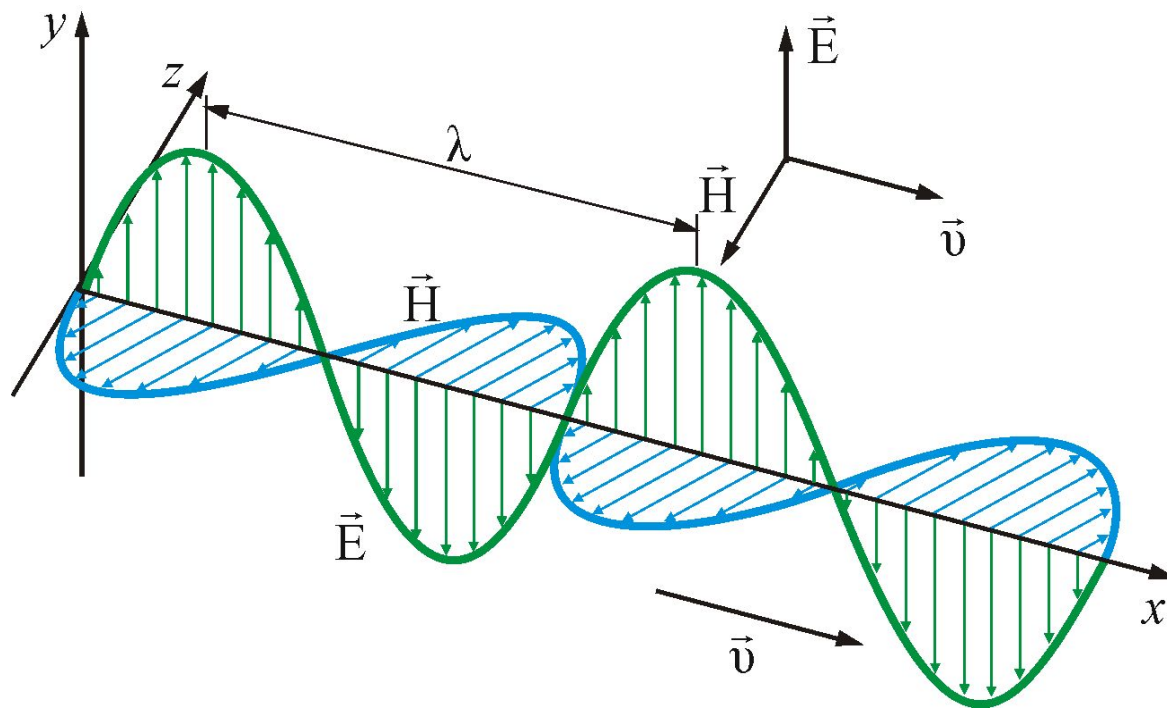


Поляризация света

Свет- это электромагнитные волны. Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор $\vec{E}$ поэтому его называют **световым вектором**. Если при распространении электромагнитной волны световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют **линейно-поляризованной** или **плоско-поляризованной** (термин **поляризация волн** был введен Малюсом применительно к поперечным механическим волнам).

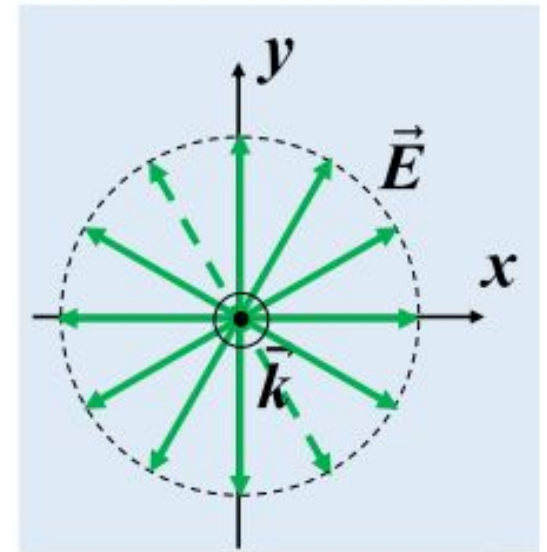
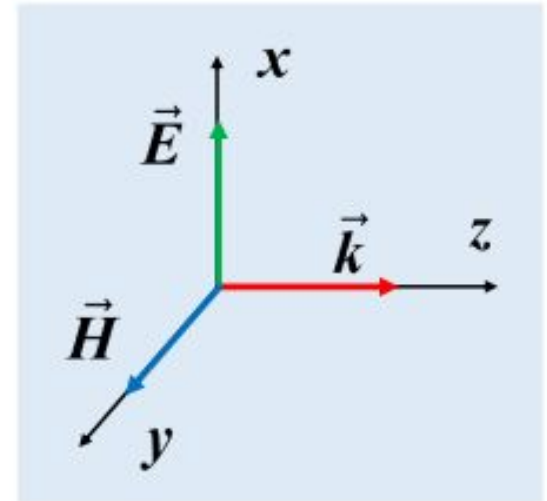


Поляризованный и естественный свет

- 1) Электромагнитные волны поперечны

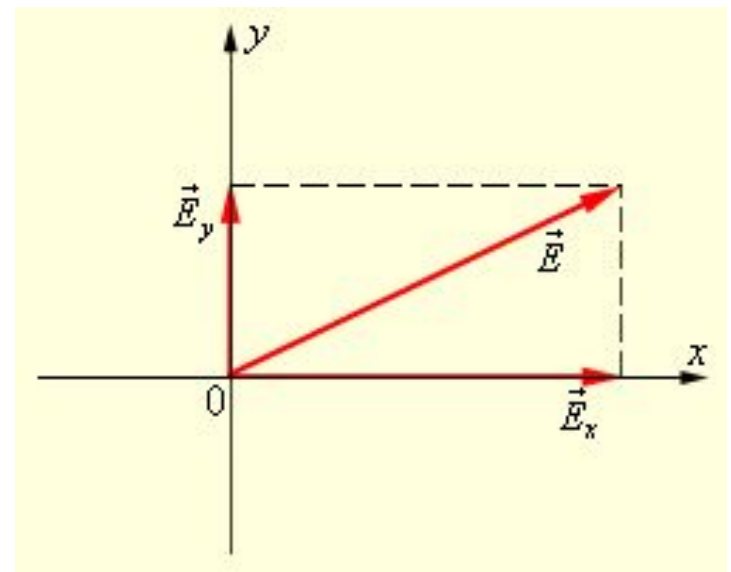
$$\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{k}$$

- 2) У **естественного (неполяризованного)** света все направления векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ равновероятны



Свет, испускаемый обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. п.), **неполяризован**. Свет таких источников состоит в каждый момент из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора в излучаемых этими атомами волнах. Поэтому в результирующей волне вектор беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными. **Неполяризованный свет** называют также *естественным светом*.

В каждый момент времени вектор E может быть спроектирован на две взаимно перпендикулярные оси



Поляризация, свойство света, связанное с поперечностью электромагнитных волн и описывающее пространственное поведение векторов электрического и магнитного полей

Рассмотрим E

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \end{cases}$$

Исключив $\omega t - kz$

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta$$

$\delta = \delta_y - \delta_x$ — разность фаз проекций электрического вектора

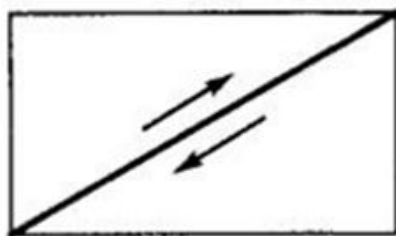
Степень вытянутости эллипса зависит от соотношения амплитуд проекций и разности фаз.

при $\delta = m\pi$ $\left(\frac{E_x}{E_{0x}} \pm \frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 = 0.$

Это линия. Колебания E происходят в фиксированной плоскости (плоскости поляризации). Такая поляризация - линейная

$$\delta = \frac{(2m+1)\pi}{2} \quad E_{0x} = E_{0y} = E_0 \quad E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad \text{окружность}$$

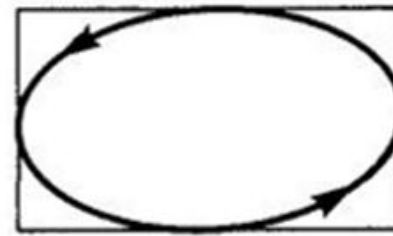
Поляризация круговая. Может быть правой или левой – в зависимости от направления вращения



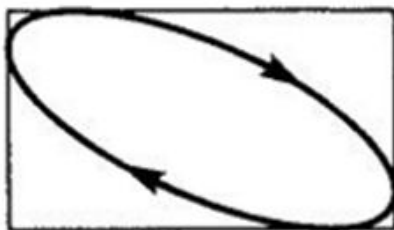
$$\delta = 0$$



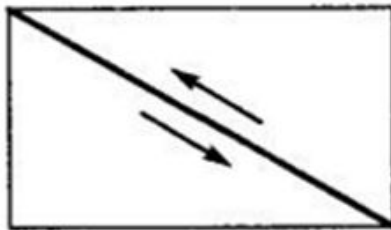
$$0 < \delta < \pi/2$$



$$\delta = \pi/2$$



$$\pi/2 < \delta < \pi$$



$$\delta = \pi$$



$$\pi < \delta < 3/2\pi$$

3) Эллиптическая поляризация

$$E_x = E_{x,0} \cdot \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$E_y = E_{y,0} \cdot \cos(\omega t + \varphi_2)$$

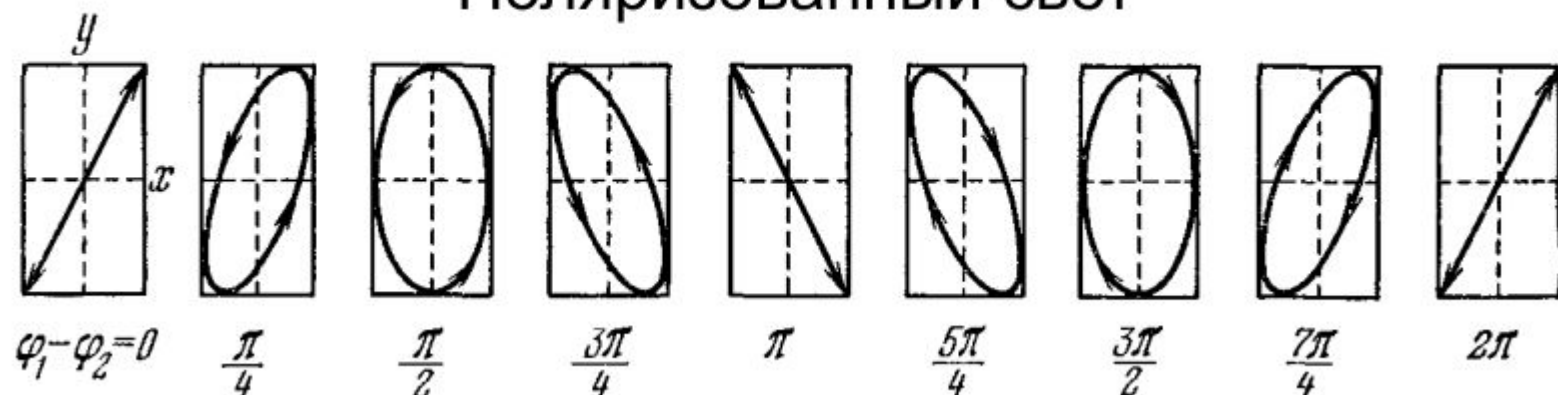
$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0, \pm\pi$ - линейная поляризация

$$\Delta\varphi = \pm\pi / 2$$

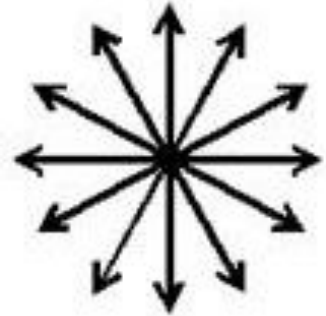
- круговая поляризация

$$E_{x,0} = E_{y,0}$$

Поляризованный свет



Виды поляризации света



В поперечной волне колебания могут происходить в любых направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Если направления колебаний при этом беспорядочно меняются, но амплитуды их во всех направлениях одинаковы, то такая волна называется *естественной*.



Если колебания происходят только в одном постоянном направлении, то такая волна называется **плоско поляризованной**.

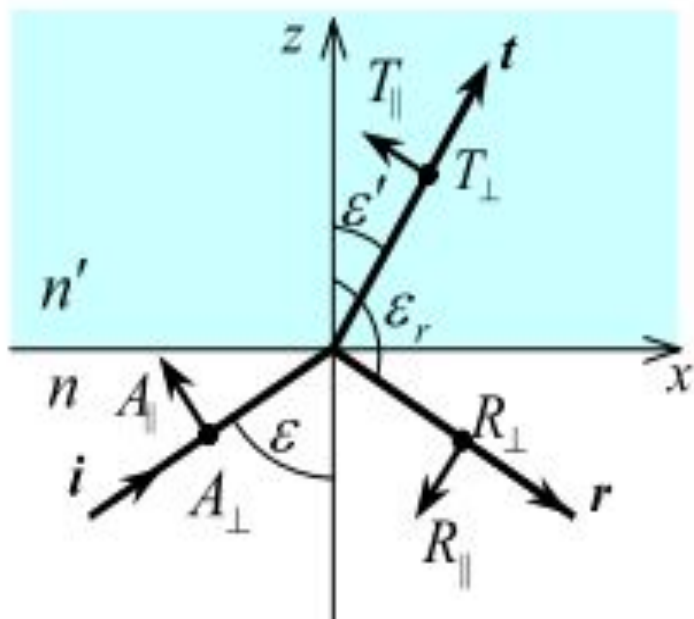


Если колебания происходят в различных направлениях, но в определенных направлениях амплитуды колебаний больше, чем в других, волна называется *частично поляризованной*.

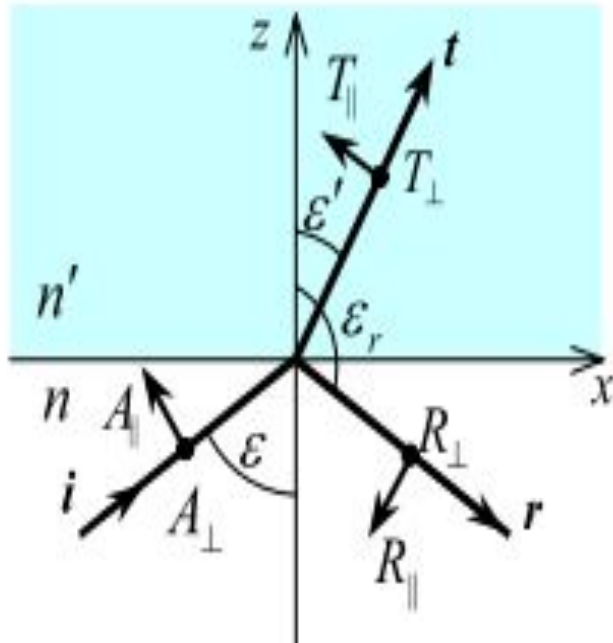
Искусственную поляризацию можно осуществить, пропуская волну через *поляризатор*.

Формулы Френеля показывают, какое количество света преломляется, а какое отражается в зависимости от угла падения и показателей преломления сред.

Рассмотрим границу раздела двух сред с показателями преломления n и n' . Разложим электрический вектор падающей плоской волны $\mathbf{E}^{(i)}$ на две составляющих: одна лежит в плоскости падения ($\parallel$), другая перпендикулярна плоскости падения (и плоскости рисунка) ($\perp$)



Компоненты падающей плоской волны



Компоненты преломленной волны

$$E_x^{(t)} = -T_{||} \cos \varepsilon'$$

$$H_x^{(t)} = -T_{\perp} n' \cos \varepsilon'$$

$$E_y^{(t)} = T_{\perp}$$

$$H_y^{(t)} = -T_{||} \cdot n'$$

$$E_z^{(t)} = T_{||} \sin \varepsilon'$$

$$H_z^{(t)} = T_{\perp} n' \sin \varepsilon'$$

Компоненты отраженной волны

$$E_x^{(r)} = -R_{||} \cos \varepsilon_r$$

$$H_x^{(r)} = -R_{\perp} n \cos \varepsilon_r$$

$$E_y^{(r)} = R_{\perp}$$

$$H_y^{(r)} = -R_{||} \cdot n$$

$$E_z^{(r)} = R_{||} \sin \varepsilon_r$$

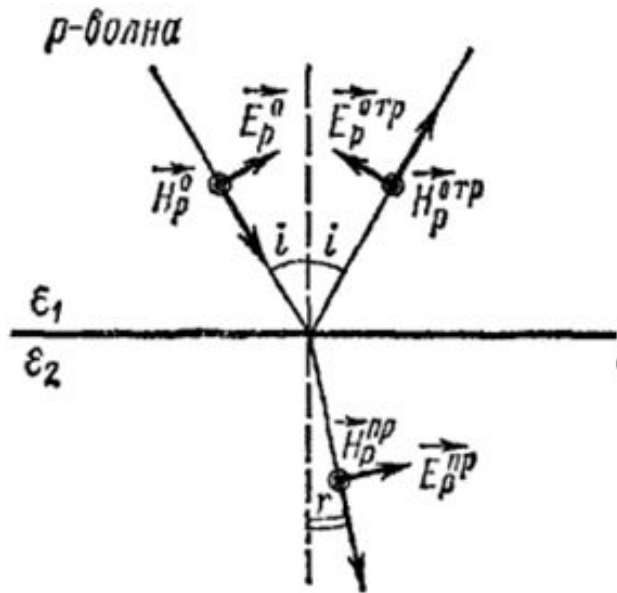
$$H_z^{(r)} = R_{\perp} n \sin \varepsilon_r$$

$$E_{1\tau} = E_{2\tau};$$

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$$

$$\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$$



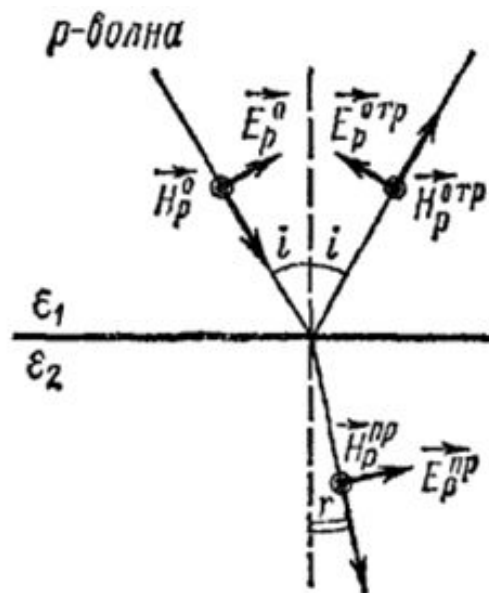
Плоская волна, в которой вектор **E** колеблется в плоскости падения (**p**-волна) .

Если числовые значения $E_p^{пр}$ и E_p^o совпадают по знаку, то колебания совершаются в одной фазе.

E_p^o и $E_p^{отр}$ колеблются в одной фазе, если числовые значения противоположны по знакам. Если одинаковые знаки, то колебания сдвинуты на π .

На границе раздела не должно быть разрывов. **E** и **H** должны быть непрерывны

$$\begin{aligned} E_{1\tau} &= E_{2\tau}; & H_{1\tau} &= H_{2\tau} \\ \epsilon_1 E_{1n} &= \epsilon_2 E_{2n} & \mu_1 H_{1n} &= \mu_2 H_{2n} \end{aligned}$$



В первой среде распространяются две волны (падающая и отраженная), во второй одна – преломленная.

Результирующие напряженности на границе раздела

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_p^0 + \mathbf{E}_p^{0\text{ТР}} \quad \text{и} \quad \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_p^{\text{нр}}$$

Проекции на касательную и нормаль равны

$$\begin{aligned} E_{1\tau} &= E_p^0 \cos i - E_p^{0\text{ТР}} \cos i, & E_{2\tau} &= E_p^{\text{нр}} \cos r; \\ E_{1n} &= -E_p^0 \sin i - E_p^{0\text{ТР}} \sin i, & E_{2n} &= -E_p^{\text{нр}} \sin r \end{aligned}$$

Подставим в нач. условия $E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad \epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}$

$$(E_p^0 - E_p^{0\text{ТР}}) \cos i = E_p^{\text{нр}} \cos r,$$

$$\epsilon_1 (E_p^0 + E_p^{0\text{ТР}}) \sin i = \epsilon_2 E_p^{\text{нр}} \sin r$$

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{n_2^2}{n_1^2} = n_{21}^2 = \left(\frac{\sin i}{\sin r} \right)^2$$

$$\begin{aligned} E_p^{\text{отр}} \cos i + E_p^{\text{пр}} \cos r &= E_p^0 \cos i, \\ -E_p^{\text{отр}} \sin r + E_p^{\text{пр}} \sin i &= E_p^0 \sin r. \end{aligned}$$

Из этой системы находим

$$\begin{aligned} E_p^{\text{отр}} &= E_p^0 \frac{\sin i \cos i - \sin r \cos r}{\sin i \cos i + \sin r \cos r} = E_p^0 \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)}, \\ E_p^{\text{пр}} &= E_p^0 \frac{2 \sin r \cos i}{\sin i \cos i + \sin r \cos r} = E_p^0 \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(i+r) \cos(i-r)} \end{aligned}$$

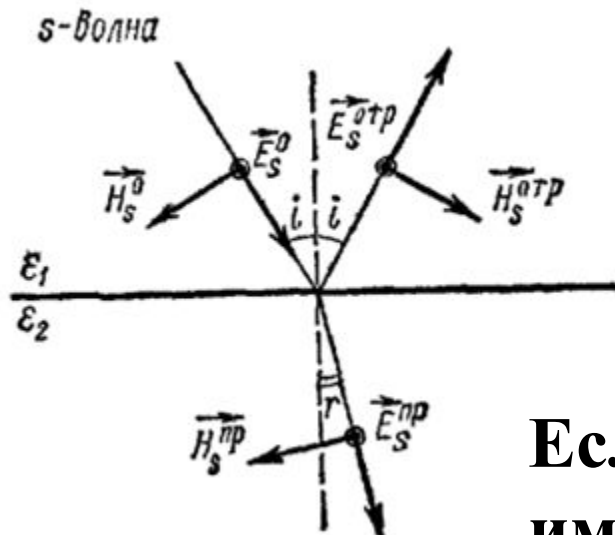
Формулы Френеля для p -волны

При $i \rightarrow 0$ (нормальное падение)

$$\begin{aligned} E_p^0(0) - E_p^{\text{отр}}(0) &= E_p^{\text{пр}}(0), \\ E_p^0(0) + E_p^{\text{отр}}(0) &= n_{21} E_p^{\text{пр}}(0) \end{aligned}$$

$$\text{при } i=r=0 \quad E_p^{\text{отр}}(0) = \frac{n_{21}-1}{n_{21}+1} E_p^0 \quad E_p^{\text{пр}}(0) = \frac{2}{n_{21}+1} E_p^0$$

S - ВОЛНА



Плоская волна, в которой вектор $\mathbf{E}$ колеблется в перпендикулярно плоскости падения (s -волна) .

Если численные значения E_s^0 , $E_s^пр$ и $E_s^отр$ имеют один знак, то они колеблются в фазе

$$E_1 = E_s^0 + E_s^отр \quad \text{и} \quad E_2 = E_s^пр$$

$$H_1 = H_s^0 + H_s^отр \quad \text{и} \quad H_2 = H_s^пр$$

Так как

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} H_0$$

$$H_s^0 = \sqrt{\frac{\epsilon_1\epsilon_0}{\mu_0}} E_s^0$$

$$H_s^отр = \sqrt{\frac{\epsilon_1\epsilon_0}{\mu_0}} E_s^отр$$

$$H_s^пр = \sqrt{\frac{\epsilon_2\epsilon_0}{\mu_0}} E_s^пр$$

Проекции на оси

$$H_{1\tau} = -H_s^0 \cos i + H_s^{\text{отр}} \cos i = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_0 / \mu_0} (-E_s^0 + E_s^{\text{отр}}) \cos i$$

$$H_{2\tau} = -H_s^{\text{нр}} \cos r = -\sqrt{\varepsilon_2 \varepsilon_0 / \mu_0} E_s^{\text{нр}} \cos r$$

$$H_{1n} = H_s^0 \sin i + H_s^{\text{отр}} \sin i = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_0 / \mu_0} (E_s^0 + E_s^{\text{отр}}) \sin i$$

$$H_{2n} = H_s^{\text{нр}} \sin r = \sqrt{\varepsilon_2 \varepsilon_0 / \mu_0} E_s^{\text{нр}} \sin r$$

Подставляем в начальные условия:

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad \varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$$

$$\mu_1 = \mu_2,$$

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad \mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$$

$$\sqrt{\varepsilon_1} (-E_s^0 + E_s^{\text{отр}}) \cos i = -\sqrt{\varepsilon_2} E_s^{\text{нр}} \cos r$$

$$\sqrt{\varepsilon_1} (E_s^0 + E_s^{\text{отр}}) \sin i = \sqrt{\varepsilon_2} E_s^{\text{нр}} \sin r,$$

Пусть

$$i \neq 0$$

$$\frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} = n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

$$(-E_s^0 + E_s^{\text{отр}}) \sin r \cos i = -E_s^{\text{пр}} \sin i \cos r$$

$$E_s^0 + E_s^{\text{отр}} = E_s^{\text{пр}}$$

$$E_s^{\text{отр}} = E_s^0 \frac{\sin r \cos i - \sin i \cos r}{\sin i \cos r + \sin r \cos i} = -E_s^0 \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)}$$

$$E_s^{\text{пр}} = E_s^0 \frac{2 \sin r \cos i}{\sin i \cos r + \sin r \cos i} = E_s^0 \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(i+r)}$$

**Формулы
Френеля для
s-волны**

При $i=0$

$$-E_s^0(0) + E_s^{\text{отр}}(0) = -n_{21} E_s^{\text{пр}}(0)$$

$$E_s^0(0) + E_s^{\text{отр}}(0) = E_s^{\text{пр}}(0)$$

При $i=r=0$

$$E_s^{\text{отр}}(0) = -\frac{n_{21}-1}{n_{21}+1} E_s^0(0)$$

$$E_s^{\text{пр}}(0) = \frac{2}{n_{21}+1} E_s^0(0)$$

Анализ формул Френеля по фазам

Углы i и r всегда заключены в пределах от 0 до $\pi/2$. Поэтому при любых значениях i и r , $E_p^{\text{пр}}$ и $E_s^{\text{пр}}$ совпадают по знаку соответственно с E_p^0 и E_s^0 , на границе раздела сред фаза преломленной волны всегда совпадает с фазой падающей волны.

Для отраженной p -волны $E_p^{\text{отр}}$ совпадает по знаку с E_p^0 , если $\text{tg}(i+r)$ и $\text{tg}(i-r)$ одновременно положительны или отрицательны. Это возможно в двух случаях:

- а) при $i > r$ ($n_{21} > 1$) и $i + r < \pi/2$;
- б) при $i < r$ ($n_{21} < 1$) и $i + r > \pi/2$.

Такое отражение p -волны сопровождается сдвигом по фазе на π .

Отражение p -волны происходит без сдвига фаз в следующих двух случаях:

- в) при $i > r$ ($n_{21} > 1$) и $i + r > \pi/2$;
- г) при $i < r$ ($n_{21} < 1$) и $i + r < \pi/2$.

Для отраженной s -волны $E_s^{\text{отр}}$ и E_s^0 совпадают по знаку и отражение происходит без сдвига фаз, если $i < r$. При $i > r$ отражение s -волны сопровождается сдвигом по фазе на π .

Энергетические коэффициенты отражения

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E}, \vec{H}], \quad I_z = \overline{S_z} = \frac{c}{4\pi} n E_0^2 \cdot \cos \theta$$

$$R = \frac{I_{omp,z}}{I_{nad,z}}, \quad T = \frac{I_{np,z}}{I_{nad,z}}$$

$$I_{nad,z} = I_{omp,z} + I_{np,z}, \quad R + T = 1$$

$$R = r^2, \quad T = \frac{n_2 \cos \gamma}{n_1 \cos \alpha} t^2$$

Степень поляризации

$$P = \frac{I_{\text{пол}}}{I_{\text{пол}} + I_{\text{ест}}}$$

P=1 полностью поляризованный свет

P=0 естественный свет

Полное внутреннее отражение

$$\sin i_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}$$

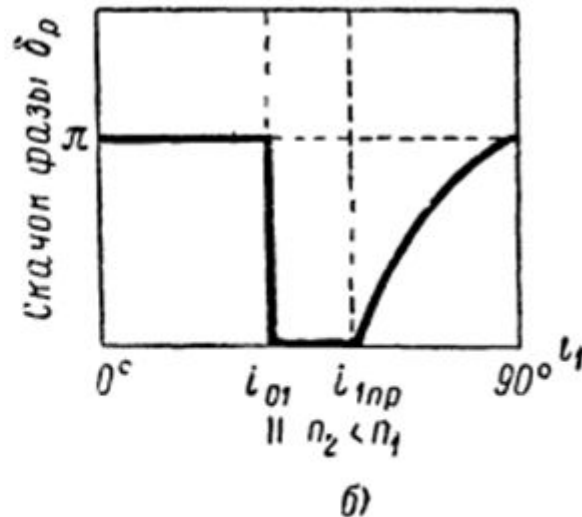
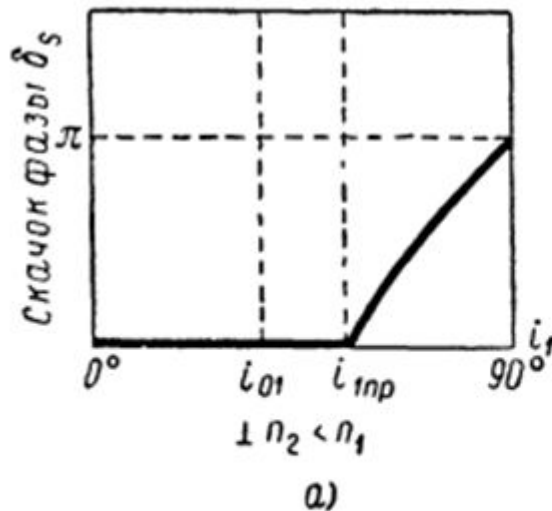
$$W = uS \sim A^2 v S$$

При полном внутреннем отражении имеет место скачок фазы в отраженном луче относительно фазы в падающем луче. Если электрический вектор $\mathbf{E}$ колеблется в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, то этот скачок фазы δ_s определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_s}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 i_1 - n_{21}^2}}{\cos i_1};$$

если электрический вектор колеблется в плоскости падения, то скачок фазы δ_p определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_p}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 i_1 - n_{21}^2}}{n_{21} \cos i_1}.$$



Скачки фаз при отражении от вещества, оптически менее плотного: а) для колебаний, перпендикулярных плоскости падения; б) для колебаний, параллельных плоскости падения.

Разность фаз $\delta_p - \delta_s$ между колебаниями, параллельными и перпендикулярными плоскости поляризации, по (9) и (10) определяется

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_p - \delta_s}{2} = \frac{\cos i_2 \sqrt{\sin^2 i_1 - n_{21}^2}}{\cos^2 i_1}. \quad (11) \quad \text{при } i_1 = i_{1 \text{ пр}} (\sin i_{1 \text{ пр}} = n_{21}):$$

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_p - \delta_s}{2} = 0,$$

т. е., если луч отражается точно при предельном угле, то не возникает никакой разности фаз между колебаниями, параллельными и перпендикулярными плоскости падения E'_{1p} и E'_{1s} ; плоско поляризованный свет остается плоско поляризованным. Вообще же говоря, между компонентами электрического вектора E'_{1p} и E'_{1s} в луче, возникшем при полном внутреннем отражении, существует некоторая разность фаз.

Закон Брюстера

	$n_{21} > 1$		$n_{21} < 1$	
	$i < i_0$	$i > i_0$	$i < i_0$	$i > i_0$
p -Волна	π	0	0	π
s -Волна	π	π	0	0