

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

§ 4. СВЕТЯЩАЯСЯ ТОЧКА, СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ И ПУЧКИ

В геометрической оптике под светящейся точкой понимают источник оптического излучения, не имеющий размеров. Это положение противоречит объяснению светящейся точки в физическом смысле, когда под светящейся точкой понимают тело, которое испускает оптическое излучение, но размерами которого можно пренебрегать по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается это тело.

В геометрической оптике не делается различия между самосветящейся точкой, являющейся частицей светового тела источника света, и не самосветящейся, являющейся частицей какого-либо предмета, освещенного посторонним источником света.

В геометрической оптике под лучом света понимают ось световой трубки, в то время как в физической оптике луч света понимается как световая трубка, поперечные размеры которой весьма малы по сравнению с ее длиной. Световым лучам геометрической оптики соответствуют нормали к поверхности волны в физической оптике.

Таким образом, светящаяся точка и световой луч в геометрической оптике есть понятия математические.

Отверстия оптических приборов имеют всегда конечные размеры. Во входное отверстие прибора от одной светящейся точки попадает много лучей. Пучок лучей есть совокупность лучей. Если лучи выходят из одной точки или соединяются в одной точке, то пучок таких лучей называется *гомоцентрическим*. В оптический прибор поступают гомоцентрические пучки лучей. Эти пучки вследствие aberrаций оптической системы превращаются в негomoцентрические, причем нарушение гомоцентричности наступает после преломления или отражения на первой же поверхности (кроме обычных случаев безабберационных поверхностей для дан-

ного пучка лучей). Пучки лучей бывают расходящиеся (рис. 1,а), сходящиеся (рис. 1,б) и параллельные (рис. 1,в).

Если из оптического прибора выходит гомоцентрический пучок, образующий одну точку изображения, то такое изображение называется *точечным*, или *стигматическим*. Изображение, образованное пересечением самих лучей, называется *действительным*, а изображение, образованное пересечением их геометрических продолжений, — *мнимым*.

На малую часть преломляющей поверхности $ABB'A'$ падает гомоцентрический пучок лучей (рис. 2) Кривизны поверхности в направлениях DE и LK неодинаковы; в направлении DE кривизна больше. Вследствие этого лучи, падающие в точки D и E , после преломления пересекутся ближе к поверхности в точке F_1 , а лучи, падающие в точки L и K , после преломления соберутся в точке F_2 . В результате получим два изображения $F_1'F_1''$ и $F_2'F_2''$ в виде прямых отрезков, расположенных под углом друг к другу.

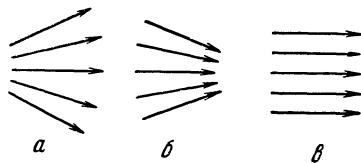


Рис 1 Пучки лучей

Пучок лучей, образующий такие изображения, перестает быть гомоцентрическим и называется *астигматическим*.

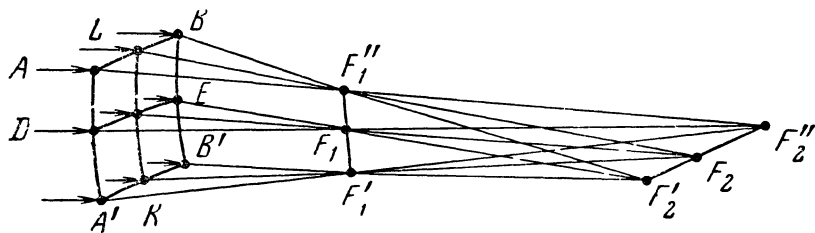


Рис. 2 Астигматический пучок лучей

Астигматическим называется такой пучок лучей, который образует изображение какой-либо точки предмета в виде двух отрезков, перпендикулярных друг другу.

Для астигматического пучка является характерным образование изображения в виде прямого отрезка. Это свойство используется в оптических приборах, например в светозаписывающих регистрационных приспособлениях (микрофотометры, осциллографы и т. д.). Частным случаем таких астигматических пучков является пучок, образованный положительной цилиндрической линзой (рис. 3), одно изображение которой находится на отрезке F_1F_2 , а другое — в бесконечности.

Если гомоцентрический пучок падает на сферическую поверхность так, что ось этого пучка совпадает с перпендикуляром к

поверхности, то астигматический пучок не образуется, так как кривизны этой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях одинаковы.

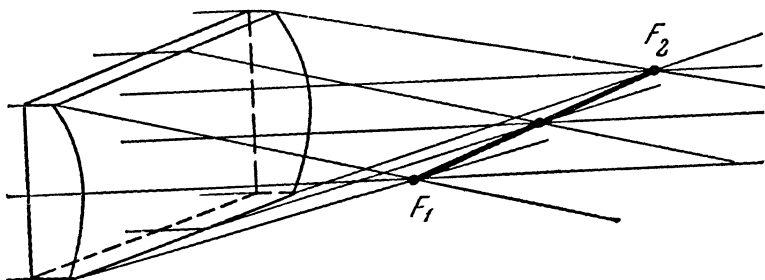


Рис. 3. Астигматический пучок, образованный цилиндрической линзой

§ 5. ЗАКОНЫ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Наблюдение солнечных и лунных затмений, геодезические наблюдения, образование теней и полутеней показали прямолинейность распространения света. Закон прямолинейного распространения света является основным в геометрической оптике. Опыт показал, что закон прямолинейного распространения света несправедлив в случае прохождения лучей вблизи задерживающих экранов. Здесь мы встречаемся с явлением дифракции, получившим подробное рассмотрение в физической оптике. Геометрическая оптика не рассматривает явление дифракции. Но в теории оптических приборов всегда имеют в виду это явление, так как значительное диафрагмирование оптических систем может вызвать дифракцию, которая искажает изображение.

Геометрическая оптика исходит из закона независимости распространения лучей. Сущность его заключается в том, что отдельные лучи и пучки, встречаясь друг с другом, пересекаясь, не оказывают друг на друга влияния.

В действительности, при некоторых условиях имеет место явление интерференции, перераспределяющее освещенность в точках изображения. Интерференция является объектом изучения физической оптики. Однако в теории образования изображения интерференция имеет важное значение, так как объясняет распределение световой энергии в кружке рассеяния, которое в свою очередь позволяет судить о качестве изображения.

Следующими основными законами, на которых базируется геометрическая оптика, являются законы отражения и преломления света.

Если лучи, распространяясь в одной оптической среде, встречают другую среду, то на границе этих сред они полностью или

частично отражаются. При отражении лучи света подчиняются следующим законам:

1. Луч падающий и луч отраженный вместе с перпендикуляром, восстановленным к поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения равен углу падения.

3. Луч падающий и луч отраженный обратимы.

Если лучи, встречая другую оптическую среду, преломляются, то они подчиняются следующим законам:

1. Луч падающий и луч преломленный вместе с перпендикуляром, восстановленным к поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения луча к синусу угла преломления для двух данных оптических сред есть величина постоянная. Это отношение называется *относительным показателем преломления двух сред*.

3. Луч падающий и луч преломленный обратимы.

Законы отражения и преломления имеют важное значение. Во-первых, они устанавливают, что лучи при прохождении через оптическую систему всегда лежат в плоскости, образованной падающим лучом и нормалью. Во-вторых, они устанавливают численные зависимости координат лучей при переходе от одной поверхности к другой, тем самым позволяют рассчитать ход луча через любую сложную оптическую систему. В-третьих, они указывают на возможность анализа оптических систем в обратном ходе лучей.

§ 6. ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Все оптические среды характеризуются абсолютным показателем преломления n , который называется *показателем преломления*. Абсолютным показателем преломления какой-либо оптической среды называется отношение синуса угла падения к синусу угла преломления при условии, что луч идет из вакуума в эту среду.

Показатель преломления вакуума, исходя из этого, равен единице. Обозначим угол падения луча через i , а угол преломления через i' . Показатель преломления первой среды n , а второй n' , тогда

$$n \sin i = n' \sin i'. \quad (6,1)$$

Произведение показателя преломления среды на синус угла между нормалью и лучом при каждом преломлении есть величина постоянная, называемая *оптическим инвариантом*.

В геометрической оптике принимают показатель преломления воздуха также равным единице, хотя его точное значение $n=1,000274$ (при нормальном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20°C).

Зависимость показателя преломления воздуха от температуры

$t^{\circ}\text{C}$ и атмосферного давления P_{δ} определяется формулой

$$n_{\text{в}} = 1 + 0,000294 \frac{P_{\delta}}{760} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{273}}. \quad (6,2)$$

Так, например, по этой формуле при $P_{\delta} = 760$ мм рт. ст. и $t^{\circ}\text{C} = -50^{\circ}$ $n_{\text{в}} = 1,0003605$. Часто для практических целей необходимо определять показатель преломления воздуха с точностью до 10^{-6} .

Показатель преломления оптических сред зависит от длины волны проходящего света, и его принято нормировать для линии натрия D , т. е. n_D . Обычно индекс D опускается. В ряде случаев, особенно в зарубежной практике, показатель преломления указывается для линии гелия d , т. е. n_d .

Показатели преломления для различных цветов в видимой области спектра приводятся в каталогах или ГОСТах на оптическое стекло, а для невидимой области спектра вычисляются на основе знания каких-либо трех показателей преломления для трех длин волн. Для этой цели служат так называемые дисперсионные формулы. При вычислении показателя преломления оптического стекла в инфракрасной области спектра для диапазона длин волн от 800 нм до 2600 нм хорошие результаты дает формула Неймана—Кетслера

$$n_{\lambda} = a + b_{\lambda}^2 + \frac{c}{\lambda^2}, \quad (6,3)$$

где

$$c = \frac{\frac{n_1 - n_2}{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^2} - \frac{n_2 - n_3}{\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^2 - 1}}{\frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{1}{\lambda_3^2}},$$

$$b = \frac{n_1 - n_2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} + \frac{c}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}$$

и

$$a = n_1 - b\lambda_1^2 - \frac{c}{\lambda_1^2}.$$

Так, например, вычисление показателя преломления стекла марки ОФЗ для $\lambda = 1,5$ мкм при известных $n = 1,59024$ ($\lambda = 1,4$ мкм), $n = 1,5850$ ($\lambda = 1,7$ мкм) и $n = 1,5792$ ($\lambda = 2$ мкм) дает значения: $c = 0,00454462$; $b = -0,00483210$; $a = 1,597392$ и $n_{\lambda} = 1,58854$.

Пример 1. Луч идет из воздуха в плоскопараллельную пластинку под углом 30° . Пластинка имеет показатель преломления $1,5163$. Определить угол преломления луча в пластинке.

Решение. Дано: $i = 30^{\circ}$; $n = 1$; $n' = 1,5163$.

Применим формулу (6,1)

$$\sin i' = \frac{\rho \sin i}{n'} = 0,32975,$$

или

$$i' = 19^\circ 15' 13''.$$

Этот пример показывает порядок величин, необходимый для вычислений. В практике встречаются случаи, когда необходимо вычислять угол преломления с точностью до сотых долей секунды.

§ 7. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Представим себе, что белый солнечный луч BP (рис. 4) падает под углом i на поверхность AA' , разделяющую две оптические среды с показателями преломления n и n' . При преломлении на границе этих двух сред происходит разложение белого света на составные части. Это явление называется дисперсией света. Это происходит потому, что белый луч составлен из ряда лучей с различной длиной волны, и эти лучи преломляются по-разному, образуя веер лучей в пределах угла di' .

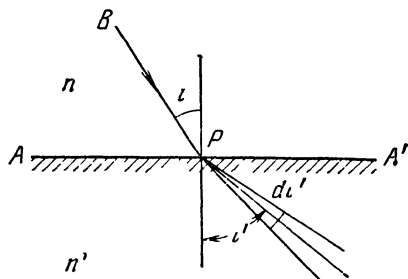


Рис 4 Дисперсия света

Для определения угловой величины дисперсии продифференцируем выражение (6,1) по переменным n' и i' при постоянных n и i :

$$dn' \sin i' + n' \cos i' di' = 0.$$

Отсюда

$$di' = - \frac{dn'}{n'} \operatorname{tg} i'. \quad (7,1)$$

Под dn' понимают разность показателей преломления для лучей, расположенных на краях изучаемого участка спектра, а под n' — показатель преломления для среднего (или наиболее эффективного) луча этого же диапазона спектра.

В частном случае, при исследовании видимого спектра, под n' понимают показатель преломления луча, соответствующего D — линии натрия. Угол i' вычисляют по формуле (6,1).

Способность стекла разлагать свет на составные части характеризуется коэффициентом дисперсии ν :

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad (7,2)$$

где индексы при показателях преломления соответствуют линиям

Фраунгофера. Этот коэффициент был введен в практику Аббе еще в прошлом столетии и иногда его называют числом Аббе.

Показатель преломления n и коэффициент дисперсии ν являются главными оптическими постоянными оптических стекол. Значения этих постоянных для некоторых оптических стекол приведены в табл. I приложения.

Оптические стекла в среднем пропускают излучение в диапазоне длин волн $0,33\text{--}2,7$ $\mu\text{м}$.

Пример 2. Определить угловую дисперсию оптического стекла с $n' = 1,6893$, если в диапазоне длин волн от 365 нм до 950 нм разность показателей преломления составляет $0,08185$. Угол падения луча на поверхность $57^\circ 38' 04''$.

Решение. Определим угол преломления по формуле (6,1)

$$\sin i' = \frac{\sin i}{n'} = 0,5; i' = 30^\circ; \operatorname{tg} i' = 0,57735.$$

Угловую дисперсию найдем по формуле (7,1):

$$di' = -0,027973,$$

или, в угловой мере:

$$di' = -1^\circ 36' 10''.$$
