

($\rho_{\perp} = r_{\perp}^2$, $\rho_{\parallel} = r_{\parallel}^2$). Поэтому вблизи предельного угла φ_0 коэффициенты частичного отражения ρ_{\perp} и ρ_{\parallel} должны очень резко меняться с изменением угла падения. Этим объясняется происхождение *резкой границы* между областями частичного и полного отражений, которая бывает видна в рефрактометрах, основанных на полном отражении света.

§ 67. Прохождение света через плоскопараллельную пластинку. Просветление оптики

1. Допустим, что на поверхность отражающего тела нанесена пленка толщины l с показателем преломления n (рис. 246). Показатель преломления первой среды обозначим через n_1 , а второй — через n_2 . Пусть все показатели преломления n_1 , n_2 и n постоянны (т. е. среды однородны), а падающая волна поляризована либо в плоскости падения, либо перпендикулярно к ней. Падающая волна

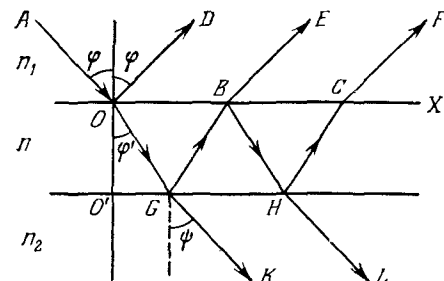


Рис. 246.

Пока-
затель преломления первой среды обозначим через n_1 , а второй —
через n_2 . Пусть все показате-
ли преломления n_1 , n_2 и n
постоянны (т. е. среды одно-
родны), а падающая волна
поляризована либо в плоско-
сти падения, либо перпенди-
кулярно к ней. Падающая волна

$$E^{(e)} = \mathcal{E}e^{i(\omega t - k_1 r)} \quad (67.1)$$

(начало координат в O) пре-
терпевает многократные отра-
жения на границах пленки.

В результате интерференции в первой среде возникает отражен-
ная волна

$$E^{(r)} = R e^{i(\omega t - k_1' r)}. \quad (67.2)$$

Поле внутри пленки будет состоять из двух плоских волн:

$$E = A e^{i(\omega t - k r)}, \quad E' = A' e^{i(\omega t - k' r)}. \quad (67.3)$$

Наконец, во второй среде возникнет преломленная волна

$$E^{(d)} = D e^{i(\omega t - k_2 r)}. \quad (67.4)$$

Ввиду граничных условий, тангенциальные компоненты всех волновых векторов должны быть одинаковы. Этим однозначно определяются направления всех волн (см. § 64). Для определения неизвестных амплитуд R , A , A' , D электромагнитная теория дает четыре независимых граничных условия (два на верхней поверхности пленки и два на нижней), из которых эти неизвестные могут быть найдены.

Однако мы предпочитаем решить задачу более коротким спосо-
бом. На верхней границе сходятся четыре волны (рис. 247), из
которых две входящие, а две другие — уходящие. При написа-

нии соотношений между их комплексными амплитудами можно отвлечься от наличия нижней границы. Тогда формально можно рассуждать так, как если бы многократных отражений не было. Все приходящие волны можно рассматривать как падающие, в результате (однократных) отражений и преломлений которых возникают уходящие волны. Падающая волна с амплитудой \mathcal{E} , отражаясь от верхней границы, дает волну, идущую в направлении вектора k'_1 . Волна с амплитудой A' , преломляясь на той же границе, дает волну, идущую в том же направлении. Результатом интерференции этих волн и является отраженная волна с амплитудой R . Это дает

$$R = r_1 \mathcal{E} + d'_1 A'. \quad (67.5)$$

Аналогично,

$$A = d_1 \mathcal{E} + r'_1 A'. \quad (67.6)$$

Здесь r_1 и d_1 означают коэффициенты Френеля на верхней границе пленки, r_2 и d_2 — такие же коэффициенты на ее нижней границе (предполагается, что свет пересекает эти границы сверху вниз). Коэффициенты Френеля при обратном ходе лучей обозначаются теми же буквами, но штрихованными. С помощью формул Френеля нетрудно проверить, что эти величины удовлетворяют соотношениям

$$r' = -r, \quad r^2 + dd' = 1. \quad (67.7)$$

Такое же рассуждение можно провести и для нижней границы пленки. Надо только перенести начало координат в точку O' , находящуюся на нижней поверхности пленки (рис. 246). Тогда волна (67.1) запишется в виде

$$E^{(e)} = \mathcal{E} e^{-ik_{1z}l} e^{i(\omega t - k_1 r')},$$

откуда видно, что роль комплексной амплитуды будет играть величина $\mathcal{E}' = \mathcal{E} e^{-ik_{1z}l}$. Аналогично преобразуются комплексные амплитуды и остальных волн. В результате получим

$$A' e^{ik_{1z}l} = r_2 A e^{-ik_2 l}, \quad D e^{-ik_{2z}l} = d_2 A e^{-ik_2 l}. \quad (67.8)$$

Из полученных уравнений найдем

$$\begin{aligned} \frac{R}{\mathcal{E}} &= \frac{r_1 + r_2 \exp(-2ik_0 n l \cos \varphi)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2ik_0 n l \cos \varphi')}, \\ \frac{D}{\mathcal{E}} &= \frac{d_1 d_2 \exp[ik_0 l (n_2 \cos \psi - n \cos \varphi)]}{1 + r_1 r_2 \exp(-2ik_0 n l \cos \varphi')}, \end{aligned} \quad (67.9)$$

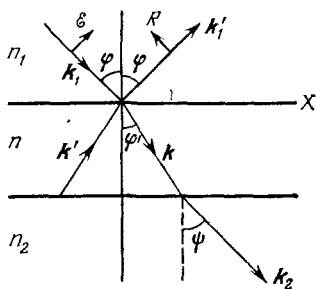


Рис. 247.

где k_0 — волновое число в вакууме, а φ' и ψ — углы преломления на первой и второй границах. Для наглядности при выводе мы ссылались на чертеж, относящийся к однородным волнам. Но, очевидно, результаты (67.9) справедливы и в том случае, когда волны в пленке или во второй среде неоднородны.

2. При нормальном падении первая формула (67.9) переходит в

$$\frac{R}{\mathcal{E}} = \frac{r_1 + r_2 e^{-2ik_0 l}}{1 + r_1 r_2 e^{-2ik_0 l}}. \quad (67.10)$$

Это выражение обращается в нуль, если выполняются два условия:

$$r_1 + r_2 \cos(2nk_0 l) = 0, \quad \sin(2nk_0 l) = 0.$$

Из второго условия получаем: $2nk_0 l = N\pi$, или

$$l = N \frac{\lambda_0}{4n} = N \frac{\lambda}{4}, \quad (67.11)$$

где N — целое число, а λ — длина волны в пленке. Теперь первое условие можно записать в виде: $r_1 + (-1)^N r_2 = 0$. Если N нечетное, то $r_1 = r_2$; если же N четное, то $r_1 = -r_2$. Однако последнее равенство не может быть выполнено. Действительно,

$$r_1 = \frac{n - n_1}{n + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_2 - n}{n_2 + n}.$$

Если бы $r_1 = -r_2$, то мы получили бы $n(n_2 - n_1) = 0$, откуда либо $n = 0$, что невозможно, либо $n_2 = n_1$, что не представляет интереса. Это показывает, что число N должно быть нечетным, а следовательно, $r_1 = r_2$. Отсюда

$$n = \sqrt{n_1 n_2}. \quad (67.12)$$

Таким образом, если $n = \sqrt{n_1 n_2}$, а толщина пленки равна $N\lambda/4$, где N — нечетное число, то отражательная способность обращается в нуль.

На этом результате основан один из методов увеличения поверхностной прозрачности стекол, применяемый в оптической промышленности (так называемое *просветление оптики*). Для стекла ($n = 1,5$) отражательная способность равна $R = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 = 0,04 = 4\%$, т. е. совсем невелика. Однако оптические приборы состоят из многих деталей, изготовленных из стекла. Отражение на границах их соприкосновения является главной причиной ослабления света при его прохождении через оптический прибор. Так, например, потери света в призмном бинокле составляют свыше 50%, причем они почти целиком происходят за счет отражения света. Значительная доля отраженного света, благодаря последующим отражениям, доходит до глаза наблюдателя и, будучи в лучшем случае равномерно рассеянной, дает освещенный фон, ослабляющий контраст света и тени в изображении. Особенно

вреден этот рассеянный свет в фотографических приборах. В лучшем случае он создает общую вуаль на эмульсии. При некоторых же неблагоприятных расположениях источников света могут получиться блики и дополнительные изображения.

Для увеличения поверхностной прозрачности стекла на его поверхности создается пленка с показателем преломления $n = \sqrt{n_1 n_2}$ и толщиной $\lambda/4$. Применение более толстых пленок (соответствующих $N = 3, 5$ и т. д.) нецелесообразно, так как условие полного исчезновения отражения может быть точно выполнено только для одной определенной длины волны и одного определенного угла падения. При $N = 1$ возрастание коэффициента отражения с изменением длины волны, а также с изменением угла падения получается наиболее медленным. Поэтому в этом случае можно добиться почти полного исчезновения отражения для сравнительно большого участка спектра и сравнительно широкого интервала углов падения.

Просветляющие пленки создаются либо путем выщелачивания из поверхности стекла его компонентов, либо, что лучше, путем напыления на поверхность стекла слоя посторонних веществ. При этом возникают трудности, связанные с тем, что показатель преломления пленки должен быть значительно меньше показателя преломления стекла. Например, если $n_2 = 1,52$, $n_1 = 1$, то $n = 1,23$. Твердых веществ с таким малым показателем преломления в природе не встречается. Поэтому пленку приходится делать пористой, причем, во избежание заметного рассеяния света, размеры пор должны быть весьма малы по сравнению с длиной волны. Но пористая пленка не обладает достаточной механической прочностью. Трудности могут быть преодолены путем применения двухслойных покрытий. Сначала просветляемая поверхность покрывается пленкой, показатель преломления которой значительно превосходит показатель преломления стекла, а затем пленкой с меньшим показателем преломления.

3. Условия отсутствия отражения (67.11) и (67.12) могут быть также получены из простых интерференционных соображений. При малых коэффициентах отражения можно пренебречь волнами, претерпевшими многократные отражения на границах пленки. Тогда останутся две отраженные волны, из которых одна отразилась от передней, а другая от задней поверхности пленки. Чтобы эти волны гасили друг друга, должны соблюдаться два условия: 1) фазы их должны быть противоположны; 2) интенсивности их должны быть равны. Первое условие при нормальном падении приводит к соотношению (67.11). Второе условие, если пренебречь ослаблением волны за счет отражения от передней поверхности пленки, сводится к $r_1 = r_2$. Отсюда, как показано выше, получается формула (67.12). Недостаток приведенного доказательства в том, что оно не учитывает многократные отражения.

ЗАДАЧИ

1. Вывести формулы для отражения и преломления электромагнитных волн в предположении, что магнитная проницаемость отлична от единицы.

О т в е т.

$$\begin{aligned} \frac{R_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} &= \frac{\sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon_2/\mu_2} \cos \psi}{\sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_2/\mu_2} \cos \psi}, & \frac{D_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} &= \frac{2\sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \varphi}{\sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_2/\mu_2} \cos \psi}, \\ \frac{R_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} &= \frac{\sqrt{\varepsilon_2/\mu_2} \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \psi}{\sqrt{\varepsilon_2/\mu_2} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \psi}, & \frac{D_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} &= \frac{2\sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2/\mu_2} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_1/\mu_1} \cos \psi}. \end{aligned} \quad (67.13)$$

2. Какой вид принимают формулы (67.13), если $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$?

О т в е т.

$$\begin{aligned} \frac{R_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} &= \frac{n_2 \cos \varphi - n_1 \cos \psi}{n_2 \cos \varphi + n_1 \cos \psi}, & \frac{D_{\perp}}{\mathcal{E}_{\perp}} &= \frac{2n_2 \cos \varphi}{n_2 \cos \varphi + n_1 \cos \psi}, \\ \frac{R_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} &= \frac{n_1 \cos \varphi - n_2 \cos \psi}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \psi}, & \frac{D_{\parallel}}{\mathcal{E}_{\parallel}} &= \frac{2n_2 \cos \varphi}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \psi}. \end{aligned} \quad (67.14)$$

Формулы для отражения в точности совпадают с формулами Френеля, если только поменять местами \perp и \parallel -составляющие. Этот факт был отмечен Гельмгольцем.

3. Показать, что отражательная способность среды для радиоволн обращается в нуль, если $\varepsilon = \mu$.

4. Останется ли справедливым закон Брюстера для радиоволн, если магнитные проницаемости сред μ_1 и μ_2 отличны от единицы?

О т в е т. Если закон Брюстера имеет место, то угол Брюстера, при котором не отражается составляющая E_{\parallel} электрического поля, определяется выражением

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \varepsilon_2 \mu_1 - \varepsilon_1 \mu_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \mu_2 - \varepsilon_1 \mu_1}}. \quad (67.15)$$

Возможен случай, когда не будет отражаться составляющая E_{\perp} . Угол, при котором это имеет место, находится из уравнения

$$\operatorname{tg} \varphi'_B = \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2 \mu_1 - \varepsilon_1 \mu_2}{\mu_1 \varepsilon_1 \mu_1 - \varepsilon_2 \mu_2}}. \quad (67.16)$$

Оба случая взаимно исключают друг друга, так как знаки подкоренных выражений в (67.15) и (67.16) противоположны. (Предполагается, что ε и μ существенно положительны.) Таким образом, всегда существует угол, при котором не отражается либо составляющая E_{\parallel} , либо составляющая E_{\perp} .

5. Проверить, что коэффициенты Френеля удовлетворяют соотношениям (67.7).

6. Пользуясь формулами Френеля, показать, что линейно поляризованный свет остается линейно поляризованным после отражения на границе раздела двух прозрачных изотропных сред во всех случаях, за исключением случаев полного отражения.

7. Угол между плоскостью колебаний поляризованного света и плоскостью падения называется *азимутом колебания*. Найти азимут преломленной волны γ и азимут отраженной волны β , если азимут падающей волны α , а угол падения φ .

$$\text{О т в е т. } \operatorname{tg} \gamma = \cos(\varphi - \psi) \operatorname{tg} \alpha, \quad \operatorname{tg} \beta = -\frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos(\varphi + \psi)} \operatorname{tg} \alpha.$$

8. 1) Найти угол Брюстера для света, отраженного от стекла с показателем преломления $n = 1,5$, 2) Найти для этого угла *степень поляризации* преломлен-

ного света, т. е. величину $\Delta = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}$, где I_{\parallel} и I_{\perp} — интенсивности отраженных волн, поляризованных соответственно в плоскости падения и перпендикулярно к ней. Падающий свет — естественный.

О т в е т. $\varphi_B = 56^{\circ}19'$, $\Delta = \frac{4n^2 - (n^2 + 1)^2}{4n^2 + (n^2 + 1)^2} = -0,08$.

9. Естественный свет падает под углом Брюстера из воздуха на поверхность стекла с показателем преломления $n = 1,5$. Найти интенсивность I_r отраженного света, зная интенсивность падающего света I_e .

О т в е т. $\frac{I_r}{I_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2 = 0,74$.

10. Естественный свет падает под углом Брюстера из воздуха на поверхность диэлектрика с показателем преломления n . Найти амплитуду D_{\parallel} преломленной волны, если амплитуда падающей волны той же поляризации равна \mathcal{E}_{\parallel} .

О т в е т. $D_{\parallel} = \mathcal{E}_{\parallel}/n$.

11. На боковую грань призмы, изготовленной из стекла с показателем преломления $n = 1,5$, падает под углом Брюстера φ_B световой пучок, электрический вектор которого лежит в плоскости падения. Каким должен быть преломляющий угол A призмы, чтобы свет прошел через нее, не испытав потерь на отражение?

О т в е т. $A = \pi - 2\varphi_B = 68^{\circ}$.

12. При каких условиях луч света, падающий на боковую грань прозрачной изотропной призмы с преломляющим углом $A = 60^{\circ}$, проходит через нее без потерь на отражение?

О т в е т. Электрический вектор должен лежать в плоскости падения. Показатель преломления призмы должен быть равен

$$n = 1/\operatorname{tg}(A/2) = \sqrt{3} = 1,73.$$

13. Свет падает из среды 1 на среду 2 под углом φ и преломляется под углом ψ . Доказать, что коэффициент отражения не изменится, если свет будет падать из среды 2 на среду 1 под углом ψ .

14. Пользуясь формулами Френеля, показать, что при отражении плоской электромагнитной волны от идеального зеркала, покрытого сверху слоем прозрачного диэлектрика, амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей. Изменяется лишь фаза волны, как это и должно быть согласно закону сохранения энергии.

Р е ш е н и е. При отражении от идеального зеркала может меняться только фаза, но не амплитуда волны. Поэтому коэффициент Френеля r_2 в формуле (67.10) должен иметь вид $r_2 = e^{i\alpha}$. Вводя еще обозначение $\delta = 2k_0nl$, получим из той же формулы

$$\frac{R}{\mathcal{E}} = \frac{r_1 + e^{i(\alpha - \delta)}}{1 + r_1 e^{i(\alpha - \delta)}}.$$

Отсюда $|R| = |\mathcal{E}|$.

15. Свет, частично отражаясь, проходит через две параллельные полупрозрачные плоскости. Коэффициенты отражения и пропускания первой из них равны ρ_1 и b_1 , а второй ρ_2 и b_2 соответственно. Степень монохроматичности падающего света невелика, так что интерференции не возникает, а имеет место сложение интенсивностей света. Найти коэффициенты отражения ρ и пропускания b для системы обеих плоскостей.

Р е ш е н и е.

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 b_1^2 + \rho_2 b_1^2 \rho_1 \rho_2 + \dots = \rho_1 + \frac{\rho_2 b_1^2}{1 - \rho_1 \rho_2},$$

$$b = b_1 b_2 + b_1 b_2 \rho_1 \rho_2 + b_1 b_2 (\rho_1 \rho_2)^2 + \dots = \frac{b_1 b_2}{1 - \rho_1 \rho_2}.$$

Используя соотношения $\rho_1 + b_1 = 1$, $\rho_2 + b_2 = 1$, полученные результаты можно записать в виде

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_1\rho_2}{1 - \rho_1\rho_2}, \quad b = \frac{(1 - \rho_1)(1 - \rho_2)}{1 - \rho_1\rho_2}. \quad (67.17)$$

При $\rho_1 = \rho_2$ отсюда получаем

$$\rho = \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1}, \quad b = \frac{1 - \rho_1}{1 + \rho_1}. \quad (67.18)$$

16. Свет, частично отражаясь, проходит через систему m параллельных полупрозрачных плоскостей. Коэффициенты отражения и пропускания каждой из них равны ρ и b . Найти коэффициент отражения ρ_m и коэффициент пропускания b_m всей системы m плоскостей. (Относительно падающего света см. предыдущую задачу.)

Решение. Присоединим к системе m плоскостей одну такую же $(m + 1)$ -ю плоскость. Первые m плоскостей можно заменить одной плоскостью с коэффициентом отражения ρ_m . Тогда задача будет сведена к предыдущей, и мы получим для коэффициентов отражения и пропускания $(m + 1)$ плоскостей

$$\rho_{m+1} = \frac{\rho_m + \rho - 2\rho_m\rho}{1 - \rho_m\rho},$$

$$b_{m+1} = \frac{(1 - \rho_m)(1 - \rho)}{1 - \rho_m\rho}.$$

Отсюда методом доказательства от m к $m + 1$ нетрудно получить

$$\rho_m = \frac{m\rho}{1 + (m-1)\rho}, \quad (67.19)$$

$$b_m = \frac{1 - \rho}{1 + (m-1)\rho}.$$

17. Стопа Столетова (1839—1896) состоит из плоскопараллельных стеклянных пластинок с показателем преломления $n = 1,5$. На нее под углом Брюстера падает свет, поляризованный перпендикулярно к плоскости падения. Найти выражения и начертить график для коэффициентов отражения и пропускания стопы в зависимости от числа N пластинок.

Ответ. $\rho_N = \frac{2N}{2N + 5,76}$, $b_N = \frac{5,76}{2N + 5,76}$ (см. рис. 248).

18. Естественный свет падает под углом φ на стопу Столетова, состоящую из N стеклянных пластинок с показателем преломления n . Найти степени поляризации Δ и Δ' прошедшего и отраженного света, а также отношение интенсивностей $I_{\perp} / I_{\parallel}$ главных компонент прошедшего света.

Ответ.

$$\Delta = \frac{N(\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})}{(2N - 1)\rho_{\perp}\rho_{\parallel} - (N - 1)(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) - 1},$$

$$\Delta' = \frac{\rho_{\perp} - \rho_{\parallel}}{2(N - 1)\rho_{\perp}\rho_{\parallel} + (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})}, \quad \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}} = \frac{1 - \rho_{\perp}}{1 - \rho_{\parallel}} \cdot \frac{(2N - 1)\rho_{\parallel} + 1}{(2N - 1)\rho_{\perp} + 1},$$

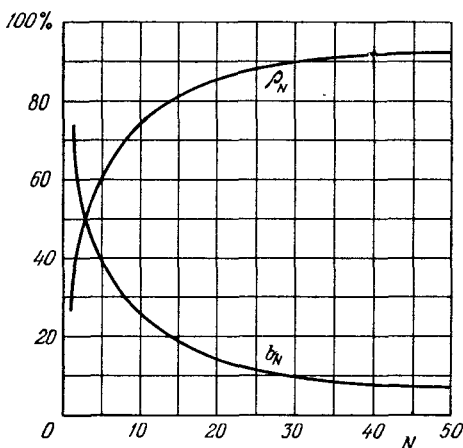


Рис. 248.

где ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} — коэффициенты отражения волн, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярно к ней, для одной отражающей поверхности:

$$\rho_{\perp} = \left(\frac{\cos \varphi - n \cos \psi}{\cos \varphi + n \cos \psi} \right)^2, \quad \rho_{\parallel} = \left(\frac{n \cos \varphi - \cos \psi}{n \cos \varphi + \cos \psi} \right)^2.$$

19. Падающий свет поляризован линейно с азимутом колебаний, равным $+45^\circ$ ¹⁾. Можно ли путем однократного отражения превратить его в свет, поляризованный по правому кругу?

О т в е т. Нельзя.

20. Какой должен быть минимальный показатель преломления параллелепипеда Френеля, чтобы при азимуте колебаний падающего света в $+45^\circ$ выходящий свет был поляризован по правому кругу?

О т в е т. $n = \frac{1 + \sin(3\pi/8)}{\cos(3\pi/8)} = 5,028$. В оптическом диапазоне спектра этот случай осуществить нельзя. Его можно было бы осуществить с более длинными электромагнитными волнами.

21. Линейно поляризованная электромагнитная волна с азимутом колебаний, равным $+135^\circ$, отражается на границе вода — воздух. Диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon = 81$. Под каким углом должна падать эта волна, чтобы отраженная волна получилась поляризованной по кругу? Какая при этом будет поляризация: правая или левая?

О т в е т. $6^\circ 29'$ или $44^\circ 38'$. Правая.

22. Линейно поляризованный луч с азимутом колебаний $+135^\circ$ падает перпендикулярно на грань AB стеклянной призмы $ABCD$ (рис. 249) и, испытав три раза полное отражение, выходит из нее. Каков должен быть преломляющий угол A призмы, чтобы вышедший свет был поляризован по кругу, если показатель преломления стекла призмы равен 1,52? Какая получится поляризация вышедшего света: правая или левая?

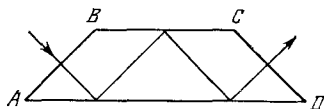


Рис. 249.

О т в е т. $69^\circ 21'$ или $42^\circ 46'$. Правая.

23. Каким должен быть минимальный показатель преломления призмы, описанной в предыдущей задаче, чтобы при азимуте колебаний падающего света, равном $+45^\circ$, выходящий свет был поляризован по правому кругу? Какой при этом должен быть угол A ?

О т в е т. $n = 1/(\sqrt{2} - 1) = 2,4143$; $A = 35^\circ 34'$.

24. С помощью векторной диаграммы показать, что скачок фазы при полном отражении превосходит вдвое скачок фазы, испытываемый преломленной (поверхностной) волной.

§ 68. Распространение света в среде с точки зрения молекулярной оптики

1. С точки зрения атомистических представлений всякую среду следует рассматривать как вакуум, в который вкраплены атомы вещества. (Молекулы можно рассматривать тоже как атомы.) Под действием падающей волны, а также излучений соседних атомов внутри каждого атома возбуждаются колебания электронов и атомных ядер. Вследствие этого атомы становятся источниками

¹⁾ Азимут колебаний падающей волны может изменяться от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. Он считается положительным, если $\mathcal{E}_{\parallel}/\mathcal{E}_{\perp} > 0$, и считается отрицательным, если $\mathcal{E}_{\parallel}/\mathcal{E}_{\perp} < 0$.