) угол сходимости, ω .

Углом охвата в пространстве предметов называется плоский угол в главном сечении, соответствующий телесному углу охвата оптической системы. Этому углу соответствует двойной апертурный угол в пространстве предметов. Представим апертурный угол в виде выражения

$$\operatorname{tg} u = \frac{D}{2a},$$

в котором диаметр входного зрачка D выразим через диафрагменное число n по формуле (28,4), а передний отрезок a — через линейное увеличение по формуле (44,11). Тогда получим

$$\operatorname{tg} u = -\frac{\beta}{2(1-\beta)n}. \quad (57,1)$$

Чем больше угол охвата, тем больше светового потока использует ся от источника света.

Углом сходимости называется плоский угол в пространстве изображений, сопряженный с углом охвата. Иногда этот угол называют углом конденсора, так как его величина в некоторых случаях должна соответствовать угловому полю зрения проекционного объектива.

При освещении предмета по первой схеме, т. е. так, чтобы изображение источника света совмещалось с самим предметом, необходимо, чтобы источник света был достаточного размера. Необходимо, чтобы изображение источника света было несколько больше самого предмета. Очевидно, что точечные источники света непригодны. Здесь находят себе применение вольтова дуги и кинопроекторные лампы, имеющие световое тело накала в виде прямоугольной системы ряда нитей (например, электролампы К12, К15, К22).

Расположение изображения источника света в плоскости предмета или вблизи него вызывает сильный нагрев проектируе-

мого предмета Применение теплофильтров снижает нагрев, но не исключает его Вследствие этого становится невозможным применение таких систем освещения для рассматривания неподвижных негативов, диапозитивов, спектрограмм и т. п., так как нагрев испортит слой эмульсии В кинопроекторных аппаратах имеет место быстрое чередование кадров, поэтому отдельный кадр не успевает нагреться до опасного предела При освещении металлических щелей в приборах также нет опасности возгорания

При освещении по второй схеме необходимо, чтобы входной зрачок объектива также был полностью заполнен светом Для этого изображение светового тела источника света должно быть несколько больше диаметра входного зрачка объектива Здесь также невыгодно применять точечные источники света Однако возможно применять источники света, не имеющие сплошного тела накала, так как изображение светового тела источника света не совмещается с предметом и не мешает наблюдению

При освещении по третьей схеме выгодно применять точечные источники света Хотя идеального параллельного пучка лучей оптические системы и не образуют, но практически позволяют получить близкий к нему пучок лучей

Причиной неравномерности освещенности изображения является сферическая аберрация конденсора Из точки A (рис 108) выходит широкий пучок лучей После преломления в конденсоре лучи вследствие сферической аберрации не собираются в точке A' В результате этого образуется каустическая поверхность Этот недостаток наиболее ярко проявляется в одиночной линзе, однако и более сложные системы не свободны от него

Если теоретически последующую оптическую систему (объектив) надо было бы располагать так, чтобы ее световое отверстие совмещалось с A' , то на практике оно должно совпадать с плоскостью GG' в наиболее узком месте каустики Тогда через объектив проходит наибольшее количество лучей Но в этом случае луч BB' может быть задержан оправой линз объектива, а тогда точка предмета T не будет освещена, и в плоскости изображения будет наблюдаться неравномерность освещения Сферическая аберрация уменьшает угол сходимости лучей ω Для увеличения угла сходимости ω становится необходимым увеличивать число линз в конденсоре, вычисляя его на минимум сферической аберрации Число линз в сферических конденсорах доходит до 6

Однолинзовый конденсор. Одна простая линза применяется в виде конденсора, если сумма углов охвата и сходимости не превышает 45° При освещении какого либо предмета возникает два случая а) источник света расположен в бесконечности и б) источник света находится на конечном расстоянии от конденсора Первый случай практически соответствует освещению дневным светом или от электрического источника света, удаленного от конденсора на расстояние не менее 20 его фокусных расстояний

Выбор того или иного конденсора для практических целей со-

проводится рассмотрением структуры пучка лучей в меридиональной плоскости (рис. 108).

Если источник света расположен в бесконечности, то в качестве конденсора применяется плоско-выпуклая линза, обращенная выпуклостью к источнику света. Представление о сферической aberrации простых линз можем составить из следующих примеров конструкций конденсоров.

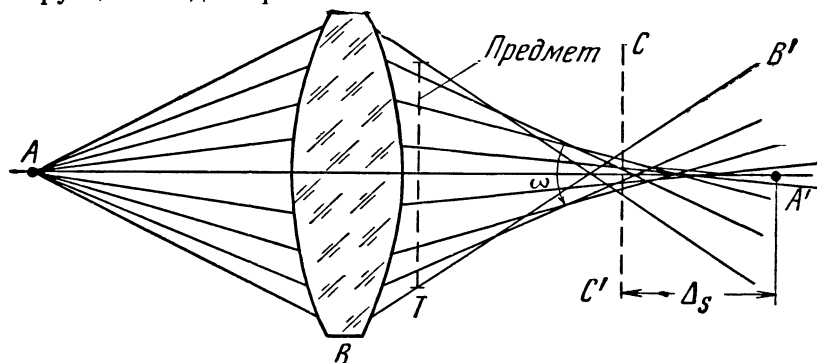


Рис. 108. Каустика конденсора, Δ_s — положение плоскости наилучшей наводки

I. Конденсор в виде плоско-выпуклой линзы (табл. 8) имеет конструктивные элементы: $r_1=14,22$ мм, $r_2=\infty$, $d=6$ мм, стекло БК10 с показателем преломления $n=1,5688$, диаметр 20 мм, $f'=25$ мм, $s_{f'}=21,17$ мм. Источник света расположен в бесконечности.

Таблица 8

h_1	n	Продольная сферическая aberrация $\delta s'$, мм	Диаметр кружка рассеяния δ' , мм	Положение плоскости наилучшей наводки Δ_s , мм	Диаметр каустики в плоскости наилучшей наводки, мм
3	4,20	-0,32	0,08	-0,24	0,02
4	3,10	-0,58	0,19	-0,42	0,05
5	2,50	-0,91	0,39	-0,68	0,10
6	2,10	-1,34	0,71	-1,00	0,19
7	1,80	-1,87	1,18	-1,43	0,28
8	1,56	-2,53	1,94	-2,00	0,40
9	1,40	-3,32	3,06	-2,55	0,70
10	1,25	-4,31	4,80	-3,35	1,10

Если конденсор проектирует световое тело источника света в масштабе 1:1 ($\beta=-1$), то наилучшей формой линзы является двояковыпуклая с равными радиусами.

$-\text{tg } u_1$	n	$\delta s', \text{ мм}$	$\delta', \text{ мм}$	$\Delta s, \text{ мм}$	Диаметр каустики в плоскости наилучшей наводки, мм
3/50	4,20	-1,31	0,16	-0,97	0,04
4/50	3,10	-2,33	0,39	-1,66	0,11
5/50	2,50	-3,63	0,78	-2,78	0,18
6/50	2,10	-5,22	1,37	-3,97	0,33
7/50	1,80	-7,10	2,31	-5,51	0,52
8/50	1,56	-9,28	3,64	-7,13	0,82
9/50	1,40	-11,78	5,53	-9,27	1,20
10/50	1,25	-14,63	8,25	-11,60	1,70

II. Конструктивные данные конденсора (табл. 9): $r_1=27,3 \text{ мм}$, $r_2=-27,3 \text{ мм}$, $d=6 \text{ мм}$, стекло БК10 с $n=1,5688$, диаметр 20 мм, $f'=25 \text{ мм}$, $s_F'=23 \text{ мм}$. Источник света расположен на двойном фокусном расстоянии от конденсора ($s_1=-48 \text{ мм}$).

Если конденсор применяется при различных масштабах проекции, то его форма должна удовлетворять условию минимума сферической aberrации.

Из теории aberrаций 3-го порядка известна формула сферической aberrации (при $\alpha_1=\beta$, $\alpha_3=1$, $n_3=1$):

$$\delta s'_{III} = -\frac{1}{2} \text{tg}^2 u' \sum_{k=1}^{k=m} h_k P_k, \quad (57,2)$$

где

$$P_k = \left(\frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^3 (\alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k). \quad (57,3)$$

Здесь α — угол парааксиального луча с оптической осью; h_k — высоты того же луча, определяемые по формуле (27,4); μ — величина, обратная показателю преломления; u' — апертурный угол в пространстве изображения; $\delta s'_{III}=0$ при условии $\sum h P=0$.

Составив суммы $\sum_{k=1}^{k=2} P = p_1 + p_2$ (при $d=0$ и $h_1 = h_2 = 1$) и продифференцировав, получим выражение для α_2 , удовлетворяющее условию минимума сферической aberrации при заданном линейном увеличении β :

$$\alpha_2 = \frac{(2 + \mu)(\beta + 1)}{2(1 + 2\mu)}. \quad (57,4)$$

Двухлинзовый конденсор применяется, если сумма углов охвата и сходимости достигает 60° . Так как плоско-выпуклая линза имеет сферическую aberrацию, близкую к минимальной, и удобна для изготовления, то одинаковые линзы такой формы нашли себе повсеместное применение в двухлинзовых конденсорах.

Оптический расчет такого конденсора прост, так как линзы обращены выпуклостями друг к другу, у всех линз главные плоскости совпадают с вершинами, а при их соприкосновении, согласно формуле (28,5) при $\Phi_1 = \Phi_2$, получаем общую оптическую силу конденсора $\Phi = 2\Phi_1$. Диаметры линз делаются одинаковыми. Такие конденсоры применяются при линейном увеличении, близком к $\beta = -1$, и невыгодны при положении источника света в бесконечности.

III. Конструктивные данные конденсора (табл. 10): $r_1 = \infty$, $r_2 = -14,22$ мм, $r_3 = 14,22$ мм, $r_4 = \infty$, $d_1 = d_3 = 6$ мм, $d_2 = 0$, стекло БК10 с $n = 1,5688$, диаметр 20 мм, $f' = 12,5$ мм, $s_F' = 8,67$ мм. Источник света расположен на двойном фокусном расстоянии конденсора ($\beta = -1$).

Таблица 10

$ig u_i$	n	$\delta s'$ мм	δ' мм	Δ_s мм	Диаметр каустики в плоскости наилучшей наводки, мм
-0,10	2,50	-0,435	0,09	-0,31	0,025
-0,15	1,67	-0,965	0,30	-0,74	0,070
-0,20	1,25	-1,683	0,72	-1,28	0,170
-0,25	1,00	-2,571	1,43	-2,00	0,320

Трехлинзовые конденсоры позволяют получить сумму углов охвата и сходимости до 100° . Для абберационного расчета таких и более сложных конденсоров можно использовать условие минимума сферической aberrации одиночной линзы.

Допустим, что оптическая система конденсора состоит из m одиночных линз, а каждая линза равномерно влияет на оптическую силу конденсора и вносит минимум сферической aberrации. Тогда в каждом воздушном промежутке, учитывая $\alpha_1 = \beta$ и $\alpha_{\text{посл}} = 1$, углы параксиального луча с оптической осью (нечетные α) определяются выражением

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} + \frac{\alpha_{\text{посл}} - \alpha_1}{m}, \quad (57,5)$$

где t — порядковый номер линзы: 1, 2, 3, 4 и т. д.

Четный угол α_{2t} в каждой линзе вычисляется из условия минимума сферической aberrации, и тогда в каждой линзе углы нулевого луча (четные α) должны удовлетворять условию

$$\alpha_{2t} = \frac{(2 + \mu)(\alpha_{2t-1} + \alpha_{2t+1})}{2(1 + 2\mu)}. \quad (57,6)$$

Так, например, для конденсоров, имеющих $\beta = -1$, изготовленных из стекла с $n = 1,5688$ (БК10), значения углов α приведены в табл. 11. Толщины линз выбираются исходя из соображений

апертуры конденсора и фокусного расстояния, а воздушные промежутки близки к нулю (например, $d=0,1$ мм).

Таблица 11

Конденсор	Однолинзовый	Двухлинзовый	Трехлинзовый	Четырехлинзовый
α_1	—1	—1	—1	—1
α_2	0	—0,5797	—0,7729	—0,8695
α_3	1	0	—0,3333	—0,5
α_4	—	0,5797	0	—0,2898
α_5	—	1	0,3333	0
α_6	—	—	0,7729	0,2898
α_7	—	—	1	0,5
α_8	—	—	—	0,8695
α_9	—	—	—	1

Если же оптическая система применяется как следящий объектив или, например, в качестве положительного компонента афокальной насадки к оптическому квантовому генератору, т. е. $\alpha_1=0$, то для линз с той же маркой стекла БК10 получаем значения углов α , приведенные в табл. 12.

Таблица 12

α	Однолинзовый	Двухлинзовый	Трехлинзовый	Четырехлинзовый
α_1	0	0	0	0
α_2	0,57969	0,289845	0,19323	0,14492
α_3	1	0,5	0,33333	0,25
α_4	—	0,869535	0,57969	0,43477
α_5	—	1	0,66667	0,5
α_6	—	—	0,96615	0,72461
α_7	—	—	1	0,75
α_8	—	—	—	1,01446
α_9	—	—	—	1

Наилучших результатов в части исправления сферической аберрации конденсоров и простоте конструкции можно добиться, применяя несферические поверхности. В последнем случае конденсор из двух плоско-выпуклых линз, имеющих несферические поверхности, позволяет получить при $\beta=-1$ сумму углов охвата и сходимости в 240° .

Трехлинзовые конденсоры особой конструкции (рис. 109) применяются для освещения щелей в спектральных приборах. Назначение конденсора заключается в том, чтобы осветить щель высотой в несколько миллиметров. В рабочем состоянии ширина щели достигает нескольких тысячных или сотых долей миллиметра. Для достижения равномерной освещенности необходимо, чтобы конденсор проектировал изображение источника света во входной зра-

чок объектива коллиматора спектрального прибора. Иногда необходимо для освещения щели выделить определенные участки светового тела источника света. Источник света проектируется конденсорной линзой K_1 в отверстие второй линзы K_2 , выполняющей роль коллектива. Третья конденсорная линза K_3 проектирует изображение источника света во входной зрачок объектива. Осевой пучок лучей показан сплошными линиями, а наклонный — пунк-

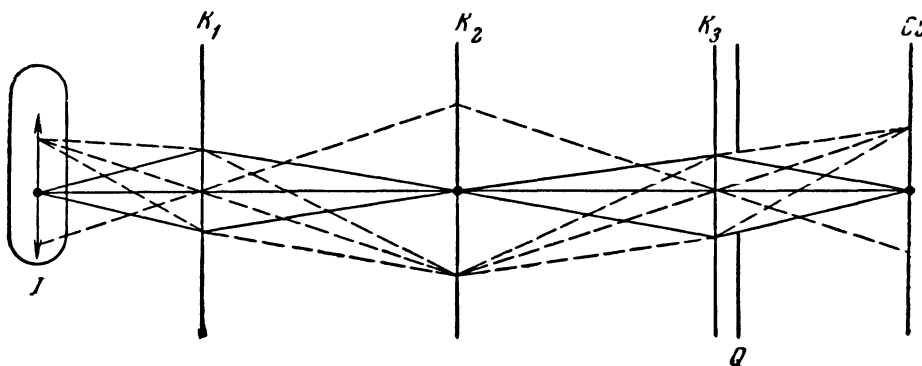


Рис. 109. Трехлинзовый конденсор спектрографа: K_1, K_2, K_3 — конденсорные линзы; I — источник света; Q — щель

тирными. Вследствие такой конструкции осветителя создается промежуточное изображение источника света в плоскости линзы K_2 . Если вплотную к линзе K_2 установить диафрагму, то возникнет возможность выделения желаемых участков светящегося тела.

В качестве осветительных систем применяются и зеркала. Среди зеркальных систем различают: 1) сферическую отрицательную поверхность, 2) поверхность параболоида вращения, 3) поверхность эллипсоида вращения, 4) сложные системы из сферических поверхностей.

Простая отражательная сферическая поверхность имеет ограниченное применение вследствие значительной сферической аберрации. Зеркало применяется для более полного использования светового потока источника света. Такое зеркало по отношению к оптическому прибору или освещаемому предмету устанавливается сзади источника света. Источник света располагается в центре кривизны этого зеркала. Зеркалу дают небольшой наклон, и лучи света, отразившись от него, минуя световое тело источника света, проходят далее, освещая рассматриваемый предмет. Примером такого применения является зеркало в осветительном устройстве кинопередвижки.

В оптических приборах часто применяют поверхности 2-го порядка. Поверхность параболоида вращения позволяет собрать в точку лучи, идущие параллельно друг другу, если они идут параллельно оси. Следовательно, если источник света разместить в фо-

кусе параболы, то поверхность параболоида вращения будет образовывать параллельный пучок. Этот принцип широко применяется в прожекторах. Поверхность эллипсоида вращения позволяет собирать в одну точку, в один фокус лучи, если они вышли из другой точки, другого фокуса, отсюда следует, что если поместить источник света в одном фокусе эллипса, а входной зрачок объектива — в другом, то возможно равномерно осветить предмет, который должен проектироваться этим объективом. Оптическая схема подобной системы освещения показана на рис. 110. Она широко применяется в фотограмметрических приборах — трансформаторах и уменьшителях, а также в кинопроекторах.

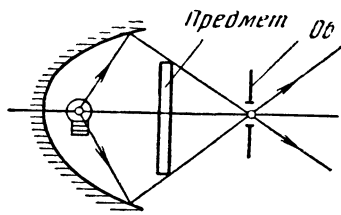


Рис. 110 Зеркальная осветительная система

Сложные зеркальные системы из двух сферических поверхностей (см. рис. 104) применяются для освещения экрана осциллоскопов, например, ультрафиолетовым светом, при некоторых специальных наблюдениях.

§ 58. ПРОЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Оптические приборы, дающие изображения на экране, называются *проекторными*. К числу таких приборов относятся: кинопроекторный аппарат, эпидиаскоп, большой проектор и др.

В зависимости от характера проектируемого предмета все проекционные системы разделяются на два вида: *эпископические* и *диаскопические*. Если предмет непрозрачен, то изображение образуется лучами света, отраженными от предмета. Такой вид проекции называется *эпископической*, или проекцией в отраженных лучах света. Если предмет прозрачен, то изображение образуется лучами света, проходящими сквозь предмет. Такой вид проекции называется *диаскопической*, или проекцией в проходящих лучах света.

Оптическая схема любой проекционной системы состоит из двух частей: *осветительной* и *оптической*. Осветительная часть включает в себя источники света, конденсоры и зеркала, назначение которых заключается в наилучшем освещении того или иного предмета. Его характеристики должны соответствовать характеристикам оптической части прибора. Оптическая часть большей частью представляет собой проекционный объектив. В сложных проекционных приборах, требующих изменения направления пучков лучей, применяются, кроме того, призмы и зеркала, а в особых случаях и дополнительные объективы.

Схема эпископа показана на рис. 111. Прибор имеет вид шара с плоским основанием, к которому снизу прижимают проектируемый предмет (чертеж, текст, картинку), и круглым вырезом в верх-