

Вступление к лабораторным работам по оптике

Оптика это раздел физики, который изучает свойства и физическую природу света, явления, связанные с распространением света и его взаимодействием с веществом. Под светом будем понимать не только *видимую* часть спектра электромагнитного излучения, но и примыкающие к нему широкие области – *инфракрасное* и *ультрафиолетовое* излучение. Эти три вида излучения образуют так называемую *оптическую область спектра*. Различные участки спектра отличаются друг от друга *длиной волны λ* и *частотой ν* . Оптический спектр занимает диапазон от границы инфракрасного излучения ($\lambda = 2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^6 \text{ нм}$, $\nu = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$) до коротковолновой границы ультрафиолета ($\lambda = 10^{-5} \text{ мм} = 10 \text{ нм}$, $\nu = 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$). Воспринимаемое человеческим глазом видимое излучение соответствует диапазону длин волн ($\lambda = 400 \div 760 \text{ нм}$). Указанные границы условны.

Практическое значение оптики и ее влияние на другие отрасли знания исключительно велики. Изобретение телескопа и спектроскопа открыло перед человечеством удивительнейший и богатейший мир явлений, происходящих в необъятной Вселенной. Изобретение микроскопа произвело революцию в биологии. Фотография помогла и продолжает помогать чуть ли не всем отраслям науки.

Простейшие оптические явления, например, возникновение теней, получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках так называемой геометрической оптики.

В основу ее формального построения положены четыре закона, установленных опытным путем еще в древности.

Закон прямолинейного распространения света: свет в прозрачной однородной среде распространяется по прямым линиям. Опытным доказательством этого закона могут служить: а) резкие тени за предметами, освещаемыми точечными источниками света, т.е. источниками, размеры которых малы по сравнению с размерами освещаемого предмета и расстояниями от него до экрана (рис.1); б) получение изображений светящихся предметов в камере-обскуре с малым отверстием в непрозрачной диафрагме (рис. 2). Эксперименты, проведенные позднее показали, что этот закон нарушается, если свет проходит сквозь очень малые отверстия, причем, чем меньше отверстие, тем существеннее отклонения.

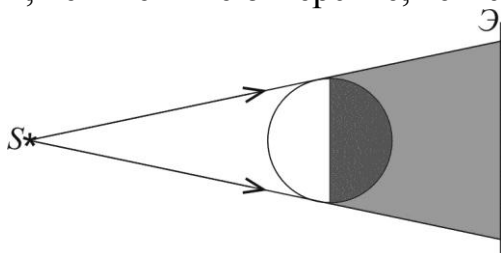


Рис. 1

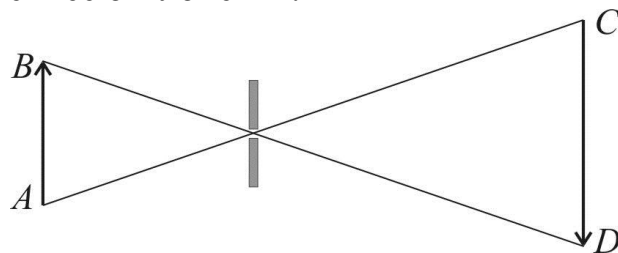


Рис. 2

Закон независимости световых пучков: распространение светового пучка в среде не зависит от наличия или отсутствия в этой среде других пучков. Разбивая световой поток на отдельные пучки, например, с помощью диафрагмы, можно показать, что действие этих пучков независимо. Отсюда следует, что освещенность экрана несколькими световыми пучками равна сумме освещенностей, создаваемых каждым пучком в отдельности.

На основе этих двух законов сложилось представление о *световых лучах*. Так называют линии (очень узкие световые пучки), вдоль которых распространяется

поток световой энергии.

Если свет направить на границу раздела двух сред (двух прозрачных веществ), то он частично проходит во вторую среду – преломляется, частично возвращается

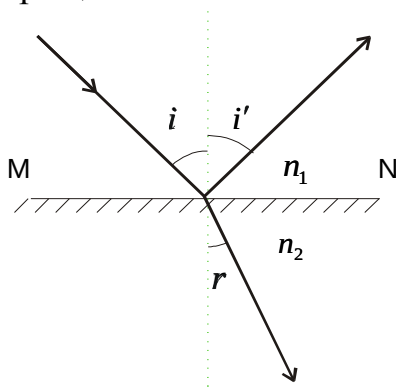


Рис. 3

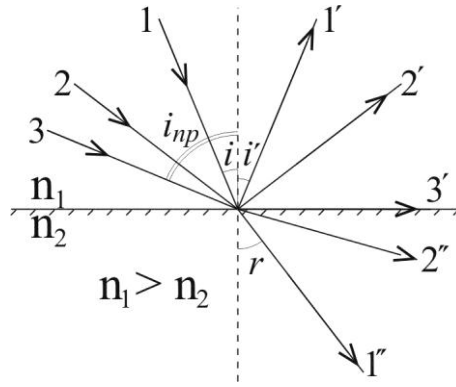


Рис. 4

обратно – отражается (рис. 3). На рис. 1 – падающий луч света, i – угол падения; 2 – отраженный луч, i' – угол отражения; 3 – преломленный луч, r – угол преломления. Отсюда следуют законы отражения и преломления света.

Закон отражения света: падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения (эта плоскость называется плоскостью падения), причем угол падения равен углу отражения

$$i = i' . \quad (1)$$

Закон преломления света: лучи падающий и преломленный лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения. При этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред

$$\sin i / \sin r = n_{21}, \quad (2)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления или показатель преломления второй среды относительно первой. *Относительный показатель преломления* двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления

$$n_{21} = n_2 / n_1 . \quad (3)$$

Абсолютным показателем преломления среды называется величина n , равная отношению скорости c света в вакууме к их скорости v в среде

$$n = c / v . \quad (4)$$

Учитывая (3), закон преломления (2) можно записать в виде

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 . \quad (5)$$

Из симметрии выражения (5) вытекает обратимость световых лучей.

Среду с бóльшим показателем преломления называют *оптически более плотной*.

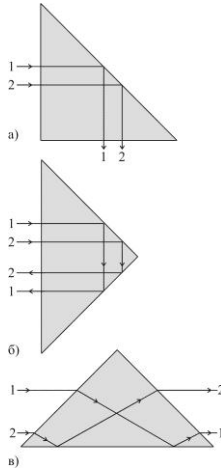
На рис. 3 свет распространяется из среды оптически менее плотной в более плотную ($n_1 < n_2$), при этом $r < i$. Если же свет преломляется в среду с меньшим показателем преломления ($n_1 > n_2$) (рис. 4), то согласно (5) закон преломления запишется

$$\sin i_2 / \sin i_1 = n_1 / n_2 > 1 ,$$

т.е. угол преломления будет больше угла падения и преломленный луч будет удаляться от нормали. При некотором угле падения $i = i_{np}$ угол преломления окажется равным $\pi/2$. При $i > i_{np}$ весь падающий свет полностью отражается, а интенсивности падающего и отраженного лучей одинаковы. Это явление называется

полным отражением. Угол i_{np} называется *предельным углом*. Согласно (5)

$$\sin i_{np} = n_2 / n_1 = n_{21}. \quad (6)$$



Явление полного отражения используется в призмах полного отражения, с помощью которых можно повернуть луч на 90° , на 180° и др. Такие призмы используются в перископах, биноклях, а также в рефрактометрах, предназначенных для измерения показателей преломления тел. Используется это явление также в световодах. Это тонкие произвольным образом изогнутые волокна из прозрачного материала, главным образом стекла. Световодящая жила (сердцевина) окружена оболочкой из стекла другого сорта с меньшим показателем преломления. Свет, падающий на торец световода под углами, большими предельного, претерпевает на границе раздела сердцевин и оболочки полное отражение и распространяется только по световедущей жиле. Таким образом, с помощью световода можно искривлять путь светового луча. Световоды используются в электронно-лучевых трубках, для кодирования информации, в медицине и т.д.

Одним из важнейших элементов оптической аппаратуры является линза. Без нее не было бы микроскопа, телескопа, спектрометра, фотоаппарата, кино, телевидения и т.п.

Линзы представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями, одна из которых обычно сферическая, а вторая сферическая или плоская. По оптическим свойствам линзы делятся на *собирающие* и *рассеивающие*. Ограничимся рассмотрением тонких линз. Линза называется *тонкой*, если ее толщина значительно меньше радиусов кривизны R_1 и R_2 поверхностей, ограничивающих линзу (рис. 5). Прямая, проходящая через центры кривизны S поверхностей линзы, называется *главной оптической осью*. У линзы есть точка на главной оптической оси, проходя через которую лучи не преломляются – это *оптический центр линзы*. У двояковыпуклых и двояковогнутых линз он совпадает с геометрическим центром средней части линзы O . Если направить на собирающую линзу пучок

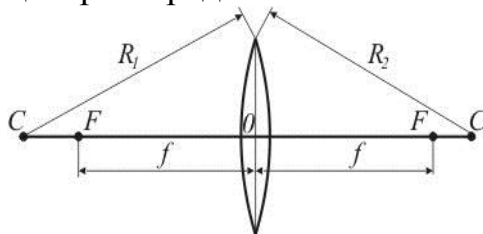


Рис. 5

лучей, параллельных главной оптической оси, то после преломления в линзе они пересекутся в точке, которая называется *фокусом* линзы F . Расстояние от центра линзы O до фокуса называется ее *фокусным расстоянием* f . Параллельные лучи, направленные на линзу под углом к главной

оптической оси также после преломления в линзе соберутся в одной точке – *побочном фокусе*. Таких точек можно получить множество. Плоскость, проведенная через все эти точки перпендикулярно главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью* линзы.

Еще в 17 веке французский физик и математик Ферма сформулировал принцип наименьшего времени, согласно которому действительный путь распространения света есть путь, для прохождения которого свету требуется минимальное время по сравнению с любым другим мыслимым путем между теми же точками – принцип Ферма. Используя этот принцип можно получить *формулу тонкой линзы* – соотношение, связывающее радиусы кривизны R_1 и R_2 линзы с расстояниями a и b от линзы до предмета и его изображения. Приводим без вывода

$$(n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (7)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления линзы и окружающей среды. Эта формула линзы пригодна для линз выпуклых и вогнутых при любом расположении предмета и соответствующем расположении фокуса. Нужно только принять во внимание знаки R_1 , R_2 , a и b , считая их положительными, если они отложены *вправо* от линзы, и отрицательными, если они отложены *влево* от линзы. Как видим фокусное расстояние зависит от относительного показателя преломления и радиусов кривизны преломляющих поверхностей.

Если $a = \infty$, т.е. лучи падают на линзу параллельным пучком, то $b = f$ (рис. 6а). Если $b = \infty$, т.е. изображение находится в бесконечности и, следовательно лучи

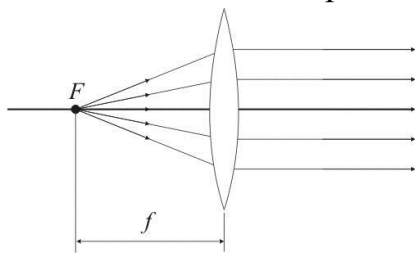


Рис. 6а

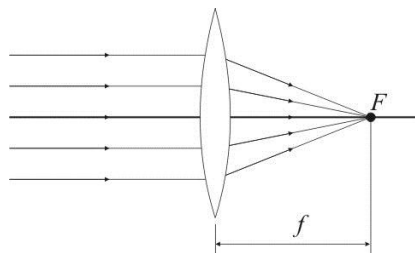


Рис. 6б

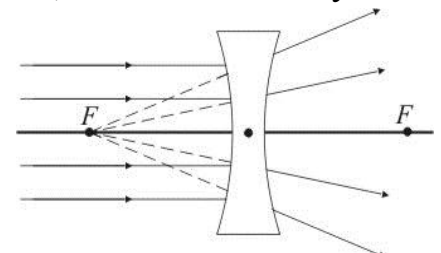


Рис. 7

выходят из линзы параллельным пучком, то $a = f$ (рис. 6б). Отсюда следует, что фокусные расстояния линзы, окруженной с обеих сторон одинаковой средой, равны, что у каждой линзы есть два фокуса, лежащие по обе ее стороны.

Для сравнения оптических свойств различных линз пользуются не величиной фокусного расстояния, а обратной величиной $1/f$. Величина $\Phi = 1/f$ называется *оптической силой линзы*. Применение этой величины связано со следующим. Чем длиннее фокусное расстояние, тем слабее преломляющая способность линзы и тем меньше дробь $1/f$; чем короче фокусное расстояние, тем сильнее преломляет линза и тем больше дробь $1/f$. Таким образом, $1/f$ характеризует преломляющую способность линзы.

Оптическая сила измеряется в диоптриях (дптр). *Диоптрия* – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1м: 1дптр = 1/м. Линзы с *положительной* оптической силой являются *собирающими*, с *отрицательной* – *рассеивающими*. В отличие от собирающей рассеивающая линза имеет мнимые фокусы (рис. 7). В мнимом фокусе сходятся после преломления в линзе не сами лучи, а их воображаемые продолжения.

Линзы, применяемые в оптических приборах характеризуются еще одной величиной – *светосилой*. Качество линзы, применяемой, например, в фотоаппарате, определяется освещенностью изображения. А она будет тем больше, чем больше диаметр линзы и чем сильнее преломляются лучи, т.е. чем короче фокусное расстояние. Поэтому *светосила* линзы измеряется отношением диаметра линзы к ее фокусному расстоянию.

Для построения изображения предмета в линзах надо построить изображения отдельных его точек. Для построения изображения точки достаточно провести из нее два луча и найти их преломленные лучи. Обычно для этого пользуются двумя из трех лучей:

- 1 – луча, проходящего через оптический центр линзы, который не преломляется;
- 2 – луча, идущего параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч или его продолжение проходит через фокус линзы;

3 – луча или его продолжения, проходящего через фокус линзы; после преломления в линзе он проходит параллельно ее главной оптической оси.

Приведем примеры построения изображений в собирающей и рассеивающей линзах. На рис. 8 показано построение изображения предмета AB когда он расположен между фокусом и двойным фокусом и между линзой и фокусом. В первом случае изображение предмета $A'B'$ действительное, увеличенное, перевернутое; во втором – мнимое, прямое, увеличенное. Изображение в рассеивающей линзе получаем всегда мнимое прямое, уменьшенное (рис. 9).

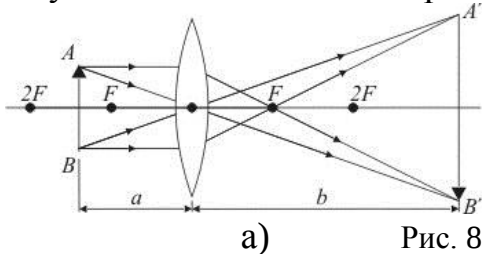
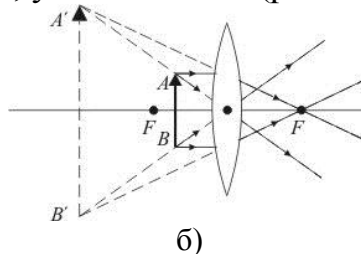


Рис. 8



б)

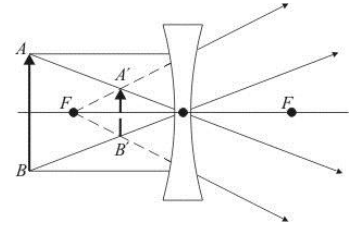


Рис. 9

Линейным увеличением линзы называется отношение линейного размера изображения $A'B'$ к линейному размеру предмета AB . Из подобия треугольников (рис.8а) следует

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a}. \quad (8)$$

Действительное изображение (оно перевернутое) соответствует отрицательным значениям линейного увеличения, мнимое (прямое) – положительным.

Все рассуждения проведены для параксиальных (приосевых) лучей, т.е. лучей, образующих с оптической осью малые углы. Только такие лучи минимально искажают изображения. Мы принимали, что показатель преломления не зависит от длины волны, а падающий на линзу свет – монохроматический (строго определенной длины волны). В реальных оптических системах эти условия не выполняются, поэтому в них возникают искажения изображения – аберрации.

Изменять естественный ход световых лучей можно также с помощью зеркал.

Плоское зеркало является идеальной оптической системой. Оптическая система называется идеальной, если любая точка предмета изображается строго в виде точки. Другие системы, обладающие осью симметрии, идеальны в параксиальной области, занимающей, как мы уже отмечали, бесконечно узкое пространство, окружающее ось симметрии.

На рис. 10 показано построение изображения точки S в плоском зеркале. Луч SA , перпендикулярный к зеркалу MN , отражается от него по тому же направлению. Наклонный луч SB отражается по направлению BC . Если оба отраженных луча попадут в глаз, они будут казаться исходящими из точки пересечения их воображаемых продолжений, т.е. из точки S_1 . Из рисунка следует, что $S_1A = SA$.

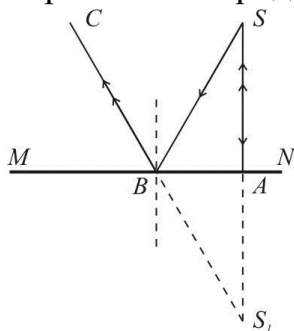


Рис.10

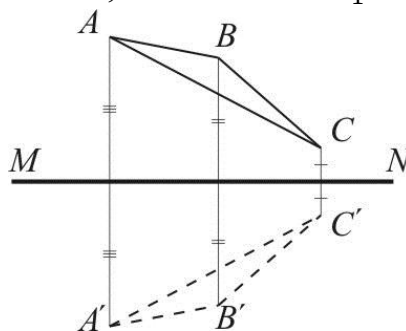


Рис.11

Таким образом, изображение светящейся точки в плоском зеркале S_1 мнимое и симметрично точке S .

Изображение предмета в плоском зеркале строится аналогично. Надо для каждой его точки найти симметричную точку, как это показано на рис. 11.

Сферическое зеркало представляет собой часть поверхности шара обычно большого радиуса. Если отражающей является внутренняя поверхность шара, то зеркало называется вогнутым, если внешняя – выпуклым.

Построение изображения предмета в сферических зеркалах аналогично такому построению в линзах. Используются такие же два из трех лучей.

Центральный пучок лучей, параллельных главной оптической оси, после отражения от вогнутого зеркала пересекает главную оптическую ось в одной точке, называемой фокусом и лежащей посередине радиуса кривизны зеркала. Т.е. фокусное расстояние зеркала равно

$$f = R/2. \quad (9)$$

В случае сферического зеркала с радиусом кривизны R и центром кривизны C , если предмет находится дальше центра C (рис. 12) предмет и изображение находятся по одну сторону от зеркала. Тогда формула сферического зеркала будет

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (8)$$

Оптическая сила зеркала, очевидно, будет $\Phi = 1/f = 2/R$.

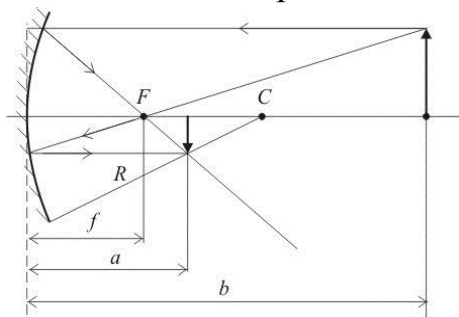


Рис. 12

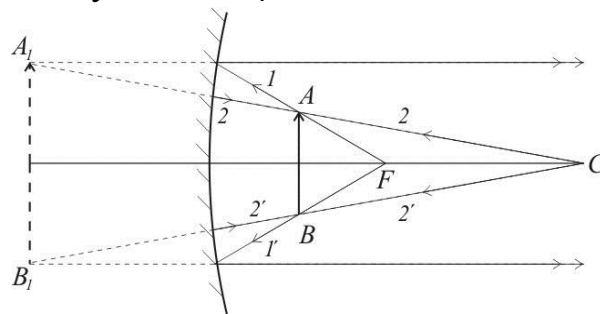


Рис. 13

На рис. 13 мы видим ход лучей для того случая, когда предмет находится ближе главного фокуса.

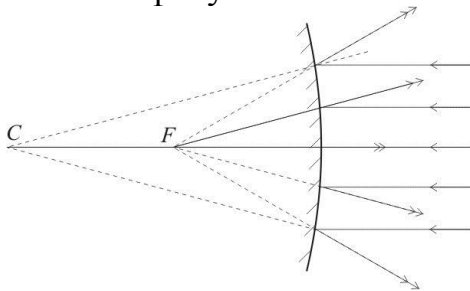


Рис.14

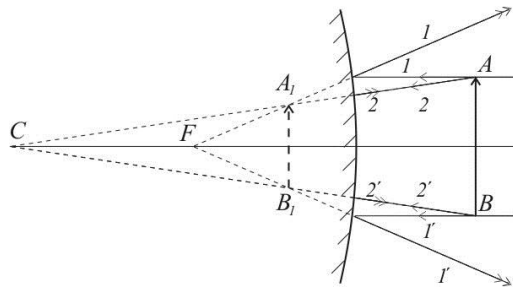


Рис.15

На рис. 14 показан ход лучей, падающих параллельно главной оптической оси на выпуклое зеркало, а на рис. 15 – построение изображения предмета в выпуклом зеркале. Из рисунков видно, что изображение предмета в выпуклом зеркале и его фокус мнимые.

Рассмотрим призму треугольного сечения (рис. 16). Две грани, через которые проходит луч, называются преломляющими; их ребро – преломляющим ребром; линейный угол A между ними – преломляющим углом призмы.

Пусть пучок монохроматического света падает на призму из воздуха под углом α_1 . При прохождении через призму пучок лучей в результате двукратного преломления отклоняется к ее основанию на некоторый угол φ по отношению к падающему лучу. Величина угла отклонения зависит от угла падения α_1 . При некотором значении α_1 угол отклонения оказывается минимальным $\varphi_{\min}$. Это

соответствует симметричному ходу лучей в призме ($\alpha_1 = \alpha_2$).

Угол $\varphi_{\min}$ называется углом наименьшего отклонения. Углы наименьшего отклонения будут разными для различных монохроматических лучей, т. к. показатель преломления материала призмы зависит от длины волны λ . В результате этого призма разлагает белый свет на составляющие, т.е. в спектр, что впервые наблюдал Ньютон.

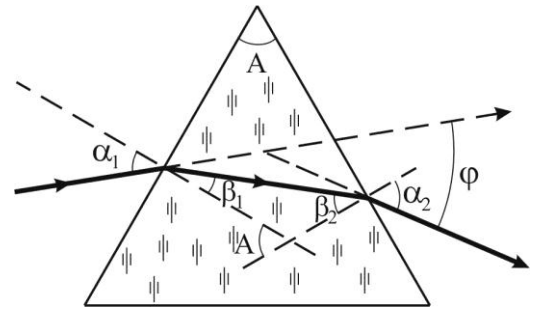


Рис.16