

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

Оптические инструменты

Самара 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

Оптические инструменты
методические указания к практическим работам

Самара 2017

УДК 535

Составители: П.Е.Тимченко, Е.В.Тимченко

Рецензент: к.т.н. Ендуткина Е. А.

Оптические инструменты: метод. указ. / сост. П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко – Самара: Изд-во Самарский университет, 2017. – 52 с: ил.

В методических указаниях к практическим работам содержится информация об оптических инструментах, принцип действия которых основывается на законах геометрической оптики; а также задачи для практических занятий.

Методические указания предназначены для студентов дневного отделения Самарского университета, обучающихся по специальности 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Прикладная оптика» и по направлениям подготовки 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», 03.04.01 «Прикладные математика и физика» по дисциплине «Микроскопия»

© Самарский университет, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Глаз как оптический инструмент	5
1.1. Теория	5
1.2 Практические задания	10
Тема 2. Фотоаппарат, как оптический инструмент	11
2.1 Теоретические основы	11
2.1.1 Принципы работы фотоаппарата	11
2.1.2 Фотографическая эмульсия	12
2.1.3. Сенситометрия	14
2.1.4. Разрешающая способность (сила)	17
2.1.5 Глубина резкости	18
2.1.6 Разрешающая способность фотоаппарата	20
2.2 Задание по практической работе	22
Тема 3. Оптические системы	24
3.1 Теория	24
3.1.1 Лупа	24
3.1.2 Микроскоп	25
3.1.4 Телескоп	40
3.1.5 Зрительные трубы	45
3.1.6 Разрешающая сила оптических инструментов	47
3.2 Практика	47
Список использованных источников	50

Тема1. Глаз как оптический инструмент

1.1. Теория

Схема оптической системы человеческого глаза, показанная на рис. 1.1. Глаз можно представить в виде сферической прозрачной роговицы, за которой находится линза, или хрусталик. Внутренность глаза заполнена жидкостью с показателем преломления, равным 1,33, как у воды. Показатель преломления хрусталика несколько выше, 1,4; глаз само фокусируется при помощи изменений оптической силы хрусталика, вызванных произвольными сокращениями мышц.



Рис. 1.1. Оптическая система человеческого глаза

Главные точки глаза почти совпадают и находятся примерно на расстоянии 2 мм позади роговицы и 22 мм от фоточувствительной поверхности изображения, называемой сетчаткой. Кроме того, глаз имеет переменную апертуру — располагающуюся перед хрусталиком радужную оболочку, которая регулирует интенсивность света, падающего на сетчатку, при помощи произвольного сокращения мышц.

В физиологической оптике обычно говорят не о фокусном расстоянии линзы, а об ее оптической силе, которая определяется как

$$P = \frac{n'}{f'} = \frac{n}{f}$$

где P измеряется в диоптриях (дптр), а f' — в метрах. Использование оптической силы более удобно, потому что оптическая сила системы расположенных вплотную (или почти вплотную) тонких линз дается

$$\frac{1}{f'_s} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} \quad (2.26)$$

суммой оптических сил отдельных линз, [см. $\frac{1}{f'_s} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}$ (2.27)].

Оптическая сила, роговицы нормального глаза равна 43 дптр, а хрусталика—17 дптр. Таким образом, полная оптическая сила глаза равна 60 дптр. Глаз фокусируется на близкорасположенных предметах, меняя оптическую силу хрусталика произвольным сокращением мышц. Этот процесс называется аккомодацией. С возрастом даже нормальный глаз теряет свою способность к аккомодации, и люди после сорока лет часто пользуются корректирующими линзами для чтения.

Ближайшее расстояние, на котором глаз фокусируется без напряжения, зависит от его максимальной аккомодации. Назовем это расстояние кратчайшим расстоянием отчетливого зрения, или ближней точкой d_r . Принято считать, что ближняя точка находится на расстоянии 25 см от глаза, что соответствует стандартному глазу — нормальному глазу сорокалетнего человека. В действительности для маленького ребенка ближняя точка может находиться на расстоянии, много меньшем нескольких сантиметров.

Кроме потери способности к аккомодации, называемой старческой дальнозоркостью, глаз может иметь оптическую систему, оптическая сила которой не соответствует размеру глазного яблока. Если оптическая сила слишком велика или глазное яблоко слишком велико, то глаз не может сфокусироваться на удаленных предметах; такое состояние называется миопией, или близорукостью. И наоборот, если оптическая система глаза недостаточно сильная, то говорят, что глаз имеет гиперметропию, или является дальнозорким. Старческую дальнозоркость иногда путают с просто дальнозоркостью — если дальнозоркие люди не могут четко сфокусироваться на бесконечности, люди со старческой дальнозоркостью, нормально фокусируясь на удаленных предметах, имеют относительно удаленную ближнюю точку.

Близорукий глаз корректируется с помощью рассеивающей (отрицательной) линзы, а дальнозоркий — с помощью собирающей (положительной) линзы. Глаз со старческой дальнозоркостью также

корректируется с помощью собирающей линзы, но эта линза предназначена для ближнего зрения: многие люди со старческой дальнозоркостью нуждаются в коррекции только для чтения или работы на близком расстоянии.

Те, у кого одновременно имеется миопия и старческая близорукость, могут носить бифокальные или даже трифокальные

очки. Это линзы, которые разделены на две (или три) области с различной оптической силой; обычно верхняя часть линзы корректирует глаз на дальнее зрение, а нижняя часть, несколько менее отрицательная, корректирует ближнее зрение. Аналогично те, кто имеет обычную дальнозоркость и старческую дальнозоркость, также могут носить бифокальные или трифокальные очки.

И, наконец, преломляющие поверхности астигматического глаза являются слегка эллипсоидальными, а не сферическими. Астигматизм корректируется комбинацией цилиндрических и сферических линз.

Пример 1.1. Покажите, что уравнение линзы для глаза может быть записано в виде

$$\frac{1}{l} = -(P_a + P_c), \quad (3.1)$$

где P_a — ширина (объем) аккомодации, или величина, на которую увеличивается оптическая сила линзы глаза, а P_c — погрешность рефракции, или величина, на которую глаз сильнее или слабее. (Если человек близорук на +4дптр, то это и будет значение P_c .)

Сокращения радужной оболочки помогают глазу адаптироваться (приспосабливаться) к свету различной интенсивности. Входные отверстия типа радужной оболочки, которые ограничивают количество света, поступающего в систему, называются апертурными диафрагмами. Радужная оболочка и зрачок глаза, являются его апертурной диафрагмой. Диаметр зрачка изменяется от 2 мм при ярком свете до 8 мм — в темноте. Для многих целей его можно положить равным 5 мм.

Сетчатка состоит из маленьких светочувствительных приемников, называемых палочками и колбочками. Колбочки ответственны за цветное зрение и работают при высоких интенсивностях падающего излучения. Палочки берут на себя работу сетчатки при низкой интенсивности и не могут различать цвета. (Это одна из причин, почему предметы кажутся бесцветными при слабом освещении.) Глаз переключается с палочек на колбочки при помощи механизма, называемого нейронным подавлением,

который по сути отключает палочки. Таким образом, глаз может иметь динамический диапазон в один миллион к единице ($10^6 : 1$).

Область наилучшей остроты зрения называется желтым пятном или пятном. Оно расположено около оптической оси системы. Вблизи центра пятна имеется область, называемая центральной ямкой, или ямкой. В ямке вообще отсутствуют палочки и имеется большое количество колбочек, и острота зрения в этой части сетчатки очень высока. Когда глаз фиксируется на каком-нибудь участке предмета, он фокусирует этот участок на ямку. При удалении от ямки острота зрения резко падает. Читатель может это проверить, если сконцентрируется на центре какой-нибудь строки на этой странице и при этом попытается прочитать всю строку. Диаметр пятна составляет примерно 2 мм, а диаметр ямки — около 300 мкм.

Палочки в основном располагаются вне ямки, в тех местах сетчатки, где плотность колбочек мала. В самой ямке палочек очень мало, поэтому по ночам труднее хорошо видеть.

Колбочки в ямке плотно упакованы, при этом каждая колбочка слегка сжата в главных точках, менее чем на $0,15$ мрад ($0,5'$). Глаз может различить две точки только в том случае, когда расстояния между их изображениями равно размеру одной колбочки. Иначе обе точки будут восприниматься как одна. Поэтому в лучшем случае глаз может различать только точки, изображения которых в главных точках различаются примерно на $0,3$ мрад ($1'$). Для предмета, расположенного на расстоянии d_g , это соответствует пределу разрешения примерно $0,1$ мм. Острота зрения резко уменьшается вне ямки.

Предел разрешения, оцененный таким образом, очень близок к теоретическому пределу разрешения, рассчитанному с помощью

теории дифракции для зрачка диаметром 2 мм: он примерно равен диаметру зрачка при ярком солнечном свете. Если бы колбочки были упакованы не так плотно, то разрешение ухудшилось бы. С другой стороны, если бы колбочки были упакованы более плотно, то из-за дифракции свет от одной точки предмета падал бы на несколько колбочек, а не на одну. Результатом было бы неясное изображение, так как относительно малая доля света падала бы на любую отдельно взятую колбочку. В результате эволюции колбочки в ямке оказались упакованы почти оптимально. Если зрачок глаза больше 2 мм, то предел разрешения ухудшается из-за aberrаций. Предел углового разрешения для зрачка диаметром 6 мм составляет примерно $0,8$ мрад ($3'$).

Обычно считается, что видимая часть спектра — это длины волн от 400 до 700 нм, хотя глаз может в какой-то степени видеть и вне этого интервала. Зрение с помощью колбочек, называемое дневным, или приспособленным к свету зрением, наиболее чувствительно к зеленому свету, длина волны которого составляет примерно 550 нм. Относительная излучательная способность солнца на этой длине волны также максимальна. На рис. 1.2 показано медленное уменьшение относительной чувствительности колбочек V_λ практически до нуля при увеличении длины волны.

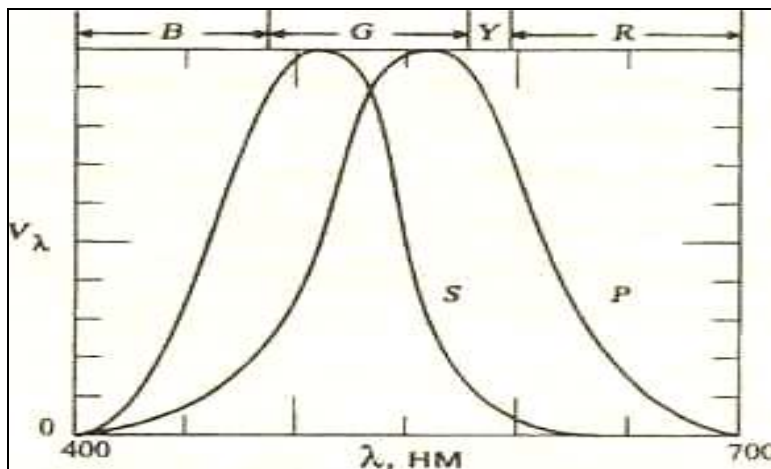


Рис. 1.2. Относительная чувствительность человеческого глаза: P — для дневного зрения, или приспособленного к свету зрения, S — для сумеречного зрения, или приспособленного к темноте зрения.

В сумерках мало прямого солнечного света, и мы видим только благодаря свету, рассеянному атмосферой. Этот свет голубой и соответственно палочки более чувствительны к голубому свету, чем колбочки. Это явление называется сумеречным, или приспособленным к темноте зрением: на рис. 1.2 также показана зависимость от длины волны относительной чувствительности для сумеречного зрения. Обе кривые нормированы на 1: действительно, палочки по сравнению с колбочками функционируют только при намного более низких интенсивностях.

1.2 Практические задания

1.1. Глаз имеет миопию 5 дптр и диапазон аккомодации 2 дптр. Найдите ближнюю и дальнюю точки глаза. Каковы будут эти точки, если миопия корректируется линзой -5 дптр? Нужны ли пациенту очки специально для чтения или, может быть, ему лучше носить бифокальные очки?

1.2. Близорукий ученый снял очки и сообщил, что он только что использовал лупу. Объясните эту странную фразу и найдите, какое угловое увеличение он получил, если оптическая сила его очков была —5 дптр. Вы можете допустить, что диапазон его аккомодации равен 4 дптр.

1.3. Используя в качестве начала отсчета его реальную ближнюю точку (не находящуюся на расстоянии 25 см), найдите угловое увеличение лупы, которую этот близорукий человек использовал. Насколько должно быть меньше фокусное расстояние линзы перед тем как близорукий человек использовал лупу с увеличением, существенно большим единицы?

Тема 2. Фотоаппарат, как оптический инструмент

2.1 Теоретические основы

2.1.2 Принципы работы фотоаппарата

Подобно глазу, фотоаппарат состоит из линзы, апертурной диафрагмы и светочувствительного экрана, в данном случае — *фотопленки*. В фотоаппарате, показанном на рис. 2.1, широкоугольный объектив помещен позади апертурной диафрагмы. Современные фотоаппараты почти всегда имеют более сложные линзы, а апертурная диафрагма помещается между двумя элементами. Апертурная диафрагма представляет собой *ирисовую диафрагму*, диаметр которой может меняться, и таким образом регулируется экспозиция пленки.



Рис.2.1 Оптическая схема фотоаппарата

При фотографировании протяженного объекта фотоаппарат не воспроизводит его целиком. В силу того, что фотопленка имеет ограниченные размеры, на ней можно видеть только те предметы, изображения которых попадают в некоторую ограниченную область. Эта область определяется прямоугольным отверстием, которое также служит держателем для пленки. Так как такое отверстие ограничивает *поле зрения* только теми предметами, которые попадают внутрь некоторого

угла (как они видны из апертурной диафрагмы), то оно называется *полевой диафрагмой*.

2.1.2 Фотографическая эмульсия

Фотопленка представляет собой тонкий слой светочувствительной *эмульсии*, помещенный на жесткой *основе*, или *подложке*, сделанной из стекла или более гибкого материала (рис. 2.2). На пленку с тыльной стороны обычно наносится *противореольный краситель* для уменьшения размытости изображения, вызванной рассеянным светом. Краситель обесцвечивается или смывается при обработке пленки.

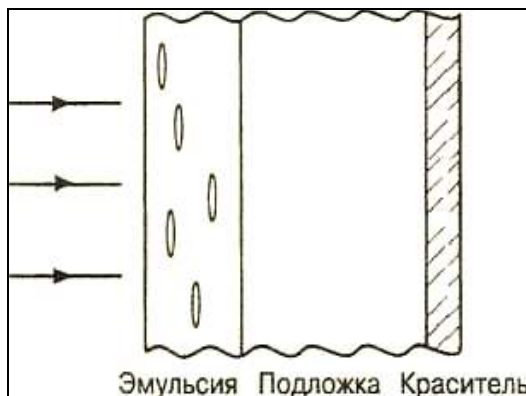


Рис. 2.2. Поперечное сечение типичной фотопленки или фотопластинки.

На самом деле термин «эмульсия» не очень сюда подходит, так как используемая смесь представляет собой взвесь крошечных *зерен галоидов серебра* в желатине. Эти зерна светочувствительны в том смысле, что при освещении светом они приобретают *способность проявляться*, причем зерна, не подверженные воздействию света, этим свойством почти не обладают. Еще не проявленное изображение, возникающее на пленке, называется *скрытым изображением*. Его невозможно обнаружить, не проявив пленку.

Проявление происходит, когда зерна погружают в *проявитель* — химический раствор, в котором из зерен галоидов серебра выделяется *металлическое серебро*. Из облученных зерен металлическое серебро выделяется значительно быстрее, чем из необлученных, и проявление этих зерен заканчивается значительно раньше, чем большинство необлученных зерен вступят в реакцию. Таким образом скрытое

изображение превращается в видимое, *серебряное изображение*. Это изображение имеет зернистую структуру, так как обычно зерно либо полностью превращается в серебро, либо не изменяется вообще, и, за исключением может быть только наиболее сильно облученных областей, между соседними проявленными зернами всегда имеются промежутки.

Чтобы изображение было устойчивым, непроявленные зерна должны быть химически удалены. После этого пленка перестает быть светочувствительной. Этот процесс называется *фиксацией*.

Таким образом, изображение составлено из металлического серебра, и проявленная пленка почти непрозрачна в местах наибольшего экспонирования и прозрачна, там где экспозиция была наименьшая. Многие современные пленки передают цвет непрерывно окрашенных предметов в виде оттенков серого. При этом изображение является негативным, потому что яркие участки предмета на пленке оказываются черными, а неяркие — белыми. Позитивное изображение обычно получается с помощью печати или увеличения, т.е. при фотографировании негатива на бумагу.

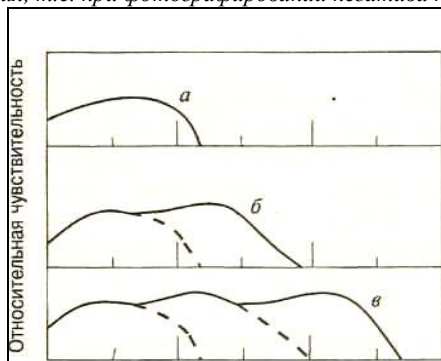


Рис.2.3 Относительная спектральная чувствительность фотографических эмульсий. а — галоид серебра, б — ортохроматическая пленка, в — панхроматическая пленка

Цветные слайды получают при помощи *прямого позитивного процесса*, в результате которого серебро удаляется, и перед фиксацией оставшиеся необлученные зерна проявляются либо при помощи освещения, либо химическими средствами.)

Как показано на рис. 2.3, сами по себе необработанные зерна галоидов серебра чувствительны только к излучению в синей и ультрафиолетовой частях спектра. Пленку можно заставить реагировать на излучение всей

видимой и ближней инфракрасной частей спектра, покрывая зерна серебра *сенситизирующими красителями*. *Ортохроматические* пленки чувствительны к зеленой части спектра. За их обработкой можно наблюдать при специальном красном освещении, называемом *безопасным*. Такие пленки часто используются при репродуцировании, когда чувствительность к различным цветам незначительна, а иногда и нежелательна. Большинство пленок, применяемых для цветной съемки, являются *панхроматическими* и чувствительны ко всей видимой области спектра. Можно создать пленки, которые будут чувствительны к инфракрасному свету и при этом сохранят свою способность реагировать на излучение с более короткими длинами волн.

2.1.3. Сенситометрия

Чувствительность пленки обычно выражается в логарифмических единицах. Это удобно по нескольким причинам. Во-первых, масса серебра на единицу площади в проявленном изображении связана с величиной логарифма прозрачности пленки. Во-вторых, характеристическая кривая, записанная в логарифмических единицах, имеет большую линейную часть. И, наконец, чувствительность человеческого глаза при ярком свете имеет приблизительно логарифмический характер.

Чтобы получить характеристическую кривую пленки, определим две величины — *оптическую плотность* D и *экспозицию* \mathcal{E} — количество света, падающее на данный участок пленки. Фотографы обычно записывают экспозицию в виде произведения *энергетической освещенности* или *освещенности* E (которую в прошлом часто называли интенсивностью) на *время экспозиции* t :

$$\mathcal{E} = Et. \quad (3.2)$$

Это определение основано на *законе взаимности*, который утверждает, что в широком диапазоне освещенностей и времен экспозиции определенной экспозиции соответствует определенная чувствительность. При предельно больших или малых экспозициях получается более низкая чувствительность, чем та, которую дает закон взаимности. Это явление называется *нарушением взаимности*.

Чувствительность пленки определяется при измерении ее оптической плотности после проявления. Если проявленная пленка пропускает долю T падающего на нее света, то ее *пропускание* будет равно T , а ее оптическая плотность будет определяться уравнением

$$D = -\lg T. \quad (3.3)$$

Знак минус служит только для того, чтобы сделать плотность D положительной в соответствии с идеей, — что чем темнее пленка, тем она плотнее. Часто плотность определяют в эквивалентной форме $D = \lg(1/T)$, где $1/T$ иногда называют *непрозрачностью*.

Как показано на рис. 2.4, характеристическую кривую получаем, находя зависимость D от $\log E$ [известную также как *кривая Хертера и Дрифилда (H&D-curve)*]. При очень малых экспозициях пленка почти прозрачна ($D \sim 0$). (В этом случае имеется некоторое количество «проявленных», но не подвергшихся освещению зерен, которые вносят вклад в оптическую плотность вуали.



Рис. 2.4. Зависимость D от $\log E$. Сплошная кривая — низкоконтрастная цветная пленка. Пунктирная кривая — более высококонтрастная копирующая (черно-белая) пленка.

Кроме того, поглощение света веществом основы приводит к малой оптической плотности основы.) После некоторого значения экспозиции плотность начинает возрастать с увеличением экспозиции. Это происходит в *нижней* части кривой, или в *области недодержек*. Еще большее увеличение экспозиции приводит к проявлению все большего числа зерен, и кривая проходит через *линейную* область, наклон которой определяется углом *гамма* (γ). Насыщение чувствительности происходит в районе *плато*, или *области передержки* кривой чувствительности, когда проявлены все зерна.

Все обычные бытовые съемки делаются в области недодержек и в линейной области кривой чувствительности. Ее средний наклон, или *коэффициент контраста*, несколько меньше, чем γ , при этом любая из этих величин может быть использована в качестве меры относительной *контрастности* полученной фотографии. Более высокие коэффициенты

контраста соответствуют более высокой контрастности полученной фотографии.

Для данной пленки и проявителя можно несколько увеличить контрастность полученного изображения при помощи увеличения времени проявления пленки; для этого используют кривые зависимости показателя контраста от времени проявления, которые обычно прилагаются к описанию пленки (см. рис. 2.5).

В художественной фотографии показатель контраста негатива обычно несколько меньше 1, т. е. негатив печатается так, чтобы контрастность изображения была примерно равна 1, и таким образом точно воспроизводится контрастность исходной картины. *Фотопленки для репродуцирования с ретушированного оригинала* и другие пленки специального назначения могут иметь более высокую контрастность; величина γ может быть существенно меньше единицы для *очень больших* экспозиций.

Большинство фотоаппаратов имеют ирисовые диафрагмы, откалиброванные в *диафрагмах*. Переход на одно деление изменяет экспозицию вдвое.

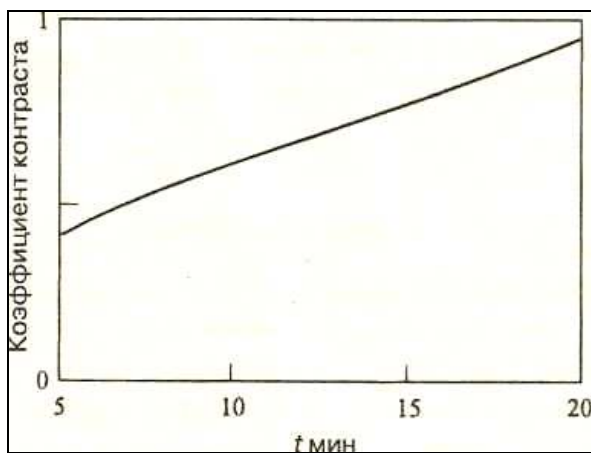


Рис.2.5. Зависимость коэффициента контраста от времени проявления низко контрастной пленки для фотографии

Аналогично времена экспозиции (в долях секунды) могут иметь значения 1/250, 1/125, 1/60, ..., так что каждое следующее время отличается от предыдущего вдвое.

Чтобы откалибровать апертуру линзы, мы введем *относительную апертуру* φ , или *число F* (иногда называемое диафрагменным числом):

$$\varphi = f/D \quad (3.4)$$

где D — диаметр апертурной диафрагмы. Если с помощью двух линз, имеющих одно и то же число F , но разные фокусные расстояния, получают изображение одного и того же удаленного протяженного предмета, то обе эти линзы создают совершенно одинаковые освещенности в плоскости пленки. Этот вопрос мы будем обсуждать в разд. 4.17, но и сейчас легко видеть, что если линза с большим диаметром и собирает больше света, она в то же время имеет и большее фокусное расстояние и таким образом распределяет свет по пропорционально большей площади пленки.

Пусть апертура линзы установлена на некоторое значение φ . Чтобы удвоить экспозицию, мы должны увеличить площадь апертуры вдвое. Это эквивалентно уменьшению φ в $\sqrt{2}$ или примерно в 1,4. Поэтому ирисовая диафрагма калибруется в единицах, имеющих коэффициент пропорциональности 1,4 и называемых *F-диафрагмами*, т. е. 2,8; 4; 5,6; 8; 11; Здесь более низкое число F соответствует большей экспозиции. Переход на одну F-диафрагму изменяет экспозицию вдвое. Значения F-диафрагмы записываются следующим образом: $F/2,8$, $F/4$ и т.д. Линза с максимальной относительной апертурой, равной 2,8, называется линзой с $F/2,8$.

2.1.4. Разрешающая способность (сила)

Во многих применениях фотографии разрешающая способность ограничена зернистостью эмульсии. Например, пусть среднее расстояние между зернами в какой-то пленке равно 5 мкм. Тогда, как и в случае человеческого глаза, можно будет различить две точки, если их изображения разделены расстоянием, вдвое превышающим размер зерна пленки. Таким образом, *предел разрешения RL* будет равен примерно 10 мкм. В фотографической науке чаще используется *разрешающая способность RP* — число разрешаемых линий на миллиметр — которая приблизительно равна

$$RP = \frac{1}{RL} \quad (3.5)$$

В приведенном примере разрешающая способность составляет примерно 100 линий/мм; большинство обычных пленок имеют

разрешение от 50 до 100 линий/мм. Пленки для репродуцирования обладают вдвое или втрое большим разрешением, а некоторые стеклянные пластинки, используемые в спектроскопии или голографии, могут различать до двух или трех тысяч линий/мм. Обработка пленки мало влияет на ее разрешающую способность. Цифровые, или беспленочные фотоаппараты вместо фотопленки используют матрицы приемников. Отдельный приемник, имеющий в поперечнике несколько микрометров, называется элементом изображения (*picture element*), или пикселем.

Цифровой фотоаппарат принято характеризовать не разрешающей способностью, а числом пикселей по каждой оси матрицы. В недорогом цифровом фотоаппарате используется матрица, имеющая 640 пикселей по горизонтали и 480 по вертикали, называемая матрицей 640 x 480. Более сложные камеры могут иметь в 2 или 3 раза большее число пикселей по каждой оси, например, 1280 x 960 или 1712 x 1368.

В цифровых фотоаппаратах используются магнитные запоминающие устройства, подобные магнитным дискам. Увеличение, например, вдвое вертикального и горизонтального числа пикселей, приводит к увеличению общего числа пикселей в четыре раза, и таким образом, для более высокого разрешения нужна более плотная упаковка запоминающей среды. И несмотря на это в высококачественной цифровой камере может одновременно храниться несколько изображений, по качеству приближающихся к получаемым с помощью обычной 35-миллиметровой камеры, оснащенной цветной пленкой.

Изображение, полученное с помощью цифровой камеры, может быть распечатано на домашнем компьютере, имеющем цветной принтер. Оно может быть улучшено с помощью специальных компьютерных программ для обработки изображения.

2.1.5 Глубина резкости

В случае, когда фотоаппарат сфокусирован на достаточно удаленном предмете, сходящиеся лучи от относительно близко расположенной точки будут попадать на пленку до того, как они сфокусируются, как показано на рис. 2.6. Изображение на пленке представляет собой маленький кружок, называемый *кружком нерезкости*. До тех пор, пока его диаметр меньше предельного разрешения пленки, самая близкая точка фокусируется вполне приемлемо. Нерезкость изображения

становится очевидной только тогда, когда диаметр кружка нерезкости превысит предельное разрешение.

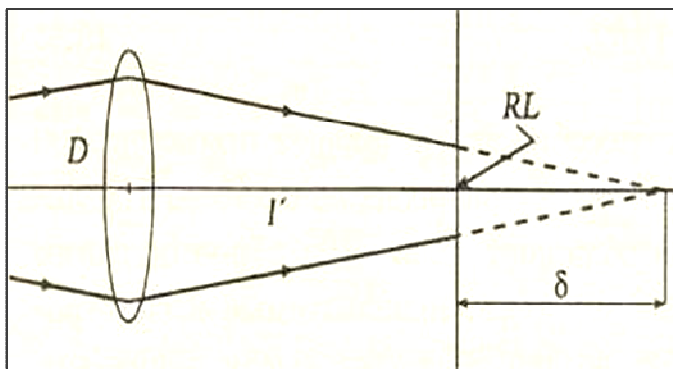


Рис. 2.6. Глубина фокуса.

Таким образом, максимально допустимая *расфокусировка* δ имеет место, когда диаметр кружка нерезкости приблизительно равен предельному разрешению. Мы можем рассчитать δ из подобия большого и маленького треугольников на рис. 2.6:

$$\frac{D}{\delta + l'} = \frac{RL}{\delta} \quad (3.6)$$

Полагая, что $\delta \ll l'$ находим

$$\delta = \frac{\varphi(1-m)}{RP} \quad (3.7)$$

где m — отрицательная величина для действительного перевернутого изображения. Выражение $\varphi(1 - m)$ часто называется *эффективным числом F* и существенно отличается от φ только при съемке крупным планом. Так как более удаленный предмет фокусировался бы перед плоскостью пленки, то полная *глубина фокуса* равна 2δ . *Глубиной резкости* называется интервал расстояний до предметов, изображения которых получаются на-расстояниях $\pm\delta$ от плоскости пленки.

Глубина резкости может быть рассчитана непосредственным применением уравнения линзы, но наиболее просто она вычисляется в двух важных случаях. Когда фотоаппарат сфокусирован за некоторой точкой, расстояние до которой, называется *гиперфокальным расстоянием H*, глубина резкости становится бесконечной. В качестве задачи читателю оставляется рассчитать гиперфокальное расстояние и показать, что

глубина резкости меняется от $H/2$ до бесконечности, когда фотоаппарат сфокусирован в H . В результате получится, что для заданного числа F самое короткое H получается для короткофокусной линзы.

Второй важный случай — когда предмет находится на расстоянии, много меньшем H . Тогда мы можем применить формулы для продольного увеличения и найти, что глубина резкости приблизительно равна $2\delta/m^2$.

Пример 2.1. Покажите, что зависимость H от числа F дается выражением

$$H = \frac{-f^2 R P}{\varphi} \quad (3.8)$$

Объясните, почему короткофокусные линзы имеют большую глубину резкости, чем линзы с большими фокусными расстояниями.

Далее покажите, что ближайшей точкой, оказавшейся в фокусе, будет та, которая находится примерно на расстоянии $H/2$ от линзы.

2.1.6 Разрешающая способность фотоаппарата

Теоретический предел разрешения фотоаппарата бывает удобнее записывать следующим образом

$$RL' = 1,22\lambda\varphi(1-m) \quad (3.21)$$

где m — отрицательно. Для видимого света L примерно равно 0,55 мкм, так что RL' примерно равен эффективному числу F , $\varphi(1-m)$ в микрометрах. Величина, обратная RL' , называется *теоретической разрешающей способностью* и обычно выражается в линиях на миллиметр.

На практике в большинстве фотоаппаратов теоретическая разрешающая способность никогда не достигается для апертур больших, чем $F/8$ ($\varphi = 8$). При такой относительной апертуре теоретическая разрешающая способность — оставляет примерно 120 линий на миллиметр. Обычные пленки редко могут иметь такое разрешение; как следствие, именно пленка может быть фактором, определяющим разрешающую способность фотоаппарата. Имеется в виду, что обычные фотообъективы редко бывают дифракционно-ограниченными при больших апертурах (малых числах F), особенно вне оси линзы. Для изготовителя недорогой линзы с широким полем зрения, необходимой в обычной фотографии, ее создателям приходится принимать

компромиссные решения и чем-то жертвовать для достижения своей цели. Им это удастся, в частности, и из-за ограничений, вносимых пленками.

Про те линзы, которые не ограничены дифракционно, говорят, что они *абберрационно-ограничены*. Таким образом, типичный фотографический объектив является абберрационно-ограниченным при числах F , меньших $F/11$. Когда диаметр апертуры превышает $F/11$, эти объективы могут давать постоянное или слегка ухудшенное разрешение на оптической оси. Особо светосильные объективы ($F/1,4$) могут быть значительно хуже при низких числах F , чем в среднем диапазоне. К тому же изображение, даваемое «широко открытым» светосильным объективом, может по краям иметь худшую яркость и разрешение.

2.2 Задание по практической работе

2.1. Линза фотоаппарата дифракционно-ограничена при $F/8$. В фотоаппарате используется пленка с высоким разрешением порядка 200 линий/мм. Найдите полезное увеличение при фотографировании удаленного предмета с помощью телескопа, имеющего линзу объектива с диаметром D . Объясните, почему результат отличается от значения $5D_{(см)}$, которое используется при наблюдениях невооруженным глазом.

2.2. Пленка имеет максимальную плотность примерно около 4. Средняя плотность негатива некоторой сцены менее 0,5. Оцените, какое количество серебра останется после проявления фотографии. (Неиспользованное серебро в конце процесса растворяется в фиксаторе и либо выбрасывается, либо используется для каких-то целей.)

2.3. Искажение перспективы. С помощью фотокамеры, имеющей линзу с фокусным расстоянием 50 мм, фотографируется удаленная сцена, имеющая значительную глубину. Фотографию увеличивают в 10 раз.

Найдите местоположение, с которого любое увеличенное изображение видно под углом, под которым виден исходный предмет. Эта точка называется центром перспективы.

2.4. Мы хотим сфотографировать удаленный предмет с помощью телескопа. Для этого выбираем бинокль 10×50 и фотоаппарат с линзой, имеющей фокусное расстояние 50 мм и максимальную апертуру $F/2$.

(а) Покажите, как сделать фотографию, и изобразите схему прибора, включающую правильное расположение фотоаппарата. Найдите максимальное значение диаметра полезной апертуры D линзы фотоаппарата.

(б) Пусть линза фотоаппарата будет дифракционно-ограничена, когда диаметр ее апертуры выбран равным D . Объясните, почему лучше всего получать все кадры при таком диаметре апертуры. Что произойдет, если фотоаппарат не будет дифракционно-ограниченным (что очень вероятно), а его разрешающая способность будет ограничена разрешающей способностью пленки?

(в) Предположим, что фотоаппарат (без телескопа) имеет время экспозиции t , если его полезная апертура равна D . Найдите время экспозиции для случая, когда фотоаппарат расположен вплотную к биноклю. (В действительности коэффициент пропускания бинокля может быть меньше 1, поэтому необходимы пробные экспозиции.)

2.5. Фотоаппарат имеет линзу с фокусным расстоянием 35 мм и используется с пленкой, имеющей разрешение $RP = 30$ линий/мм, или предел разрешения $RL = 1/30$ мм. Пленка, а не линза ограничивает возможности системы.

(а) Две точки разделены угловым расстоянием δ . Каково наименьшее значение δ , которое может разрешить фотоаппарат (с упомянутой выше пленкой)? Сравните с угловым разрешением глаза (0,3 мрад).

(б) Фотоаппарат установлен так, что через него можно смотреть в телескоп, линза объектива которого имеет диаметр D , как и в задаче 3.15. Каково наибольшее полезное угловое увеличение телескопа? Почему оно отличается от значения $5D_{(cm)}$, которое имеет место, когда глаз смотрит в телескоп?

2.6. В фотокамере используется пленка с разрешением $RP = 100$ линий/мм. При каком фокусном расстоянии предел углового разрешения фотокамеры равен угловому разрешению глаза?

Тема 3. Оптические системы

3.1 Теория

3.1.1 Лупа

Этот оптический инструмент, иногда называемый простым микроскопом или ручной линзой, хорошо знаком читателю и не нуждается в подробном описании. Представьте, что мы хотим рассмотреть маленький предмет, имеющий высоту h . Лучше всего он виден в ближней точке d_v под углом h/d_v .

Для увеличения предмета мы используем лупу. В идеальном случае предмет расположен в ее переднем фокусе F и проецируется на отрицательную бесконечность. Как можно видеть на рис. 3.1, мнимое изображение видно под углом $w = h/f'$. Если w превосходит h/d_v , то изображение на сетчатке, полученное с помощью линзы, будет увеличено пропорционально. Поэтому мы определим *угловое увеличение*:

$$MP = \frac{\text{Угол зрения мнимого изображения}}{\text{Угол зрения предмета, расположенного в } d_v} \quad (3.9)$$

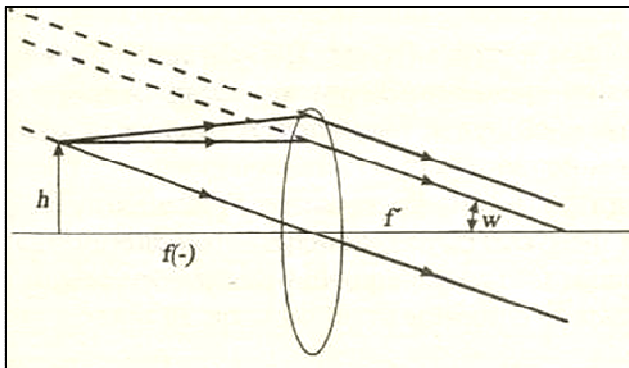


Рис.3.1 Лупа

(Не следует путать увеличение MP , которое безразмерно, с оптической силой в диоптриях.) Угловое увеличение часто используется вместо безразмерного линейного увеличения в системах, в которых изображение или предмет с большой вероятностью располагаются на бесконечности. В таких случаях безразмерное линейное увеличение может быть равно нулю, а угловое увеличение — нет. Для лупы мы немедленно находим

$$MP = \frac{d_v}{f'} \quad (3.10a)$$

В силу того, что d_v принято брать равным 25 см,

$$MP = \frac{25}{f'_{(см)}} \quad (3.10б)$$

Простые линзы хорошо работают в качестве луп с угловым увеличением, достигающим значения 5. Окуляры или специальные компараторы с плоским полем обычно могут обеспечить угловое увеличение, равное 10 или более.

Угловое увеличение любой лупы (или окуляра) может быть улучшено на +1 (например, с 5 до 6) при помощи установки линзы в положение, при котором изображение появляется на расстоянии наилучшего зрения d_v . Это утомительная процедура, дающая на самом деле небольшое улучшение. Целесообразнее научиться использовать оптические приборы с неаккомодированным глазом, т. е. с глазом, находящимся в состоянии, когда его мышцы, управляющие хрусталиком, совершенно расслаблены и хрусталик сфокусирован на расстояние в несколько метров (не обязательно на бесконечности, как когда-то считалось).

Пример 3.1. Наблюдатель, используя лупу, может аккомодировать свой глаз на расстояние наилучшего зрения d_v , а не на бесконечности. Покажите, что угловое увеличение дается выражением

$$MP = 1 + \left(\frac{d_v}{f'} \right), \quad (3.11)$$

если глаз вооружен лупой. А что будет, если глаз находится в F'? Объясните, почему угловое увеличение MP зависит от положения глаза по отношению к линзе.

3.1.2 Микроскоп

Микроскоп является двухкомпонентным инструментом. Первая линза, *объектив*, создает увеличенное изображение предмета. Затем это изображение наблюдается с помощью высококачественной лупы, называемой *окуляр*ом, которая проецирует изображение на бесконечность.

Схема микроскопа изображена на рис. 3.2. Расстояние $F'_o F_e$ между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра называется *оптической длиной трубы (тубуса) микроскопа* d . Объектив проецирует изображение с линейным увеличением

$$m = -\frac{g}{f'_0} \quad (3.12)$$

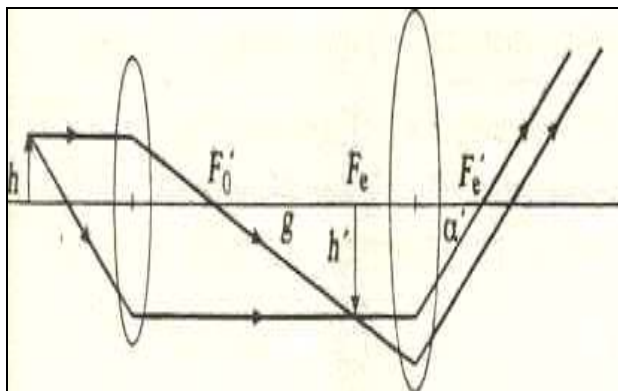


Рис. 3.2. Микроскоп

выраженным через δ . Угол под которым изображение видно из окуляра, равен g/f'_0 или $-hg/f'_0f'_e$. Поделив эту величину на h/d_v , находим, что полное угловое увеличение микроскопа дается выражением

$$MP = -\left(\frac{g}{f'_0}\right)MP_e \quad (3.13)$$

где MP_e — угловое увеличение окуляра. Знак минус означает лишь, что предмет оказывается перевернутым. В микроскопии это обычно не имеет значения. Во многих микроскопах используется $g = 160$ мм. Таким образом, увеличению, указанному на оправе объектива, соответствует длина трубы 160 мм, и объективы конструируются так, чтобы они лучше всего работали на этой длине. Если длина трубы не равна 160 мм, то это обычно указывается на оправе объектива.

Все более распространенной становится длина трубы, равная бесконечности. В этом случае изображение проецируется на бесконечности, а не 160 мм. Поэтому, чтобы сфокусировать изображение вблизи окуляра, нужно использовать *вспомогательную линзу*. Тогда линейное увеличение объектива будет равно отношению фокусного расстояния вспомогательной линзы к фокусному расстоянию объектива. Фокусное расстояние вспомогательной линзы можно выбрать приблизительно равным 160 мм, так что объективу с заданным фокусным расстоянием будет соответствовать одно и то же увеличение в любой системе.

Если использовать микроскоп с неправильной длиной трубы, то могут возникнуть сферические aberrации, особенно при увеличениях 40 х и более. В частности, с бесконечной длиной трубы нужно использовать *объектив, настроенный на бесконечность*, и нельзя использовать объективы, настроенные для труб, имеющих длину 160 или 210 мм.

Некоторые изготовители микроскопов также используют величину, называемую *механической длиной трубы*, или ее эквивалент. Обычно это расстояние между опорной плоскостью объектива (нижний срез тубуса) и изображением; но эта величина не является стандартом.

При использовании со стандартной длиной трубы обычные объективы имеют линейное увеличение, равное 10, 20 или 40х. Кроме линейного увеличения, равное 10, 20 или 40х. Кроме линейного увеличения, на оправе микроскопа указывается величина, называемая *числовой апертурой* NA. Полное угловое увеличение микроскопа не должно быть намного больше полезного углового увеличения

$$MP_u = 300NA \quad (3.14)$$

если микроскоп используется для визуальных наблюдений. Типичный объектив с линейным увеличением 40 х может иметь числовую апертуру, равную 0,65. В этом случае MP_u будет примерно равно 200, и предел разрешения прибора— меньше 1 мкм. Большее полезное угловое увеличение можно получить, используя более светосильные объективы, в частности *иммерсионные объективы*, которые могут иметь числовые апертуры порядка 1,6.

Чтобы исключить сферические aberrации, большинство объективов используется с *покровными стеклами* определенной толщины, обычно 0,16 или 0,18 мм. Некоторые *металлургические объективы*, с другой стороны, предназначены для наблюдения за непрозрачными поверхностями и поэтому они не комплектуются покровным стеклом.

Объективы микроскопов, используемые с покровным стеклом, можно назвать *биологическими объективами* в отличие от металлургических. Если покровное стекло отсутствует, то может увеличиться роль сферических aberrаций, особенно если числовая апертура больше 0,5. Иногда эти объективы могут быть использованы для рассмотрения «сухого» предмета, т. е. предмета, не погруженного в жидкость и не находящегося в контакте с покровным стеклом. В этих случаях покровное стекло помещают в воздухе непосредственно перед первым элементом объектива. Отсутствие покровного стекла может привести к уменьшению

контрастности изображения и возможным ошибкам при количественных измерениях (например, длины).

Видеомикроскоп — это несколько более сложное устройство, чем просто объектив микроскопа, присоединенный к видео (телевизионной) камере. Наблюдать выходной сигнал видеокамеры на экране намного легче и менее утомительно, чем смотреть в окуляр микроскопа, при этом в обоих случаях качество изображения примерно одинаково. К тому же на экране почти всегда можно подобрать яркость или контрастность изображения, чтобы выявить, какие-то детали, не обнаруженные невооруженным глазом. Также можно легко использовать вне осевого освещение, чтобы обнаружить даже с помощью обычных микроскопов нечеткие фазовые изображения.

Однако истинная сила видеомикроскопии состоит в том, что видеосигнал от видеомикроскопа поступает на *цифровой преобразователь*, который может «схватывать» или *оцифровывать* и затем обрабатывать изображение почти в реальном времени или заносить его в память для дальнейшего анализа.

Хороший объектив микроскопа, если он используется с подходящей оптической длиной трубы d , является дифракционно-ограниченным. Таким образом, предел разрешения предмета равен $1,22 \lambda/D$. При обобщении на случай, когда пространство предмета имеет показатель преломления n , мы должны использовать тот факт, что длина волны в среде равна λ/n , где λ — длина волны в воздухе или вакууме. Предел разрешения, таким образом, равен $1,22 \lambda/nD$.

Микроскописты обычно записывают это выражение через *числовую апертуру* в виде $NA = nD/2l$. Величина $D/2l$ равна половине угла u , под которым в параксиальном приближении в плоскости предмета видна апертурная диафрагма. Предел разрешения предмета, выраженный через числовую амплитуду NA , имеет вид

$$RL = \frac{0,61\lambda}{NA} \quad (3.25)$$

Если параксиальное приближение не используется, то из условия синусов получаем

$$NA = n \sin u \quad (3.26)$$

для хорошо отъюстированного объектива.)

Для большинства объективов $n = 1$, и $\sin u$ редко превышает 0,65 для объектива с увеличением 40 х. Так как N приблизительно равна 0,55 мкм, то предел разрешения ограничен величиной примерно 0,5 мкм. В некоторых конструкциях *масляно-иммерсионных объективов* капля масла с высоким показателем преломления помещается между объективом и покровным стеклом микроскопа и удерживается там силами поверхностного натяжения. Такие объективы могут иметь увеличение 60 или 100 и числовую апертуру, достигающую значения 1.6; их следует использовать с подходящим маслом и - для исключения аберраций- с покровным стеклом, имеющим соответствующие показатель преломления и толщину.

В микроскопе, как и в телескопе, *полезное угловое увеличение* достигается, когда глаз начинает различать все детали, имеющиеся в плоскости изображения объектива. Если две точки находятся на расстоянии, равном пределу разрешения RL (рис. 3.3), то $MP = MP_u$ при условии, что угол a'_{min} равен пределу разрешения глаза. Из рис. 3.3 видно, что угол, который образует луч, проведенный через F'_e , равен

$$a'_{min} = \frac{RL'}{f'_e} \quad (3.27)$$

а проведя луч через F'_o , можно найти

$$\frac{RL'}{g} = \frac{RL}{f'_o} \quad (3.28)$$

Но $RL = \frac{0,61\lambda}{NA}$, поэтому после ряда преобразований угол a'_{min} может быть записан в виде

$$a'_{min} = \frac{0,61\lambda MP}{NA d_v} \quad (3.29)$$

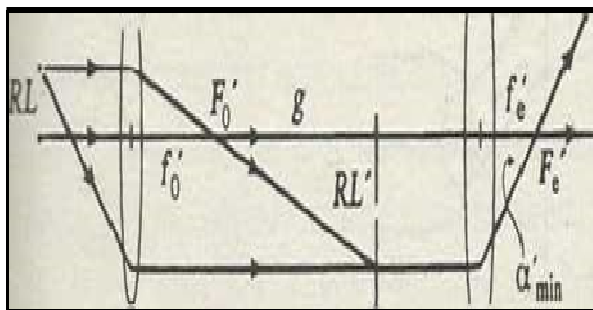


Рис. 3.3. Угловой предел разрешения микроскопа.

где d_v — наикратчайшее расстояние четкого зрения. Полагая $a'_{min}=0,3$ мрад и $\lambda = 0,55$ мкм, находим

$$MP_u = 300NA. (3.30)$$

Как и в случае телескопа, угловое увеличение микроскопа MP не должно превышать MP_u более чем в два раза.

Обычно микроскопы используются с источниками белого света, изображения которых с помощью оптических элементов проецируются в систему прибора. Под *критическим освещением* понимают получение изображения диффузного источника в плоскости образца. Источник должен быть однородным для того, чтобы его структура не проявлялась в изображении, видимом в микроскопе. Для этой цели обычно используются вольфрамовые лампы с плоскими *ленточными нитями накаливания*.

Схема освещения Кёлера представлена на рис. 3.4. Конденсорная система в ней состоит из двух линз — конденсорной линзы CL и вспомогательной линзы AL . Как и в случае проектора, эти линзы не обязательно должны быть высокого качества. Вспомогательная линза проецирует изображение нити лампы Fil на апертурную диафрагму AS , которая расположена в передней фокусной плоскости конденсорной линзы. Конденсор в свою очередь проецирует изображение нити на бесконечности. С другой стороны, мы можем сказать, что каждая точка нити накаливания создает параллельный пучок лучей, распространяющихся под углом к оси системы; это изображено сплошной линией на рис. 3.4. Точки, находящиеся далеко от оси, дают лучи, идущие под большими углами к оси, тогда как точки, расположенные вблизи оси, создают пучки, почти параллельные ей. Пучки имеют перетяжку вблизи задней фокальной точки конденсора. Предмет располагают вблизи этой перетяжки.

Полевая диафрагма FS — обычно это ирисовая диафрагма — расположена вблизи вспомогательной линзы. Аксиальное положение конденсора юстируется так, чтобы проецировать изображение полевой диафрагмы в плоскость объекта, что показано пунктирной прямой на рис. 3.4. Эта юстировка осуществляется почти полным закрытием полевой диафрагмы и фокусировкой микроскопа на предмете и полевой

диафрагме одновременно. Полевую диафрагму затем можно открывать до тех пор, пока она не исчезнет из поля зрения.

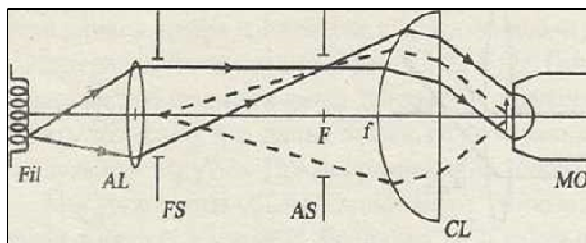


Рис.3.4. Схема освещения Кёлера

Апертурная диафрагма определяет число параллельных пучков, падающих на плоскость предмета, т. е. она определяет полную освещенность системы. Закрытие апертурной диафрагмы, однако, не влияет на поле зрения, потому что последнее определяется изображением полевой диафрагмы. Аналогичным образом изменение поля зрения не влияет на суммарную освещенность любой точки предмета (до тех пор, пока эта точка остается в поле зрения). Критическое освещение и освещение Кёлера уникальны в том отношении, что поле зрения и освещенность могут контролироваться независимо друг от друга. Освещенность Кёлера чаще используется в технических микроскопах, в которых равномерная освещенность не так важна: действительно, во многих осветительных системах микроскопов применяются лампы с плотно скрученной нитью накаливания, что совершенно не подходит для критического освещения.

Мы можем определить числовую апертуру конденсора аналогично тому, как определяли числовую апертуру линзы объектива: она равна синусу угла между оптической осью системы и наиболее сильно отклоненным лучом, выходящим из конденсора. Многие микроскописты выбирают значения числовой апертуры конденсора и объектива примерно равными. Такая конфигурация создает то, что иногда называют *полной освещенностью*, и таким образом обеспечивает хорошую освещенность и уменьшает рассеянный свет, для чего выбирается минимальное насколько это возможно значение полевой диафрагмы.

Числовая апертура конденсора влияет на *когерентность* освещения, от которой зависит как внешний вид изображения, так и предел разрешения. Например, согласно теории *частичной когерентности*, разрешение будет наилучшим, когда числовая апертура конденсора

примерно в 1,5 раза превышает числовую апертуру объектива. Тогда предел разрешения дается выражением (3.25). Однако не всегда возможно выполнить это условие, так как числовая апертура объектива может быть примерно равна или превышать I .

Изображение острого края в высоко когерентном свете имеет некоторые выбросы, или *дифракционные полосы*, на яркой стороне края, которые отсутствуют в некогерентном свете. Таким образом, пока апертурная диафрагма конденсорной линзы открыта (и свет становится все менее и менее когерентным), дифракционные полосы постепенно уменьшаются и почти совсем исчезают, когда конденсор достигает полной освещенности. Это еще одна причина, по которой в обычной микроскопии следует применять полную освещенность.

Когда в качестве источника используется лазер, освещенность системы не очень важна, потому что свет является высоко когерентным, и когерентность ее может меняться. Предел разрешения возрастает примерно на 30%, и изображение часто сопровождается уродливыми артефактами, которые являются результатом интерференции.

3.1.3 Растровый конфокальный микроскоп

Растровый конфокальный микроскоп, схематически изображенный на рис. 3.5, не является чем-то новым, но в последнее время он опять стал широко использоваться, особенно в биологии. Точечный источник, им может быть лазер, фокусируется высококачественным объективом микроскопа L_1 (не конденсором) на плоскость образца. Линза второго объектива пересылает изображение источника, используя подходящую длину трубы, на приемник D . Так как фокусы обоих объективов расположены в одной плоскости, то микроскоп называется конфокальным. В некоторых приборах перед приемником помещается точечная диафрагма.

Для получения изображения можно *просканировать* сам предмет, перемещая его мимо изображения источника. Там, где, например, предмет прозрачен, весь свет от источника фокусируется на приемнике. Там же, где предмет непрозрачен, приемник получает мало света. Выходной сигнал приемника как функция времени представляет собой одну строку изображения. Затем предмет движется вверх и вниз (выходя из плоскости страницы), и таким образом может наблюдаться еще одна строка. Последовательность параллельных, линейных разверток называется *растром*, т. е. мы можем сказать, что предмет сканируется в общей фокальной плоскости двух объективов для получения растровой

картинки. Для некоторых измерений, таких как ширина полосы интегральной схемы, не обязательно получать всю растровую картинку, потому что сканирование одной строки дает достаточную информацию.

Предмет можно увидеть, только если он сканируется очень быстро (и в двух измерениях). Поэтому часто бывает удобнее перемещать изображение точечного источника вдоль неподвижного предмета. При длительных количественных

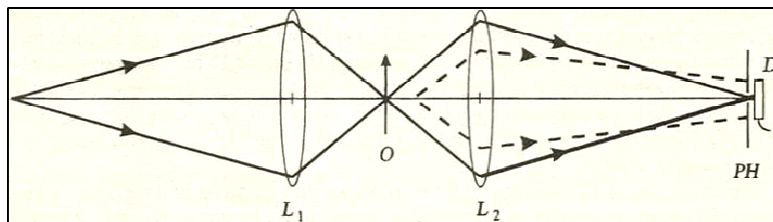


Рис. 3.5. Конфокальный микроскоп.

измерениях перемещение самого предмета, возможно, даст более точные результаты, но в любом случае для получения информации необходимо использовать цифровую обработку изображения.

Одним из важных преимуществ растровой конфокальной микроскопии перед обычной микроскопией является возможность ее использования для *оптического послойного анализа*. Иначе говоря, изображения, находящиеся не в фокусе, невидимы, а растровый конфокальный микроскоп позволяет получить слой за слоем изображения объемных объектов, например, биологических образцов. Пунктирными линиями на рис. 3.5 показан ход лучей, выходящих из точки предмета, не лежащей в фокусе. С некоторым приближением источник можно считать точечным, а точка предмета находится далеко от изображения источника, поэтому освещена она не очень хорошо, и ее изображение, безусловно, получается слабым. К тому же, если перед приемником имеется диафрагма, то изображение точки, не находящейся в фокусе, окажется далеко от плоскости этой диафрагмы, и следовательно, на приемник попадет совсем мало света. В результате точки предмета, находящиеся вне глубины поля объектива оказываются не просто размытыми, а невидимыми. Это становится чрезвычайно важным, скажем, при изучении небольших тусклых структур, находящихся вблизи более яркой структуры, или при изучении относительно неплотных структур типа клеток без

ограничений, вносимых размытыми изображениями несфокусированного предмета.

В промышленном растровом конфокальном микроскопе сканирование источника (а не предмета) можно осуществлять с помощью перфорированного диска, называемого *диск Нипкова*. Подобная схема изображена на рис. 3.6. Равномерно излучающий диффузный источник S фокусируется светоделителем BS и конденсором CL на вращающийся диск D —диск Нипкова, в котором проделаны дырочки, расположенные в виде дуг спирали, как показано на вынесенной картинке на рис. 3.6. Изображения дырочек проецируются на плоскость предмета с помощью линзы объектива микроскопа MO ; движение этих изображений по плоскости предмета создает искомый растр.

Линза объектива возвращает свет, рассеянный или отраженный точками предмета, на диск Нипкова. Оттуда свет через окуляр направляется либо для непосредственного наблюдения глазом, либо на видеокамеру для наблюдения на мониторе или для обработки изображения. На рис. 3.6 промежуточное изображение проецируется в плоскость диска: в свою очередь конечное изображение I появляется в плоскости изображения объектива переноса (или окуляра) RL . Изображение будет устойчивым, если оно сканируется диском менее чем за примерно $1/60$ с.

Диск на рис. 3.6 пропускает только очень малую долю падающего на него света. Поэтому источник должен быть очень интенсивным. К тому же диск должен быть хорошо отполирован и наклонен под небольшим углом к направлению

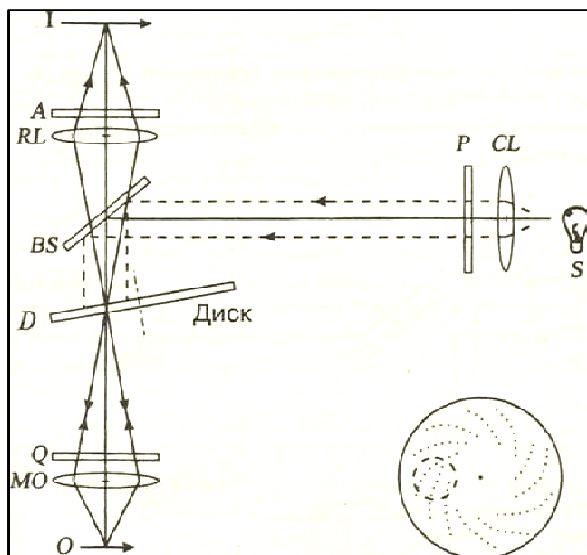


Рис. 3.6. Конфокальный микроскоп с диском Нипкова, работающий в реальном времени (G.S. Kino, *Intermediate Optics in Nipkow Disk Microscopes*, in *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, ed. by J.B. Pawley, Plenum, NY, 1990).

падающего луча, чтобы исключить вклад в изображение света, рассеянного диском. Для дальнейшего отделения рассеянного света после источника помещается поляризатор P . Поляризованный свет от источника дважды проходит через четвертьволновую пластинку Q перед возвращением на диск Нипкова. После этого плоскость поляризации поворачивается на 90° , и свет направляется через второй поляризатор, или анализатор, A , ось которого повернута на 90° по отношению к оси первого. У рассеянного же света осталась прежняя поляризация, и он, таким образом, не может пройти через второй поляризатор. В других схемах, использующих диск Нипкова, вместо поляризаторов могут быть использованы зеркала, которые направляют отраженный свет в отверстия в диске, не используемые для облучения, и таким образом удаляется свет, рассеянный диском.

Растровый конфокальный микроскоп, в котором используется диск Нипкова, почти всегда работает в режиме отражения. Часто это является преимуществом, как, например, когда нужно рассмотреть непрозрачный предмет. В других случаях это неважно или перевешивается

способностью прибора делать невидимыми плоскости, лежащие не в фокусе.

Разрешение обычного микроскопа или растрового конфокального микроскопа ограничено дифракцией. Это происходит потому, что такие приборы создают изображение каждой точки предмета, и изображения этих точек искажены дифракцией. Предел разрешения определяется радиусом диска Эйри.

Много работ было посвящено построению изображения, предел разрешения которого был бы меньше предела Рэля, но обычно получались более чем скромные результаты. Например, растровый конфокальный микроскоп имеет предел разрешения примерно на 30% меньше предела Рэля. Увеличение дифракционно-ограниченных изображений с помощью компьютеров также было малоуспешным.

Растровый оптический микроскоп ближнего поля — это зондовый микроскоп, в котором изображение воссоздается по точкам без использования линз. Зонд, диаметр которого много меньше длины волны, устанавливается на фиксированном расстоянии от предмета и используется, например, для регистрации отражения от предмета. Пока зонд очень мал и находится близко от предмета, предельное разрешение системы приблизительно равно его диаметру.

Зонд может быть изготовлен при помощи нагрева и растяжения оптического волокна или микрокапилляра до разрыва или еще лучше при помощи заострения конца оптического волокна травлением. В любом случае этот конец с помощью вакуумного напыления покрывается металлом типа алюминия или серебра. Если пар металла будет падать на рабочий конец сзади, то самый его кончик окажется в тени источника паров, в результате чего он будет иметь небольшую не покрытую металлом область и сможет использоваться в качестве зонда.

На рис. 3.7 представлена схема типичного растрового оптического микроскопа ближнего поля. Зонд присоединен к оптическому волокну (не показанному на рисунке), через которое на него поступает свет лазера. Зонд располагается вблизи образца подобно тому, как это делается в атомно-силовом и сканирующем туннельном микроскопах (которые не являются оптическими микроскопами). В растровом оптическом микроскопе ближнего поля пьезоэлектрическое устройство вызывает колебания, или «дрожание» зонда на частоте его механического резонанса. Эти колебания регистрируются, например, с помощью лазерного пучка, направленного перпендикулярно образцу, и

последующего наблюдения с помощью фотоприемника за светом, рассеянным зондом. Зонд близко подводится к образцу с помощью *пьезоманипулятора*, т. е., микрорегулятора, в котором для регулировки положения используется пьезоэлектрический кристалл. Хотя не совсем понятно, как это происходит, амплитуда «дрожания» уменьшается и частота меняется до тех пор, пока зонд не коснется поверхности. С использованием электронной обратной связи для поддержания постоянными амплитуды, частоты или фазы «дрожаний» рабочий конец зонда может быть также установлен на фиксированном расстоянии от поверхности, имеющем значения 5 или 10 нм.

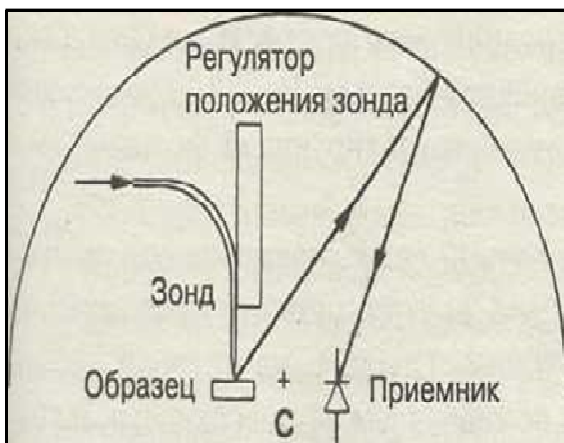


Рис. 3.7. Схематическое изображение растрового оптического микроскопа ближнего поля. С — центр зеркальной полусферы

Зонд заостряется до размеров, меньших длины волны света и поэтому он работает (или не работает) подобно конусному выходному соединителю п. 12.1.5). Это означает, что большая часть света, направленного на зонд, теряется в результате заострения — некоторая его часть отражается обратно, а другая поглощается металлическим покрытием, которое может быть разрушено, если входная мощность слишком велика, а именно порядка нескольких десятков милливатт.

Коэффициент пропускания зонда обычно имеет значения между 10^{-4} и 10^{-6} . Обратное пропускание имеет примерно тот же порядок, так что суммарное отражение системы находится в промежутке 10^{-8} - 10^{-12} . Поэтому достаточно трудно (но иногда возможно) измерить отраженную мощность, во-первых потому, что она мала, а во-вторых, потому, что она

подвержена воздействию дробового шума, создаваемого излучением, отраженным острием в обратном направлении.

Вместо этого конструкторы растровых оптических микроскопов ближнего золья часто используют системы, подобные изображенной на рис. 3.7, в которых используется непрозрачный образец, так что система работает на отражение. Зонд облучает очень маленькую площадь образца, и свет, отраженный этой областью, дифрагирует во всех направлениях. Для сбора дифрагированного света и фокусирования его на приемник используется полусферическое зеркало. Дифрагированная мощность пропорциональна отражательной способности образца непосредственно под зондом. С помощью сканирования зонда образцом получается изображение поверхности. Если поверхность не плоская, а имеет рельеф, то этот рельеф может быть также промерен при помощи мониторинга расстояния зонда до поверхности.

Существует несколько конструкций растровых оптических микроскопов ближнего поля. Если образец прозрачен, то полусферическое зеркало может быть заменено светосильным объективом, расположенным, например, по другую сторону образца. Так же, как и в первом случае, образец может быть освещен, но теперь регистрируется свет, даваемый зондом. Таким же образом может быть измерена структура мод полупроводникового лазера. И наконец, если образец является фотоэлементом типа солнечной батареи, то он может быть освещен с помощью зонда, при этом результирующий фототок дает информацию о структуре образца.

Когда луч света отражается от металлической поверхности, он слегка проникает внутрь металла. Интенсивность света внутри металла приближенно является экспоненциальной функцией глубины. Глубина, на которой интенсивность падает в $1/e$ раз по сравнению с ее значением на поверхности, называется *толщиной скин-слоя*. Интенсивность на головке зонда примерно постоянна вдоль ограничительной апертуры зонда, а затем падает экспоненциально с увеличением радиуса. Таким образом, эффективный диаметр зонда, опять же очень грубо равен диаметру головки зонда плюс двойная толщина скин-слоя.

Обычно толщина скин-слоя меньше диаметра рабочего конца зонда, и поэтому ее величина не имеет значения. Тем не менее, толщина скин-слоя определяет теоретический предел разрешения головки зонда бесконечно малого диаметра. Это означает, что конечный предел разрешения растрового оптического микроскопа ближнего поля имеет

порядок удвоенной толщины скин- слоя металлического покрытия. Толщина скин- слоя зависит от свойств металла и качества его нанесения и имеет величину порядка 50 нм для большинства металлов в видимой области спектра.

Свойства изображения, даваемого растровым оптическим микроскопом ближнего поля, сложным образом зависят от взаимодействия рабочего конца зонда и поверхности. Волна, проходящая через зонд, быстро распространяется после того как она покидает рабочий конец зонда, так что предел разрешения зависит только от расстояния между зондом и образцом. Вследствие многократного отражения также имеется сильное взаимодействие между волнами, пришедшими от зонда, и волнами, отраженными образцом. В терминах чувствительность растрового оптического микроскопа ближнего поля не является линейной функцией электрического поля, и таким образом этот прибор не может характеризоваться ни импульсной характеристикой, ни передаточной функцией. И в самом деле, возможно, из-за сильной нелинейности чувствительности растрового оптического микроскопа ближнего поля его предел разрешения имеет порядок 10 нм, или намного меньше толщины скин-слоя.

На рис. 3.8 изображена микрофотография мишени, полученная с помощью растрового оптического микроскопа ближнего поля. Мишень состоит из алюминиевых полосок, нанесенных на стеклянную пластину. Микрофотография получена в проходящем свете, так что непрозрачные алюминиевые полоски выглядят темными. Хорошо разрешенные вертикальные полосы вблизи центра рисунка находятся примерно на расстоянии 30 нм друг от друга; это означает, что предел разрешения прибора несколько меньше 30 нм.

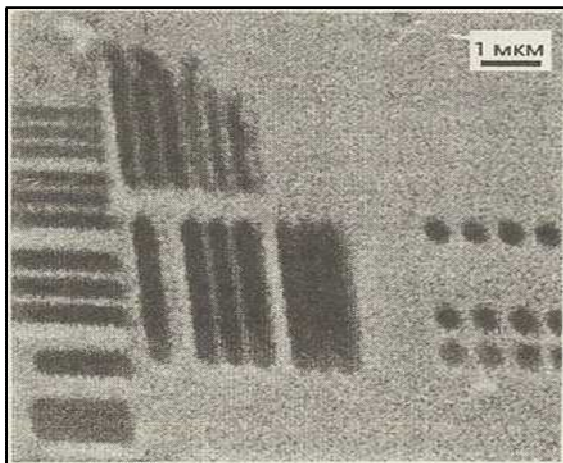


Рис. 3.8. Микрофотография алюминиевых полосок на прозрачной подложке, полученная с помощью растрового оптического микроскопа ближнего поля. Фотография Хельмута Хензела и Армина Кноля, Байрейтский университет, Германия; любезно представлено Digital Instruments.

3.1.4 Телескоп

Телескоп отличается от микроскопа местоположением предмета и предназначен для наблюдения за крупными объектами, находящимися на далеком расстоянии. Как и в случае микроскопа, объектив телескопа создает изображение, которое затем рассматривается через окуляр.

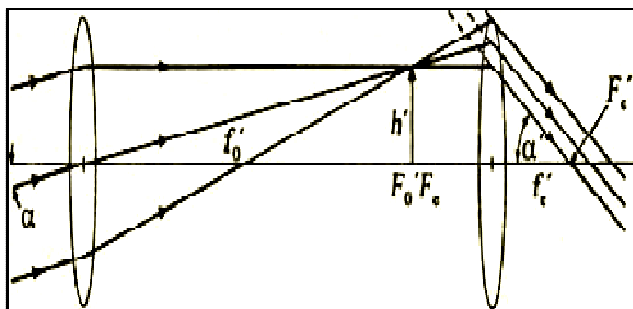


Рис.3.9. Простой телескоп

Пусть предмет расположен на далеком расстоянии, но при этом достаточно велик, чтобы быть видимым под углом α с местоположения телескопа (рис. 3.9). Через телескоп он виден под углом α' . Как и в случае лупы, мы определяем угловое увеличение телескопа соотношением

$$MP = \frac{\alpha'}{\alpha}. \quad (3.15)$$

Из геометрических соображений находим, что $a = h'/f'_0$ и $a' = h'/f'_c$. Таким образом,

$$MP = -\frac{f'_0}{f'_e} \quad (3.16)$$

где знак минус оставлен потому, что изображение перевернуто. Если f'_0 намного больше, чем f'_e , то удаленный предмет при рассмотрении в телескоп может казаться намного большим, чем при рассмотрении невооруженным глазом.

Принято на примере телескопа демонстрировать роль зрачков и диафрагм в оптической системе. Как и в случае фотоаппарата, отверстие, ограничивающее общее количество света, поступающее в телескоп, называется *апертурной диафрагмой*, или *ограничивающей апертурой*. В правильно сконструированном телескопе оправа, в которой крепится объектив, служит апертурной диафрагмой и приблизительно совпадает с самим объективом.

Теперь проследим за ходом двух пучков лучей в телескопе (рис. 3.10). Луч pr , который проходит через центр апертурной диафрагмы, называется *главным лучом*. Пучки, выходящие из окуляра, образуют перетяжку, в которой главный луч пересекает ось немного позади F'_e . Окуляр создает изображение апертурной диафрагмы в плоскости, в

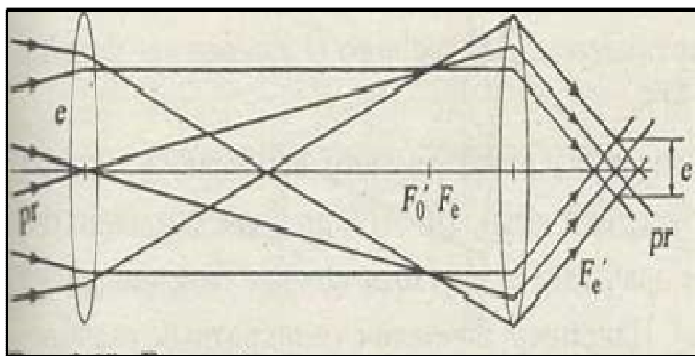


Рис.3.10. Входной зрачок телескопа

которой главный луч пересекает ось. Это изображение называется *выходным зрачком* и лежит в плоскости перетяжки. Внимательное изучение рис. 3.10 также показывает, что выходной зрачок и перетяжка в

точности совпадают. Все лучи, которые входят в апертурную диафрагму и проходят через оптическую систему, проходят при этом через выходной зрачок. В телескопе апертурная диафрагма также играет роль *входного зрачка*.

Формально выходной зрачок определяется как изображение апертурной диафрагмы, которое видно во всех частях оптической системы, расположенных после нее. Входной зрачок — это изображение, которое видно во всех частях оптической системы, расположенных перед апертурной диафрагмой. Входной и выходной зрачки также являются изображениями друг друга. Для наилучшего наблюдения глаз должен быть расположен вблизи входного зрачка. Иначе большая часть лучей не попадет в зрачок глаза. Это явление называется *виньетированием*.

Полагая, что e — диаметр входного зрачка, а e' — выходного, легко показать, что

$$\frac{e}{e'} = MP \quad (3.17)$$

Для телескопа e также является и апертурной диафрагмой, так что диаметр выходного зрачка составляет $1/MP$ от диаметра апертурной диафрагмы.

В идеальном случае выходной зрачок должен не только совпадать со зрачком глаза по местоположению, но и иметь примерно одинаковый с ним диаметр. Если выходной зрачок слишком велик, то виньетирование неизбежно, и глаз фактически становится ограничивающей апертурой. Многие лучи, входящие в объектив, не попадают в глаз, и таким образом значительная часть полезной поверхности объектива используется впустую, что можно легко увидеть, проецируя изображение зрачка глаза в плоскость объектива. В данном случае именно это изображение, а не сам объектив является входным зрачком. Тем не менее, некоторые телескопы имеют несколько большие выходные зрачки, чтобы дать глазу некоторую свободу перемещения.

Если угловое увеличение настолько велико, что выходной зрачок становится много меньше зрачка глаза, то *полезное угловое увеличение* может превысить величину

$$MP_u = 5D_{(cm)} \quad (3.18)$$

где D — диаметр объектива в сантиметрах. Для данного D угловое увеличение не должно сильно превышать MP_u .

Мы уже говорили, что зрачок глаза имеет диаметр примерно 5 мм при средних условиях наблюдения (средний глаз). По этой причине

большинство *биноклей* делаются с входными зрачками 5 мм (хотя ночные бинокли могут иметь выходные зрачки до 8 мм). Например, бинокли с семикратным увеличением обычно имеют объективы 35 мм. Такие бинокли маркируются как 7 x 35; первое число означает оптическую силу, второе — диаметр объектива в миллиметрах. Другими распространенными биноклями являются бинокли, имеющие маркировки 8 x 40 и 10 x 50, тогда как ночные бинокли могут быть 6 x 50. Маленькие, легкие бинокли, такие как 8 x 25, имеют меньшие выходные зрачки и наиболее пригодны для использования в дневное время. Восьмикратные бинокли являются наиболее мощными ручными биноклями.

Кроме апертурной диафрагмы большинство телескопов имеют *диафрагму поля зрения*, расположенную в передней фокальной плоскости окуляра. Как и в случае фотоаппарата, диафрагма поля зрения ограничивает угловое восприятие, или поле зрения. Для предотвращения частичного виньетирования она располагается в ПЛОСКОСТИ изображения, где лучи сходятся в точку.

Как видно из рис. 3.9, если поле зрения телескопа велико, окуляр может иметь недопустимо большой диаметр. Соответственно полевая линза часто располагается в передней фокальной плоскости окуляра или вблизи нее. Она мало влияет на изображение и перенаправляет расходящиеся лучи на ось. В частности, при заданном диаметре окуляра полевая линза может перенаправить главный луч к его краю. Таким образом, самый край поля зрения становится размытым в силу того, что примерно половина лучей проходит сквозь окуляр, а другая — виньетируется.

Большинство окуляров телескопов и микроскопов имеют встроенные полевые линзы. Вторая линза в таком окуляре, которую мы до сих пор называли окуляром, называется *глазной линзой окуляра*. Использование полевой линзы приближает выходной зрачок к глазной линзе окуляра и несколько уменьшает *eye relief*^d, или расстояние между глазной линзой окуляра и сетчаткой.

Объектив телескопа теоретически может разрешить две точки, если расстояние между их изображениями равно $1,22 \lambda f^* / D$ или более. Это означает, что угловое расстояние между этими двумя точками должно быть больше, чем

$$a_{min} = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (3.22)$$

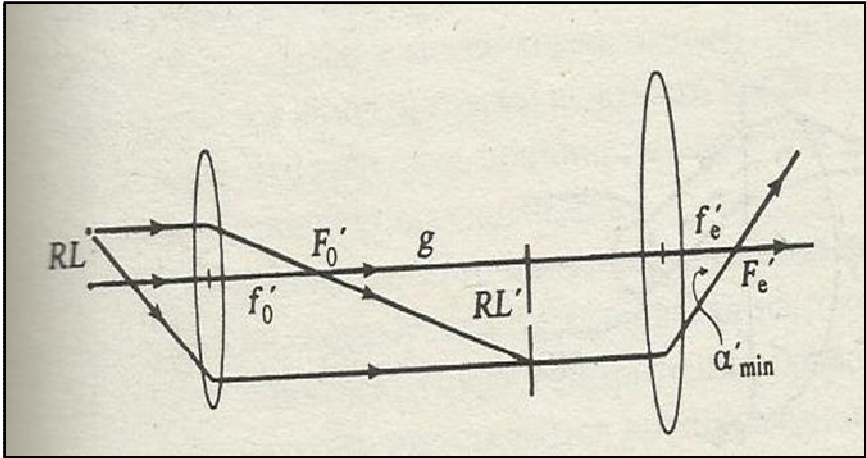


Рис. 3.10. Угловой предел разрешения телескопа.

Для хорошего разрешения этих двух изображений окуляр телескопа должен иметь более высокую относительную апертуру (меньшее число F), чем его объектив. Тогда глаз увидит угловое расстояние

$$a'_{\min} = \frac{MP_{1,22\lambda}}{D}, \quad (3.23)$$

где MP — угловое увеличение телескопа.

В отличие от фотообъективов объективы телескопов относительно редко имеют числа F , превосходящие $F/11$. Поэтому вблизи оси отражающие объективы или ахроматические дублеты можно с большой степенью уверенности назвать дифракционно ограниченными.

Угловой предел разрешения глаза составляет примерно 0,3 мрад ($1'$). Глаз сможет различить две точки только в том случае, если a'_{\min} будет не меньше этого значения. Когда a'_{\min} точно равно 0,3 мрад, то говорят о *полезном угловом увеличении*, которое равно

$$MP_u = 5D_{(\text{см})}, \quad (3.24)$$

если D взято равным 0,55 мкм. Чтобы использовать телескоп в полной мере, его угловое увеличение MP должно быть как минимум равно полезному угловому увеличению MP_u , а для удобства наблюдения может быть сделано даже вдвое большим.

С другой стороны, угловое увеличение телескопа не должно слишком превосходить полезное увеличение. Когда MP примерно равно MP_u , глаз полностью различает дископодобные изображения в фокальной плоскости объектива. Увеличение MP (например, с помощью увеличения

оптической силы окуляра) не даст лучшего разрешения, потому что глаз уже увидел изображение в фокальной плоскости объектива. Однако это увеличит размер точечных изображений на сетчатке. Свет, получаемый объективом от одной точки, распространяется не на один, а на несколько рецепторов. В результате края не будут четкими, а контрастность изображения, особенно мелких деталей станет существенно хуже.

По этой причине угловое увеличение, сильно превышающее $MP_{\text{н}}$, называется *бесполезным (пустым) угловым увеличением* и его не следует использовать.

3.1.5 Зрительные трубы

Телескоп дает перевернутое изображение. В астрономии это неважно, но в зрительных трубах предпочтительно иметь прямое изображение.

Простейшим телескопом прямого изображения является *телескоп Галилея*, в котором окуляром служит рассеивающая линза, и он автоматически создает прямое изображение. В наше время такие оптические системы применяются только в слабых театральные биноклях. *Призменные бинокли*, или *полевые бинокли*, являются телескопами прямого изображения, в которых используются две отражающие призмы для того, чтобы повернуть изображение и сделать его прямым.

В оптическом приборе, обычно называемым *зрительной трубой*, используется оборачивающая линза, которая создавая изображение с единичным увеличением, переворачивает его (рис. 3.11). И телескоп, и микроскоп могут иметь много объективов переноса изображения, подобных оборачивающей линзе *EL*, показанной на рис. 3.11. Микроскоп, оснащенный такими линзами, называется *бороскопом* и может быть использован для осмотра внутренностей длинной полый трубки, подобной стволу пушки. В телескопе редко используется более одной линзы переноса изображения. Исключением является случай, когда эта линза комбинируется с зеркалом или призмой для наблюдения за предметом, не лежащим на линии зрения окуляра; такой прибор называется *перископом*.

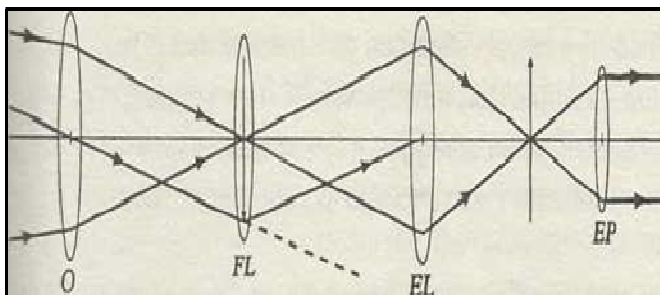


Рис. 3.11. Зрительная труба, или телескоп прямого изображения.

Подобно окуляру в обычном телескопе, оборачивающая линза может стать слишком большой, если велико поле зрения и если фокусная длина объектива O также велика. Чтобы избежать этого, следует поместить полевую линзу FL в плоскость первого изображения или вблизи нее. Так же как и полевая линза в окуляре EP , эта линза перенаправляет рассеянные лучи на ось оптической системы, как показано на рис. 3.11. В отличие от полевой линзы в окуляре, в данном случае полевая линза проецирует изображение апертурной диафрагмы в плоскость оборачивающей линзы. [Полевая линза окуляра не проецирует изображение апертурной диафрагмы в плоскость глазной линзы окуляра, потому что тогда допустимое расстояние между глазом и окуляром (eye relief) было бы очень мало.]

Во многих отношениях полевая линза напоминает конденсорную линзу в диапроекторе. Она захватывает лучи, которые при ее отсутствии не попадали бы на оборачивающую линзу, и направляет их прямо на ось оптической системы. Для правильной работы полевая линза должна проецировать изображение апертурной диафрагмы в плоскость оборачивающей линзы. Иначе возникнет виньетирование, о чем уже упоминалось, когда речь шла об окуляре телескопа. К тому же изображение апертурной диафрагмы должно достаточно хорошо заполнять оборачивающую линзу подобно тому, как изображение нити накаливания заполняет проекционную линзу диапроектора.

Всякий раз, когда главный луч пересекает ось оптической системы, создается изображение апертурной диафрагмы, или *зрачок*. В плоскости зрачка почти всегда помещается дополнительная диафрагма, которая имеет диаметр, равный диаметру зрачка, и уменьшает количество рассеянного света без виньетирования.

И наконец, нужно проследить, чтобы линза переноса изображения проецировала изображение полевой линзы на полевую диафрагму, связанную с окуляром. Полевая линза и полевая диафрагма должны быть изображениями друг друга. Если это не так, то одна из них становится эффективной полевой диафрагмой, подобно размеру зрачка глаза в простом телескопе.

3.1.6 Разрешающая сила оптических инструментов

В физической или волновой оптике показывается, что из-за дифракции изображение точки не является точкой, а представляет собой небольшое пятно, называемое *диском Эйри*. Размер пятна зависит от относительной апертуры оптической системы. В силу того, что изображение не является точкой, две точки предмета невозможно будет различить, если их диски Эйри пересекаются. Для оптики с круговой симметрией *теоретический предел разрешения* RL' дается выражением

$$RL' = \frac{1,22 \lambda l'}{D}, \quad (3.19)$$

где l' — расстояние до изображения, D — диаметр апертуры и λ — длина волны. Оптическую систему, в которой возможно достичь такого предела разрешения, называют *дифракционно-ограниченной*.

Величина RL' — это расстояние между двумя точками изображения, при котором две точки предмета еще различимы. Расстояние между реальными точками в плоскости предмета определяется формулой $RL = \frac{RL'}{m}$, где m — линейное увеличение системы. Так как расстояние между двумя точками предмета, при котором эти точки еще можно различить, должно быть не меньше RL , то эту величину называют *пределом разрешения в плоскости предмета*. В силу того, что $m = \frac{l'}{l}$, для предела разрешения в плоскости предмета имеем

$$RL = \frac{1,22 \lambda l}{D}. \quad (3.20)$$

Знак l здесь не важен, поэтому мы полагаем $RL > 0$.

3.2 Практика

3.1. В растровом конфокальном микроскопе используется объектив с увеличением $40\times$, числовой апертурой $0,65$ и длиной трубы 160 мм.

Диаметр точечной диафрагмы, расположенной перед приемником, равен 11 мкм, а глубина поля линзы объектива примерно 0,65 мкм.

(а) Используйте $xx' = -f^2$ для определения расстояния между передним фокусом объектива и хорошо сфокусированной точкой предмета.

(б) Предположим, что предмет отодвинут от линзы объектива на 100 мкм. На каком расстоянии от заднего фокуса эта точка предмета окажется точно в фокусе?

3.2. На предмет, находящийся на расстоянии 1 м и имеющий ширину 1 см, смотрят в телескоп, имеющий объектив с фокусным расстоянием 50 мм и с окуляром, номинальное увеличение которого равно $10\times$.

(а) Под каким углом виден предмет, если на него смотрят невооруженным глазом с расстояния 1 м?

(б) Под каким углом изображение видно из окуляра? Предположим теперь, что линза объектива находится на расстоянии 1 м от предмета.

(в) Каково полное угловое увеличение телескопа для предмета, находящегося на расстоянии 1 м?

3.3. При помощи микроскопа с объективом, имеющим увеличение $40\times$ и числовую апертуру 0,65, наблюдается конец оптического волокна, дающего свет с длиной волны 550 нм. Какую оптическую силу должен иметь окуляр микроскопа? Каков предел разрешения?

3.4. Используйте формулу $\delta = \phi(1 - m)RP$ (где m - отрицательная величина для действительного перевернутого изображения, выражение $\phi(1 - m)$ - эффективное число F) для выражения глубины поля объектива микроскопа через числовую апертуру NA .

3.5. Линза с фокусным расстоянием 0,8 см используется в качестве объектива микроскопа с фокусным расстоянием окуляра, равным 2 см. Оптическая длина тубуса равна 18 см. Каково увеличение микроскопа?

3.6. Определить предел разрешения сухого и иммерсионного ($n = 1,55$) объективов с угловой апертурой $u = 140^\circ$. Длину волны принять равной 0,555 мкм.

3.7. Чему равен предел разрешения на длине волны $\lambda = 0,555$ мкм, если числовая апертура равна: $A_1 = 0,25$, $A_2 = 0,65$?

3.8. С каким показателем преломления следует взять иммерсионную жидкость, чтобы рассмотреть в микроскопе субклеточный элемент диаметром 0,25 мкм при наблюдении через оранжевый светофильтр (длина волны 600 нм)? Апертурный угол микроскопа 70° .

3.9. На ободке лупы имеется надпись «x10» Определить фокусное расстояние этой лупы.

Список использованных источников

1. Мурзин, С.П. Расчет и конструирование системы транспортировки и формирования излучения [Текст] / Мурзин С.П. // Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Оптика лазеров». – Самара: СГАУ, 2008. – 10 с.
2. Вейко, В.П. Сборник задач по лазерным технологиям [Текст] / Вейко В.П., Шахно Е.А. Изд. 3-е, испр. и дополн. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. - 67 с.
3. Приезжев, А.В. Лазерная диагностика в биологии и медицине. [Текст] / А.В. Приезжев, В.В. Тучин, Л.П. Шубочкин. – М.: «Наука», 1989. – 240 с.

Учебное издание

Оптические инструменты

Методические указания к практическим работам
Составители: Тимченко Павел Евгеньевич
Тимченко Елена Владимировна

Самарский государственный национальный университет имени
академика С.П. Королева» (Самарский университет)
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Издательство Самарский университет
443086 Самара, Московское шоссе, 34

