

Рис. 128

5. Постройте изображение точечного источника света, находящегося в точке S (рис. 128).



§ 19. Закон преломления света.

Показатель преломления.

Полное отражение

- Что происходит со световым лучом, прошедшим во вторую среду? Как можно управлять световым лучом?



Изменение направления распространения луча света при прохождении через границу раздела двух сред называется преломлением света (рис. 129).

Угол между перпендикуляром, восстановленным в точке падения к границе раздела двух сред, и преломленным лучом называется углом преломления.

Для изучения свойств световых волн необходимо знать закономерности их распространения в однородной среде, а также закономерности отражения и преломления на границе раздела двух сред.

Рассмотрим падение плоской световой волны на плоскую поверхность раздела однородных изотропных и прозрачных сред при условии, что размеры поверхности раздела намного больше длины волны падающего излучения.

Пусть на плоскую поверхность раздела LM двух сред падает плоская световая волна, фронт которой AB (рис. 130). Если угол падения α отличен от нуля, то различные точки фронта AB волны достигнут границы раздела LM не одновременно.

Рассмотрим, что будет происходить во второй среде, считая, что модуль скорости v_2 распространения света в ней меньше, чем в первой



Рис. 129. Преломление света на границе раздела двух сред

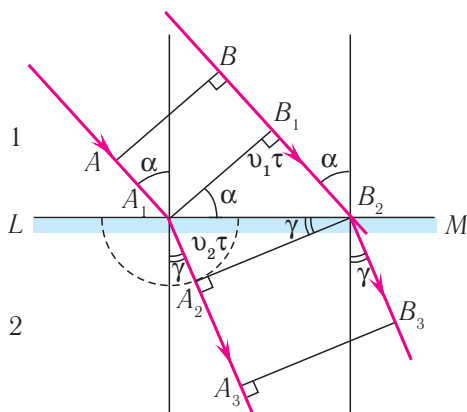


Рис. 130. Объяснение преломления света в соответствии с принципом Гюйгенса: AB — фронт падающей плоской волны; A_2B_3 — фронт волны после преломления

нами. Из $\triangle A_1B_1B_2$ находим $A_1B_2 = \frac{v_1\tau}{\sin\alpha}$ и из $\triangle A_1A_2B_2$ — $A_1B_2 = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}$.
Откуда

$$\frac{v_1\tau}{\sin\alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin\gamma}.$$

Из него следует закон преломления:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Напомним, что абсолютным показателем преломления называется отношение модуля скорости распространения световой волны в вакууме c к модулю скорости распространения в данной среде:

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

С учетом этого соотношения закон преломления принимает вид:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Величина

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

($v_2 < v_1$) (см. рис. 130). Фронт падающей волны AB будет перемещаться со скоростью, модуль которой v_1 , по направлению AA_1 . К моменту времени (за промежуток времени $\tau = \frac{B_2B_1}{v_1}$),

когда точка B_1 фронта достигнет границы раздела двух сред (точка B_2), вторичная волна из точки A_1 (согласно принципу Гюйгенса) пройдет расстояние $l_2 = v_2\tau$. Фронт волны, распространяющейся во второй среде, можно получить, проводя прямую линию, касательную к полуокружности с центром в точке A_1 .

Из построения видно, что $\angle B_1A_1B_2 = \alpha$, $\angle A_1B_2A_2 = \gamma$, как углы с взаимно перпендикулярными сторонами.

равная отношению абсолютных показателей преломления n_2 второй и n_1 первой сред, называется **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой. В отличие от абсолютного показателя преломления относительный показатель преломления может быть и меньше единицы, если $n_2 < n_1$.

Таким образом, исходя из волновой теории света, получен **закон преломления световых волн (света)**:

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

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

Для наблюдения явления преломления света достаточно поместить карандаш в стакан с водой и посмотреть на него со стороны — карандаш будет казаться «надломленным» (преломленным) (см. рис. 129), оставаясь при этом совершенно целым.

► Перепишем закон преломления в следующем виде:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.$$

При такой записи закона преломления (без дроби) необходимо всегда умножать абсолютный показатель преломления на синус угла, относящийся к одной и той же среде.

На границе раздела двух прозрачных сред обычно одновременно с преломлением наблюдается отражение волн. Согласно закону сохранения энергии сумма энергий отраженной $W_{\text{отр}}$ и преломленной $W_{\text{прел}}$ волн равна энергии падающей волны $W_{\text{пад}}$ (рис. 131):

$$W_{\text{пад}} = W_{\text{прел}} + W_{\text{отр}}.$$

Примерный баланс энергий между отраженной и преломленной волнами приведен на рисунке 131.

Причиной преломления волн, т. е. изменения направления распространения волн на границе раздела двух сред, является изменение модуля

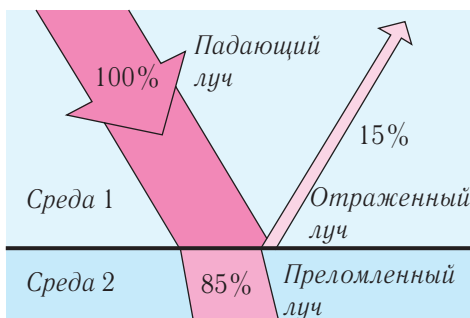


Рис. 131. Баланс энергий при отражении и преломлении света на границе раздела прозрачных сред

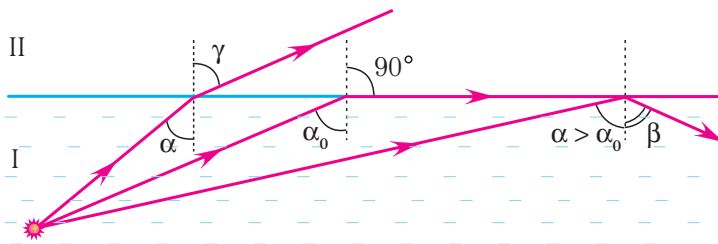


Рис. 132. Преломление и отражение света на границе раздела сред

скорости распространения электромагнитных волн при переходе излучения из одной среды в другую.

Как следует из закона преломления, при переходе света из *оптически более плотной* среды I (с большим абсолютным показателем преломления n_1) в *оптически менее плотную* среду II (с меньшим показателем преломления n_2) угол преломления γ становится больше угла падения α (рис. 132, 133).

По мере увеличения угла падения, при некотором его значении α_0 , угол преломления станет $\gamma = 90^\circ$, т. е. свет не будет попадать во вторую среду.



Это явление называется **полным отражением света** (рис. 133). Угол α_0 , при котором возникает полное отражение, называется **предельным углом полного отражения**. Он определяется из закона преломления при условии, что угол преломления $\gamma = 90^\circ$:

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

Таким образом, преломленная волна отсутствует при углах падения, больших предельного угла $\alpha \geq \alpha_0$. Например, для границы вода ($n = 1,33$) — воздух предельный угол полного отражения $\alpha_0 = 49^\circ$, для границы алмаз ($n = 2,42$) — воздух — $\alpha_0 = 24^\circ$.

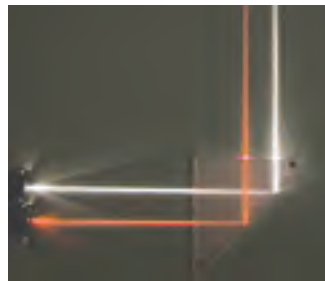


Рис. 133. Полное отражение света на границе раздела сред

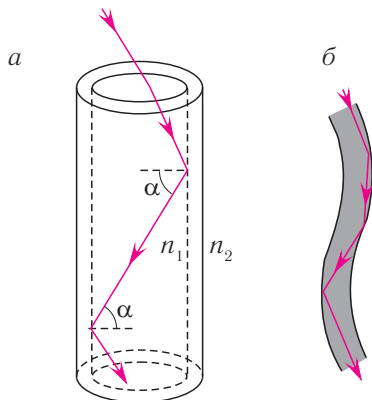


Рис. 134. Ход лучей в световоде:
а — прямом; б — гибком



Рис. 135. Световоды

Явление полного отражения используют в волоконной оптике для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких световодов (рис. 134, 135), а также в различных отражательных призмах различных оптических приборов. В волоконно-оптических устройствах, в которых свет распространяется по тонким световодам, стеклянная световедущая жила которых покрыта слоем вещества с меньшим показателем преломления.

► В 1954 г. белорусским физиком, академиком Федором Ивановичем Федоровым было теоретически предсказано новое физическое явление — поперечное смещение (перпендикулярно плоскости падения) светового пучка при его полном отражении. Это смещение пучка намного меньше длины волны и для его наблюдения световой пучок должен быть ограниченным в поперечном направлении. В 1969 г. французским физиком К. Эмбером оно было подтверждено экспериментально и получило название «сдвиг Федорова».



В 2009 г. китайский ученый Чарльз Као удостоен Нобелевской премии по физике за выдающийся вклад в исследование световодов для оптической связи.



1. Какое явление называется преломлением света?
2. Что является причиной преломления света на границе раздела сред?
3. Объясните, почему карандаш, опущенный в воду, кажется сломанным (см. рис. 129).
4. Сформулируйте закон преломления света.
5. Что называется полным отражением света? При каком условии оно наблюдается?

6. По какой формуле рассчитывается предельный угол полного отражения света?
7. Чему равен угол преломления при нормальном падении света на границу двух сред?
8. Почему кажущаяся глубина водоема меньше действительной?
9. Для чего аквалангисты надевают маски на глаза при погружения в воду?

Пример решения задачи

Определите угол падения α луча из воздуха на стеклянную пластинку с показателем преломления $n = 1,5$, если угол между отраженным и преломленным лучами равен $\varphi = 90^\circ$.

Дано:

$$n = 1,5$$

$$n_{\text{в}} = 1,0$$

$$\varphi = 90^\circ$$

α — ?

Решение

Из закона преломления света находим:

$$\sin \alpha = n \sin \gamma.$$

Из геометрического построения (рис. 136) следует, что угол отражения и преломления связаны соотношением:

$$\beta + \gamma = 90^\circ.$$

$$\gamma = 90^\circ - \beta.$$

Подставляем найденный угол γ в закон преломления и с учетом закона отражения ($\beta = \alpha$) определяем искомый угол падения:

$$\sin \alpha = n \sin(90^\circ - \beta) = n \sin(90^\circ - \alpha) = n \cos \alpha.$$

Откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = n, \quad \operatorname{tg} \alpha = 1,5, \quad \alpha = 56^\circ.$$

Ответ: $\alpha = 56^\circ$.

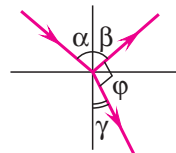


Рис. 136

Упражнение 15

1. Определите глубину реки H , если человеку, смотрящему нормально к ее поверхности, она кажется равной $h = 4,0$ м. Показатель преломления воды относительно воздуха принять $n = \frac{4}{3}$.
2. Найдите относительный показатель преломления n_{21} второй среды относительно первой, если угол отражения луча на границе раздела двух сред $\alpha = 40^\circ$, а угол его преломления — $\gamma = 46^\circ$.
3. Определите угол падения α луча света на поверхность стекла из воздуха, если угол преломления в $k = 2,0$ раза меньше угла падения. Показатель преломления стекла $n = 1,5$.

4. Определите предельный угол полного отражения α_2 на границе вещества со стеклом (показатель преломления стекла $n = 1,42$), если на границе этого вещества с воздухом ($n_{\text{в}} = 1,0$) предельный угол полного отражения $\alpha_1 = 45^\circ$.
5. Определите угол падения α луча света из воздуха на поверхность стекла с показателем преломления $n = 1,6$, если угол преломления этого луча $\gamma = 29^\circ$.
6. Определите угол падения α на плоскую границу раздела двух сред с показателями преломления $n_1 = 1,5$ и $n_2 = 1,7$, если луч отраженный перпендикулярен лучу преломленному.
7. Свет распространяется вдоль оптического волокна с показателем преломления $n_1 = 1,60$. Определите показатель преломления n_2 оболочки, если предельный угол полного отражения равен $\alpha_{\text{пр}} = 85,0^\circ$.



§ 20. Прохождение света через оптические элементы

- Законы отражения и преломления света широко используются для управления ходом световых пучков. Для отражения света в приборах применяются зеркала и призмы, для преломления — призмы, плоскопараллельные пластинки (рис. 137), линзы. Зеркала, призмы, пластинки и линзы являются элементами, комбинируя которые создают различные оптические приборы. Как они работают?

Рассмотрим отдельные элементы оптических приборов.

Плоскопараллельная пластинка

Рассмотрим ход светового луча от источника в плоскопараллельной пластинке толщиной d , находящейся в воздухе (рис. 138, а). Согласно закону преломления на первой и второй границах

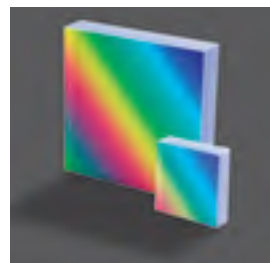


Рис. 137. Плоскопараллельные пластинки

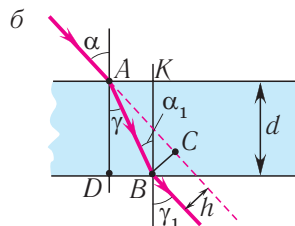


Рис. 138. а — световой луч, проходящий через плоскопараллельную пластинку;
б — ход луча в пластинке