

## 1.7. ОТСЧЕТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Цель лекции:** изучение принципов работы отсчетных измерительных устройств.

### 1.7.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАРКИ

Задачей отсчетных оптических устройств является сопоставление измеряемого объекта с эталоном, определение различия между этим объектом и эталоном. Во всех отсчетных устройствах происходит совмещение изображения с измерительной маркой или совмещение двух изображений друг с другом.

Простейшей измерительной маркой является одиночный штрих, расположенный в плоскости изображения измеряемого объекта; более совершенной измерительной маркой является перекрестие двух штрихов или два параллельных штриха с небольшим расстоянием между ними – биссектор. В тех случаях, когда наблюдаемым объектом является изображение штрихов какой-либо шкалы, целесообразно использовать биссектор.

Картины поля зрения с различными видами измерительных марок представлены на рис. 1.63, *а, б, в*. Ошибка совмещения одиночного штриха ограничивается разрешающей способностью глаза и составляет около  $1'$ ; ошибка совмещения при использовании биссектора существенно меньше – порядка  $10''$  и определяется нониальной остротой зрения.

При стереоскопическом наблюдении в качестве измерительной марки используют баллончик, острие которого подводят к измеряемой точке изображения (рис. 1.63, *г*).

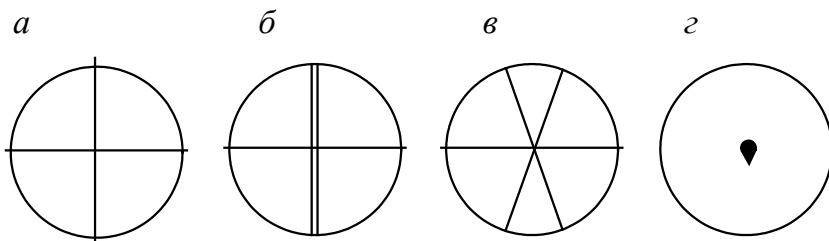


Рис. 1.63. Картины поля зрения оптических отсчетных устройств

Определение расхождения между размерами измеряемого объекта и эталона осуществляется путем перемещения измерительной марки относительно изображения измеряемого объекта или, наоборот, путем перемещения изображения объекта относительно марки.

### 1.7.2. ШКАЛОВЫЕ ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Нониус и верньер.** Эти устройства предназначены для отсчетов по линейным или круговым шкалам. Эталонные шкалы, линейные и угловые (круговые), имеют значительное расстояние между штрихами. Цена деления нониусной шкалы, стыкующейся с эталонной, меньше цены деления основной шкалы и выбирается таким образом, чтобы  $N$  делений нониуса соответствовали бы  $N - 1$  делениям эталонной  $i$ -шкалы. Тогда, если начальный и конечный штрихи не будут совмещены со штрихами основной шкалы, то совмещение  $k$ -го штриха нониуса с соответствующим штрихом основной шкалы определит расстояние до начального штриха нониусной шкалы от ближайшего штриха эталонной шкалы, равное:

$$x = \frac{k}{N} a, \quad (1.20)$$

где:  $a$  – цена деления эталонной шкалы.

Таким образом, нониальное отсчетное устройство позволяет осуществлять разделение интервала эталонной шкалы соответственно числу делений нониуса. Модификацией нониального устройства (верньер) является отсчетное устройство с несколькими параллельными отсчетными шкалами, сдвинутыми относительно друг друга на доли деления основной шкалы, с ценой деления, равной цене деления основной шкалы.

**Трансверсальный масштаб.** Вместо сдвига параллельных отсчетных шкал иногда используют широкую наклонную шкалу, угол наклона штрихов которой определяется отношением расстояния между делениями основной шкалы к расстоянию между делениями отсчетной шкалы. Такое устройство носит название трансверсального масштаба.

**Муар-микрометр.** Он состоит из двух перекрывающихся друг друга шкал с одинаковыми по ширине прозрачными и непрозрачными полосами, но с различным шагом, как это показано на рис. 1.64.

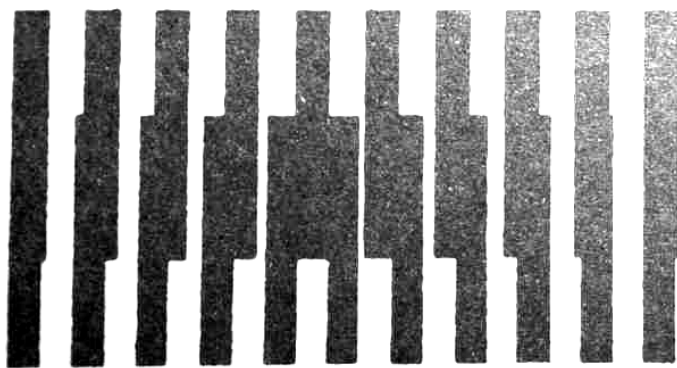


Рис. 1.64. Шкалы муар-микрометра

Если  $N - 1$  делениям основной шкалы соответствует  $N$  делений нониальной шкалы, то в зоне перекрытия этих шкал произойдет некоторое изменение ширины светлого промежутка, начиная от наибольшей возможной ширины до полного перекрытия светлых промежутков шкал темными. Смещение одной из этих шкал относительно другой на  $1/N$  интервала будет вызывать смещение самой широкой (или самой темной) полосы на целый интервал.

Делая у таких шкал темные полосы более широкими, чем светлые, можно уменьшать число наблюдаемых светлых полос.

### 1.7.3. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МИКРОСКОПОВ

Исследуемый под микроскопом объект должен быть освещен достаточно интенсивно и равномерно по полю. Из всех известных методов освещения наиболее рациональным является метод Кёллера, который находит широкое применение и в других оптических приборах. Принципиальная оптическая схема освещения по Кёллеру представлена на рис. 1.65. Осветитель состоит из коллектора ( $H_1H_1'$ ) и конденсора ( $H_2H_2'$ ). Вблизи коллектора располагается ирисовая полевая диафрагма ПД, которая конденсором проектируется в плоскость объекта. Источник излучения проектируется коллектором в плоскость апертурной диафрагмы АД, расположенной в передней фокальной плоскости конденсора. Конденсором источник света проецируется на бесконечность. Достоинствами осветительной системы по Кёллеру являются равномерное освещение объекта, возможность регулировки освещенности (числовой апертуры конденсора) и освещаемого поля объекта, обеспечение телецентрического хода лучей. В качестве коллекторов в зависимости от оптических характеристик используются одно-, двух- или трехлинзовые системы. Иногда для упрощения конструкций применяют асферические поверхности, обычно параболоидальные. В качестве конденсоров используются системы такие же, как и в других осветительных системах.

При абберрационном расчете коллекторов и конденсоров основное внимание уделяется исправлению сферической абберрации в ряде случаев хроматизма положения и комы.

Однолинзовые конденсоры со сферическими поверхностями применяют с объективами микроскопов с числовой апертурой до 0,3.

Для освещения объектов, исследуемых под большим увеличением, используют высокоапертурные иммерсионные конденсоры, например двухлинзовый конденсор с  $A = 1,2$ . Однако принцип Кёллера здесь осуществляется приближенно из-за большой сферической абберрации. Трехлинзовый иммерсионный конденсор с  $A = 1,4$  отличается от двухлинзового наличием апланатического мениска. Двухлинзовые безиммерсионные конденсоры, неахроматизованные, с

одной параболической поверхностью часто применяются в поляризационных микроскопах.

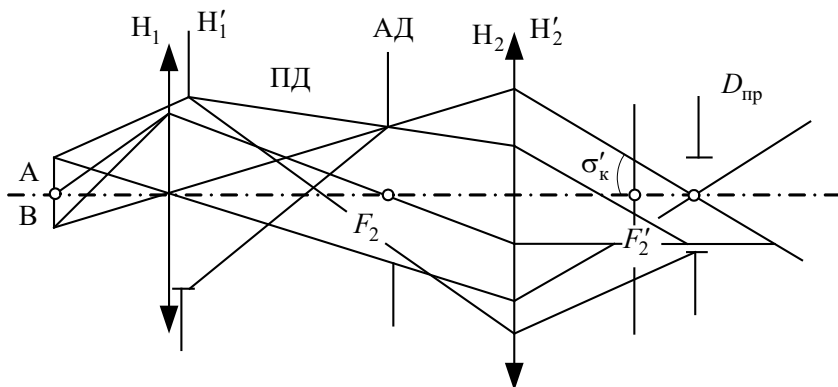


Рис. 1.65. Принципиальная схема осветительной системы по Кёллеру

Ахроматические апланатические иммерсионные конденсоры по коррекции и оптической схеме приближаются к ахроматическим объективам. Для столика Федорова применяют конденсоры с большим рабочим расстоянием. Панкратический конденсор позволяет плавно изменять и устанавливать апертуру конденсора в точном соответствии с апертурой объектива. Для темного поля используются кардиоид-конденсоры. Иногда с целью упрощения кардиоидную поверхность заменяют сферической. Метод темного поля в отраженном свете осуществляется путем освещения объектива сверху с помощью кольцевого зеркала, расположенного над объективом, и эпиконденсора с параболической отражающей поверхностью.

#### 1.7.4. ПРОЖЕКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Прожекторы являются самостоятельными осветительными системами, предназначенными для освещения удаленных поверхностей и для оптической сигнализации. Прожектор состоит из источника света, лучи от которого с помощью оптической системы собираются и направляются в пределах сравнительно небольшого телесного угла.

Основными оптическими характеристиками прожекторов являются сила света, коэффициент усиления, угол рассеяния, дистанция оформления пучка и угол охвата.

Принципиальная оптическая схема прожектора представлена на рис. 1.66. Источник света располагается в фокальной плоскости.

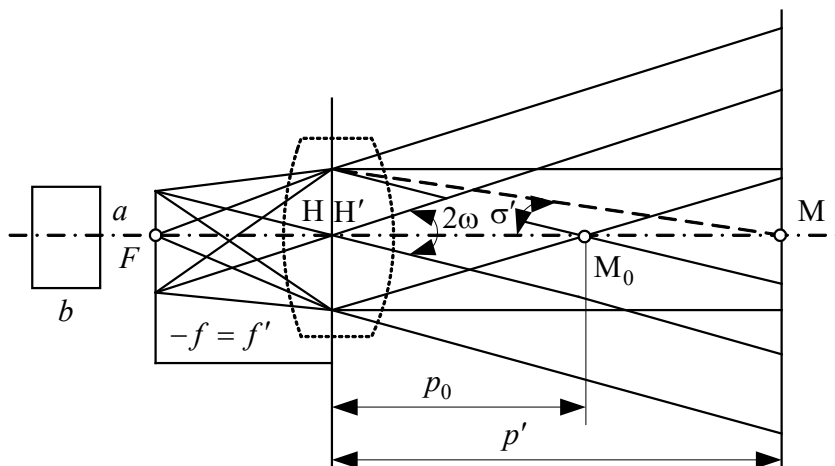


Рис. 1.66. Принципиальная оптическая схема прожектора

Угол расходимости определяется из выражения:

$$2\omega = \frac{D_u}{f'}, \quad (1.21)$$

где  $D_u$  – диаметр источника света;  $f'$  – фокусное расстояние.

Угол рассеяния для точечного источника:

$$\omega = \frac{\lambda}{D}, \quad (1.22)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $D$  – размер светового тела источника света.

Если прожектор освещает предметы на расстоянии  $p' > p_0$ , где  $p_0$  – среднее расстояние освещенности, то освещенность этих предметов определяется по формуле

$$p_0 = \frac{D}{2 \tan \omega} = \frac{D}{D_u} f'. \quad (1.23)$$

Дистанция оформления пучка:

$$E' = \tau \pi L \sin^2 \sigma = \frac{\tau L s_{np}}{p'^2}, \quad (1.24)$$

где  $s_{np}$  – площадь отверстия прожектора;  $L$  – осевая сила света прожектора;  $\tau$  – коэффициент пропускания оптической системы;  $\sigma$  – апертурный угол прожектора.

Под коэффициентом усиления понимают отношение освещенности, получаемой с помощью прожектора, к освещенности, непосредственно получаемой от одного источника света:

$$k_{np} = \frac{E_{np}}{E_u} = \frac{I_{np}}{I_u} = \frac{\tau s_{np}}{s_u}, \quad (1.25)$$

где  $I_{np}$  – сила света прожектора;  $I_u$  – сила света источника;  $E_{np}$  и  $E_u$  – дистанции оформления пучка прожектора и источника света соответственно.

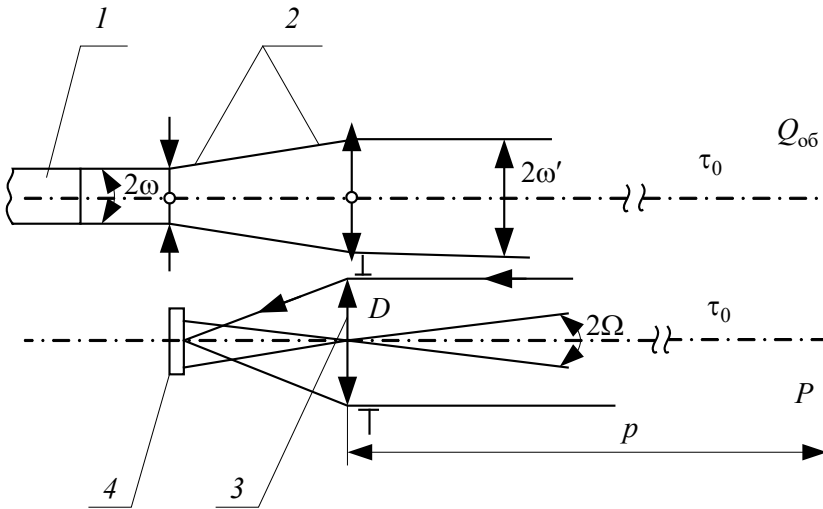
### 1.7.5. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛОКАЦИИ С ЛАЗЕРОМ

Лазер с афокальной насадкой применяют для освещения удаленных объектов в дальномерах: локаторах и т. д. Оптическая система локатора (рис. 1.67) содержит передающую часть, состоящую из лазера 1 и афокальной насадки 2, и принимающую часть, содержащую объектив 3 и фотоприемник 4.

Диаметр освещаемого пятна  $d_n$  на объекте равен:

$$d_n = 2\omega'p, \quad (1.26)$$

где  $2\omega'$  – угол расходимости лазера;  $p$  – расстояние до объекта.



**Рис. 1.67.** Принципиальная оптическая схема лазерного локатора: 1 – лазер; 2 – афокальная насадка; 3 – принимающая часть, содержащая объектив; 4 – фотоприемник

Энергетическая освещенность объекта вычисляется по формуле

$$E_g = \frac{\tau_a I_g}{p^2} \cos \varepsilon, \quad (1.27)$$

где:  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $p$  – расстояние до объекта;  $I_g$  – сила света объекта. Энергетическая яркость и сила света объекта определяются из выражений:

$$L_g = \frac{\sigma E_g}{\pi}; \quad I'_g = L_g Q_{об} \cos \varepsilon, \quad (1.28)$$

где:  $Q_{об}$  – энергия излучения объекта:

$$Q_{об} = \frac{\pi d_n^2}{4};$$

где:  $d_n$  – площадь поверхности.

Поток излучения, попадающего в зрачок объектива, определяется как:

$$\Phi'_e = E'_e Q, \quad (1.29)$$

где:  $E'_e$  – дистанция оформления светового пучка.

Из условия получения эквивалентного увеличения  $\Gamma = 1$  определим  $n_2$ :

$$\Gamma = \Gamma_W \Gamma_T = 1 = \frac{n_W n_4}{n_2}; \quad n_2 = n_4 n_W, \quad (1.30)$$

где:  $\Gamma_W$  и  $\Gamma_T$  – эквивалентное увеличение для углового увеличения и видимое увеличение телескопической системы;  $n_W$  и  $n_4$  – коэффициент преломления для углового увеличения и коэффициент преломления оптического компонента.

В случае сдвоенных телескопических систем находим:

$$\Gamma = \Gamma_W \Gamma_T^2 = 1 = \left(\frac{n_4}{n_2}\right)^2 n_W; \quad n_2 = n_4 \sqrt{n_W}. \quad (1.31)$$

При выполнении условий (1.30) и (1.31) происходит полная взаимная компенсация дисторсии телеконцентрической системы и дисторсии плоскости раздела водной и воздушной сред. Результатом является исправление дисторсии по всему полю зрения.

### ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ

Вопрос 1	Что является задачей отсчетных оптических устройств?
Ответы:	
1	Задачей отсчетных оптических устройств является сопоставление измеряемого объекта с эталоном, определение различия между этим объектом и эталоном
2	Задачей отсчетных оптических устройств является определение количество световой энергии, прошедшей через оптическую систему
3	Задачей отсчетных оптических устройств является определение светосилы эталонной оптической системы
Вопрос 2	Какова разрешающая способность глаза в угловых минутах?
Ответы:	
1	Разрешающая способность глаза составляет одну угловую минуту
2	Разрешающая способность глаза составляет 60 угловых минут
3	Разрешающая способность глаза составляет 10 угловых минут
Вопрос 3	Для чего предназначены устройства нониус и верньер?
Ответы:	
1	Эти устройства предназначены для отсчетов по линейным или круговым шкалам
2	Эти устройства предназначены для настройки оптической си-

	стемы на резкость изображения
3	Эти устройства предназначены для цветовой фильтрации изображения
Вопрос 4	Какое устройство носит название трансверсального масштаба?
Ответы:	
1	Устройство, в котором используют широкую наклонную шкалу, угол наклона штрихов которой определяется отношением расстояния между делениями основной шкалы к расстоянию между делениями отсчетной шкалы
2	Устройство, в котором используют синусоидальную шкалу, в которой длина штрихов определяется амплитудой синусоиды
3	Устройство, в котором используют сетчатую шкалу, позволяющую отсчитывать масштаб в трех измерениях
Вопрос 5	Из каких шкал состоит Муар-микроскоп
Ответы:	
1	Он состоит из двух перекрывающихся друг друга шкал с одинаковыми по ширине прозрачными и непрозрачными полосами, но с различным шагом
2	Он состоит из трех шкал с одинаковыми по ширине полосами и с одинаковым шагом
3	Он состоит из трех перекрывающихся друг друга шкал с различными по ширине непрозрачными полосами, но с одинаковым шагом
Вопрос 6	Что является основными оптическими характеристиками прожекторов?
Ответы:	
1	Сила света, коэффициент усиления, угол рассеяния, дистанция оформления пучка и угол охвата
2	Диаметр прожектора, коэффициент отражения отражателя, дальность освещения
3	Диаметр отражателя, коэффициент пропускания защитного стекла, потребляемая мощность
Вопрос 7	Для чего применяют лазер с афокальной насадкой?
Ответы:	
1	Для освещения удаленных объектов в дальномерах, локаторах и т. д.
2	Для фокусировки излучения в точку в лазерных сварочных аппаратах
3	Для получения иммерсионного изображения