

§ 22. Оптические приборы для получения действительных изображений

Посредством глаза, а не глазом
Смотреть на мир умеет разум.

Вильям Блейк

Сложно представить жизнь современного человека без использования разнообразных оптических приборов. Они используются не только в быту и на производстве, но и в морских глубинах, в космосе, позволяя увидеть то, что ранее было скрыто от глаз человека. Как они устроены? Какие их основные характеристики? Чем они отличаются друг от друга?

Познакомимся с оптическими приборами, широко используемыми человеком.

По своему назначению оптические приборы подразделяются на две большие группы:

- 1) для получения действительных изображений предметов (проекторы, фотоаппараты);
- 2) для увеличения угла зрения (лупа, микроскоп, подзорная труба).

Фотоаппарат — оптическое устройство, предназначенное для получения действительных уменьшенных обратных изображений предметов на светочувствительной матрице (сенсорной матрице) (рис. 158). При этом предметы могут быть расположены на различном удалении от точки съемки. Фотоаппарат состоит из закрытой светонепроницаемой камеры и системы линз, называемых **объективом (О)** (см. рис.158).

Перемещая объектив фотоаппарата, добиваются наводки на резкость, при которой изображение предмета формируется точно на специальной светочувствительной матрице. В противном случае изображение получается нечетким (размытым). Она покрыта сенсорами освещенности, каждый из которых имеет фильтр одного из основных цветов: синий, красный или зеленый.

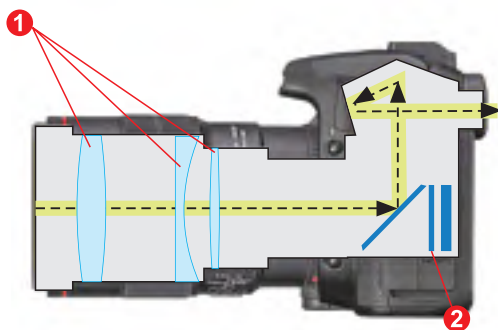


Рис. 158. Цифровой фотоаппарат и его оптическая схема: 1 — система линз (объектив); 2 — светочувствительная матрица

Количество световой энергии, поступающей на пленку, определяется размерами *диафракмы* и временем открытия затвора (*выдержкой*).

► Фотографический метод регистрации изображения изобрели в 1839 г. Л. Дагер и Ж. Ньепс.

На элементе формируется точка изображения — **пиксель** (от англ. *pixel — picture element* — элемент изображения). Чем больше пикселей, тем более качественное изображение получается. Поэтому важнейшей характеристикой цифровых фотоаппаратов является его разрешение, т. е. количество пикселей. У самых простых фотоаппаратов оно составляет несколько мегапикселей, а у лучших — до нескольких десятков мегапикселей. Количество сенсоров влияет также на величину изображения, которую можно получить с помощью данного аппарата.

При нажатии кнопки затвора на каждом пикселе чувствительного элемента фотоаппарата фиксируется интенсивность каждого из трех цветов. Процессор аппарата, как у компьютера, собирает информацию о цвете в файл и записывает его на запоминающее устройство — карту памяти. После этого фото можно просматривать на компьютере или специальной приставке. При этом и на самом фотоаппарате можно сразу посмотреть сделанный снимок, что является огромным преимуществом цифрового фотоаппарата.

Какие еще достоинства имеет цифровой фотоаппарат?

Во-первых, возможность получения неограниченно большого количества копий без потери качества «оригинала» фотографии.

Во-вторых, возможность использования фотоаппарата при различных световых условиях и с разных расстояний без дополнительных устройств.

В-третьих, возможность использования цифровых изображений для переноса на различные поверхности и размещения на Web-сайте, а также редактирования с помощью различных компьютерных программ.

В-четвертых, возможность сделать большое количество снимков с минимальным интервалом времени (10 и более кадров в секунду).



В-пятых, габаритные размеры и масса. Например, некоторые аппараты имеют размеры $10 \times 6 \times 5$ см и массу 200 г.



1. Для чего служит фотоаппарат? Назовите его основные части и объясните их назначение.



2. Можно ли сфотографировать себя в зеркале? Что при этом получим на фотопленке? Ответ обоснуйте.

§ 23. Оптические приборы для увеличения угла зрения

Поскольку острота зрения человека ограничена, то особое значение как в науке, так и на производстве приобретают оптические приборы, позволяющие увидеть и контролировать мельчайшие детали объектов. Что для этого необходимо? Как называются эти приборы и как они устроены? Какие их основные характеристики?



Процесс фокусировки изображения на сетчатку глаза называется аккомодацией глаза (от лат. *commodus* — удобный).

Близорукость — дефект зрения, при котором глаз видит удаленный предмет не резко, а расплывчато.

Дальнозоркость — дефект зрения, при котором глаз не в состоянии видеть резко близкие предметы.

Основную часть информации (примерно 90 %) об окружающем мире мы получаем с помощью органов зрения.

Расстояние наилучшего зрения — это расстояние от предмета до глаза, при котором глазные мышцы не устают, и угол зрения максимален.

Размер изображения A_1B_1 предмета AB на сетчатке (рис. 159) определяется *углом зрения* $\varphi = \frac{h}{F}$, вершина которого находится в оптическом центре глаза — точке O .

Угол зрения образован лучами, направленными на крайние точки предмета, т. е. *это угол под которым виден предмет из оптического центра глаза*. Отметим, что изображение на сетчатке всегда действительное, уменьшенное и перевернутое.

От бесконечно удаленного предмета в глаз попадает пучок параллельных лучей. В этом случае ($d = \infty$) аккомодации не требуется. Если предмет приближается, то лучи становятся расходящимися. В этом случае оптическая система глаза собирает лучи на сетчатке. В отличие от фотоаппарата наводка на резкость достигается не перемещением «объектива» хрусталика, а изменением его оптической силы.

Понятие «*нормальный глаз*» человека характеризуется расстоянием наилучшего зрения около 25 см и пределом зрения (дальняя точка),ходящимся на бесконечности.

С возрастом возможность аккомодации быстро уменьшается в основном из-за уплотнения хрусталика, теряющего способность достаточно сжиматься. Пожилой человек не может отчетливо видеть близкие пред-

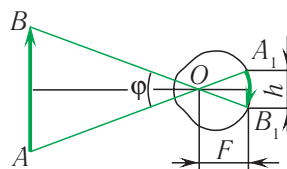


Рис. 159. Ход лучей в глазу

меты, а также различать буквы в газетах и книгах. К пятидесяти годам расстояние наилучшего зрения увеличивается в среднем до 50 см.

С возрастом вследствие болезни или при несоблюдении гигиены у глаз могут появиться дефекты. Два наиболее распространенных дефекта зрения — *близорукость* и *дальнозоркость*.

Очки — первый оптический прибор, примененный человеком. Появились они довольно давно в XIII—XIV вв. Для исправления близорукости используют очки с рассеивающими линзами, а дальнозоркости — очки с собирающими линзами. Сейчас очки стали обычным предметом обихода, и многим дают возможность нормально жить и работать. Другой разновидностью устройств, корректирующих зрение, являются контактные линзы. Помимо практичности, их особенностью является плотный контакт с роговицей, позволяющий значительно уменьшить искажения и увеличить поле зрения системы глаз-линза.

Наш глаз не дает возможности увидеть очень малые объекты без специальных вспомогательных устройств, так как мы ясно видим объект только в том случае, когда воспринимаем зрительные впечатления от различных точек объекта.

Соответственно, две точки можно раздельно видеть только тогда, когда их изображения получаются на различных чувствительных элементах сетчатки — палочках или колбочках. Так как минимальное расстояние между соседними колбочками или палочками в центральной ямке приблизительно 5 мкм, а расстояние от сетчатки до хрусталика 17 мм, то поэтому минимальный угол зрения, при котором две точки еще видны раздельно для нормального глаза, составляет около $1'$. Кроме того, минимальный угол зрения должен соответствовать дифракционному расширению пучка, вызванному его прохождением через зрачок.

Чем больше угол φ между прямыми, соединяющими оптический центр глаза O (рис. 160) с крайними точками предмета (угол зрения), тем

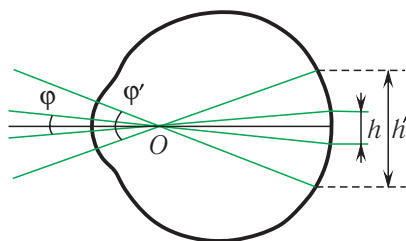


Рис. 160. Увеличение угла зрения

яснее виден предмет и тем большее число различных деталей можно различить. Угол зрения можно увеличить ($\varphi' > \varphi$), приближая предмет к глазу или глаз к предмету. При этом размер изображения на сетчатке также увеличивается ($h' > h$).

Таким образом, увеличение объема зрительной информации может быть достигнуто лишь за счет увеличения угла зрения. Простейший способ увеличить

угол зрения — приблизить предмет к глазу. Однако это не всегда возможно. Наименьшее расстояние до глаза, при котором мы еще видим предмет, определяется ближним пределом аккомодации. Опыт показывает, что объект не фокусируется на сетчатке, если он находится от глаза на расстоянии ближе 14 см. Вследствие этого возникает потребность в создании приборов, позволяющих увеличить угол зрения.

Оптические приборы, вооружающие глаз, подразделяются на две группы:

- 1) приборы для рассматривания *очень мелких объектов* (лупа, микроскоп), которые эти объекты как бы «увеличивают»;
- 2) приборы, предназначенные для рассматривания *удаленных объектов* (зрительные трубы, бинокли, телескопы), которые эти объекты как бы «приближают».

Лупа — оптический прибор (собирающая линза), позволяющий увеличить угол зрения (т. е. увеличить мелкие детали предметов) (рис. 161).

Лупа представляет собой короткофокусную линзу (F от 10 мм до 100 мм), которая располагается между глазом и предметом.

При использовании лупы предмет нужно поместить вблизи фокальной плоскости линзы (изображение находится на бесконечности), чтобы мышцы глаз были полностью расслаблены. Предмет может также помещаться на расстоянии наилучшего зрения, т. е. между фокусом и оптическим центром линзы.

Увеличением лупы Γ называется отношение углов, под которыми виден предмет при применении лупы (угол ϕ') и при рассматривании его невооруженным глазом (угол ϕ) с *расстояния наилучшего зрения* d_0 (рис. 162):

$$\Gamma = \frac{\phi'}{\phi}.$$

Тогда увеличение лупы равно:

$$\Gamma = \frac{\phi'}{\phi} = \frac{F + d_0}{F} = 1 + \frac{d_0}{F}. \quad (1)$$



Рис. 161. Лупа

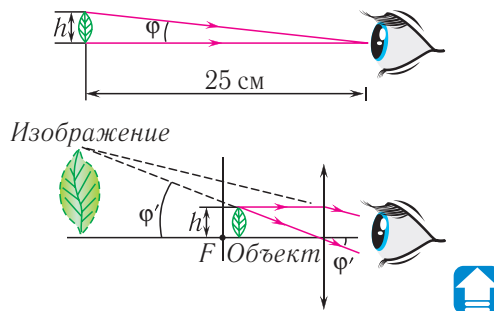


Рис. 162. Мелкий предмет, рассматриваемый: а — невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения; б — через лупу

Эта формула соответствует *аккомодации глаза на расстояние наилучшего зрения*.



Тогда угол $\varphi' = \frac{h}{F}$ и увеличение лупы в этом случае имеет вид:

$$\Gamma = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{d_0}{F}. \quad (2)$$



Эта формула соответствует *аккомодации глаза на бесконечность*.

Но в этом случае приходится напрягать мышцы глаз.

Вследствие того что $d_0 = 0,25$ м, обычно лупы имеют увеличение от 2,5 до 25 раз. Лупы с увеличением $\Gamma > 40$ не применяются из-за сильных искажений изображения или малости обзора.

▶ В XVII в. голландский мастер Антоний Ван Левенгук с помощью линз смог увидеть капилляры кровеносной системы, красные кровяные тела, изучать подробности строения простейших одноклеточных.

Микроскоп (от греч. *μικρος* (микрос) — маленький и *σκοπεω* (скопео) — смотрю) — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным глазом.

Таким образом, назначение *микроскопа* состоит в том, чтобы получать с его помощью такое изображение не различимого для глаза предмета, которое, не находясь ближе 14 см от глаза, рассматривалось бы под углом зрения большим, чем предельный угол в $1'$.

Микроскоп состоит из двух собирающих линзовых систем: объектива 1 с фокусным расстоянием F_1 , равным нескольким миллиметрам, и окуляра 2 с фокусным расстоянием F_2 , равным нескольким сантиметрам (рис. 163). Предмет S_1S_2 помещается перед фокусом объектива.



В микроскоп объект виден детальнее, поскольку рассмотрение многого изображения $S_1''S_2''$ объекта в окуляр осуществляется под большим углом зрения.



Из-за явления дифракции в микроскоп невозможно рассматривать объекты, размеры которых сравнимы с длиной волны света. Таким образом, максимальное увеличение микроскопа ограничено ($\Gamma \leq 2000$) вследствие волновой природы света.



При рассматривании крупных, но очень удаленных объектов угол зрения мал и может быть меньше предельного. В этом случае для увеличения угла зрения применяются *бинокли* и *телескопы*.

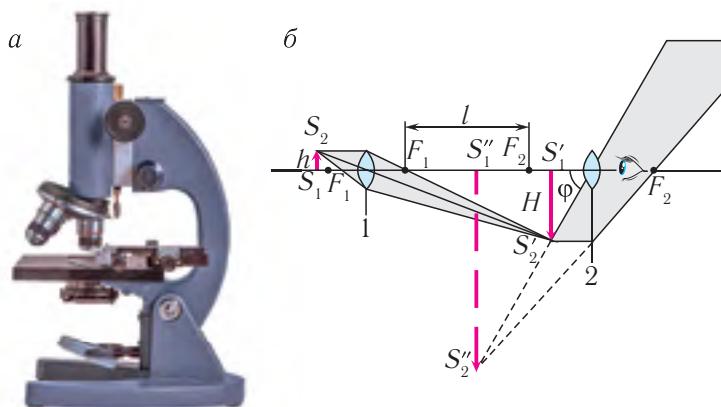


Рис. 163. Микроскоп: *а* — общий вид; *б* — оптическая схема и ход лучей

Телескопы (от греч. $\tau\eta\lambda\epsilon$ (теле) — далеко и $\sigma\kappa\omicron\pi\epsilon\omega$ (скопео) — смотрю) — астрономические оптические приборы, предназначенные для наблюдения небесных тел. О них вы узнаете подробно в курсе астрономии.

Две маленькие подзорные трубы, составленные вместе для двух глаз, дают **бинокль** (рис. 164, *а*). Поскольку труба Кеплера дает перевернутое изображение, то в биноклях, построенных на ее основе, применяется оборачивающая система из двух призм с полным отражением (рис. 164, *б*).

Наличие двух призм позволяет создать прямое изображение, так как одна призма поворачивает изображение в вертикальной плоскости, другая — в горизонтальной. Кроме того, благодаря призмам объективы в полевом бинокле можно раздвинуть больше, чем окуляры, которые приставляются к глазам (см. рис. 164). Соответственно, изображение в таком бинокле не только приближено, но и объемно.

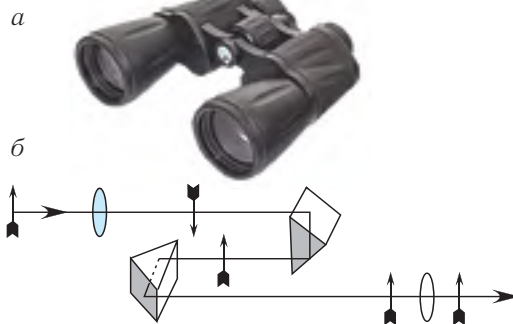


Рис. 164. Бинокль: *а* — общий вид; *б* — оборачивающая система призм



1. Что такое угол зрения? Чем определяется минимальный угол зрения?
2. Для чего предназначена лупа? Микроскоп? Подзорная труба? Бинокль?
3. Чем микроскоп отличается от подзорной трубы?
4. Какой цвет обеспечивает наилучшую разрешающую способность оптического микроскопа?

5. Почему оптический микроскоп не позволяет наблюдать молекулы и клетки?
6. Почему изображение, даваемое биноклем, объемно?
7. Атомы имеют размеры порядка $\sim 10^{-10}$ м. Объясните, можно ли, используя видимый свет, визуально наблюдать атом.



САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 3

Оптика — раздел физики, в котором изучаются свойства света, его физическая природа и взаимодействие с веществом.

Под **светом** понимают электромагнитные волны с частотами от $1,5 \cdot 10^{11}$ Гц до $3 \cdot 10^{16}$ Гц (длины волн изменяются в диапазоне, соответствующем инфракрасному, видимому и ультрафиолетовому излучению).

Электромагнитные волны распространяются в вакууме с максимальной возможной в природе скоростью переноса энергии — $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Скорость распространения света в веществе определяется соотношением:

$$v = \frac{c}{n}.$$

Абсолютный показатель преломления вещества равен отношению модуля скорости света в вакууме к модулю скорости света в веществе:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Длина волны λ_n в веществе определяется соотношением:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n},$$

где λ — длина волны в вакууме, n — абсолютный показатель преломления вещества.

При переходе световой волны из вакуума в вещество или из одного вещества в другое **частота света остается неизменной**.

Интерференция света — явление возникновения устойчивой во времени картины чередующихся максимумов и минимумов амплитуд результирующей волны при сложении двух (или нескольких) когерентных волн.

Оптическая разность хода волн $\delta = n_2 d_2 - n_1 d_1 = c \left(\frac{d_2}{v_2} - \frac{d_1}{v_1} \right)$ — разность расстояний, пройденных волнами с учетом их различных модулей скоростей v_2 и v_1 распространения в этих средах с показателями преломления n_1 и n_2 .

Условие максимумов интерференции:

$$\delta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Условие минимумов интерференции:

$$\delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Устойчивое во времени распределение амплитуд колебаний в пространстве при интерференции называется **интерференционной картиной**.

Принцип Гюйгенса — Френеля:

все вторичные источники, расположенные на волновом фронте, когерентны между собой. Огибающая волна, получающаяся в результате интерференции вторичных волн, совпадает с волной, испускаемой источником.

Явление огибания волнами непрозрачных препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от прямолинейного, называется **дифракцией**.

Дифракционная решетка — оптический прибор, предназначенный для разложения света в спектр и точного измерения длин волн. Он состоит из большого числа равноотстоящих параллельных штрихов, нанесенных на стеклянную или металлическую поверхность.

Условие возникновения главных дифракционных максимумов, наблюдаемых под углами θ , при нормальном падении света на дифракционную решетку:

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Под **лучом** понимают линию, вдоль которой переносится энергия электромагнитной волны.

Геометрической оптикой называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о нем как о совокупности световых лучей.

Закон отражения света:

лучи, падающий и отраженный, а также перпендикуляр к отражающей поверхности, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости;

угол отражения равен углу падения.

Центр сферы O называется **оптическим центром** зеркала, его радиус R — **радиусом** зеркала. Вершина шарового сегмента P называется **полюсом** зеркала. Прямая линия OP , проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется **главной оптической осью**. Любая прямая, например прямая OM , проходящая через оптический центр O

и поверхность зеркала (за исключением его главной оптической оси), называется **побочной оптической осью**. Точка F , которая находится на главной оптической оси на расстоянии $F = \frac{R}{2}$ от полюса зеркала, называется **главным фокусом зеркала**.



Изменение направления распространения света при прохождении через границу раздела двух сред называется **преломлением света**.

Закон преломления света:

лучи, падающий и преломленный, лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения луча к плоскости границы раздела двух сред;

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред и равная отношению показателю преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Явление отсутствия преломленного луча при отражении падающего от границы раздела сред называется **полным отражением света**. Наименьший угол, с которого начинается полное отражение, называется **предельным углом полного отражения**:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}; (n_2 < n_1).$$

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}.$$

Правило знаков:

в случае собирающей линзы, действительного источника и действительного изображения знаки перед величинами F , d , f выбирают *положительными*;

в случае рассеивающей линзы, мнимого источника и мнимого изображения — знаки перед величинами F , d , f выбирают *отрицательными*.

Линейным (поперечным) увеличением Γ называется отношение линейного размера изображения h к линейному размеру предмета H :

$$\Gamma = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}.$$

Цифровой фотоаппарат — оптический прибор, предназначенный для получения и записи оптического изображения на электронные носители (флэш-карты, диски и т. д.).



Лупа — оптический прибор (собирающая линза), позволяющий увеличить угол зрения.

Микроскоп — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным взглядом.

Телескоп — астрономический оптический прибор, предназначенный для наблюдения небесных тел.



Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (О. Рёмер, А. Физо, А. Майкельсон, Т. Юнг, О. Френель).

2. Если посмотреть через металлическую или пластмассовую трубку на свет, то можно увидеть светлые и темные кольца. Изучите это явление и объясните его. Исследуйте, как радиусы наблюдаемых колец зависят от диаметра трубки.

3. Если проделать небольшое отверстие в стенке темного ящика (камера обскуры), то на его дальней стенке появится обратное изображение предметов (рис. 165). Исследуйте, как яркость и резкость изображения зависят от диаметра отверстия.

4. Если вы посмотрите на читаемый вами текст то правым, то левым глазом, то увидите несколько смещенные относительно друг друга и отличающиеся изображения. К какому зрительному эффекту приводят эти различия, когда вы смотрите на текст двумя глазами?

5. Из прозрачного сосуда, наполненного жидкостью (например, водой), бьет струя. Источник света (лазер) расположен таким образом, чтобы горизонтальный луч входил в струю жидкости (рис. 166). При некоторых условиях струя жидкости будет «работать» как световод. Исследуйте, как свойства такого световода зависят от скорости вытекания воды, от диаметра отверстия.

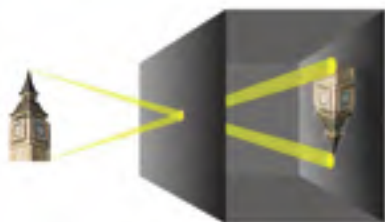


Рис. 165. Схема камеры-обскуры

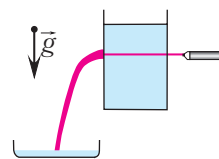
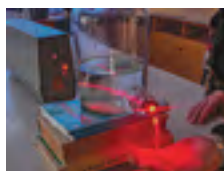


Рис. 166. Жидкий световод