

ОПТИКА

1. ПРЕДМЕТ ОПТИКИ И ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ СВЕТА

1.1. Предмет оптики

Оптика – это раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также взаимодействие света с веществом.

Термин оптика происходит от греческого «optike» – наука о зрительных восприятиях. В древности оптика определялась как наука о природе света и механизмах зрения.

Важность изучения, понимания и использования свойств света осознавалась еще в глубокой древности, так, в «Книге Света» в Славяно-Арийских Ведах, свету отводится основополагающая роль в возникновении жизни, так и говорится «Жизнь порождает свет».

Свет Солнца играет определяющую роль в нашей жизни: он поддерживает жизнь на Земле, непосредственно воздействуя и формируя все жизненно важные функции живых организмов, включая человека. Под воздействием света, в частности, сформировались особенности строения и функционирования органов зрения человека. Свету мы обязаны своим интеллектом: более 90% всей информации человек получает визуально, т.е. благодаря свету.

В настоящее время невозможно представить нашу повседневную жизнь без достижений оптики. Электрическое освещение, экраны мобильных телефонов, телевизоров, компьютеров, лазерные проигрыватели, принтеры, и т.д. Современная оптика – это широко разветвленная область исследований, послужившая основой и взаимодействующая со многими разделами современной физики (квантовая механика, физика твердого тела, лазерная физика, голография, и др.), а также со многими другими отраслями наук (информатика, биология, медицина, нелинейная динамика, и др.).

Прогресс в области информационных технологий напрямую связывают с достижениями оптической науки, благодаря которой традиционные электрические сигнальные цепи будут вытеснены оптическими элементами получения, обработки и передачи информации.

Одним из самых значительных достижений оптики явилось изобретение лазеров. Перечислим лишь некоторые области человеческой деятельности, которые развиваются на основе использования достижений лазерной техники: лазерная биология и медицина, лазерная фотохимия, лазерное разделение изотопов, лазерный управляемый термоядерный синтез, оптоэлектроника, интегральная оптика, оптические компьютеры, адаптивная оптика, кабельная оптическая видеосвязь,

оптическая память, оптическая локация, дальнометрия, дистанционный контроль окружающей среды, лазерная обработка материалов (резка, сварка, упрочение), лазерные микро- и нанотехнологии.

Нанотехнологии ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) позволяют управлять строением вещества и создавать среды с совершенно новыми оптическими свойствами. Попадая на такую среду, свет может распространяться в ней, не выходя наружу. Это свойство позволило создать необычайные материалы для текстильной промышленности; реальностью стал сказочный плащ-невидимка (используется для маскировки в армии). Покрытия, делающие невидимым военные самолеты, также изготавливаются на основе нанотехнологий.

Примеры применения высоких технологий в медицине

1. Операция по коррекции зрения проводится с помощью фемтосекундного лазера (излучающего мощные импульсы света длительностью 10^{-15} с), бесшовно т.е. не надрезая роговицу. Во время работы излучение лазера фокусируется на любой необходимой глубине в слоях роговицы.
2. Наночастицы из золота внедряются в клетки пораженной ткани, которая затем облучается излучением мощного лазера, разогревающим частицы золота и «сжигающим» пораженную ткань.
3. Лазерное зондирование используется для диагностики внутренних органов человека.

Масштаб объектов, которые изучает оптика, простирается от размеров галактик (в настоящее время на околоземной орбите находится телескоп Хаббл, который регистрирует сигналы, идущие от звезд многие миллионы световых лет, $1 \text{ св. год} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ м}$) до размеров, сравнимых с размерами атомов и молекул. К примеру, диаметр углеродной нанотрубки равен $1\text{--}2 \text{ нм}$, диаметр атома кремния – $0,15 \text{ нм}$, ширина молекулы ДНК – $2,5 \text{ нм}$, диаметр клеток крови (кровяных телец) составляет $7,5 \text{ мкм}$ ($1 \text{ мкм} = 1000 \text{ нм}$).

Без преувеличения можно утверждать, что оптика – это наука XXI века.

Нетрудно заметить, что даже самые передовые разработки в области оптических технологий базируются на фундаментальных оптических законах, явлениях и принципах. Эта неразрывная связь должна побудить будущих специалистов в любых сферах высоких технологий с уважением и вниманием отнестись к изучению базового курса оптики.

Что же такое свет?

Физика в целом, и оптика, в частности, сталкиваясь с новыми явлениями в повседневной жизни или в лабораторных экспериментах, создает определенные модели, а затем посредством изучения этих моделей и сопоставления их с экспериментальными данными развивает представления о действительности. По мере развития представлений о свойствах света, появлялись различные модели, описывающие эти свойства. Проявление свойств света происходит при взаимодействии

его со средой, поэтому наряду с развитием представлений о природе света развивались представления об оптических свойствах среды.

В настоящее время известно три модели, описывающие свойства света.

1. **Свет – это луч.** Луч – это прямая линия, по которой распространяется свет и переносится его энергия. Среда при этом рассматривается как черный ящик, замедляющий скорость света и поглощающий часть его энергии
2. **Свет – это электромагнитная волна** – возмущение напряженности электрического и магнитного полей, протекающее во времени и в пространстве. Среда в рамках электронной теории Лоренца моделируется ансамблем гармонических осцилляторов, обладающих собственными частотами колебаний. Под действием света в среде возникают электрические диполи.
3. **Свет- это поток квантов** - частиц, называемых фотонами, которые одновременно обладают свойствами волны. Среда состоит из атомов и молекул, описываемых законами квантовой механики.

В зависимости от того, какое из этих представлений лежит в основе, различают геометрическую оптику (свет-это луч), физическую оптику (свет – это волна) и квантовую оптику (свет – это квант).

Геометрическая оптика не рассматривает вопроса о природе света и о строении вещества. В ее основе лежат *эмпирические (опытные) законы* и представление о распространяющихся *независимо друг от друга световых лучах, отражающихся и преломляющихся на границах сред с разными оптическими свойствами и прямолинейных в оптически однородных средах.*

Физическая (волновая) оптика рассматривает проблемы, связанные с природой света и световых явлений, она объясняет такие явления как дифракция, интерференция, поляризация света, распространение света в различных средах. Ее теоретическим основанием служат уравнения Максвелла. Среда в рамках электронной теории Лоренца моделируется ансамблем гармонических осцилляторов, обладающих собственными частотами колебаний. Под действием света в среде возникают электрические диполи. Свойства среды характеризуются диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями, которые в общем случае зависят от частоты света и его волнового вектора. Эти величины (ϵ и μ) однозначно определяют оптические характеристики среды: показатель преломления и коэффициент поглощения.

Волновая оптика объясняет все законы геометрической оптики и границы ее применимости. В отличие от геометрической оптики, она позволяет рассматривать процессы распространения света и тогда, когда размеры систем, формирующих, и рассеивающих световые пучки, меньше длины волны.

Адекватно описывая распространение света в материальных средах, волновая оптика не смогла удовлетворительно объяснить процессы его испускания и поглощения.

Квантовая оптика рассматривает явления, в которых при взаимодействии света и вещества проявляются квантовая природа света, а также квантовые свойства атомов и молекул.

Изучение квантовых свойств атомов и молекул привело к созданию лазеров – генераторов электромагнитного излучения с уникальными свойствами, которые произвели революцию практически во всех областях физики, в том числе и оптики, а также во многих областях техники и технологии.

1.2. Эволюция представлений о природе света

СВЕТ-ЛУЧ. Кратко остановимся на истории развития оптики. Оптика — одна из самых древнейших наук, тесно связанная с потребностями практики. Она восходит к самым древним цивилизациям. Например, прямолинейное распространение света было известно в Месопотамии (5 000 лет до н.э.) и использовалось еще в древнем Египте при строительных работах. Пифагор (6 век до н.э.) высказал мысль, что тела видны благодаря испускаемым ими частицам. Аристотель (5 век до н.э.) считал, что свет есть возбуждение среды, находящейся между объектом и глазом. Он также занимался атмосферной оптикой, а радугу объяснял отражением света каплями воды. Школа Платона сформулировала два важнейших закона геометрической оптики — прямолинейность распространения света и равенство углов падения и отражения. Евклид (3 век до н.э.) в своих трактатах рассматривал возникновение изображений при отражении от плоских и сферических зеркал.

Главный вклад греков, явившийся первым шагом в развитии оптики как науки, состоит не в их гипотезах и догадках о природе света, а в том, что они нашли законы его прямолинейного распространения и отражения (катоптрика- наука об отражении света- Евклида) и умели ими пользоваться.

Следующий важный шаг - понимание законов преломления, был сделан много веков спустя. В средние века хорошо были известны эмпирические правила построения изображений, даваемых линзами, начало развиваться искусство изготовления линз. В XIII веке были изобретены очки, около 1590 г. - двухлинзовый микроскоп (Янсен, Левенгук). В 1609 г. Галилей построил первый телескоп, с помощью которого сделал ряд астрономических открытий.

Точные законы преломления света были экспериментально установлены лишь около 1620 г. (Снеллиус, Декарт). Декарт в 1637 г. опубликовал свою знаменитую "Диоптрику" (наука о преломлении света). Около 1660 г. был сформулирован принцип Ферма, в соответствии с которым свет распространяется по пути, требующем минимальной затраты времени. Этим был завершен фундамент построения геометрической оптики.

СВЕТ-ВОЛНА. Дальнейшее развитие оптики связано с открытием явлений волновой оптики: дифракции (1665 г., термин «дифракция» ввел Гримальди), интер-

ференции света и двойного лучепреломления (1669 г., Бартолинус), которые не поддавалось истолкованию в рамках геометрической оптики, а также с работами Ньютона и Гюйгенса.

Ньютон обращал большое внимание на периодичность световых явлений и допускал возможность интерференции, но отдавал предпочтение корпускулярной концепции света, согласно которой свет - это поток частиц, действующий на эфир, введенный Декартом (эфир – это механическая среда - переносчик света¹) и вызывающих в нем колебания.

По Ньютону, равенство углов падения и отражения объяснялось равенством углов при упругом рассеянии частицы на границе раздела двух сред. Ньютон считал, что преломление света вызвано действием на световые корпускулы на границе двух сред сил, изменяющих нормальную составляющую скорости корпускул.

Из рисунка следует, что $\sin \alpha = \frac{v_{1\tau}}{v_1}$, $\sin \gamma = \frac{v_{2\tau}}{v_2}$. Но т.к. $v_{1\tau} = v_{2\tau}$, то

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1.1)$$

и $n_{21} = v_2 / v_1$. Если преломление происходит на границе вакуума со средой, то $n_{21} = n = v / c$, где n – абсолютный показатель преломления. Т.к. $n > 1$, то $v > c$, т.е. скорость света в среде больше, чем в вакууме.

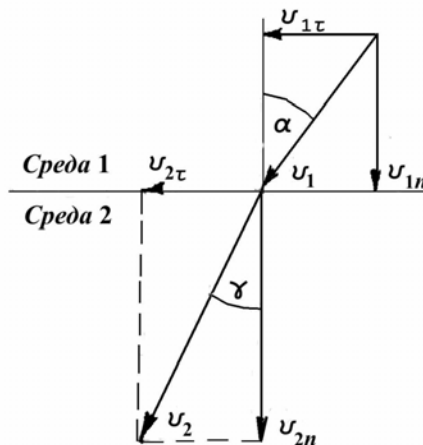


Рис. 1.1

Гюйгенс следовал идеям Леонардо да Винчи и развивал работы Гримальди и Гукка, исходя из аналогии между акустическими и оптическими явлениями. Он считал, что световое возбуждение - это импульсы упругих колебаний эфира, распространяющиеся с большой, но конечной скоростью. В то время было неясно, как быстро распространяется свет; так, одни ученые (например, Кеплер, Декарт)

¹ Заметим, что в то время были известны только механические колебания, которые могли распространяться только в среде, поэтому и была выдвинута гипотеза о существовании особой среды, в которой распространяется свет – эфира.

считали скорость света бесконечной, а другие (Гук и Ньютон) - конечной. Первое экспериментальное измерение скорости света произвел Ремер (1676) он получил значение $c = 225\,000\,000$ м/с.

Схема рассуждений Ремера приведена на рис. 1.2. Период обращения ближайшего к Юпитеру спутника равен приблизительно 42,5 ч. Поэтому спутник должен был заслоняться Юпитером или выходить из полосы затмения каждые 42,5 ч. Но в течение полугода, когда Земля удаляется от Юпитера, затмения наблюдались каждый раз со все большим запаздыванием по сравнению с предсказанными сроками, Ремер пришел к выводу, что свет распространяется не мгновенно, а имеет конечную скорость, поэтому ему требуется все больше времени для достижения Земли, по мере того как она, двигаясь по орбите вокруг Солнца, удаляется от Юпитера.

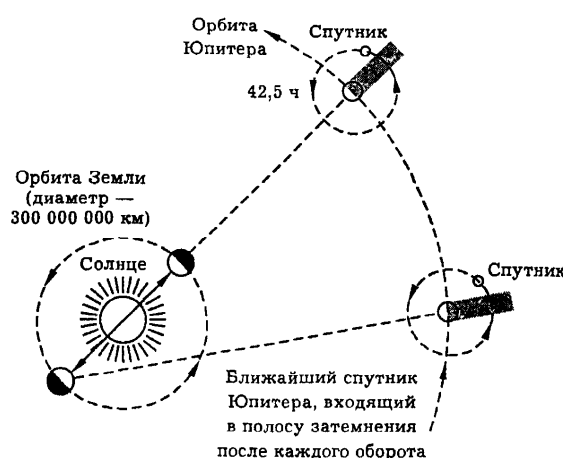


Рис.1.2

Позднее в 1726 г. на основе астрономических измерений Брадлей получил более точный результат: $c = 301\,000\,000$ м/с. Опыты по определению скорости света ведутся уже более 300 лет и не прекращаются до настоящего времени. Здесь нет ничего удивительного. Скорость света – универсальная постоянная, знание ее числового значения важно для всех разделов физики. Требование ее неизменности лежит в основе современных теорий естествознания. Наиболее точные измерения, проведенные на основе лазерных экспериментов, дают $c = 299\,702\,456,2$ м/с.

Огромным вкладом Гюйгенса в оптику является установление им принципа, согласно которому каждая точка пространства, до которой доходит световое возмущение (точка волнового фронта) является источником вторичных сферических волн², огибающая фронтов которых представляет собой фронт реальной распространяющейся волны в последующие моменты времени (опубликовано в «Трактате о свете», 1690 г.). Волновым фронтом называется волновая поверхность на грани-

² Гюйгенс рассматривал свой принцип как прием для отыскания направления распространения света (по сути, прием геометрической оптики, а не волновой), он не связывал природу света с волновым процессом. То, что мы называем вторичными сферическими волнами, с точки зрения Гюйгенса, – возмущение, аналогичное кругам на воде.

це возмущенной и невозмущенной части пространства. Волновая поверхность (поверхность равных фаз) – поверхность, на которой фаза волны постоянна.

В последующем этот принцип был дополнен Френелем предположением об интерференции вторичных волн и получил название принципа Гюйгенса-Френеля. Опираясь на этот принцип, Гюйгенс объяснил законы отражения и преломления света. Причем из его теории следовало правильное выражение для показателей преломления: $n_{21} = v_1 / v_2$, где v_1, v_2 - скорости света в первой и во второй среде. Он также объяснил двойное лучепреломление в исландском шпате, открытое в 1670 г. Бартолинусом. Однако, сформулировав фундаментальный принцип, Гюйгенс не разработал последовательной волновой теории, которая могла бы противостоять воззрениям Ньютона. Поэтому корпускулярная теория истечения и распространения света сохранила свое господствующее положение до начала XIX века.

Победа волновой оптики связана с работами Юнга и Френеля. Юнг определил условия интерференции (1801) и на этой основе объяснил цвета тонких пленок. Френель, используя принцип Гюйгенса, дал удовлетворительное волновое объяснение прямолинейности распространения света и многочисленным дифракционным явлениям.

В опытах Френеля и Араго было установлено, что волны, поляризованные перпендикулярно друг другу, не интерферируют. Это позволило Юнгу и независимо от него Френелю высказать важную идею о поперечности световых волн.

Объяснение законов отражения и преломления на основании принципа Гюйгенса

Закон отражения поясняет рис.1.3а. Пусть параллельный пучок лучей света A_1B_1 падает на границу раздела двух сред MN . Луч A_1A достигает границы раздела раньше, чем луч B_1B . Положение волнового фронта в этот момент времени показано линией AC . Из точки A в обратном направлении начинает испускаться вторичная сферическая волна и прежде, чем луч B_1B достигнет границы, она пройдет расстояние AD . На рисунке показано положение волнового фронта DB в момент времени, когда луч B_1B достигает границы раздела. Прямоугольные треугольники ACB и ADB равны, т.к. сторона AB - общая, а $AD = CB = ct$, где t – время распространения волнового фронта AC от точки C до точки B (или время распространения вторичной волны от точки A до точки D). Из равенства треугольников следует, что $\angle CAB = \angle DBA$, но $\angle CAB = \alpha$ и $\angle DBA = \beta$ как углы со взаимно перпендикулярными сторонами, следовательно, $\alpha = \beta$, т.е. угол падения равен углу отражения.

Закон преломления. Вывод закона преломления света производится аналогичным способом, с той разницей, что теперь вторичная волна распространяется во второй среде (рис.1.3б). Пусть на границу раздела двух сред падает параллельный

пучок лучей A_1B_1 . Положение волнового фронта в момент времени, когда луч A_1A достигает границы раздела, показано линией AC . В момент, когда его левый край достигнет точки A (см. рис.1.3.б), во второй среде вокруг этой точки начнет образовываться сферическая волна. Правый край фронта подойдет к границе раздела через время $t = CB/v_1$, где v_1 – скорость распространения света в среде 1. За это время сферическая волна из точки A успеет распространиться на расстояние $AD = v_2t$ (v_2 – скорость распространения света в среде 2). Из рисунка видно, что $\angle CAB = \alpha$ и $\angle ABD = \gamma$. Тогда

$$\sin \alpha = \frac{CB}{AB} = \frac{v_1 t}{AB}, \sin \gamma = \frac{AD}{AB} = \frac{v_2 t}{AB}, \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1.2)$$

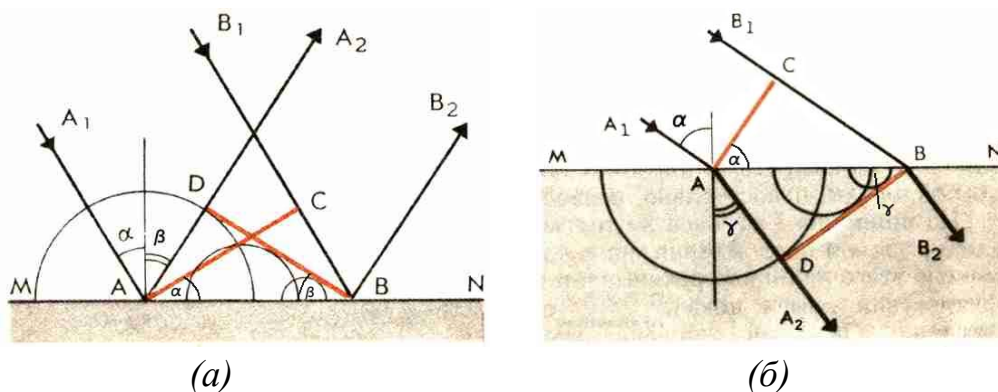


Рис.1.3. К выводу законов отражения (а) и преломления (б) света

Т.о. все известные к тому времени оптические явления получили волновую интерпретацию. Вместе с тем, представления о поперечности колебаний упругого эфира привели к необходимости наделения его противоречивыми свойствами, в частности, свойствами твердого тела, в котором свободно перемещаются другие тела.

Эти трудности были преодолены лишь при последовательном развитии учения об электромагнитном поле Максвеллом в 1862-1864 г.г. Основываясь на открытиях Фарадея (опыт по изучению вращения плоскости поляризации света в магнитном поле, 1848 г.), Максвелл пришел к выводу, что свет есть электромагнитное поле, а не упругая волна эфира.

Максвелл обобщил все опытные данные и сформулировал уравнения, на основании которых теоретически показал, что

1. электромагнитное поле способно существовать самостоятельно, отдельно от электрических зарядов и токов, изменяя свое состояние – напряженность электрического и магнитного поля – во времени и в пространстве, т.е. существовать в виде электромагнитных волн.

2. скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна электродинамической постоянной $\frac{1}{c^2} = \epsilon_0 \mu_0$,

При этом величина c совпала со значением скорости света, измеренной экспериментально. В среде скорость света $v = c/n$, $n^2 = \epsilon\mu$, где ϵ, μ — соответственно относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

В 1888 году Герц обнаружил электромагнитные волны экспериментально.

Эксперименты по изучению взаимодействия света с веществом (явлений дисперсии, поглощения, рассеяния, поляризации света) привели к представлению о веществе как совокупности осцилляторов³, с которыми взаимодействует свет, и к созданию электронной теории строения вещества.

В 90-х годах XIX века Друде, Гельмгольц и, в особенности, Лоренц (1896) при создании **электронной теории строения** вещества объединили **идею об осцилляторах и электромагнитную теорию света**. Плодотворное представление об электронах, которые входят в состав атомов и молекул и способны совершать в них колебания, позволило описать многие оптические явления, в т.ч. нормальную и аномальную дисперсию. Рэлей (1890) на основе представления о среде как об ансамбле осцилляторов создал основы теории рассеяния света. Рождественский (1912) выполнил наиболее точные работы по аномальной дисперсии света, хорошо согласующиеся с электронной теорией. Зееман (1886) наблюдал, а Лоренц (1897, Нобелевская премия) объяснил действие магнитного поля на частоты излучения и поглощения атомов. В полном согласии с теорией Максвелла оказалась и величина светового давления (впервые идею высказал Кеплер), измеренная Лебедевым (1899).

Решающие и наиболее поразительные периоды развития физики — это периоды великих обобщений, когда явления, ранее казавшиеся разрозненными, неожиданно становятся всего лишь разными аспектами одного и того же процесса. История физики и, в частности, оптики — это история таких обобщений, а в основе успеха физической науки лежит главным образом наша способность к синтезу. По-видимому, самым знаменательным событием XIX столетия считается тот день, когда Максвелл в 1860 г. сопоставил законы электричества и магнетизма с законами поведения света и создал электромагнитную теорию света.

"Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется среда, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые и электромагнитные явления", писал Максвелл.

³Осциллятором называется материальная точка, колеблющаяся под действием квазиупругой (возвращающей) силы. По Лоренцу, на электрон в среде (в атоме со стороны ядра) действует квазиупругая сила. Под действием света атом поляризуется т.е. становится диполем и приобретает электрический дипольный момент. Диполь — два одинаковых по величине заряда q с противоположными знаками, находящихся на расстоянии l друг от друга. Под действием света это расстояние изменяется со временем.

Создание электромагнитной теории света является одним из величайших достижений физики. Недаром, говоря современным языком, в рейтинге величайших ученых "всех времен и народов" создатель этой теории Максвелл постоянно находится на одном из первых мест.

Электромагнитная теория света стала отправным пунктом при создании теории относительности. При выяснении природы и свойств эфира, была разработана электродинамика движущихся сред (Лоренц, 1896), а также были проведены опыты с движущимися относительно источника излучения наблюдателями (опыт Майкельсона, 1881 и опыт Майкельсона-Морли, 1887). В данных экспериментах эфир не был обнаружен. Эти и ряд других опытов, противоречивших представлениям о среде-переносчике электромагнитных колебаний, нашли объяснение в созданной Эйнштейном специальной теории относительности (1905), приведшей к кардинальному пересмотру классической физики и устранению необходимости в эфире как гипотетической среде-переносчике света.

Плодотворность классической электродинамической теории света Максвелла, дополненной электронной теорией строения вещества Лоренца, неоднократно подтверждалась в дальнейшем при объяснении огромного количества оптических явлений. Т.о. построение электромагнитной теории света и дополнение ее электронной теорией взаимодействия света и вещества явилось крупнейшим этапом в развитии оптики и физики в целом.

Как сказано выше, из теории Максвелла следует, что оптическое излучение или свет представляет собой электромагнитные волны. **Электромагнитная волна — колебания напряженности электрического и магнитного полей, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью.**

На рис. 1.4 показан участок шкалы электромагнитного излучения в длинах волн, соответствующий оптическому диапазону.

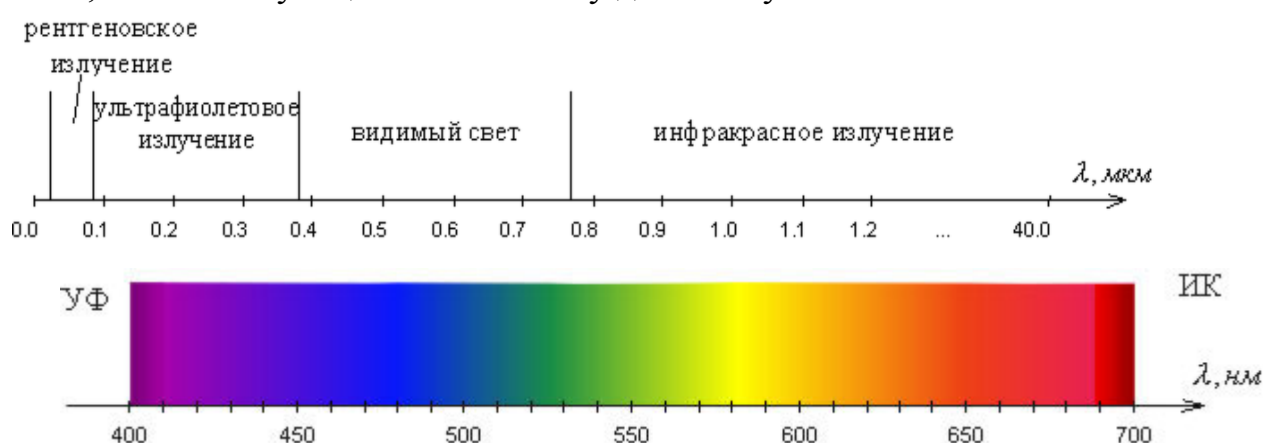


Рис.1.4. Оптический и видимый диапазоны на шкале электромагнитных волн

Под светом (оптический диапазон) в настоящее время в рамках физической оптики понимают не только видимое излучение, но и примыкающие к нему широкие области инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения.

Электромагнитные волны различной длины условно делят на диапазоны по различным признакам (способу получения, способу регистрации, характеру взаимодействия с веществом). Границы оптического диапазона, а также границы между его участками установлены на основе экспериментальных данных и не являются абсолютно точными. Диапазон видимых длин волн: $380 \text{ нм} = \lambda < 760 \text{ нм}$.

В таблице 1 приведены диапазоны электромагнитных волн источники излучения, методы регистрации, свойства излучения и области применения.

Таблица 1

Виды излучений	Длина волны	Источники	Регистрация	Свойства излучения	Применение
Радиоволны	100 км-1мм ($3 \times 10^3 - 3 \times 10^{12}$ Гц)	Транзисторные цепи	Резонатор Герца, антенна	Отражение, преломление дифракция поляризация	Связь и навигация
Инфракрасное излучение	0,1м – 770нм ($3 \times 10^{12} - 4 \times 10^{14}$ Гц)	Вращательные и колебательные спектры молекул	Болометр, фотоэлемент	Отражение, преломление дифракция поляризация	Приготовл. пищи, на- гревание, сушка, фо- токопирова- ние
Видимый свет	770 – 380 нм ($4 \times 10^{14} - 8 \times 10^{14}$ Гц)	Излучение атомов и молекул при возбуждении их электронных оболочек.	Спектро- граф, болометр	Отражение, преломление дифракция поляризация	Наблюдение за видимым миром
Ультрафиолетовое излучение	380 – 5 нм ($8 \times 10^{14} - 6 \times 10^{16}$ Гц)	Излучение атомов и ионов при возбуждении их электронных оболочек.	Фотоэле- мент, болометр	Фотохими- ческие реак- ции	Лечение за- болеваний кожи, унич- тожение бактерий, сторожевые устройства
Рентгеновское излучение	5 нм– 10^{-2} нм ($6 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$ Гц)	Излучение с внутренних электронных оболочек атомов и тормозное излучение электронов в металле – рентгеновская трубка.	Фотопла- стинка	Проникаю- щая способность дифракция	Рентгено- графия, ра- диология, обнаружение подделок
γ - излучение	$5 \times 10^{-11} - 10^{-15}$ м	Излучение ядер атомов при радиоактивном распаде, космическое излучение	Трубка Гейгера	Проникаю- щая способность	Стерилиза- ция, Медицина, лечение рака

Вместо частот при описании процессов взаимодействия света и вещества в рамках квантовой оптики обычно говорят об энергии кванта света $E = h\nu$. Энергию при этом выражают в электрон-вольтах: 1 ЭВ – это энергия, которую приобретает электрон, пролетая разность потенциалов в один Вольт.

СВЕТ-КВАНТ. В тот момент, когда волновая теория стала общепризнанной, были установлены спектральные закономерности излучения света атомами, открыт фотоэффект и эффект Комптона.

Волновая теория Максвелла не смогла объяснить процессов испускания и поглощения света, и в частности, фотоэлектрического эффекта. Электронная теория Лоренца, в свою очередь, не смогла объяснить многие явления, связанные с взаимодействием света с веществом, в частности, вопрос о распределении энергии по длинам волн при тепловом излучении абсолютно черного тела.

Перечисленные затруднения и противоречия были преодолены благодаря смелой гипотезе (1900) немецкого физика Планка, согласно которой излучение и поглощение света происходит не непрерывно, а дискретно, т. е. определенными порциями (квантами), энергия и импульс которых определяется как:

$$E = h\nu, E = mc^2, p = mc, \quad (1.3)$$

Где E и p – энергия и импульс кванта света (фотона), h – постоянная Планка. Теория Планка не нуждалась в понятии об эфире. Она объяснила тепловое излучение черного тела. Эйнштейн в 1905 г. создал квантовую теорию света, согласно которой не только излучение света, но и его распространение происходит в виде потока световых квантов — фотонов, энергия которых определяется соотношением (1.3), а масса равна

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}, \quad (1.4)$$

где λ – длина волны, c – скорость света.

Квантовые представления о свете хорошо согласуются с законами излучения и поглощения света, законами взаимодействия света с веществом (фотоэффект, эффект Комптона).

Все многообразие научных свойств и законов распространения света, его взаимодействия с веществом показывает, что свет имеет сложную природу. Он представляет собой единство различных видов движения — корпускулярного (квантового) и волнового (электромагнитного).

Длительный путь развития привел к современным представлениям о двойственной корпускулярно-волновой природе света. Выражения (1.3) и (1.4) связывают корпускулярные характеристики излучения — массу и энергию кванта — с его волновыми характеристиками — частотой колебаний и длиной волны.

Луи де Бройль высказал гипотезу о всеобщем корпускулярно волновом дуализме материи: каждая частица обладает волновыми свойствами, и каждой

волне могут быть приписаны определенная масса и импульс. Свет – лишь один из примеров проявления дуализма в природе.

Как испускается свет

Согласно представлениям классической теории, электромагнитное излучение возникает при ускоренном движении заряженных частиц. Простейшей (модельной) излучающей системой является электрический диполь – дипольный осциллятор – (совокупность двух равных по абсолютной величине зарядов q с противоположными знаками, находящихся на расстоянии l друг от друга), момент которого $p=ql$ изменяется со временем. При этом может изменяться как величина заряда q (излучение радиопередатчиков), так и величина плеча диполя l (оптическое излучение)

Зависимость интенсивности излучения диполя I от угла θ между направлением радиуса-вектора (проведенного из центра диполя в точку наблюдения) и осью диполя, приводимая в полярных координатах (рис. 1.5), называется диаграммой направленности излучения диполя. Как видно из приведенной диаграммы, диполь сильнее всего излучает в направлениях, перпендикулярных его оси ($\theta = \pi/2$). Ось диполя показана стрелками. Вдоль своей оси ($\theta = 0$ и $\theta = \pi$) диполь не излучает вообще.

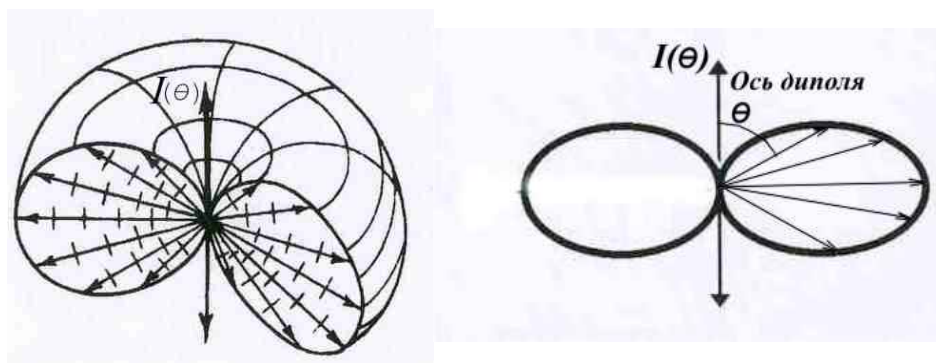


Рис. 1.5. Диаграмма направленности излучения диполя

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ (ЛУЧЕВАЯ) ОПТИКА

2.1 Основные понятия, границы применимости и задачи ГО

Геометрическая оптика играет важную роль в современном оптическом приборостроении и в развитии информационных технологий; она решает задачи формирования светового пучка (светотехника) и образования оптического изображения (оптотехника).

Представления и законы геометрической оптики возникли на основе опыта задолго до выяснения природы света. Законы геометрической оптики справедливы лишь в той степени, в какой можно пренебречь явлениями интерференции и дифракции световых волн. Дифракция сказывается тем слабее, чем меньше длина волны. Поэтому можно сказать, что **геометрическая оптика является предельным случаем волновой оптики, соответствующим исчезающе малой длине волны ($\lambda \rightarrow 0$)**. Длины волн считаются пренебрежимо малыми по сравнению с размерами неоднородностей электромагнитного поля и среды.

Геометрическая оптика не применима там, где необходимо исследовать тонкую структуру неоднородностей, сравнимых с длиной волны, она не описывает распределение светового поля вблизи края изображения в оптических системах, а также вблизи фокусов пучков, то есть там, где возможна тонкая структура неоднородностей.

Законы и границы применимости геометрической оптики могут быть получены математически из уравнений Максвелла для электромагнитного излучения

Основным понятием геометрической оптики является **световой луч**. **Световой луч** - это геометрическая линия, вдоль которой распространяется свет и переносится световая энергия. В геометрической оптике под **светящейся точкой** понимают источник, не имеющий геометрических размеров. Светящаяся точка и луч в геометрической оптике – понятия математические.

В физической оптике световым лучам соответствуют нормали к волновым поверхностям, что следует из уравнений Максвелла (будет показано далее). Лучи и поверхности постоянной фазы (волновые поверхности) электромагнитных волн для излучения точечного источника приведены на рис. 2.1.



Рис. 2.1.

Отверстия оптических приборов всегда имеют конечные размеры и в них от одной светящейся точки попадает много лучей, или **пучок лучей**.

Пучок лучей – это совокупность лучей, характеризующаяся конечными поперечными размерами. Т.к. луч – геометрическая линия, не имеющая размеров, то чтобы получить пучок конечного поперечного размера, надо сложить бесконечное число лучей. Ограничение на поперечные размеры пучка налагают условия дифракционной расходимости. В геометрической оптике пучок лучей – это, как и луч, – линия, вдоль которой распространяется свет. Заметим, что реально существующие тонкие лучи (пучки) света способны ввести в заблуждение. Они тонкие сравнительно со своей длиной, но очень толстые сравнительно с длиной волны. Узкий лазерный пучок – на самом деле плоская волна, поперечные размеры которой практически бесконечны по сравнению с длиной волны λ .

То же относится и к понятию светящейся точки (**точечный источник**): в реальности источник света – это тело, состоящее из бесконечного числа точечных источников, т.е. имеющее конечные размеры, но размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до него (рассматривать как точку, равномерно излучающую свет по всем направлениям). Практически источник можно считать точечным, если его размеры не менее, чем в 10 раз меньше расстояния до точки наблюдения. Физический точечный источник – это источник, размеры которого малы по сравнению с длиной волны, испускаемой этим источником. При этом сам источник состоит из большого числа излучателей, например, атомов.

2.2 Законы геометрической оптики.

- закон прямолинейного распространения света в однородной, прозрачной (непоглощающей) среде;
- закон независимости световых пучков;
- закон отражения света;
- закон преломления света на границе двух однородных, прозрачных сред.

Основные законы геометрической оптики дополняет **принцип Ферма**

Первые три закона были известны Евклиду, Аристотелю, Птолемею и другим мыслителям древности. Закон преломления был открыт в 17 веке Снеллиусом и объяснен Декартом.

Используя представление о световых лучах как о линиях, вдоль которых распространяется энергия света, эти законы можно получить на основе электромагнитной теории света.

Закон прямолинейного распространения света в однородной прозрачной среде.

Свет между двумя точками в однородной ($n=const$) прозрачной среде распространяется по прямой, соединяющей эти точки.

Прямолинейность световых лучей, испускаемых точечным источником света, приводит к образованию резкой тени предмета (см. рис 2.2). Форма тени предмета при его освещении точечным источником соответствует геометрической центральной проекции контура предмета (с центром в источнике). Этот закон имеет глубокий смысл, ибо само понятие прямой линии сформировалось главным образом на основе оптических наблюдений. Изложение этого закона встречается в сочинениях Фалеса Милетского (600 лет до нашей эры).

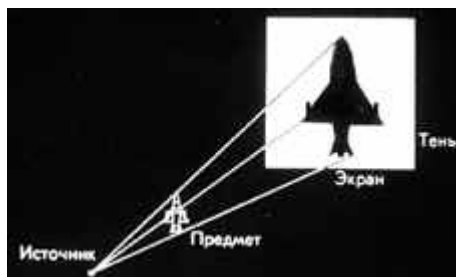
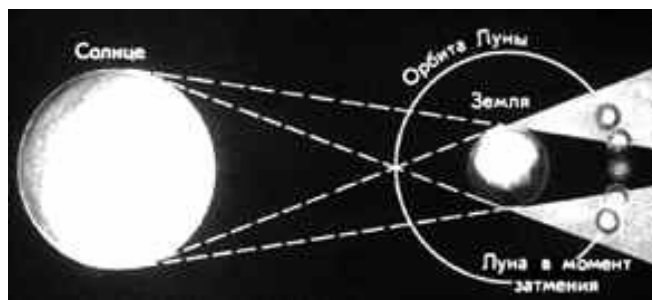


Рис. 2.2.

При освещении предмета протяженным источником света края тени оказываются размытыми. В переходную область между полной тенью и светом (в область полутени) попадают лучи не от всех точек источника. Этот закон нарушается, когда свет проходит через очень малые преграды, и отклонение от прямолинейности тем больше, чем меньше эти преграды.

Астрономической иллюстрацией прямолинейного распространения света и, в частности, образования тени и полутени, может служить затмение одних планет другими, например затмение Луны, когда Луна попадает в тень Земли (см. рис.2.3а). Вследствие взаимного движения Луны и Земли тень Земли перемещается по поверхности Луны, и лунное затмение проходит через несколько фаз. Фазы лунного затмения показаны на рис. 2.3б.



(а)



(б)

Рис.2.3

Геометрическое проецирование с помощью световых лучей, т.е. формирование оптических изображений, широко используется в технике, в частности, при создании интегральных микросхем. Изображенные на фотопленке элементы микросхемы проецируются на кристалл кремния, где с помощью системы линз получа-

ется подобное уменьшенное изображение микросхемы (см. рис 2.4). Специальная обработка позволяет превратить это изображение в печатную микросхему.

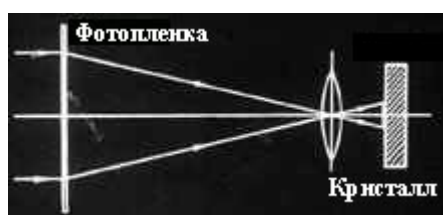


Рис. 2.4.

Закон независимости световых пучков

Отдельные лучи, встречаясь и пересекаясь друг с другом, не оказывают взаимного влияния.

Это означает, что если световой поток разбить на несколько пучков, то действие каждого из них на экране не зависит от того, действуют ли другие пучки, или они устранены. Аналогично распространение в среде каждого пучка не зависит от присутствия других пучков. Если несколько лучей падают на одну и ту же площадку, то ее освещенность равна сумме освещенностей, создаваемых каждым пучком по отдельности. Т. е. в геометрической оптике пренебрегают интерференцией лучей (см. рис. 2.5).



Рис. 2.5. Предмет, освещенный несколькими источниками

Закон независимости световых лучей следует из **линейности** уравнений электродинамики (уравнений Максвелла). Этот закон строго справедлив для вакуума. Для световых лучей в веществе закон независимости лучей справедлив для линейных сред, оптические свойства которых не зависят от интенсивности света (что выполняется точно при небольшой интенсивности света). Этот закон нарушается при распространении в веществе света высокой интенсивности (сфокусированное лазерное излучение), а также в активных средах с инверсной населенностью энергетических уровней (в рабочем веществе лазера).

Прохождение света через плоскую границу раздела двух однородных прозрачных сред

Если свет падает на границу двух однородных прозрачных сред, то падающий луч разделяется на отраженный луч и луч преломленный, **направления распространения которых задаются законами отражения и преломления**. Интенсив-

ность и состояние поляризации отраженного и преломленного света определяется формулами Френеля.

Закон отражения света

а) Луч падающий, нормаль к отражающей поверхности в точке падения и луч отраженный лежат в одной плоскости.

б) Угол отражения β равен углу падения α :

$$\alpha = -\beta \quad (2.1)$$

с) Луч падающий и луч отраженный обратимы.

Обратимость (или взаимность) световых лучей означает, что если навстречу лучу, претерпевшему ряд отражений и преломлений пустить другой луч, то он пойдет по тому же пути, что и первый (прямой) луч, но только в обратном направлении. Знак минус в выражении (2.1) появляется из-за того, что углы отсчитываются от нормали по и против часовой стрелки

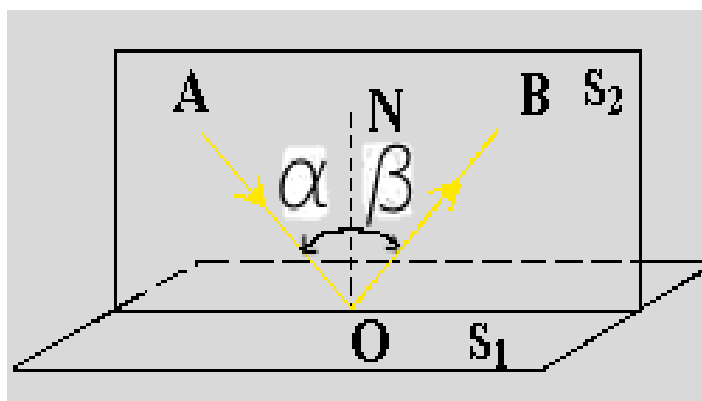


Рис. 2.6. S_1 - отражающая поверхность; S_2 - плоскость падения; AO - падающий луч; OB - отраженный луч; ON - нормаль к отражающей поверхности.

Построение изображений в плоских зеркалах

Пучок лучей, выходящих из точечного источника (т. е. гомоцентрический пучок), после отражения в плоском зеркале остается гомоцентрическим: если отраженные лучи мысленно продолжить назад, эти продолжения лучей пересекутся за зеркалом в одной точке, которую можно считать мнимым изображением источника (см. рис.2.7).

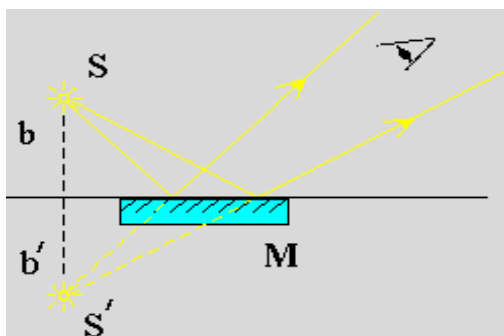


Рис. 2.7

Источник и его изображение расположены симметрично относительно зеркала. Наблюдателю кажется, что отраженные от зеркала лучи выходят из точки S' , расположенной за зеркалом симметрично точке S .

При отражении от плоской зеркальной поверхности световых лучей, исходящих от некоторого предмета, возникает мнимое изображение предмета (см. рис.2.8). Предмет и его мнимое изображение располагаются симметрично относительно зеркальной поверхности. Изображение предмета в плоском зеркале равно по размеру самому предмету.

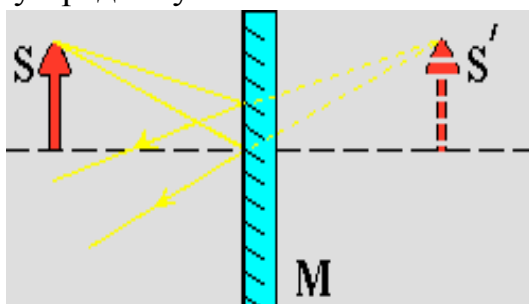


Рис. 2.8

Мнимое изображение пространственного (трехмерного) предмета в плоском зеркале отличается от самого предмета как правая система координат отличается от левой, т.е. как правая рука отличается от левой (см. рис.2.9).

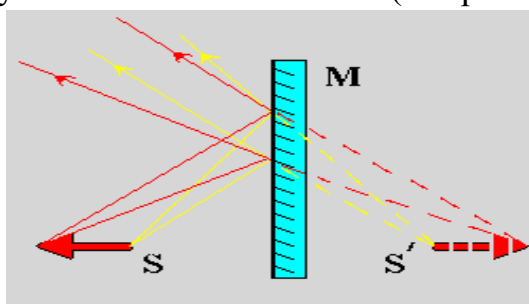


Рис. 2.9

Построение изображений в скрещенных зеркалах представлено на рис. 2.10. При отражении источника S в зеркале 1 образуется изображение S' , которое, в свою очередь, служит источником для изображения S'' в зеркале 2 (рис. 2.10, а).

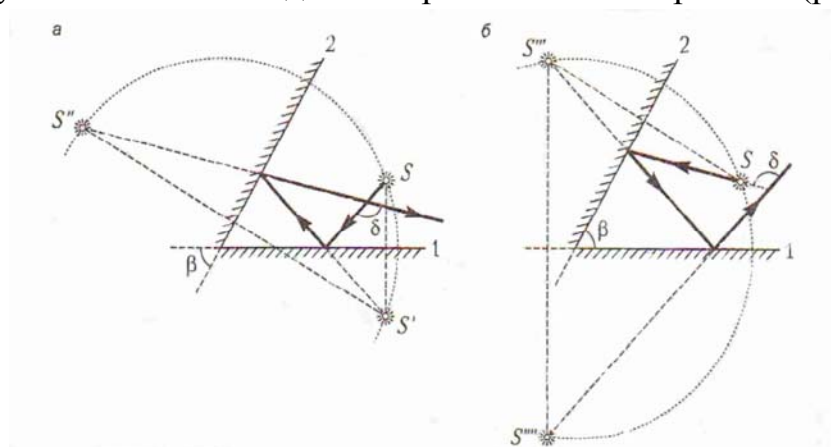


Рис. 2.10. Изображения источника в скрещенных зеркалах

С другой стороны, начиная построение с зеркала 2, получим изображения S''' и S'''' (рис. 2.10, б). Можно сказать, что сам источник S и все формирующиеся изображения лежат на дуге одной окружности с центром в вершине зеркального угла. Кроме того, из простых геометрических соображений очевидно, что угол δ между направлениями лучей до и после отражения от двух зеркал равен удвоенному углу между зеркалами: $\delta = 2\beta$.

Последнее свойство широко используется для конструирования уголкового отражателя света (рис. 2.11). Зеркала, образующие прямой угол, возвращают все световые лучи точно в обратном направлении.

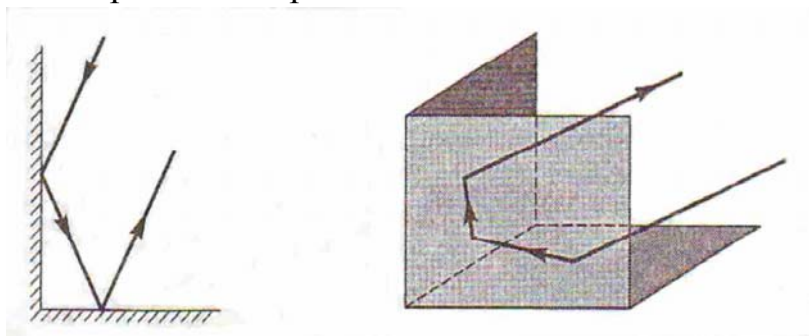


Рис. 2.11. Плоский и объемный уголкового отражатели

Закон отражения (2.1) справедлив как для плоских, так и для искривленных поверхностей. Построение изображений в сферических зеркалах см. ниже.

Закон преломления света

а) Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости (рис. 2.12).

б) Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}, \quad (2.2)$$

где n_{21} - относительный показатель преломления второго вещества по отношению к первому.

в) Луч падающий и луч преломленный обратимы.

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

Абсолютный показатель преломления среды n есть показатель преломления этой среды относительно вакуума:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

Физический смысл абсолютного показателя преломления – он равен отношению фазовой скорости электромагнитных волн в вакууме c к их фазовой скорости v в среде.

Из уравнений Максвелла следует, что $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$, где ε и μ — соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Учитывая (2.3), закон преломления (2.2) можно записать в виде

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma \quad (2.5)$$

Из симметрии выражения (2.5) вытекает **обратимость световых лучей**. Если обратить преломленный луч, заставив его падать на границу раздела из второй среды в первую под углом γ , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом α , т. е. пойдет в обратном направлении.

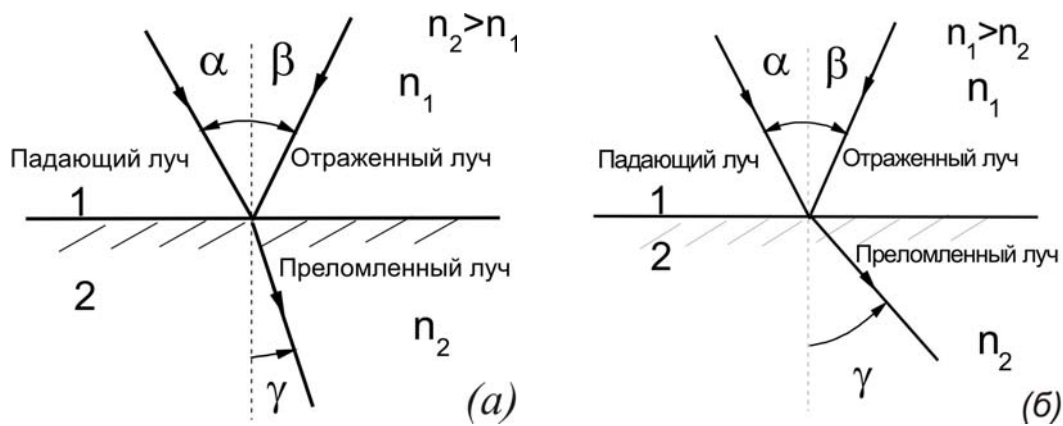


Рис. 2.12. Схема хода лучей при преломлении из оптически менее плотной среды (а) в оптически более плотную (преломленный луч отклоняется от нормали меньше, чем падающий) и из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду (б) (преломленный луч отклоняется от нормали больше, чем падающий).

Рисунок 2.13 иллюстрирует прохождение света через призму (показатель преломления вещества призмы больше показателя преломления окружающей среды). Зависимость угла отклонения луча призмой δ от угла падения луча на призму α показана на рис. 2.13б. Угол отклонения становится минимальным при симметричном ходе лучей ($\alpha_1 = \alpha_2$), в этом случае зависимость угла минимального отклонения σ от показателя преломления вещества призмы и преломляющего угла θ определяется выражением:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\theta + \sigma_{\min}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}. \quad (2.6)$$

Соотношение (2.6) обычно применяется для определения показателя преломления по измеренным с помощью гониометра углам σ и θ . Если преломляющий

угол призмы мал, то такая призма носит специальное название — клин (рис. 2.13в).

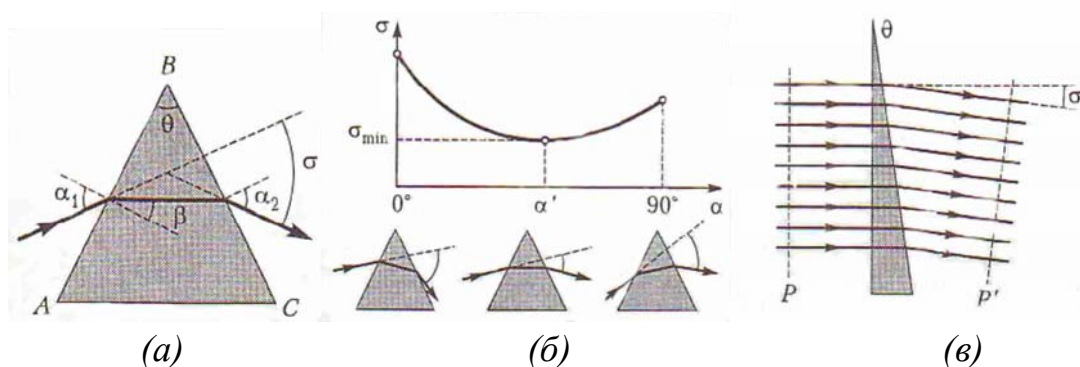


Рис. 2.13. Ход луча через призму с преломляющим углом θ (а) и клин (в); зависимость угла отклонения σ от угла падения α (б)

Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления (оптически менее плотную), например, из стекла в воду, $n_1 > n_2$ то, согласно (2.5), угол преломления γ больше, чем угол падения α (рис. 2.12,б). С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. 2.14) до тех пор, пока при некотором угле падения $\alpha = \alpha_{np}$ угол преломления γ не окажется равным $\pi/2$. Угол α_{np} называется предельным углом. При углах падения $\alpha > \alpha_{np}$ весь падающий свет полностью отражается (рис. 2.14). По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного — растет.

Если $\alpha = \alpha_{np}$, то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего. Таким образом, при углах падения в пределах от α_{np} до $\pi/2$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы. Это явление называется полным внутренним отражением. Предельный угол α_{np} определим из формулы (2.7) при подстановке в нее $\gamma = \pi/2$. Тогда

$$\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \alpha_{np} = \arcsin n_{21}. \quad (2.7)$$

Соотношение (2.7) удовлетворяет значениям угла при $\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1} < 1$. Следовательно,

но, явление полного внутреннего отражения имеет место только при падении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную.

Рисунок 2.14 иллюстрирует полное внутреннее отражение на границе вода-воздух. В оптических приборах (биноклях, перископах, рефрактометрах, и т.д.) широко применяются различные типы призм, принцип действия которых основан на явлении полного внутреннего отражения (так называемые, призмы ПВО). Для призм, сделанных из обычного оптического стекла (средний показатель преломления $n = 1,5$), предельный угол равен $\arcsin (1/1,5) \approx 42^\circ$. Это означает, что любая

45-градусная призма полностью отражает свет без нанесения зеркального покрытия.

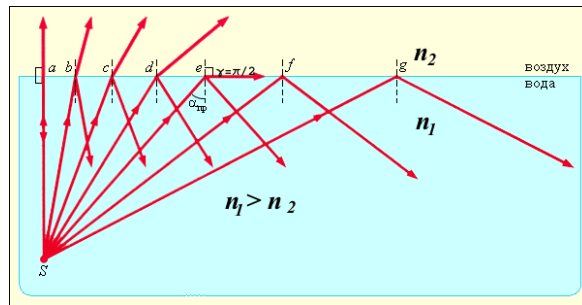


Рис. 2.14.

На рис. 2.15 показаны призмы полного отражения, позволяющие а) повернуть луч на 90° ; б) перевернуть изображение; в) повернуть луч на 180° .

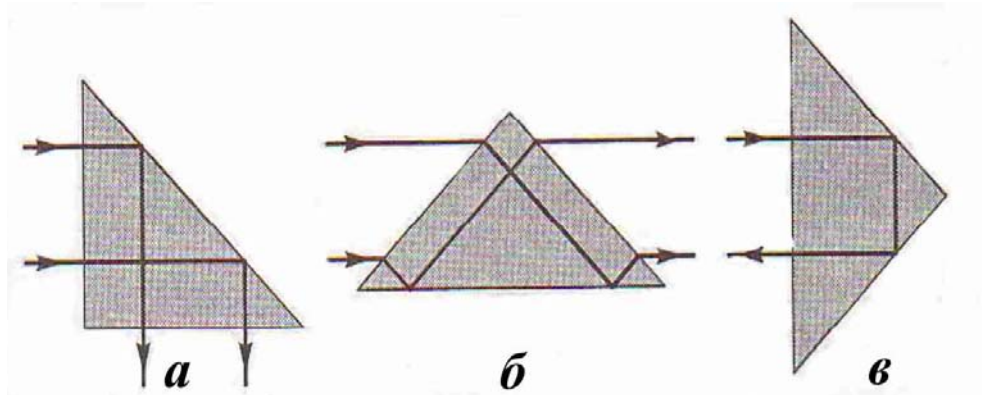


Рис. 2.15

Использование призмы полного отражения с основанием в виде равнобедренного прямоугольного треугольника в системе обратной связи рубинового лазера показано на рис. 2.16.

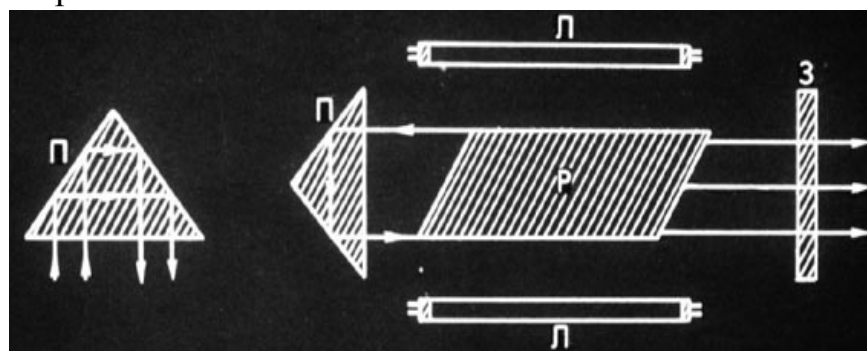


Рис. 2.16. Схема рубинового лазера с обратной связью: Π – призма полного отражения, P – рубиновый стержень, L – лампы накачки, $З$ – полупрозрачное зеркало.

Явление полного отражения используется также в *световодах*, представляющие собой тонкие нити (волокна) из оптически прозрачного материала. Показатель преломления поверхностного слоя волокна меньше, чем внутреннего, что

обеспечивает полное отражение от боковой поверхности световода, и свет распространяется только вдоль волокна. С помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. Световоды используются для передачи информации в ЭВМ, в оптических системах связи, для диагностики внутренних органов в медицине, и в др.

Ход лучей в оптическом световоде показан на рис. 2.17. Свет выходит из волокна только в точках изгиба, где нарушается условие полного отражения.

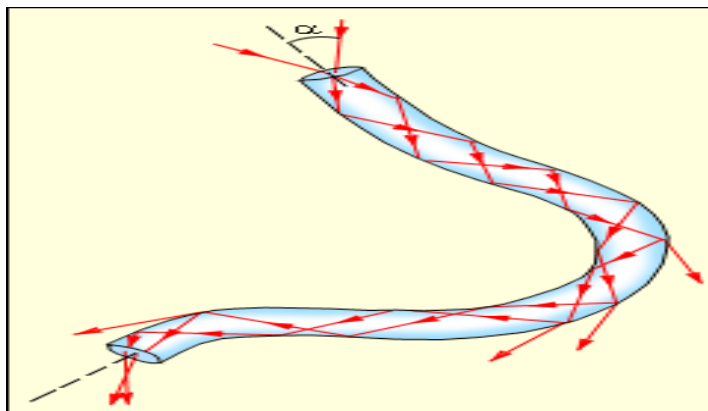


Рис. 2.17

2.3 Принцип Ферма

Принцип Ферма дополняет основные законы геометрической оптики. В физике исключительное значение имеет метод принципов, позволяющий на основе небольшого числа общих предположений – принципов – обосновать известные законы некоторого круга явлений и предсказать еще неоткрытые закономерности.

В 1660 году французский математик Ферма установил, что в основу геометрической оптики может быть положен принцип наименьшего времени, или наикратчайшего оптического пути.

Согласно этому принципу, **в однородной среде свет от одной точки к другой распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время: *лучи света распространяются по пути, приводящему к цели в кратчайшее время.***

Между заданными точками 1 и 2 (см. рис.2.18) возможны разные пути *a*, *b*, *c*. Принцип Ферма утверждает, что свет пойдет по тому пути, оптическая длина которого минимальна.

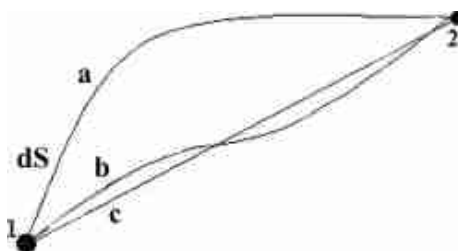


Рис. 2.18.

Из принципа Ферма вытекают законы прямолинейного распространения, отражения и преломления света.

Для прохождения малого участка пути dS (Рис. 2.18) свету нужно время $dt=dS/v$ где v -скорость света в данной точке среды. Заменив v через c и n по формуле (2.4), получим, что, $dt=(1/c)ndS$. Следовательно, время, затрачиваемое светом на прохождение пути от точки 1 до точки 2, можно вычислить по формуле

$$\tau = \frac{1}{c} \int_1^2 ndS \quad (2.8)$$

Согласно принципу Ферма τ должно быть минимальным. Поскольку c — константа, должна быть минимальна величина

$$L = \int_1^2 ndS = nS, \quad (2.9)$$

которую называют **оптической длиной пути**. Т.к. в однородной среде $n=const$, а минимальное расстояние между точками 1 и 2 S_{min} — прямая линия, то условие (2.9) означает прямолинейное распространение света. В однородной среде оптическая длина пути равна произведению геометрической длины пути S на показатель преломления среды n : $L=nS$. Принцип Ферма можно сформулировать следующим образом: *в однородной среде свет распространяется по такому пути, оптическая длина которого $L=nS$ минимальна. Точнее, оптическая длина пути должна быть экстремальна, т. е. либо минимальна (Рис. 2.19, а), либо максимальна (Рис. 2.19, б), либо стационарна — одинакова для всех возможных путей (Рис. 2.19, в).* В последнем случае все пути света между двумя точками A и B оказываются **таутохронными** (требующими для своего прохождения одинакового времени). Примером таутохронных систем является отражатель в виде эллипсоида (Рис. 2.19, в), линза, и др.

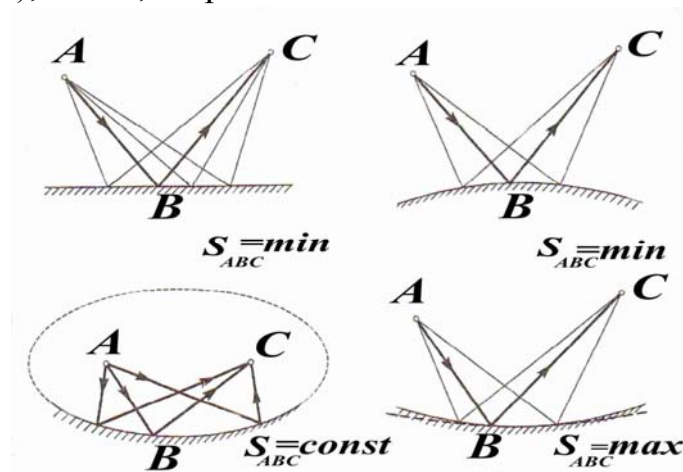


Рис. 2.19. Иллюстрация выполнения принципа Ферма при отражении от зеркальных поверхностей различной формы

Объяснение законов отражения и преломления на основании принципа Ферма

Пусть свет попадает из точки A в точку B , отразившись от поверхности MN (рис. 2.20, a). Среда, в которой проходит луч, однородна. Поэтому минимальность оптической длины пути сводится к минимальности его геометрической длины. Покажем, что наименьшей длиной обладает путь луча, отразившегося в точке O , для которого угол отражения равен углу падения. Зеркально отразив точку B от поверхности раздела, получим точку B' . Геометрическая длина произвольно взятого пути равна $AO'B = AO'B'$, т.к. треугольник $BO'B'$ – равнобедренный аналогично равны пути $AOB = AOB'$ (треугольник BOB' – равнобедренный), построенные в соответствии с законом отражения.

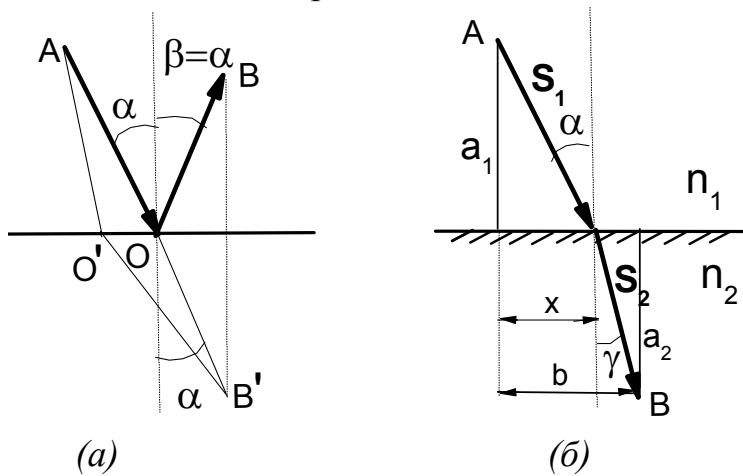


Рис. 2.20

Из рисунка видно, что минимальным будет путь $AOB = AOB'$, т.к. только при таком ходе луча линия AOB' будет прямой. Любая линия $AO'B' > AOB'$. Заметим, что при удалении точки O' от точки O геометрическая длина пути неограниченно возрастает, так что в данном случае имеется только один экстремум – минимум.

Теперь найдем точку, в которой должен преломиться луч, распространяясь от A к B , чтобы оптическая длина пути была экстремальна (рис. 2.20, b). Для произвольного луча оптическая длина пути равна

$$L = n_1 S_1 + n_2 S_2 = n_1 \sqrt{a_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}.$$

Чтобы найти экстремальное значение, продифференцируем L по x и приравняем полученное выражение нулю:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{n_1 x}{\sqrt{a_1^2 + x^2}} - \frac{n_2 (b-x)}{\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}} = n_1 \frac{x}{S_1} - n_2 \frac{(b-x)}{S_2} = 0 \quad (2.10)$$

Множители при n_1 и n_2 равны соответственно $\sin \alpha$ и $\sin \gamma$. Таким образом, мы приходим к соотношению $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$, выражающему закон преломления.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. В неоднородной среде световые лучи искривляются. Путь, по которому распространяется свет в неоднородной среде, также может быть найден с помощью принципа Ферма.

Распространение света в оптически неоднородных средах

Миражи

Закон прямолинейного распространения справедлив для вакуума и для однородных сред. В оптически неоднородной среде световые лучи искривляются в сторону больших оптических плотностей. Это можно показать либо с помощью построений Гюйгенса, либо с помощью принципа Ферма, либо как следствие дифференциального уравнения для лучей (следующего из уравнений Максвелла).

Искривлением лучей света в неравномерно нагретом воздухе, прилегающем к раскаленной поверхности Земли, объясняется явление миража, когда в жаркой пустыне возникает иллюзия находящейся на горизонте водной глади или вдали на асфальте нагретого солнечным светом шоссе видны "лужи", исчезающие при приближении к ним. Мы настолько привыкли к прямолинейному распространению света, что подсознательно считаем источник расположенным на прямолинейном продолжении попадающих в глаз лучей даже тогда, когда лучи искривлены (см. рис. 2.21). Поэтому мы видим расположенные над горизонтом удаленные предметы как бы отраженными "водной гладью".

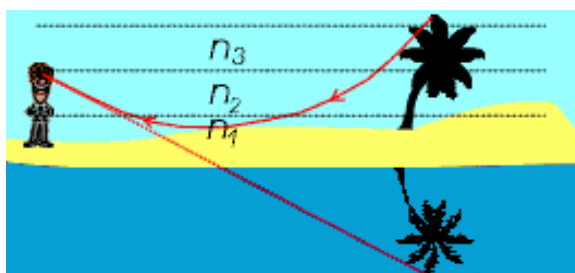


Рис. 2.21. Миража у поверхности Земли: $n_1 < n_2 < n_3$

В верхних слоях атмосферы оптическая плотность воздуха убывает с высотой, и это приводит к оптическому явлению - верхнему миражу. Явление верхнего миража используется при создании сверхдальней лазерной связи (см. рис. 2.22)..



Рис. 2.22. Мираж в верхних слоях атмосферы: $n_1 < n_2 < n_3$

У горизонта Солнце кажется на полградуса выше, чем на самом деле. На рисунке этот угол увеличен для большей наглядности. "Отражение" лазерного

луча от верхних слоев атмосферы позволяет осуществить прямую связь на расстояниях более 300 километров.

Современные лазерные локаторы (см. рис. 2.23), предназначенные для наблюдения за ракетами, спутниками и самолетами, работают в радиусе от 30 до 30000 метров.

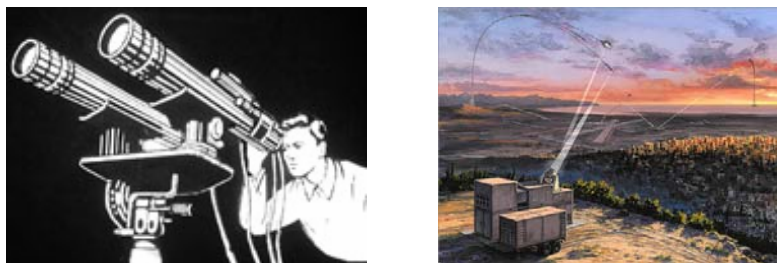


Рис. 2.23. Лазерный локатор типа двойной телескоп

2.3. Центрированная оптическая система и ее кардинальные элементы

Оптическая система представляет собой совокупность отражающих и преломляющих поверхностей, отделяющих друг от друга оптически однородные среды. Обычно эти поверхности бывают сферическими или плоскими и характеризуются радиусом кривизны, для плоскости радиус кривизны $R = \infty$. Форма оптических поверхностей должна выдерживаться с точностью меньше длины волны ($0.1 — 0.02 \lambda$). Оптические среды — это прозрачные однородные среды с точным значением показателя преломления (с точностью до 4-6 знаков после запятой). В качестве оптических сред в оптических системах в основном применяют: воздух (вакуум) ($n = 1$); оптические стекла, для них точно известны показатели преломления и различные оптико-физические свойства ($n = 1.42 — 2.0$); оптические кристаллы, которые работают в более широком диапазоне длин волн, чем стекла.

Оптическая система предназначена для формирования изображения путем преобразования световых пучков, исходящих от предмета. Преобразование световых пучков в оптической системе происходит за счет преломления и отражения света поверхностями, а также за счет ограничения пучков диафрагмой. Кроме того, пучки света могут преобразовываться за счет дифракции.

Центрированная оптическая система. Оптическая ось.

Центрированная оптическая система (рис. 2.24) — это такая система, в которой все отражающие и преломляющие поверхности сферические, и центры всех сфер лежат на одной прямой, называемой оптической осью системы.

Оптическая ось системы является осью симметрии, при вращении вокруг которой система сохраняет все свои свойства.

Пучок лучей, исходящих из одной точки или сходящихся в одной точке, называется **гомоцентрическим** (рис. 2.25). Гомоцентрическому пучку лучей соответствует **сферическая волновая поверхность**.



Рис. 2.24. Центрированная оптическая система

На рис. 2.25 показаны расходящийся, сходящийся и гомоцентрический пучок. Частным случаем гомоцентрического пучка является пучок параллельных лучей; ему соответствует плоская световая волна. Точка пересечения параллельного пучка световых лучей находится в бесконечности. Если пучок световых лучей, идущий из какой-либо точки P (см.рис. 2.26), после прохождения через оптическую систему пересекается в точке P' , то точка P' называется **изображением** точки P . Изображение, образованное пересечением лучей выходящих из оптической системы, называют **действительным**, а изображение, образованное пересечением геометрических продолжений этих лучей - **мнимым**.

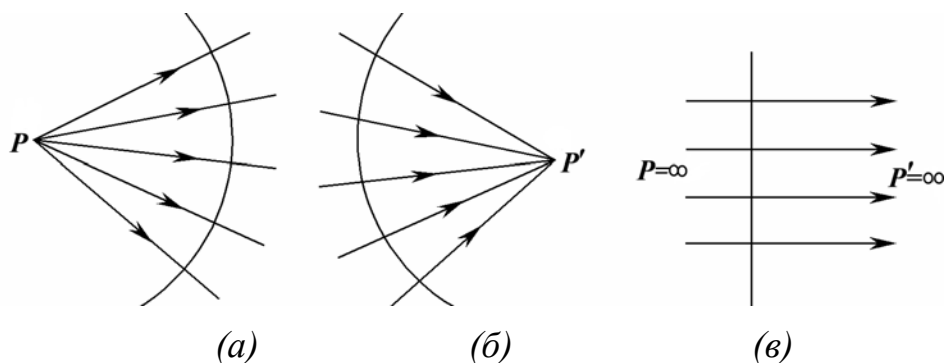


Рис. 2.25. Гомоцентрические пучки лучей: *a* - расходящийся, *б* -сходящийся, *в* - параллельный.

При сохранении гомоцентричности после прохождения оптической системы каждая точка источника дает одну точку изображения, которая называется **сопряженной**. Такие изображения называются точечными или **стигматическими**.

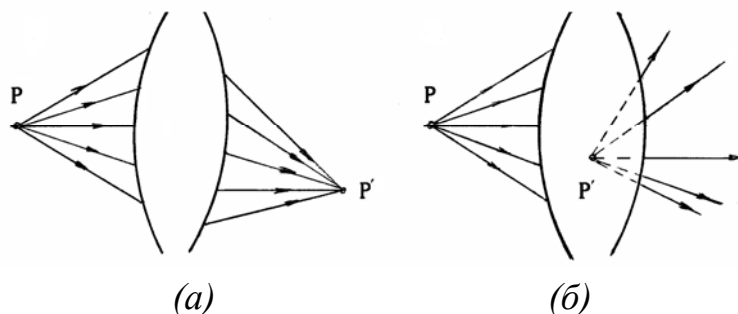


Рис. 2.26. Изображение точки в оптической системе:
a - действительное, *б* - мнимое.

В геометрической оптике изображение точки принято обозначать той же буквой, что и предмет, но со штрихом. Это относится и к другим обозначениям

(лучам, плоскостям, углам, отрезкам, показателям преломления и т.д.). Вследствие обратимости световых лучей источник света P и изображение P' могут поменяться ролями точечный источник: помещенный в P' , будет иметь свое изображение в P . По этой причине P и P' называют сопряженными точками. Две точки, одна из которых является изображением другой, называют **сопряженными**.

Идеальная оптическая система. Приближение параксиальной оптики

Оптическая система, которая дает стигматическое изображение, геометрически подобное отображаемому предмету, называется идеальной. С помощью такой системы пространственная непрерывность точек P отображается в виде пространственной непрерывности точек P' . Первая непрерывность называется **пространством предметов**, вторая—**пространством изображений**. Любой предмет или изображение рассматриваются как совокупность точек предмета или изображений этих точек. Все лучи, исходящие из любой точки предмета, собираются после выхода из системы в одной точке изображения.

Имеются в виду предмет и изображение, лежащие в плоскостях, перпендикулярных к оси системы, для предметов, имеющих протяженность **вдоль оси, подобие предмета и изображения не сохраняется**.

В идеальной оптической системе отсутствуют искажения изображения, дифракция, а изображение строится по законам параксиальной оптики).

Приближение параксиальной оптики состоит в выполнении двух условий.

1). Все рассматриваемые лучи имеют малый угол с оптической осью и с нормальными к преломляющим поверхностям.

2). Каждый луч, проходя преломляющую границу, находится на малом расстоянии от оптической оси. Расстояние мало по сравнению с радиусом кривизны преломляющей границы.

Следующие вопросы будем рассматривать в этом приближении, если не оговорено обратное.

Теория идеальной оптической системы разработана Гауссом и имеет чисто геометрический характер.

Реальные оптические системы, состоящие из сферических и плоских преломляющих и отражающих поверхностей, в общем случае не удовлетворяют положениям теории идеальных оптических систем. Изображением светящейся точки на экране в реальной оптической системе будет не точка, а светлое пятно.

Реальные оптические системы ведут себя как идеальные лишь для лучей, распространяющихся вдоль оси центрированной оптической системы, когда лучи образуют очень малые углы с оптической осью и с нормальными к преломляющим и отражающим поверхностям системы. В этом случае, пользуясь разложением в ряд Тейлора функции $\sin \alpha$:

$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \dots \quad (2.11)$$

и ограничиваясь первым членом, можно положить $\sin \alpha = \alpha$, где α выражается в радианах.

Область, в пределах которой можно делать такие замены, называется параксиальной, а соответствующие пучки лучей называют параксиальными (приосевыми). В этой области закон преломления света можно записать в следующем виде:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.12)$$

Линейное, угловое и продольное увеличение оптической системы

Выберем в предметной плоскости Q перпендикулярной оптической оси отрезок длиной y . Его изображение будет расположено в сопряженной плоскости Q' и будет иметь линейные размеры y' (рис.2.27).

Отношение размера изображения к размеру предмета называют **линейным увеличением оптической системы** (β):

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (2.13)$$

Для пары сопряженных плоскостей Q и Q' перпендикулярных оптической оси линейное увеличение постоянно и не зависит от величины предмета. При $\beta > 0$ изображение прямое, при $\beta < 0$ – изображение перевернутое.

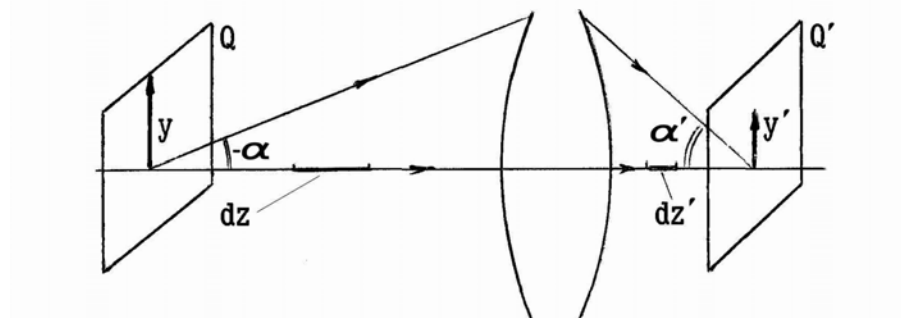


Рис. 2.27. К определению увеличения оптической системы

Угловым увеличением оптической системы (γ) называют отношение тангенсов углов образованных сопряженными лучами с оптической осью:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (2.14)$$

Продольным увеличением оптической системы (δ) называют отношение размера изображения бесконечно малого отрезка, расположенного вдоль оптической оси, к размеру этого отрезка:

$$\delta = \frac{dz'}{dz} \quad (2.15)$$

Кардинальные элементы оптической системы позволяют построить изображение любой точки предмета, не рассматривая действительного хода лучей в оптической системе.

Идеальная оптическая система обладает рядом кардинальных элементов - **передний и задний фокусы, передние и задние главные и узловые точки, передние и задние фокальные, главные и узловые плоскости**. Иногда к числу кардинальных элементов относят **переднее и заднее фокусные расстояния**. Знание четырех кардинальных точек (обычно это фокусы и главные точки) полностью определяет работу оптической системы, т.е. мы можем построить изображение предмета, пользуясь только этими кардинальными элементами и совершенно не рассматривая действительного хода лучей в данной оптической системе.

Задний фокус и задняя фокальная плоскость оптической системы.

Задним фокусом оптической системы называют изображение бесконечно удаленной точки, расположенной на оптической оси. Лучи, выходящие из бесконечно удаленной точки на оптической оси, падают на оптическую систему параллельно оптической оси. Поэтому можно сказать, что **задним фокусом оптической системы называется точка (F'), в которой собирается пучок лучей, падающих на систему параллельно ее оптической оси** (рис. 2.28).

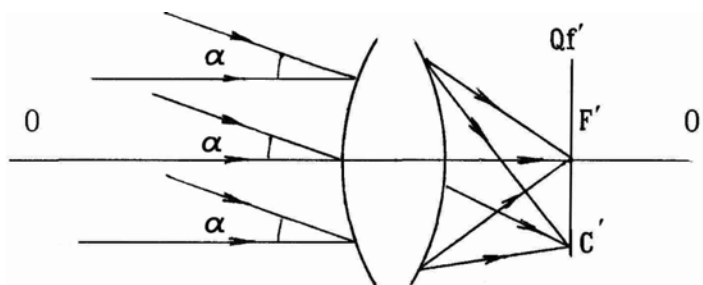


Рис. 2.28. Задний фокус и задняя фокальная плоскость оптической системы

Плоскость (Qf'), проходящая через задний фокус и перпендикулярная оптической оси, называется **задней фокальной плоскостью оптической системы**. Эта плоскость является **изображением бесконечно удаленной плоскости**.

Параллельный пучок лучей, падающий на оптическую систему под углом α к оптической оси, идет из бесконечно удаленной точки, расположенной вне оптической оси, и после выхода из оптической системы собирается в сопряженной точке C' , которая находится в задней фокальной плоскости вне оптической оси.

Передний фокус и передняя фокальная плоскость оптической системы.

Точку F на оптической оси в пространстве предметов, сопряженную с бесконечно удаленной точкой на оси в пространстве изображений, называют **передним фокусом оптической системы**.

Всякий луч, входящий в оптическую систему через передний фокус, выходит из системы параллельно ее оптической оси. Если параллельный пучок идет в обратном направлении, то лучи соберутся в переднем фокусе системы (рис. 2.29).

Плоскость Qf , перпендикулярная оптической оси и проходящая через передний фокус, **называется передней фокальной плоскостью**. Передняя фокальная плоскость сопряжена с бесконечно удаленной плоскостью пространства изображений. Пучок лучей, выходящий из любой точки C передней фокальной плоскости Qf , выходит из оптической системы наклонным пучком параллельных лучей.

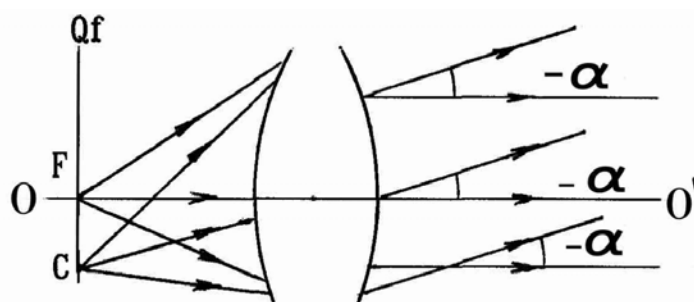


Рис.2.29. Передний фокус и передняя фокальная плоскость оптической системы

Передняя и задняя главные плоскости и главные точки оптической системы.

Две сопряженные и перпендикулярные оптической оси плоскости, для которых линейное увеличение равно плюс единице ($\beta = +1$), называются **передней и задней главными плоскостями Qh и Qh'** . Точки их пересечения с оптической осью называются **главными точками H и H'** .

Любой отрезок в передней главной плоскости изображается равным и одинаково расположенным отрезком в задней главной плоскости. Отсюда следует, что входящий в оптическую систему и выходящий из нее лучи, пересекают главные плоскости по одну сторону и на одинаковых расстояниях $h = h'$ от оптической оси. Т.о., при построении изображений в оптической системе между главными плоскостями лучи идут параллельно оптической оси.

Положение фокусов и главных плоскостей определяют путем расчета или графического построения хода лучей, параллельных оптической оси, в прямом и обратном направлениях.

Переднее и заднее фокусные расстояния. Расстояние HF от передней главной точки H до переднего фокуса F является **передним фокусным расстоянием оптической системы $-f$** , а расстояние $H'F'$ от задней главной точки H' до заднего фокуса F' – **задним фокусным расстоянием f'** (рис.2.30). **Фокусные расстояния отсчитывают от соответствующих главных точек с учетом правила знаков.** Если оптическая система находится в однородной среде, например в воздухе ($n = n' \approx 1$), то $f' = -f$, т.е. фокусные расстояния равны по абсолютному значению. В

общем случае $-f'/f = n'/n$. Так как $n > 0$ и $n' > 0$, то фокусные расстояния всегда имеют разные знаки.

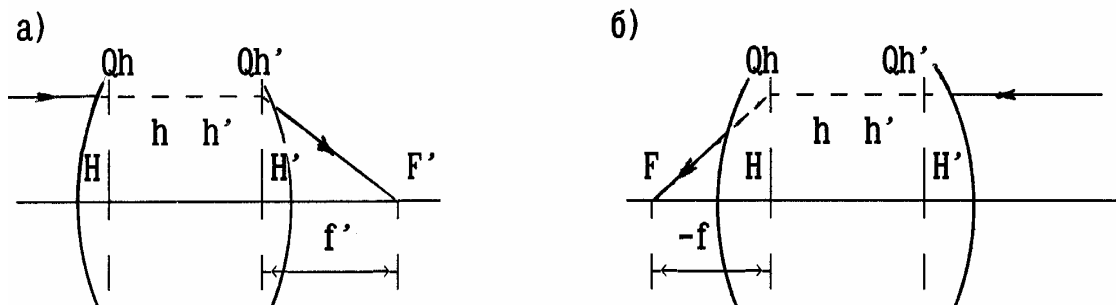


Рис. 2.30. Графическое определение положения главных плоскостей и фокусных расстояний оптической системы: *a* - задних, *б* - передних

Обычно оптическую систему характеризуют задним фокусным расстоянием, поэтому, если $f' > 0$, то система считается положительной если $f' < 0$, то - отрицательной.

Величина

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} \quad (2.16)$$

называется **оптической силой системы**. Здесь n и n' – показатели преломления среды, расположенной слева (в пространстве предметов) и справа (в пространстве изображений) от оптической системы. Чем больше Φ , тем меньше фокусное расстояние f и, следовательно, тем сильнее преломляются лучи оптической системой. Оптическая сила измеряется в диоптриях (дптр). **Чтобы получить Φ в диоптриях, фокусное расстояние в формуле (2.16) должно быть взято в метрах.** При положительной Φ заднее фокусное расстояние f также положительно; следовательно, система дает действительное изображение бесконечно удаленной точки — параллельный пучок лучей превращается в сходящийся. В этом случае оптическая система называется **собирающей**. При отрицательной Φ изображение бесконечно удаленной точки будет мнимым — параллельный пучок лучей превращается системой в расходящийся. Такая система носит название **рассеивающей**.

Узловые точки и узловые плоскости оптической системы.

Сопряженные точки, лежащие на оптической оси, для которых угловое увеличение равно плюс единице ($\gamma = +1$), называются **узловыми точками оптической системы N и N'** . Сопряженные лучи, проходящие через точки N и N' , параллельны. Узловые плоскости – плоскости, построенные в точках N и N' перпендикулярно оптической оси. Чтобы найти узловые точки N и N' , от переднего фокуса вправо откладывается заднее фокусное расстояние, а от заднего фокуса влево откладывается переднее фокусное расстояние. Отрезки NN' и HH' равны. Если $n = n'$, то узловые точки совпадают с главными.

Будем в дальнейшем рассматривать только оптические системы расположенные в однородной среде, для которых $n = n'$, и следовательно, $f' = -f$. В этом

случае узловые точки N , (N') и главные точки H (H') оптической системы совпадают и сопряженные лучи, проходящие через главные точки H и H' параллельны друг другу (рис. 2.31), т.е. $\alpha = \alpha'$.

Шесть плоскостей (две фокальные, две главные и две узловые) и шесть точек главной оси, им соответствующие (фокусы, главные и узловые точки), называются *кардинальными элементами*. Иногда к числу кардинальных элементов относят переднее и заднее фокусные расстояния. Когда по обе стороны системы располагается одна и та же среда, фокусные расстояния равны, узловые точки сливаются с главными, и система характеризуется положением всего лишь четырех точек и плоскостей.

Знание кардинальных элементов полностью определяет работу оптической системы, т.е. мы можем построить изображение любой точки, пользуясь только этими кардинальными элементами и совершенно не рассматривая действительного хода лучей в данной оптической системе.

2.4. Построение изображений и хода лучей в идеальной оптической системе

2.4.1 Правило знаков

В геометрической оптике используют правило знаков (рис. 2.31).

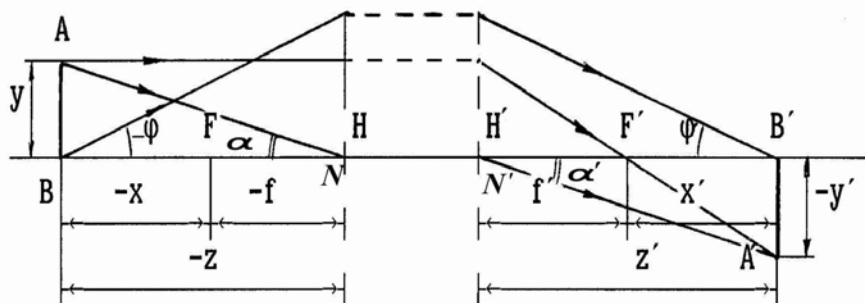


Рис.2.31. Пример применения правила знаков.

1. **Положительное направление распространения света**, как правило, — слева направо. Для каждого отрезка указывается направление отсчета. Отрезки, характеризующие положение предметов и изображений, отсчитываются от **кардинальных элементов (главных плоскостей) оптической системы**.
2. **Отрезки вдоль оптической оси считаются положительными**, если их направление отсчета совпадает с направлением распространения света.
3. **Отрезки, перпендикулярные к оптической оси**, считают положительными, если они расположены над оптической осью и отрицательными, если они расположены под осью.
4. **Угол считается положительным**, если образуется вращением оси, от которой ведется отсчет по часовой стрелке, и отрицательным в противном случае.

5. Радиус кривизны поверхности считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности (поверхность обращена выпуклостью влево). При оптических расчетах считается, что после каждой отражающей поверхности показатель преломления, осевое расстояние и угол отражения меняют знак на противоположный.

Построение изображения предмета в оптической системе сводится к построению изображения отдельных точек предмета, а в конечном итоге к построению хода лучей через оптическую систему. При этом используются свойства кардинальных элементов идеальной оптической системы. **Для построения любой точки предмета достаточно построить ход хотя бы двух лучей, проходящих через предметную точку.** Точка пересечения этих лучей после прохождения их через оптическую систему будет **изображением предметной точки.**

Обычно для построения используют так называемые характерные лучи, ход которых в оптической системе хорошо известен, т.е. лучи, проходящие через фокусы и главные (узловые) точки оптической системы (рис. 32).

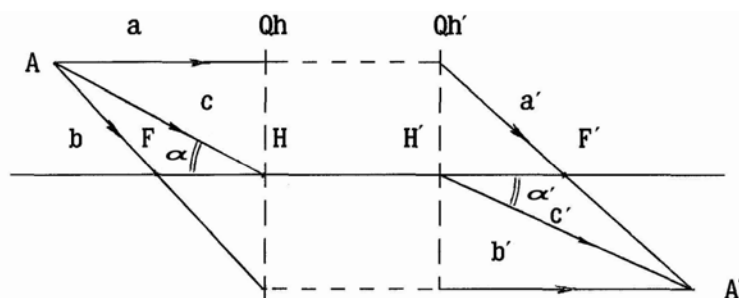


Рис. 2.32. Графическое построение изображения точки, расположенной вне оптической оси

Луч (а), проходящий через предметную точку (A) и падающий на систему параллельно оптической оси, после преломления на задней главной плоскости (Oh) проходит через задний фокус (F').

Луч (b), проходящий через предметную точку и передний фокус, после преломления на передней главной плоскости идет параллельно оптической оси.

Луч (с), проходящий через предметную точку и переднюю главную (узловую) точку, выходит из задней главной (узловой) точки параллельно падающему лучу ($\alpha = \alpha'$).

Этими тремя лучами удобно пользоваться, если предметная точка расположена вне оптической оси. Если же точка расположена на оптической оси, то все три описанных выше луча совпадают с оптической осью. Поэтому для построения изображения точки, расположенной на оптической оси, необходимо построить ход хотя бы одного луча, пересекающего оптическую ось в предметной точке, и найти точку пересечения этого луча после выхода из оптической системы с оптической осью. Эта точка и будет изображением исходной предметной точки

На рис. 2.33 показаны четыре способа построения хода лучей через положительную и отрицательную оптические системы. Для построения используются вспомогательные лучи, проходящие через фокусы или главные точки. Точки, общие для заданного и вспомогательного лучей в передней фокальной плоскости, обозначены точкой C , а точки общие для тех же лучей в задней фокальной плоскости обозначены соответственно через C' . Лучи, выходящие из точек C , после прохождения оптической системы будут параллельными между собой. Параллельные лучи, падающие на оптическую систему соберутся в точке C' .

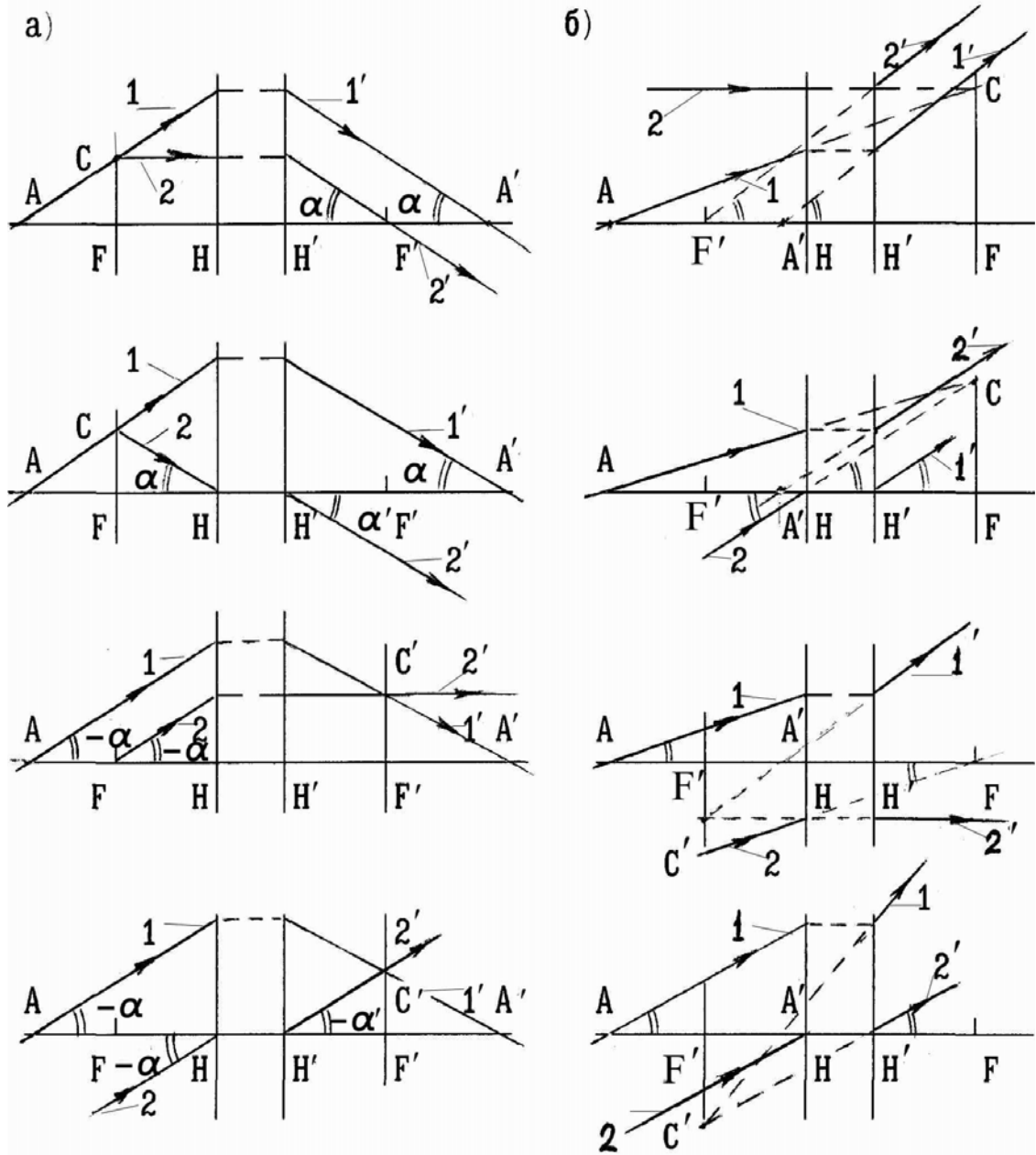


Рис. 2.33. Построение хода лучей в положительной (а) и отрицательной (б) оптической системе. 1 - заданный луч, 2 - вспомогательный луч.

2.4.2. Основные формулы центрированной оптической системы

Из геометрических построений, показанных на рис. 2.34, можно вывести формулу, связывающую фокусное расстояние линзы с расстоянием от передней главной плоскости до предмета ($-a$) и расстоянием от задней главной плоскости до изображения (a'). Из подобия треугольников ADF и BHF и треугольников $AD'F'$ и $C'H'F'$ можно записать, что линейное увеличение оптической системы равно

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{(-f)}{(-z)} = \frac{z'}{f'}. \quad (2.17)$$

Учитывая, что $f' = -f$, можно записать:

$$-zz' = -ff' = f^2 = (f')^2. \quad (2.18)$$

Формула (2.18) называется **формулой Ньютона**.

Подставляя в формулу (2.17) значения z' и $-z$, выраженные через величины отрезков a' , $-a$ и фокусное расстояние f' :

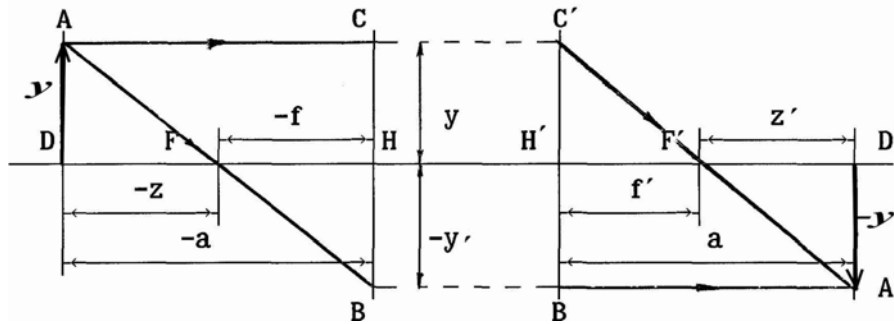


Рис.2.34. К выводу формулы отрезков оптической системы.

$$-z = -a - (-f) = -a - f', \quad z' = a' - f', \quad (2.19)$$

запишем:

$$-(a + f')(a' - f') = -ff', \quad aa' + f'a' - af - ff' = -ff', \quad -f'a' + af = aa' \quad (2.20)$$

Разделив (2.20) на $aa'f'$, получим **формулу Гаусса**, или **формулу отрезков**:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a}. \quad (2.21)$$

Для тонкой линзы передняя и задняя главные плоскости совпадают и проходят через середину линзы, поэтому фокусное расстояние тонкой линзы можно определить экспериментально, измеряя расстояния от линзы до предмета ($-a$) и от линзы до изображения этого предмета (a').

2.4.3. Диафрагмы. Ограничение лучей при помощи диафрагм

Четкие без искажений изображения предметов получаются, как правило, только в параксиальных лучах, т.е. в лучах, образующих малые углы с оптической

осью. Для устранения непараксиальных лучей и улучшения качества изображения применяют диафрагмы. **Диафрагма** — это металлический экран с круглым отверстием. Диафрагмы могут быть представлены явно, т.е. диафрагма является элементом оптической системы, или неявно, когда роль диафрагмы играет край элемента оптической системы, например, оправы линзы, зеркала.

На рис. 2.35 показана диафрагма D и ее изображения D' и D'' , полученные впереди стоящими и сзади стоящими элементами оптической системы (т.е. полученными в пространстве предметов при обратном ходе лучей и в пространстве изображений при прямом ходе лучей). Если теперь заменить диафрагму D ее изображениями D' и D'' , то они будут так же ограничивать параксиальные пучки, как и диафрагма D . В самом деле, в параксиальном приближении всякий луч, прошедший через край диафрагмы D' и D'' , проходит и через край диафрагмы D .

Т.о., от рассмотрения самих диафрагм можно перейти к рассмотрению их изображений.

Ограничение размера пучков – результат совместного действия всех имеющихся в оптической системе диафрагм. Диафрагма, которая сильнее всего ограничивает пучок, идущий из предметной осевой точки P , называется **апертурной, или действующей**. Чтобы определить, какая из диафрагм является апертурной, надо найти изображение всех диафрагм имеющихся в системе, в пространстве предметов в обратном ходе лучей по законам параксиальной оптики.

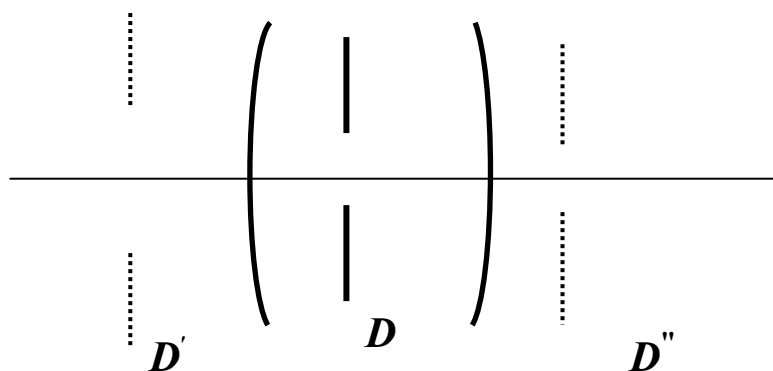


Рис. 2.35. Диафрагма и ее изображения в пространстве предметов и в пространстве изображений.

Апертурная диафрагма – это диафрагма, изображение которой видно под наименьшим углом u из осевой точки предмета (рис. 2.36). Угол u называется углом зрения.

Изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов, сформированное предшествующей частью оптической системы в обратном ходе лучей, называется **входным зрачком оптической системы**. **Апертура** (лат. – отверстие) – угловой диаметр входного зрачка при наблюдении его из точки расположения предмета, определяет поперечный размер пучка лучей. Луч, идущий из осевой точки предмета и проходящий через край апертурной диафрагмы называется

апертурным лучом. Если апертурная диафрагма находится в пространстве предметов, то входным зрачком является сама апертурная диафрагма.

От размера апертурной диафрагмы зависит яркость изображения и **светосила оптической системы**, которая определяется как $(D/f)^2$, где D – диаметр входного зрачка, f – фокусное расстояние системы.

Изображение апертурной диафрагмы в пространстве изображений, сформированное последующей частью оптической системы в прямом ходе лучей, называется **выходным зрачком оптической системы**. Если апертурная диафрагма находится в пространстве изображений, то выходным зрачком является сама апертурная диафрагма. Угол, под которым виден выходной зрачок из точки изображения на главной оптической оси, называется **апертурным углом** со стороны изображения, или **углом проекции системы**.

Входной зрачок, выходной зрачок и апертурная диафрагма сопряжены (см. рис. 2.36).

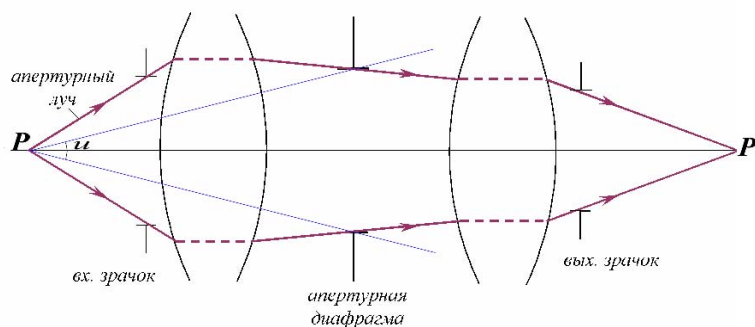


Рис.2.36. Апертурная диафрагма, входной и выходной зрачок оптической системы

Апертурный луч внутри системы проходит через край апертурной диафрагмы, в пространстве предметов – через край входного зрачка, а в пространстве изображений – через край выходного зрачка.

2.4.4. Построение изображений в зеркалах и линзах

Тонкая линза. Линза представляет собой систему двух сферических преломляющих поверхностей (рис. 2.37). **Вершиной (или полюсом) преломляющей поверхности** называется точка пересечения ее с оптической осью. Линзу называют тонкой (рис. 2.38), если расстоянием между вершинами преломляющих поверхностей O и O' можно пренебречь и считать эти вершины находящимися в одной точке, которую называют **оптическим центром тонкой линзы**.

Это означает, что **обе главные плоскости тонкой линзы проходят через ее оптический центр**. Если показатели преломления сред по обе стороны линзы одинаковы, то узлы совпадают с главными точками, т. е. также находятся в **оптическом центре линзы**.

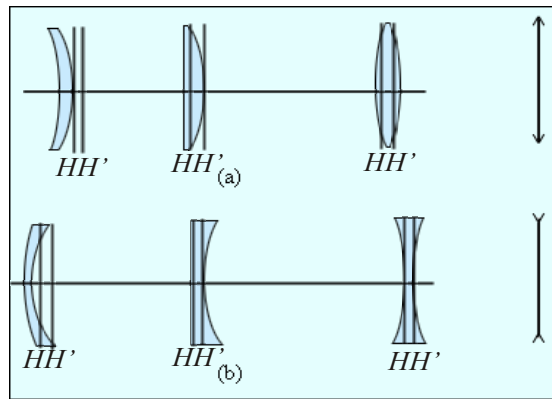


Рис. 2.37. Типы линз и положение главных плоскостей: слева направо: (а) собирающие: мениск, плоско- и двояковыпуклая; (б) рассеивающие: мениск, плоско- и двояковогнутая

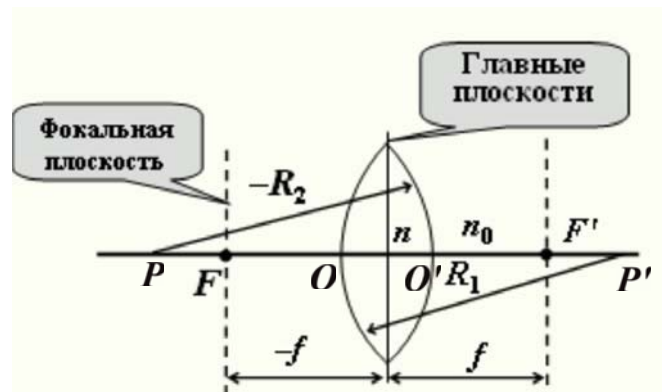


Рис. 2.38. Тонкая линза

Характерными лучами для тонкой линзы являются

1. Луч, входящий в систему через передний фокус, выходит из нее параллельно оптической оси.
2. Луч, входящий в систему параллельно оптической оси, выходит из нее через фокус.
3. Луч, входящий в систему через оптический центр линзы, на выходе из нее не изменяет своего направления (т.е. не преломляется).

Формула тонкой линзы (без вывода)

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{n - n_0}{n_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f'}; \quad \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \quad \frac{f'}{a'} - \frac{f}{a} = 1, \quad (2.22)$$

где n и n_0 – показатели преломления материала линзы и окружающей среды соответственно.

Для того чтобы эта формула давала правильный результат при обращении поверхности выпуклостью в любую сторону, с радиусом кривизны R нужно об-

ращаться как с алгебраической величиной: для выпуклой поверхности (центр кривизны C' лежит справа от вершины O) считать его положительным, для вогнутой поверхности (C лежит слева от O') – отрицательным.

Если система состоит из двух сложенных вместе линз, находящихся в среде с одинаковыми показателями преломления n , то оптическая сила D суммарной системы и ее фокусное расстояние определяются как

$$D = D_1 + D_2, f' = \frac{1}{D}, \quad (2.23)$$

где D_1, D_2 – оптическая сила каждой из линз.

Сферическое зеркало. Формула сферического зеркала (без вывода):

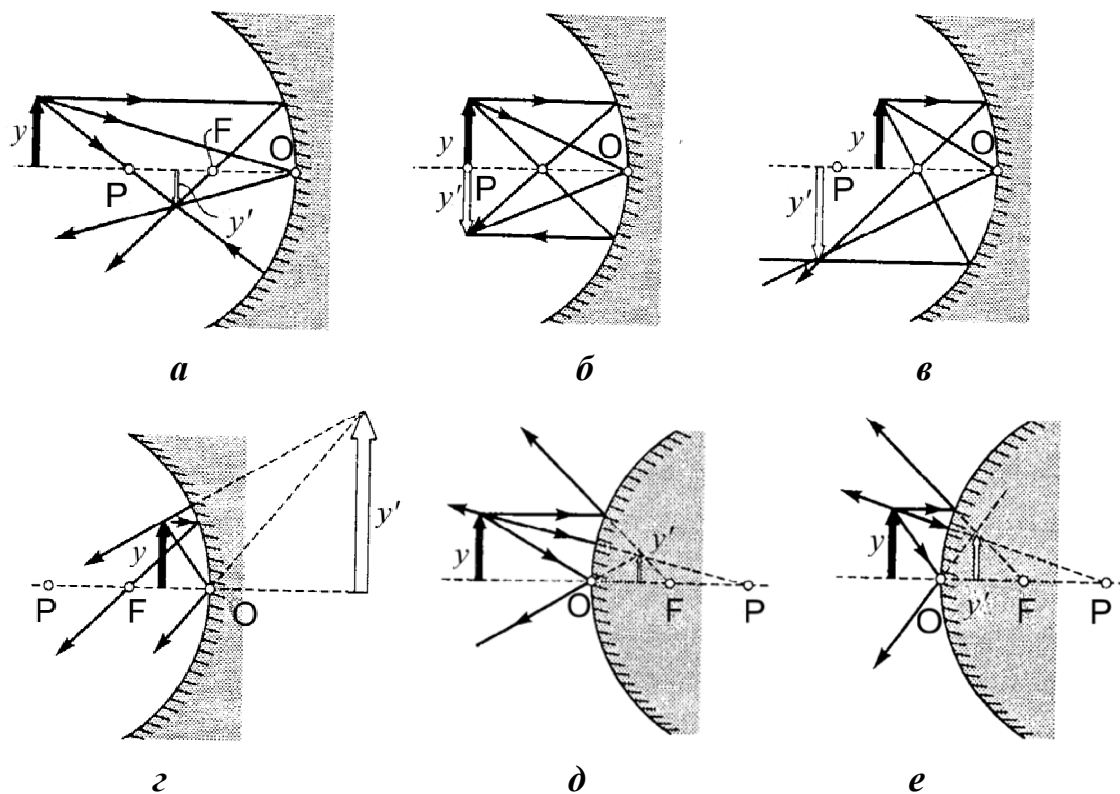
$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{2}{R}. \quad (2.24)$$

Характерными лучами для сферического зеркала являются

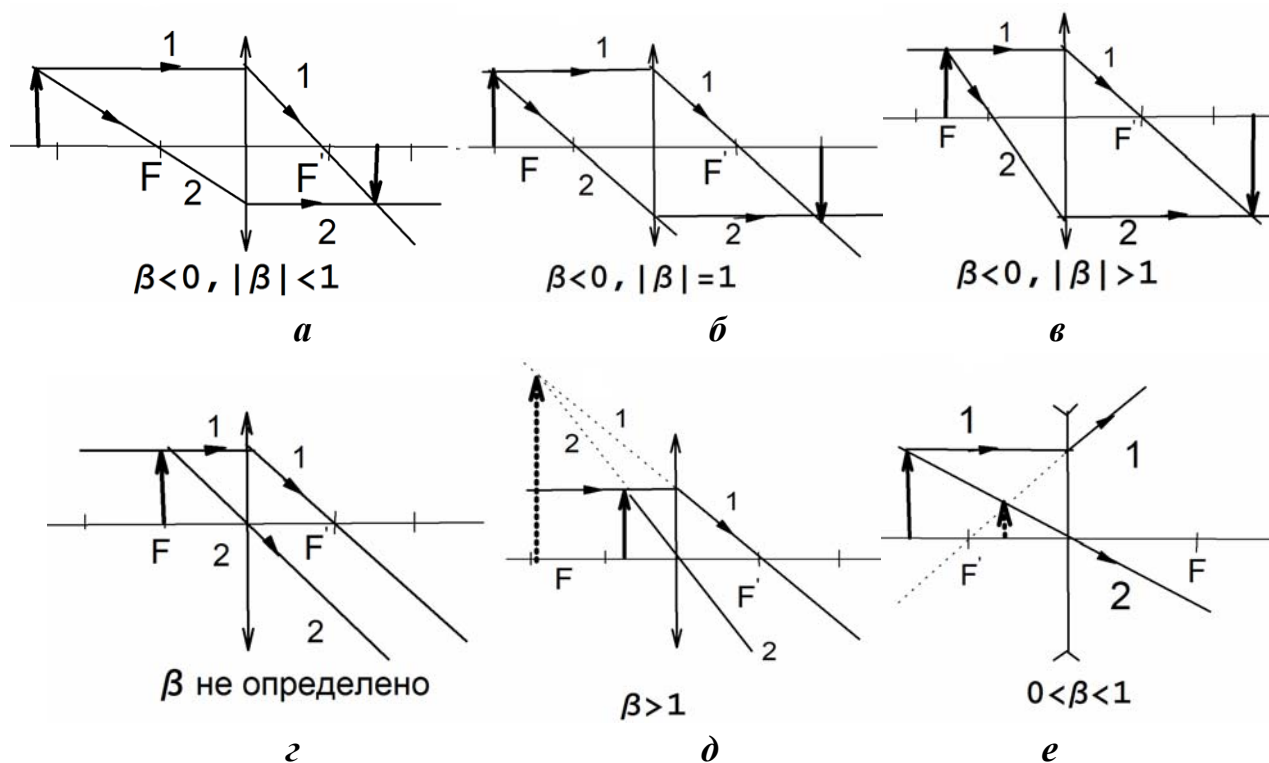
1. Луч, проходящий через оптический центр зеркала, после отражения идет по той же прямой;
2. Луч, идущий через фокус зеркала, после отражения идет параллельно оптической оси;
3. Луч, падающий на зеркало в его вершине, после отражения симметричен с падающим лучом относительно главной оптической оси.
4. Луч, параллельный главной оптической оси, после отражения проходит через фокус зеркала.

Построение изображений в зеркалах и тонких линзах показано на рис. 2.39.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗЕРКАЛАХ И ЛИНЗАХ



Построение изображений в сферических зеркалах при различных положениях предмета y : a - $г$ – вогнутое зеркало $д, е$ – выпуклое; O – вершина, P – центр сферической поверхности



Построение изображений и значения линейного усиления для собирающих (a - $д$) и рассеивающей ($е$) линз в зависимости от положения предмета y

Рис. 2.39

2.5. Оптические приборы для визуальных наблюдений

2.5.1. Глаз как оптическая система

Глаз человека представляет собой сложную оптическую систему, схематическое устройство глаза показано на рис. 2.41. Глаз имеет почти шарообразную форму (24 мм вдоль главной оптической и 22 мм в поперечном направлении).

Снаружи он покрыт защитной оболочкой 1 белого цвета – **склерой**. Передняя прозрачная часть 2 склеры называется **роговицей**. Показатель преломления роговицы $n_1 = 1,376$. Пройдя роговицу, свет попадает в полость, заполненную водянистой влагой 3 с показателем преломления $n_2 = 1,336$. В водянистую влагу погружена **радужная оболочка** 4, окрашенная пигментом. Отверстие в радужной оболочке представляет собой **зрачок**. В зависимости от интенсивности падающего света зрачок рефлекторно изменяет свой диаметр приблизительно от 2 до 8 мм, то есть действует подобно диафрагме в оптической системе. Между роговицей и радужной оболочкой находится прозрачная жидкость с показателем преломления $n_2 = 1,336$. За зрачком находится **хрусталик** 5 – эластичная двояковыпуклая линза диаметром около 9 мм и толщиной около 4 мм, передняя поверхность которой менее выпуклая, чем задняя. Внутренняя структура хрусталика, состоящего из большого числа (около 22000) тонких слоев различной плотности, напоминает структуру луковицы. Показатель преломления хрусталика меняется от наружной области к внутренней от 1,386 до 1,406.

Глазная мышца 6, рефлекторно напрягаясь и расслабляясь, может изменять кривизну поверхностей хрусталика, главным образом передней, изменяя тем самым его оптическую силу. В полости глаза за хрусталиком находится прозрачное **стекловидное тело** 7 ($n_3 = 1,337$).

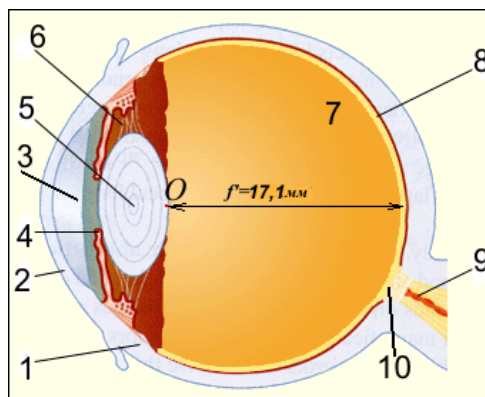


Рис. 2.41. Строение глаза человека

Роговица, водянистая влага, хрусталик, и стекловидное тело образуют оптическую систему глаза, аналогичную собирающей линзе. Оптический центр O такой линзы находится на расстоянии около 5 мм от роговицы 2 и около 17,1 мм

от **сетчатки** 8, представляющей собой сложное разветвление **зрительного нерва** 9 с нервными окончаниями – **палочками** и **колбочками**, которые являются светочувствительными элементами.

Толщина сетчатки, покрывающей 65% внутренней поверхности глаза, изменяется от 0,1 до 0,5 мм. Сетчатка преобразует падающее на нее видимое излучение в электрические импульсы, передаваемые по зрительному нерву 9 в головной мозг. В месте выхода из сетчатки зрительного нерва светочувствительные клетки отсутствуют, поэтому там возникает **слепое пятно** 10, не чувствительное к свету.

Основная особенность глаза как оптического инструмента состоит в способности рефлекторно изменять оптическую силу в зависимости от положения предмета. Такое приспособление глаза к изменению положения наблюдаемого предмета называется **аккомодацией**. Область аккомодации глаза можно определить положением двух точек:

- **дальняя точка аккомодации** определяется положением предмета, изображение которого получается на сетчатке при расслабленной глазной мышце. У нормального глаза дальняя точка аккомодации находится в бесконечности. При этом оптическая сила глаза $D = 1/f = 1/0.0171\text{ м} = 58,5 \text{ дптр}$.
- **ближняя точка аккомодации** – расстояние от рассматриваемого предмета до глаза при максимальном напряжении глазной мышцы. Ближняя точка аккомодации у нормального глаза располагается на расстоянии, зависящем от возраста: от 10 см для двадцатилетних (при этом оптическая сила глаза $D = 68,5 \text{ дптр}$) до 22 см ($D = 63 \text{ дптр}$) к сорока годам.

Кроме этих двух точек, определяющих границы области аккомодации, у глаза существует **расстояние наилучшего зрения L** , то есть расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего (без чрезмерного напряжения) рассматривать детали предмета (например, читать мелкий текст). Для нормального глаза **оптимальное расстояние для чтения и письма (расстояние наилучшего зрения)** составляет около 25 см (при этом оптическая сила глаза $D = 62,5 \text{ дптр}$). С возрастом из-за уплотнения хрусталика возникает старческая дальнозоркость – ближняя точка наилучшего видения составляет около 50 см.

Видимые размеры предметов определяются размерами изображений, получающихся на сетчатке глаза, которые определяются **углом зрения**, т. е. углом между крайними лучами, идущими в оптический центр глаза от рассматриваемого предмета. С приближением рассматриваемого предмета к глазу увеличивается угол зрения, а с ним и размеры изображения на сетчатке. Это позволяет рассмотреть более мелкие детали. Однако при максимально возможном приближении усиливается напряжение мышцы, деформирующей хрусталик, работа глаза становится утомительной.

При нарушении зрения изображения удаленных предметов в случае ненатянутого глаза могут оказаться не на сетчатке, как у нормального глаза

(рис.2.42 *а*), а либо перед сетчаткой у **близорукого** глаза (рис. 2.42 *б*), либо за сетчаткой у **дальнозоркого** глаза (рис. 2.42 *в*). В результате изображение предмета "расплывается".

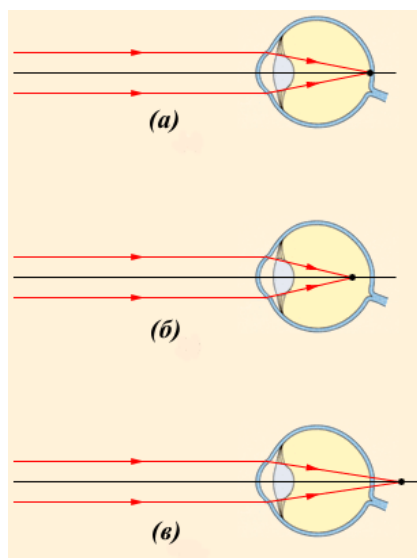


Рис.2.42. Изображение удаленного предмета в глазе: *а* – нормальный глаз; *б* – близорукий глаз; *в* – дальнозоркий глаз

На рис. 2.43 показано, как подобрать очки для чтения для близорукого (*а*) и дальнозоркого (*б*) глаза. У близорукого глаза оба предела наилучшего видения находятся ближе, чем у нормального глаза.

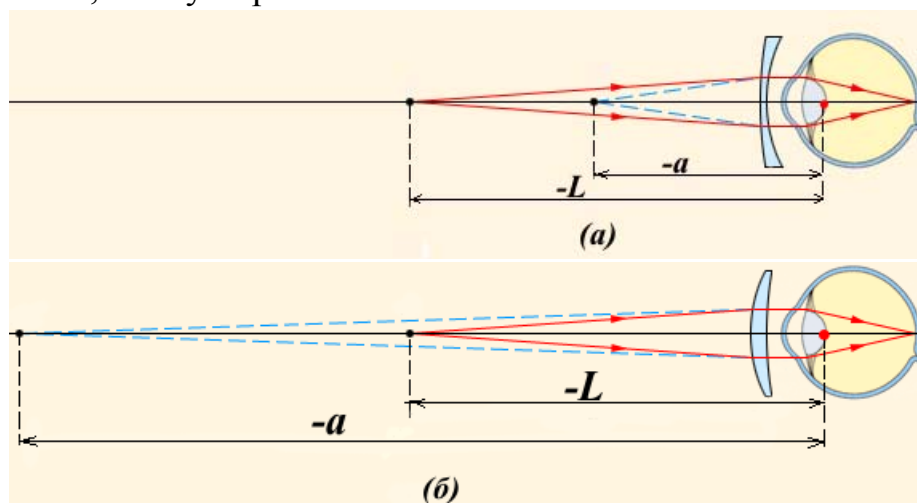


Рис.2.43. Коррекция зрения у близорукого (*а*) и дальнозоркого (*б*) глаза

Чтобы получить четкое изображение предмета находящегося на расстоянии наилучшего видения L , на сетчатке близорукого глаза, у которого ближний предел находится на расстоянии a от центра глаза, используются очки с рассеивающими (выпукло-вогнутыми) линзами, имеющими отрицательную оптическую силу (рис. 2.43 *а*), которые уменьшают оптическую силу глаза. Аналогично, для дальнозоркого глаза, ближний предел которого находится на расстоянии a от цен-

тра глаза, используются очки с положительными (вогнуто-выпуклыми) линзами (рис. 2.43 б), которые увеличивают оптическую силу глаза.

2.5.2. Три цвета радуги. Свет и цвет

Свет имеет цвет.

Сетчатка глаза состоит из светочувствительных клеток двух типов.

Одни реагируют только на интенсивность света и позволяют видеть в полутьме (палочки). Высота палочек 30 мкм, толщина 2 мкм, в глазу их содержится около 130 миллионов. Граница дня и ночи — момент, когда пропадают цвета.

Другие клетки (колбочки) по-разному реагируют на свет в разных частях видимого спектра, их высота 10 мкм, толщина 6-7 мкм, в глазу их около 7 миллионов.

Цветочувствительные клетки имеют три разных реакции на свет в разных частях видимого спектра.

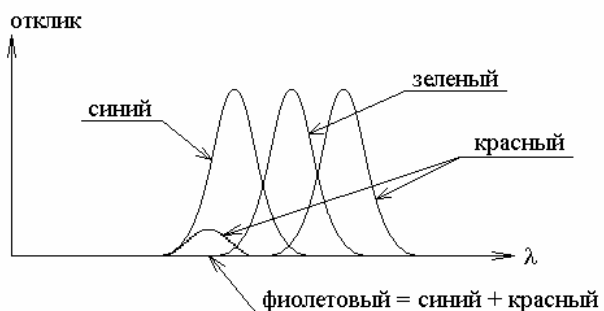


Рис. 44. Три цвета, различаемых человеческим глазом

Так цветной монитор имеет светящиеся зерна люминофора трех цветов: синего, зеленого и красного. Эти три типа зерен позволяют создавать любые оттенки цвета.

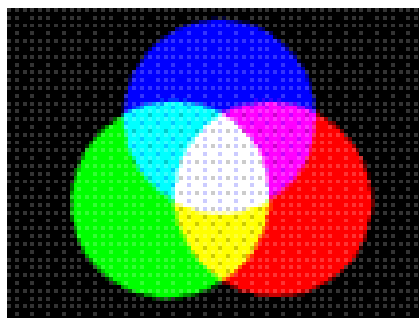


Рис.2.45. Комбинация трех цветов позволяет получить любой другой цвет

Согласно теории **цветового зрения Юнга-Гемгольца**, ощущение любого цвета можно получить смешиванием спектрально чистых излучений красного, зеленого и синего цвета. Эта теория хорошо согласуется с наблюдаемыми фактами и

предполагает, что **в глазу есть только три типа светочувствительных приемников**. Они отличаются друг от друга **областями спектральной чувствительности**. Красный свет воздействует преимущественно на приемники первого типа, зеленый - второго, синий - третьего. **Сложением излучений таких трех цветов в различных пропорциях можно получить любую комбинацию возбуждения всех трех типов светочувствительных элементов, а значит и ощущение любого цвета**. Если все рецепторы возбуждены в одинаковой степени, мы имеем ощущение белого цвета, если рецепторы не возбуждены - черного. По этой причине, накладывающиеся области красного, зеленого и синего цвета выглядят как белое пятно. Наложение красного и синего цвета дает фиолетовый цвет, зеленого и синего - бирюзовый, красного и зеленого – желтый

Почему мы видим в видимом свете

Границы частотного диапазона видимого света, а также сама форма кривой видности (кривой чувствительности) человеческого глаза были сформированы в процессе длительной эволюции, приспособившись к условиям освещения земных предметов солнечным светом, а также к условиям сумеречного и ночного освещения. Действительно, было бы биологически нецелесообразно, если бы глаз обладал способностью принимать излучение с длинами волн короче 290 нм, так как из-за наличия озонового слоя в атмосфере земли, поглощающего ультрафиолетовые лучи, спектр солнечного излучения вблизи поверхности Земли практически обрывается на длине волны 290 нм.

С другой стороны, из-за теплового излучения самого глаза, его высокая чувствительность к инфракрасному излучению сделала бы невозможной работу глаза в условиях солнечного освещения. В этом случае собственное тепловое инфракрасное излучение глаза затмило бы не только рассеянное излучение неба, но прямой солнечный свет. Работа глаза как органа зрения стала бы невозможной. Другая причина отсутствия зрения в инфракрасных лучах заключается в малости энергии инфракрасных квантов света. Процесс зрения должен начинаться либо химическими, либо фотоэлектрическими действиями, а они вызываются отдельными квантами света и не могут происходить, если энергия кванта меньше некоторого минимального предела.

Спектральный состав излучения Солнца и функция чувствительности среднего человеческого глаза, а также условные границы диапазона, свободного и от вредных УФ-лучей и от собственного теплового ИК-излучения, показаны на рис. 2.46.

Приведенные на рис. 2.47 графики показывают относительную спектральную чувствительность глаза к излучению различных длин волн (кривая видности) при дневном свете (кривая красного цвета) и при сумеречном свете (кривая синего цвета). Максимальная чувствительность глаза при дневном свете достигается на

длине волны 555 нм, а при сумеречном свете - на длине волны 510 нм. Максимальная чувствительность глаза в обоих случаях принимается за единицу.

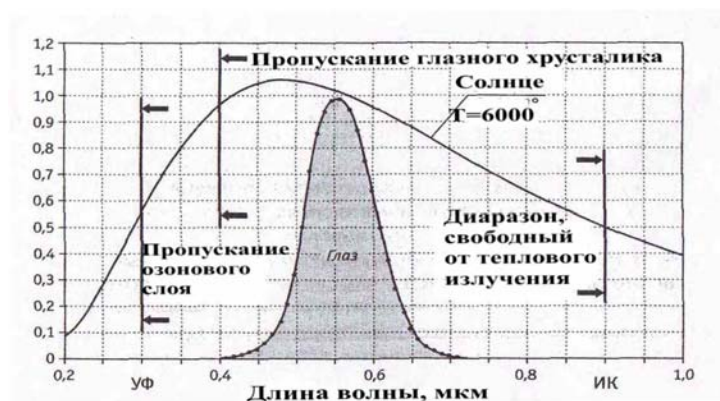


Рис. 2.46. Спектральный состав излучения Солнца и функция чувствительности среднего человеческого глаза Показаны условные границы диапазона, свободного и от вредных УФ-лучей, и от собственного теплового ИК-излучения

Отличие между этими двумя кривыми видности объясняется тем, что дневной и сумеречный свет воспринимаются различными рецепторами глаза (палочками при сумеречном свете и колбочками при дневном свете). При этом палочки обеспечивают чёрно-белое зрение и обладают очень высокой чувствительностью. Колбочки же позволяют человеку различать цвета, но их чувствительность гораздо ниже. В темноте работают только палочки - именно поэтому ночью воспринимаемое изображение серое.

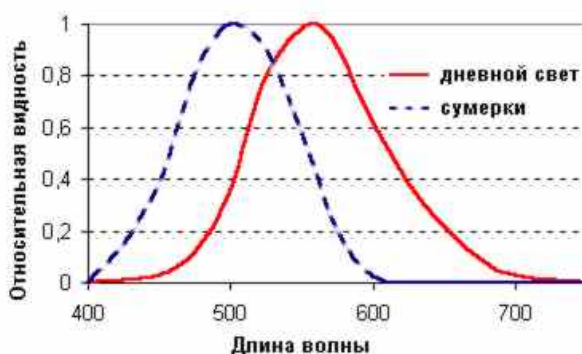


Рис. 2.47. Кривая светочувствительности человеческого глаза в дневное (красная сплошная линия) и в сумеречное (синяя пунктирная линия) время

Как мы можем видеть из кривой видности, глаз способен воспринимать свет на длинах волн примерно от 400 нм до 760 нм. В условиях адаптации к темноте глаз может также немного видеть инфракрасный свет с длиной волны до 950 нм и ультрафиолетовый свет с длиной волны не меньше 300 нм.

2.5.3. Оптические приборы, вооружающие глаз

Невооруженный глаз различает предметы величиной около 0,1 мм. Применение лупы повысило эту возможность до 0,01 мм, а с помощью микроскопа стало возможным различать малые объекты величиной до 0,15 мкм.

Старейшие оптические приборы – лупа и очки. Изобретение зрительной трубы, а затем и микроскопа относится к началу XVII в. Первая заявка на изобретение зрительной трубы была подана в Нидерландах Липперсгеем в 1608 г. В Италии в 1609 г Галилей изобрел свою знаменитую зрительную трубу с окуляром в виде отрицательной линзы. К этому же периоду относится и изобретение микроскопа, хотя дата и автор изобретения до сих пор неизвестны.

Назначение приборов, вооружающих глаз заключается в том, чтобы дать на сетчатке глаза увеличенное изображение удаленных или близких, но малых по размерам предметов. При визуальных наблюдениях глаз является неотъемлемой частью оптической системы, поэтому **ход лучей в приборах, вооружающих глаз, зависит от аккомодации глаза.**

При анализе работы оптических приборов для визуальных наблюдений удобнее всего полагать, что глаз наблюдателя **аккомодирован на бесконечность**⁴. Это означает, что лучи от каждой точки предмета, пройдя через прибор, попадают в глаз в виде параллельного пучка.

Размеры изображения на сетчатке определяются углом, под которым виден рассматриваемый предмет. Достигаемый за счет применения прибора эффект характеризуется видимым увеличением оптического прибора Γ , определяемым соотношением:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\beta}{\alpha}, \quad (2.25)$$

где α и β – углы, под которыми предмет виден без прибора и через него (угловые размеры предмета). Если это отношение положительно, то оптическая система образует прямое изображение. На это указывает одинаковость знаков углов α и β . Перевернутое (обратное) изображение характеризуется различными по знаку углами α и β , следовательно, и величина увеличения будет отрицательна. Однако на практике часто пренебрегают знаком увеличения, и оно считается **положительным**, а вид изображения, прямое или обратное, оговаривается особо.

1. Лупа. Увеличение лупы

Лупа — собирающая линза, предназначенная для получения увеличенного мнимого прямого изображения предмета. Простейшая лупа (рис. 2.48)

⁴ В некоторых учебниках полагается, что глаз наблюдателя аккомодирован на расстояние наилучшего зрения нормального глаза. В этом случае ход лучей в приборах несколько усложняется, но угловое увеличение прибора остается таким же, как и при аккомодации на бесконечность.

представляет собой положительную линзу с небольшим фокусным расстоянием (более сложные лупы состоят из нескольких линз).

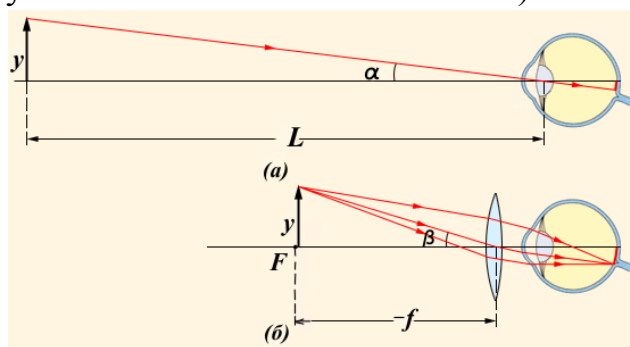


Рис. 2.48. Действие лупы: *a* – предмет рассматривается невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения $L = 25 \text{ см}$; *б* – предмет рассматривается через лупу с фокусным расстоянием f

Угловой размер предмета при рассматривании без лупы, когда он располагается на расстоянии наилучшего зрения от глаза $L = 25 \text{ см}$, определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{L}. \quad (2.26)$$

При наблюдении через лупу предмет располагается вблизи переднего фокуса линзы F (см. рис. 2.48). В этом случае получается прямое мнимое увеличенное изображение, которое рассматривается глазом под углом

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y}{-f} = \frac{y}{f'}. \quad (2.27)$$

Увеличение лупы в соответствии с (2.25) определяется как

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\frac{y}{f'}}{\frac{y}{L}} = \frac{L}{f'}, \quad (2.28)$$

Т.к $L = 25 \text{ см}$,

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{25}{f} = \frac{\Phi}{4}, \quad (2.29)$$

где f' – фокусное расстояние в метрах, Φ – оптическая сила в диоптриях. Обычно лупа имеет оптическую силу $\Phi > 4$ диоптрий.

Для примера рассмотрим лупу, на оправе которой имеется надпись "2.5", что означает, увеличение лупы равно 2.5. Фокусное расстояние такой лупы $f' = \frac{25}{2.5} = 10 \text{ см} = 0.1 \text{ м}$, оптическая сила лупы $\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ дптр}$.

2. Зрительная труба

Для рассматривания удаленных предметов применяются зрительные трубы. Зрительные трубы, предназначенные для наблюдения небесных светил, называются телескопами. Зрительная труба состоит из двух собирающих линз – обращенной к предмету линзы с большим фокусным расстоянием (объектива) O_1 и линзы с малым фокусным расстоянием (окуляра) O_2 , обращенной к наблюдателю. При этом задний фокус объектива F'_1 совпадает с передним фокусом окуляра F_2 . Для наводки на резкость расстояние между объективом и окуляром может немного меняться.

На рис. 2.49 изображен ход лучей в астрономическом телескопе. Предполагается, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность, поэтому лучи от каждой точки удаленного предмета выходят из окуляра параллельным пучком.

Изображение y' удаленного предмета, даваемое объективом, лежит практически в задней фокальной плоскости объектива. Это изображение рассматривается через окуляр как через лупу. Длинной трубы можно пренебречь по сравнению с расстоянием до предмета. Поэтому можно считать, что невооруженным глазом предмет будет виден под углом α , тангенс которого равен

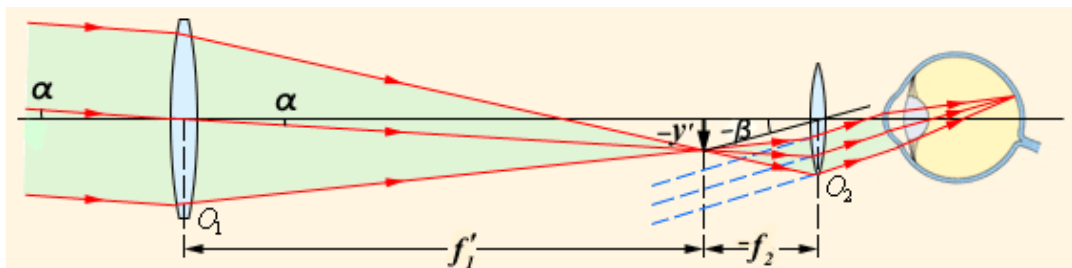


Рис. 2.49. Ход лучей в телескопе

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{-y'}{f_1'} . \quad (2.30)$$

Угол β , под которым предмет виден в зрительную трубу, отрицательный:

$$\operatorname{tg}(-\beta) = \frac{-y'}{-f_2'} = \frac{-y'}{f_2'}, \operatorname{tg} \beta = \frac{y'}{f_2'} . \quad (2.31)$$

Следовательно, для увеличения, даваемого зрительной трубой, получается выражение:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{(-y')f_1'}{f_2'y'} = -\frac{f_1'}{f_2'} < 0 . \quad (2.32)$$

Как видно из рис. 2.49, зрительная труба дает перевернутое изображение рассматриваемого предмета. Для телескопов это не имеет значения. В трубах же, предназначенных для наблюдения земных объектов, для получения прямого изображения вводятся дополнительные оборачивающие системы. Зрительные трубы бывают двух типов: зрительная труба **Кеплера**, которая дает увеличенные пере-

вернутые изображения и зрительная труба Галилея, формирующая увеличенные **прямые** изображения. Окуляром в трубе Галилея служит рассеивающая линза.

В качестве объектива в больших астрономических телескопах применяются не линзы, а сферические зеркала. Такие телескопы называются **рефлекторами**. Следует иметь в виду, что большие астрономические телескопы предназначены не только для того, чтобы увеличивать угловые расстояния между наблюдаемыми космическими объектами, но и для увеличения потока световой энергии от слабо-светящихся объектов.

3. Микроскоп

Для получения больших увеличений (до 2000) при наблюдении мелких предметов применяется микроскоп. Увеличенное изображение предмета в микроскопе получается с помощью оптической системы, состоящей из двух короткофокусных линз – объектива O_1 и окуляра O_2 (рис. 2.50). Объектив формирует действительное перевернутое увеличенное изображение предмета. Это промежуточное изображение рассматривается глазом через окуляр, действие которого аналогично действию лупы. Окуляр располагают так, чтобы промежуточное изображение находилось в его фокальной плоскости; в этом случае лучи от каждой точки предмета распространяются после окуляра параллельным пучком.

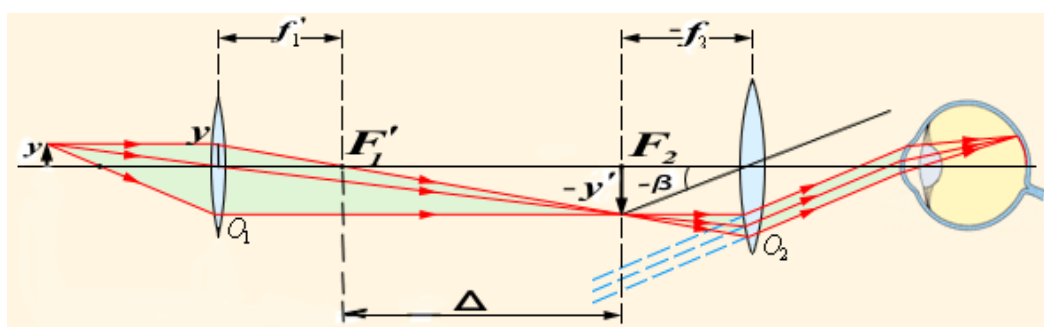


Рис. 2.50. Ход лучей в микроскопе

Из подобия треугольников с общей вершиной в точке F_1' (см. рис. 2.50) для линейного увеличения получим выражение

$$\frac{-y'}{y} = \frac{\Delta}{f_1'}. \quad (2.33)$$

Угловой размер предмета, видимого в микроскоп, определяется как

$$\operatorname{tg}(-\beta) = \frac{-y'}{-f_2} = \frac{-y'}{f_2'}, \operatorname{tg} \beta = \frac{y'}{f_2}, \quad (2.34)$$

Учитывая, что угловой размер предмета, рассматриваемого через лупу, описывается формулой (2.26), для увеличения, даваемого микроскопом, воспользовавшись (2.33) и (2.34), получим

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{y' L}{f_2' y} = -\frac{y \Delta L}{f_1' f_2' y} = -\frac{\Delta L}{f_1' f_2'} < 0. \quad (2.35)$$

Таким образом, объектив микроскопа дает увеличенное перевернутое изображение предмета. Для удобства наблюдения можно перевернуть предмет.

Из формулы (2.35) видно, что для получения больших увеличений нужно уменьшать фокусные расстояния объектива и окуляра. Практически f_1' составляет величину порядка 1 мм, $f_2' \sim 10$ мм, $\Delta \sim 100$ мм. При этих данных получается

$$\Gamma = \frac{250 \cdot 100}{1 \cdot 10} = 2500.$$

Казалось бы, что уменьшая фокусные расстояния и увеличивая Δ , можно достигнуть сколь угодно больших Γ . Однако предел увеличению, даваемому микроскопом, кладется волновой природой света.