

Лекция 08. Естественный и поляризованный свет. Закон Брюстера. Поляризатор, анализатор. Закон Малюса. Дисперсия света. Волоконная оптика.

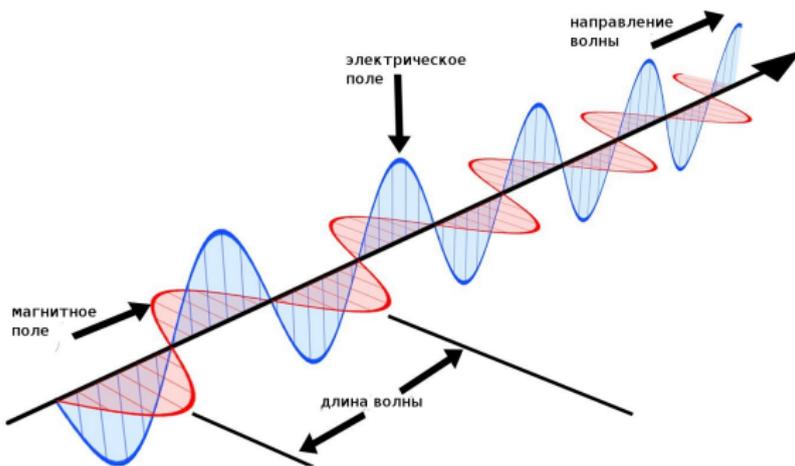
Штыгашев А.А.

Новосибирск, НГТУ

Поляризация света есть физическая характеристика оптического излучения, описывающая поперечную анизотропию световых волн, т.е. **неэквивалентность** различных направлений в плоскости перпендикулярной световому лучу.

Для электромагнитной волны векторы \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{k} образуют правую тройку векторов и для плоской волны

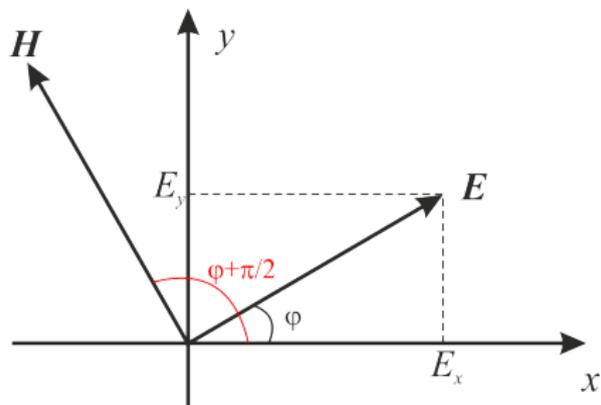
$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_m \cos(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r} + \alpha) \\ \mathbf{H} &= \mathbf{H}_m \cos(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r} + \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$



Направим ось z вдоль направления распространения волны, тогда вектора \mathbf{E} , \mathbf{H} лежат в плоскости параллельной плоскости $z = 0$.

Если в процессе распространения волны вектор \mathbf{E} лежит в плоскости (\mathbf{E}, \mathbf{k}) , то такая волна называется **плоскополяризованной** (линейно-поляризованной).

Плоскость (\mathbf{E}, \mathbf{k}) называют **плоскостью колебаний** или **плоскостью поляризации**



Рассмотрим проекцию вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля на плоскость $z = 0$

$$E_x = E_m \cos \varphi \cos(\omega t - kz + \alpha)$$

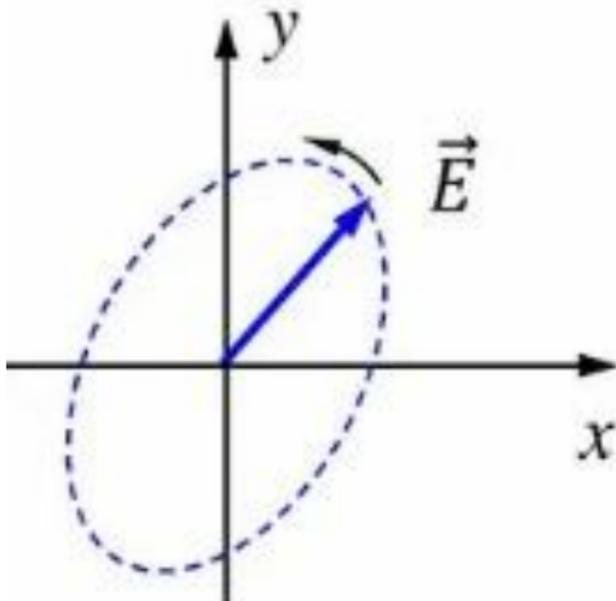
$$E_y = E_m \sin \varphi \cos(\omega t - kz + \alpha)$$

аналогично для напряженности магнитного поля \mathbf{H}

$$H_x = -H_m \sin \varphi \cos(\omega t - kz + \alpha)$$

$$H_y = H_m \cos \varphi \cos(\omega t - kz + \alpha)$$

Сложение двух распространяющихся в одном направлении линейнополяризованных ЭМВ во взаимно-перпендикулярных плоскостях дают волну поляризованную эллиптически, т.е. проекция конца вектора \vec{E} на плоскость перпендикулярную направлению распространения ЭМВ описывает эллипс.



Пусть \mathbf{E} первой волны направлен вдоль оси x , а \mathbf{E} второй ЭМВ вдоль оси y , и пусть электромагнитные волны, распространяются вдоль оси z :

$$\begin{aligned} E_x &= E_{mx} \cos(\omega t - kz) \\ E_y &= E_{my} \cos(\omega t - kz + \delta) \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} E_{mx} &= E_m \cos \varphi \\ E_{my} &= E_m \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим траекторию, которую описывает конец проекции вектора \mathbf{E} на плоскость $z = 0$

$$\begin{aligned}\frac{E_x}{E_{mx}} &= \cos(\omega t - kz), \\ \frac{E_y}{E_{my}} &= \cos(\omega t - kz + \delta)\end{aligned}\tag{4}$$

$$\frac{E_y}{E_{my}} = \cos(\omega t - kz) \cos \delta - \sin(\omega t - kz) \sin \delta \quad (5)$$

$$\frac{E_y}{E_{my}} = \frac{E_x}{E_{mx}} \cos \delta - \sin(\omega t - kz) \sin \delta \quad (6)$$

$$\frac{E_x}{E_{mx}} = \cos(\omega t - kz),$$

$$\frac{E_y}{E_{my}} = \frac{E_x}{E_{mx}} \cos \delta - \sin(\omega t - kz) \sin \delta$$

Плюс

$$\sin^2(\omega t - kz) + \cos^2(\omega t - kz) = 1$$

Уравнение эллипса

$$\left(\frac{E_y}{E_{my}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{mx}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_y}{E_{my}}\right)\left(\frac{E_x}{E_{mx}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta \quad (7)$$

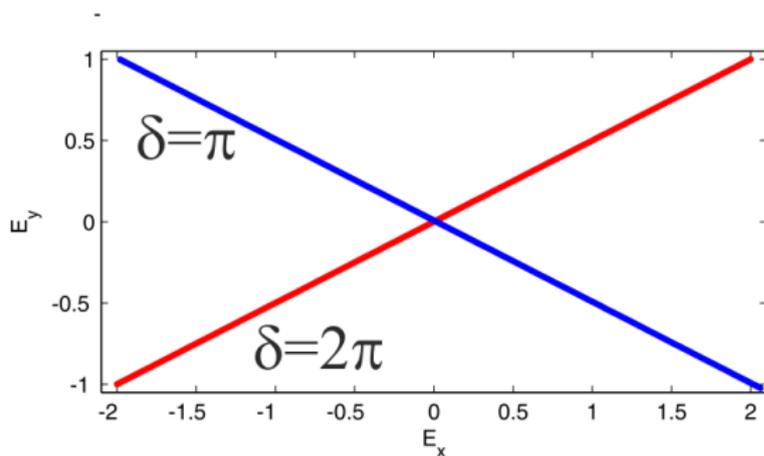
Рассмотрим частные случаи:

- 1. $\delta = m\pi$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$
- 2. $\delta = (m + 1/2)\pi$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

1. $\delta = m\pi$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Из уравнения эллипса следует

$$\left(\frac{E_y}{E_{my}}\right) - (-1)^m \left(\frac{E_x}{E_{mx}}\right) = 0, \quad E_y = (-1)^m \frac{E_{my}}{E_{mx}} E_x \quad (8)$$



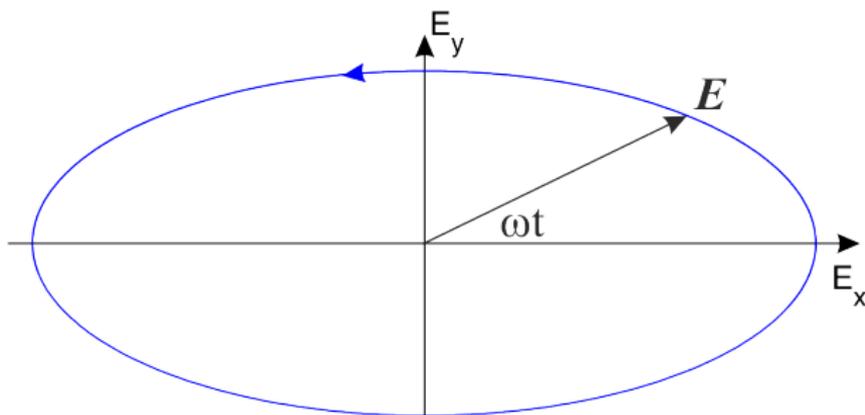
$$E_{mx} = 2, \quad E_{my} = 1$$

Проекция вектора \mathbf{E} описывает на плоскости $z = 0$ траекторию - отрезок, с углом наклона $\theta_m = \pm \arctan(E_{my}/E_{mx})$ к оси абсцисс (ось x), где знак «плюс» для четных m , знак «минус» - для нечетных m . Такой свет называют **плоскополяризованным** или **линейно поляризованным** светом.

2. $\delta = (m + 1/2)\pi$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$\frac{E_x}{E_{mx}} = \cos(\omega t - kz), \quad \frac{E_y}{E_{my}} = \pm \sin(\omega t - kz) \quad (9)$$

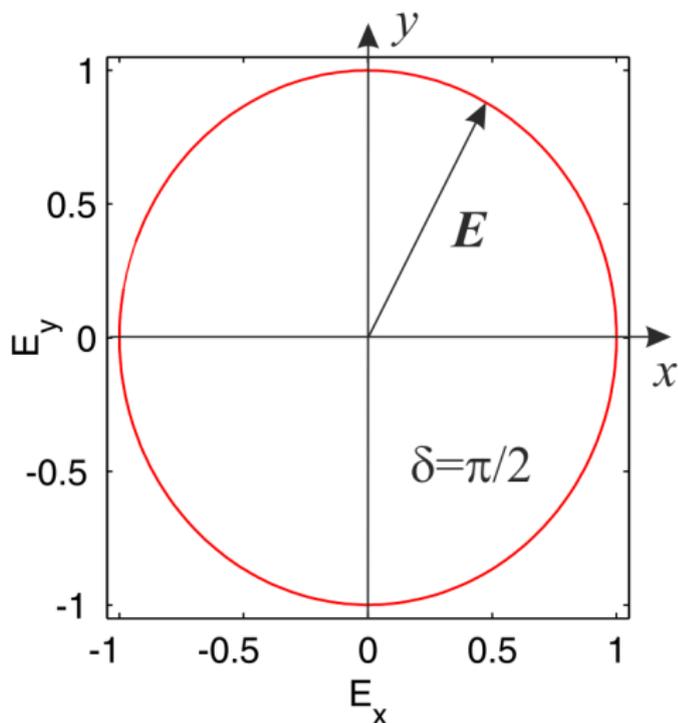
$$\left(\frac{E_y}{E_{my}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{mx}}\right)^2 = 1 \quad (10)$$



Знак «плюс» выписан для четных m . При фиксированном z , по мере увеличения времени t , конец вектора \mathbf{E} описывает **эллипс против** часовой стрелки.

- Если смотреть навстречу световому лучу и при этом вектор \mathbf{E} вращается против часовой стрелки, то **эллиптическая** поляризация света **левая**.
- Если же вектор \mathbf{E} вращается по часовой стрелке, то **эллиптическая** поляризация света **правая**.

Если амплитуды $E_{mx} = E_{my}$ и $\delta = (m + 1/2)\pi$, то свет обладает **круговой** поляризацией.



Эллиптически поляризованный свет при отражении от жука *Cetonia-aurata*



Естественный свет – это свет в котором ни одно направление вектора \mathbf{E} не выделено и имеются колебания всех направлений с одинаковой амплитудой (δ случайная равномерно распределенная величина).

Для получения плоскополяризованного света используют приборы – поляризаторы (поляроиды), которые пропускают колебания вектора \mathbf{E} , параллельные некоторой плоскости, называемой **плоскостью поляризатора** (**плоскость пропускания поляризатора**), и гасят колебания, перпендикулярных к этой плоскости.



Левый рисунок - поляроид (поляризационная пленка).
Правый рисунок - часть установки - поляризатора - призма
Николя

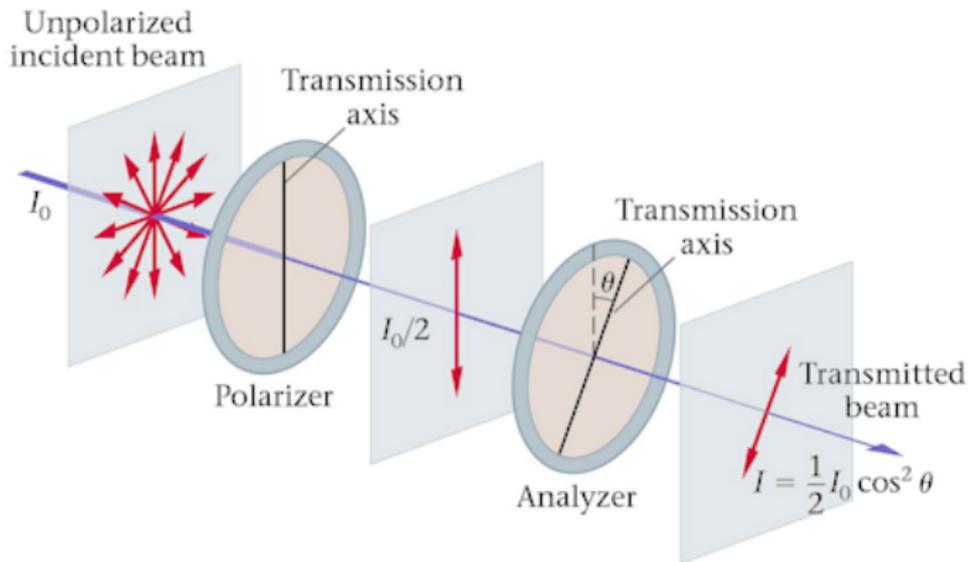
Разложим амплитуду \mathbf{E}_m на $\mathbf{E}_{m\parallel}$ и $\mathbf{E}_{m\perp}$ по отношению к плоскости поляризатора:

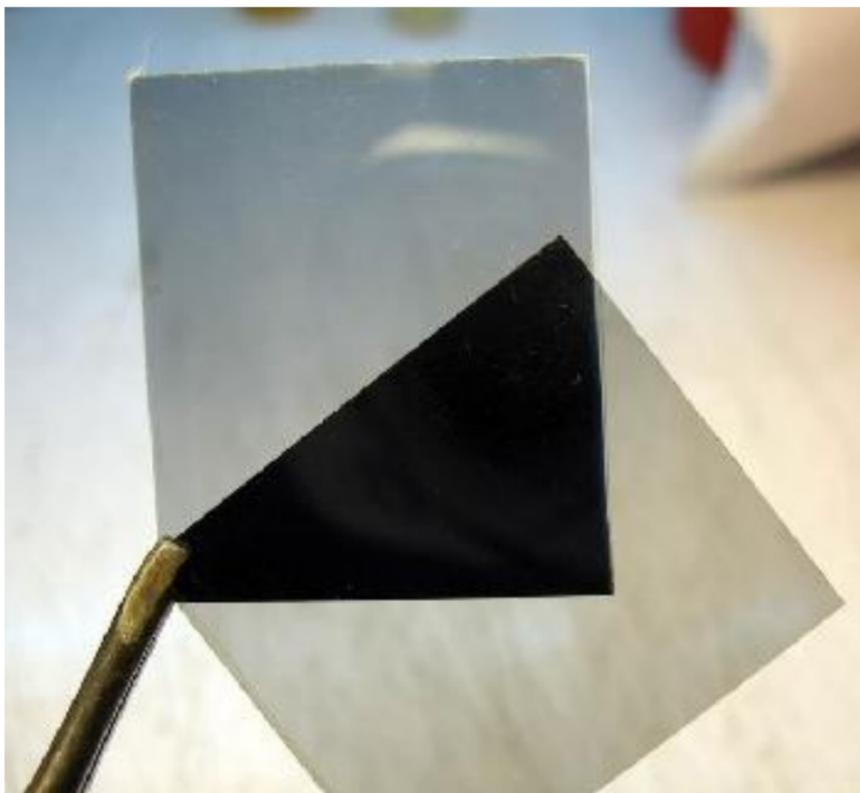
$$\mathbf{E}_{m\parallel} = \mathbf{E}_m \cos \alpha, \quad \mathbf{E}_{m\perp} = \mathbf{E}_m \sin \alpha \quad (11)$$

Составляющая $\mathbf{E}_{m\perp}$ на выходе поляризатора равна нулю, следовательно проходит через поляризатор компонента $\mathbf{E}_{m\parallel}$, тогда **интенсивность** света равна

$$I = \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\mathbf{E}_{m\parallel}|^2, \quad I = \left(\frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\mathbf{E}_m|^2 \right) \cos^2 \alpha \quad (12)$$

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (13)$$





В естественном свете все значения α равновероятны, поэтому поляризатор пропускает часть света, равную среднему значению $\langle \cos^2 \alpha \rangle$

$$I = I_0 \langle \cos^2 \alpha \rangle = I_0 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{2} I_0 \quad (14)$$



Смесь естественного и поляризованного света называют **частично поляризованным** светом.

В частично поляризованном свете при вращении поляризатора вокруг направления потока света интенсивность света будет меняться от I_{\min} до I_{\max} .

Степенью поляризации света называют отношение

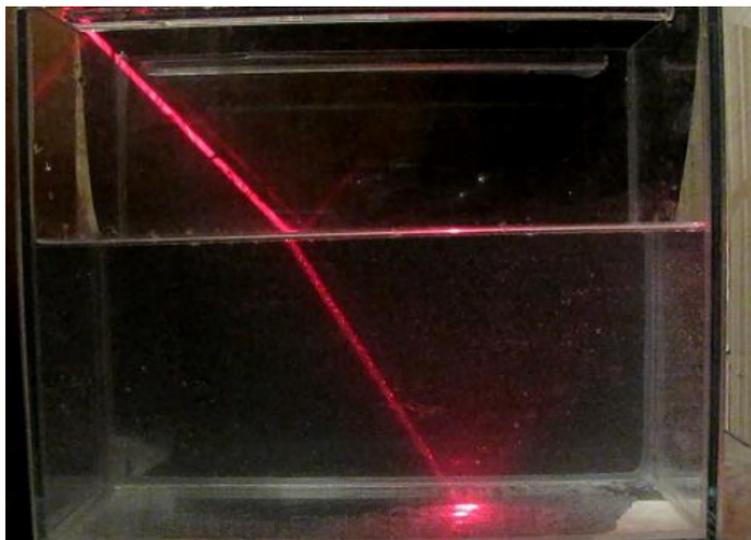
$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (15)$$

Степень поляризации:

- для полностью поляризованного света равна $P = 1$, так как $I_{\min} = I_0 \cos^2 \pi/2 = 0$, а $I_{\max} = I_0 \cos^2 0 = I_0$;
- для естественного света $P = 0$, так как $I_{\min} = I_{\max} = 0.5I_0$.

Поляризация света при отражении и преломлении

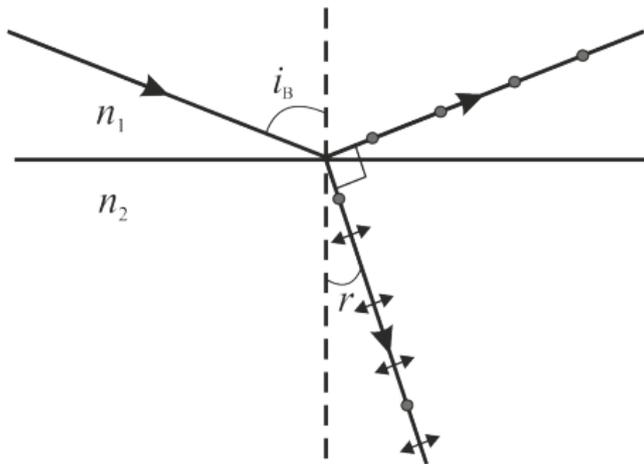
При падении пучка света на границу раздела двух диэлектрических сред, то при отражении и преломлении свет частично поляризуется, причем степень поляризации зависит от угла падения i .



При угле падения i_B , таком что

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}, \quad (16)$$

отраженный свет полностью поляризован, причем плоскость колебаний светового вектора \mathbf{E} перпендикулярна плоскости падения.



Позднее i_B назвали **углом Брюстера**

При угле Брюстера преломленный пучок света имеет максимальную степень поляризации. Легко видеть, что

$$i_B + r = \frac{\pi}{2}, \quad (17)$$

То есть,

$$\frac{\sin i_B}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = \tan i_B$$

$$\sin r = \cos i_B$$

$$i_B = \frac{\pi}{2} - r.$$

Формулы Френеля для интенсивности линейно-поляризованного света

- 1. Интенсивность света, **отраженного** от границы раздела двух диэлектриков

$$I'_{\perp} = I_{m\perp} \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)}, \quad I'_{\parallel} = I_{m\parallel} \frac{\tan^2(i - r)}{\tan^2(i + r)} \quad (18)$$

где I'_{\perp} и I'_{\parallel} - интенсивности компонент, поляризованных перпендикулярно (s-polarized) и параллельно плоскости отражения (p-polarized),

Формулы Френеля для интенсивности линейно-поляризованного света

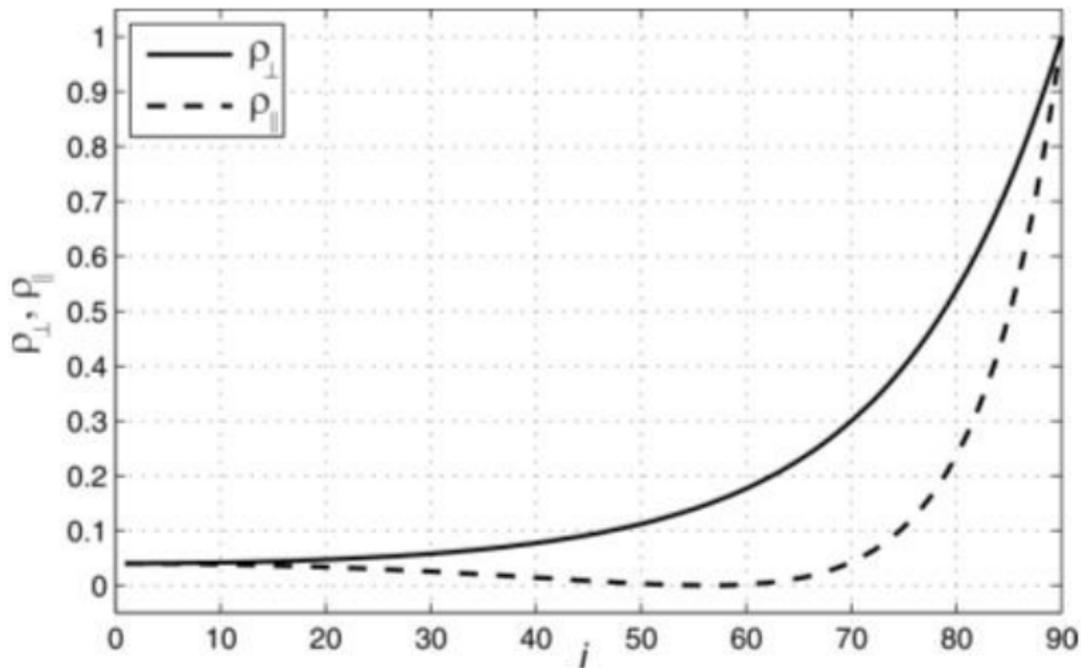
- 2. Интенсивность света, **преломленного** на границе раздела двух диэлектриков

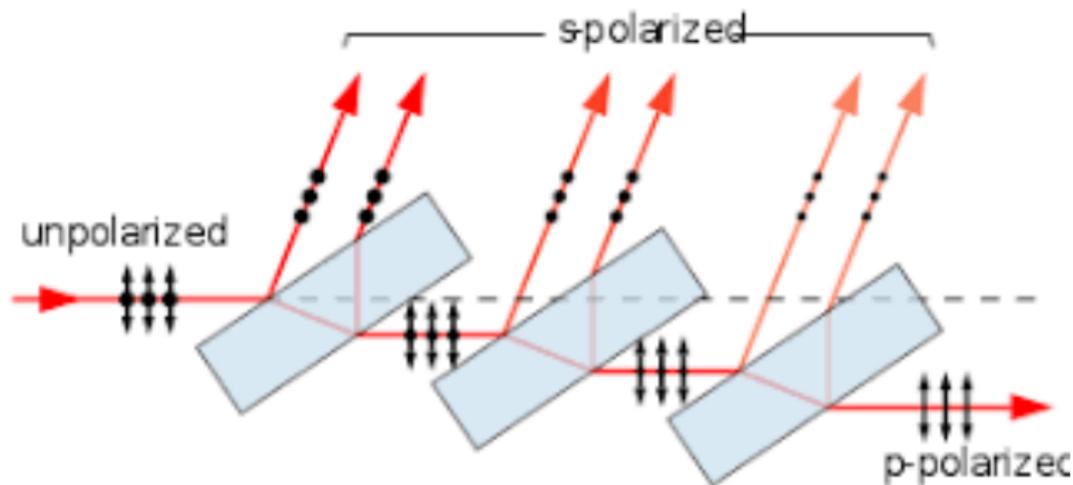
$$I''_{\perp} = I_{m\perp} \left(\frac{2 \cos i \sin r}{\sin(i+r)} \right)^2, \quad I''_{\parallel} = I_{m\parallel} \left(\frac{2 \cos i \sin r}{\sin(i+r) \cos(i-r)} \right)^2 \quad (19)$$

где I''_{\perp} и I''_{\parallel} - интенсивности компонент, поляризованных перпендикулярно и параллельно плоскости преломления.

Коэффициенты отражения компонент плоско-поляризованного света:

$$\rho_{\perp} = \frac{I'_{\perp}}{I'_{m\perp}}, \quad \rho_{\parallel} = \frac{I'_{\parallel}}{I'_{m\parallel}} \quad (20)$$





Способ получения поляризованного света

Коэффициент отражения **неполяризованного** света

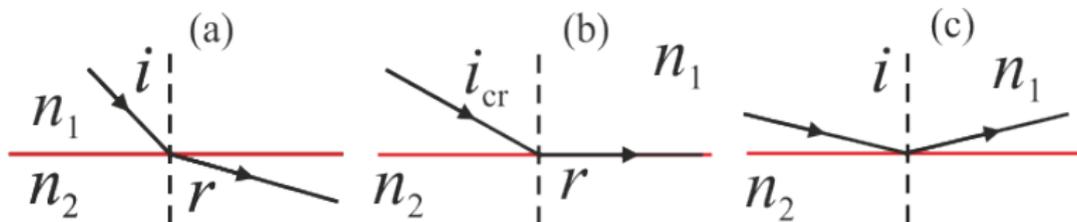
$$\rho = 0.5(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) \quad (21)$$

Полное внутреннее отражение света

- (а) Для диэлектрических сред с показателями преломления $n_1 > n_2$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow n_1 \sin i = n_2 \sin r \rightarrow i < r \quad (22)$$

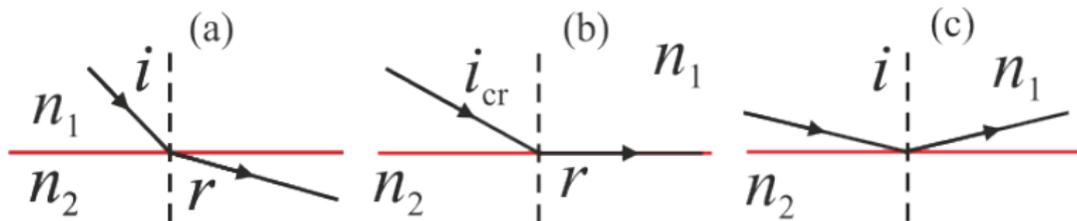
угол преломления r больше угла падения i



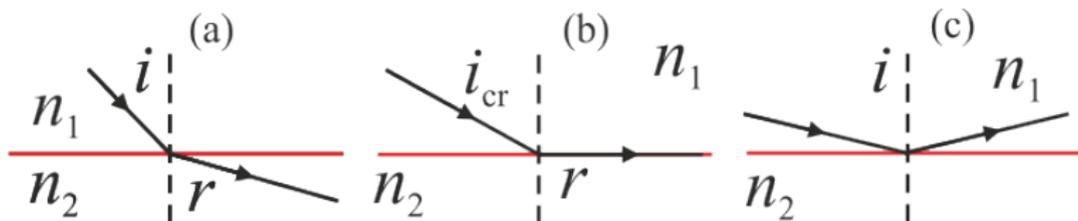
- (b) При критическом угле падения i_{cr} , таком что $r = \pi/2$ получаем

$$\sin i_{cr} = \frac{n_2}{n_1} \quad (23)$$

свет скользит вдоль границы раздела двух сред.

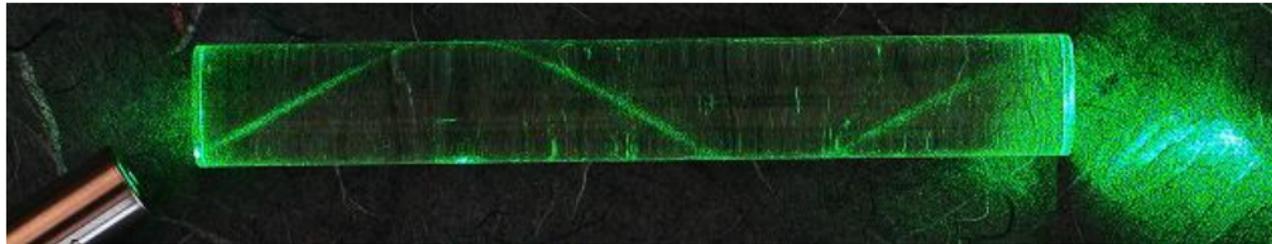


- (c) При $i > i_{cr}$ свет не проникает во вторую среду

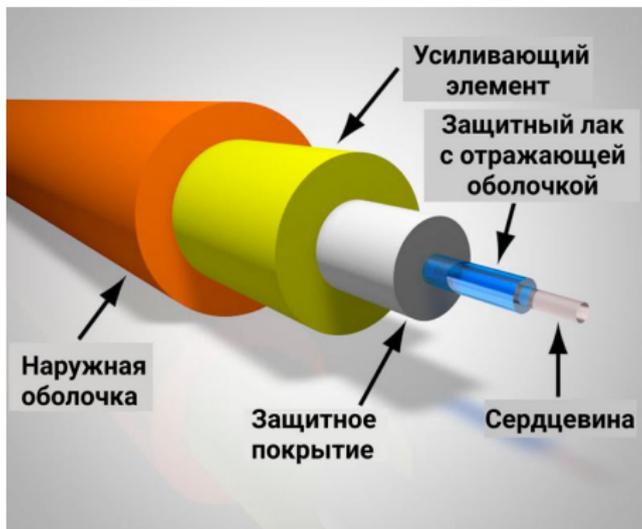


Такое явление называется **явлением полного внутреннего отражения**, которое легло в основу очень важного прикладного раздела физики – **волоконной оптики**, которая является базой для развития важнейшей отрасли волоконно-оптической связи, на основе которой функционируют различные информационные сети, в том числе и современный Интернет.

Волоконная оптика – это раздел оптики, в котором рассматривается передача световых сигналов по волноводам оптического диапазона.



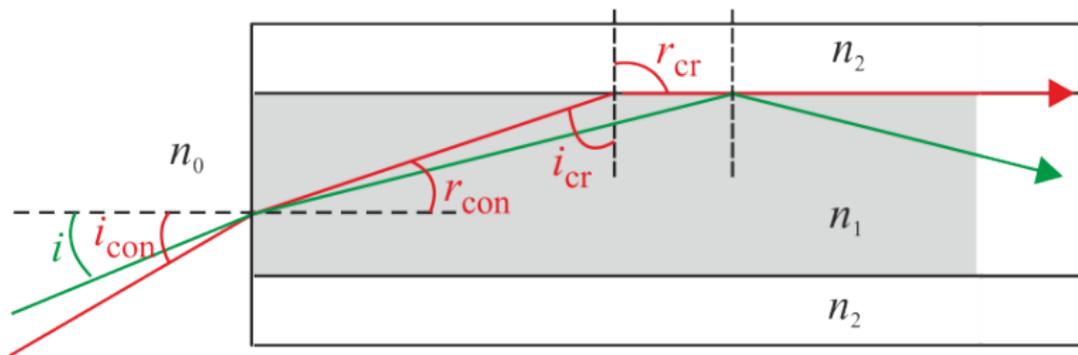
Важным классом оптических волноводов являются многослойные оптические волокна, простейший волновод состоит из цилиндрической сердцевины из кварцевого стекла с показателем преломления n_1 и прозрачной оболочки с показателем преломления n_2 , причем $n_1 > n_2$.



Рассмотрим как распространяется свет по световоду. Пусть угол i - угол падения на торец волокна, а r - угол преломления.

$$\frac{\sin i_{con}}{\sin r_{con}} = \frac{n_1}{n_0}, \quad \frac{\sin i_{cr}}{\sin r_{cr}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \sin i_{cr} = \frac{n_2}{n_1} \quad (24)$$

Определим конус лучей, в котором обеспечивается прохождение света по волокну.



Пусть угол i_{cr} предельный угол падения света из сердцевины на оболочку, тогда $r_{cr} = \pi/2$ и $i_{cr} = \arcsin(n_2/n_1)$, учитывая, что $r_{con} + i_{cr} = \pi/2$, тогда предельный угол падения на торец определим

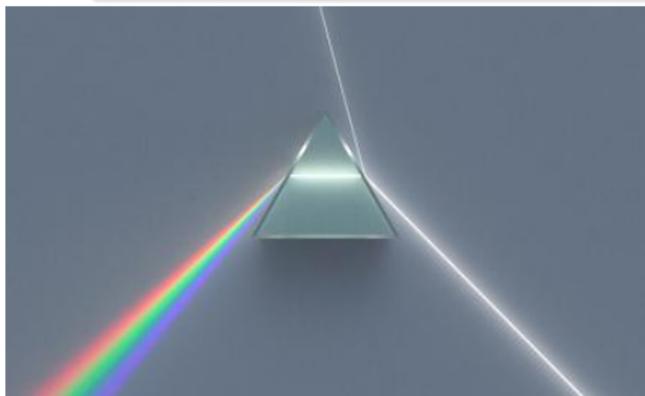
$$i_{con} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \sin r_{con}\right) = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \cos \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)\right) \quad (25)$$

Таким образом все лучи внутри конуса $i < i_{con}$ проходят большие расстояния (десятки и сотни км).

Дисперсия света

Дисперсия света – совокупность оптических явлений, обусловленных зависимостью диэлектрической проницаемости ϵ (показателя преломления n) от частоты ω (длины света λ) (частотная дисперсия света).

Пространственной дисперсией света называется зависимость диэлектрической проницаемости ϵ среды от волнового вектора k .



Примером дисперсии – разложение естественного света при прохождении через стеклянную призму (подробно изучил это явление И. Ньютон в 1672 г).

Дисперсия света

Опытно установили, что красный свет (ω_1) преломляется на меньший угол, чем фиолетовый (ω_2), причем $\omega_1 < \omega_2$ и $n(\omega_1) < n(\omega_2)$, следовательно, дисперсия света монотонно возрастающая зависимость показателя преломления с частотой $n(\omega) = \alpha\omega$.



По определению показатель преломления есть

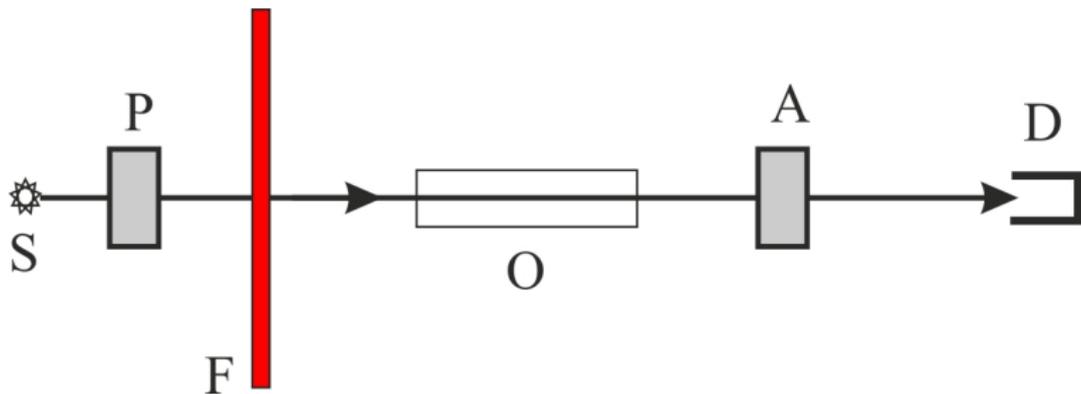
$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \quad \rightarrow \quad v_1 > v_2 \quad (26)$$

Фазовая скорость волны красного цвета больше, чем фазовая скорость фиолетового цвета.

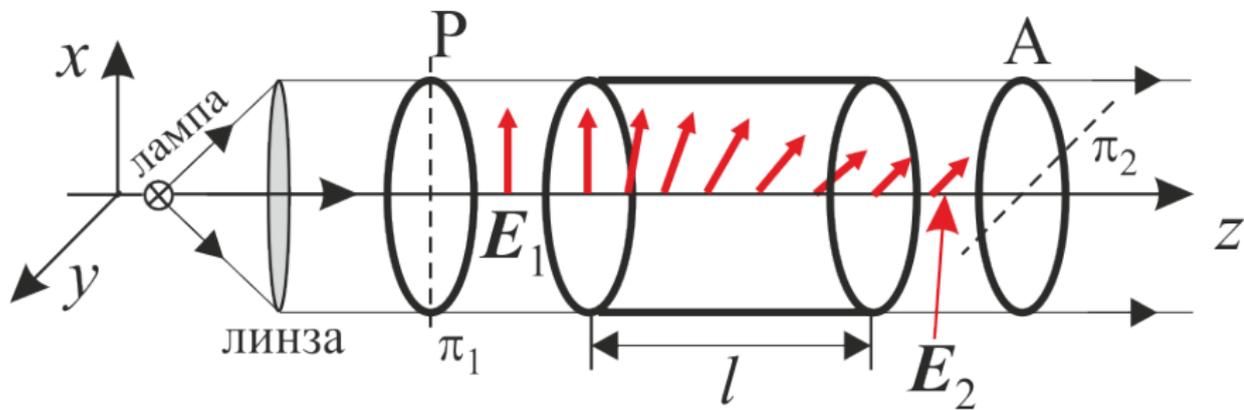
Косвенным результатом такой дисперсии является ограничение по дальности передачи оптического сигнала по оптоволокну, так как разные частотные компоненты сигнала имеют разные фазовые скорости, что приводит к неизбежному расплыванию сигнала

Вращение плоскости поляризации

Явление вращения плоскости поляризации было открыто Ф.Араго в 1811 году в кварце (SiO_2). Для этого использовалась установка, состоящая из источника света S , поляризатора P для поляризации света, фильтра F , пропускающего свет определенной длины волны, изучаемой среды (кварц), анализатора A , анализирующего поляризацию света, приемника света D (глаз человека, фотоэкспонетр и т.п.)



Параллельный пучок света от источника света поляризованный при помощи поляризатора P и монохроматизированный фильтром F падает на образец кварца так, что свет распространяется вдоль оптической оси кварца. Если угол α между плоскостями поляризатора и анализатора равен прямому, то, при отсутствии кварца в канале, свет не проходит через анализатор, но в присутствии кварца свет проходит через систему и попадает в приемник излучения D , следовательно кварц поворачивает плоскость поляризации (колебаний) пучка света и этот угол можно измерить, поворачивая анализатор на угол α до полного затемнения проходящего через систему света.



Для кварца характерна вращательная дисперсия, то есть угол поворота **плоскости поляризации** света зависит от длины волны света, например для кристаллического кварца толщиной 1 мм плоскость поляризации поворачивается на угол:



Цвет	Угол поворота
красный	15°
желтый	21°
зеленый	27°
синий	33°
фиолетовый	51°

Для некоторой длины волны угол поворота пропорционален толщине l образца

$$\alpha = \beta l \quad (27)$$

где β - вращательная способность вещества (угол поворота на единицу длины).

Опытным путем обнаружили, что существуют два вида кварца - правовращающий (по часовой стрелке, если смотреть навстречу световому лучу) и левовращающий кварц.

Явление вращения плоскости поляризации характерно не только для кристаллических тел, но и для аморфных, жидких и газообразных веществ.

Для растворов Био в 1831 году установил, что

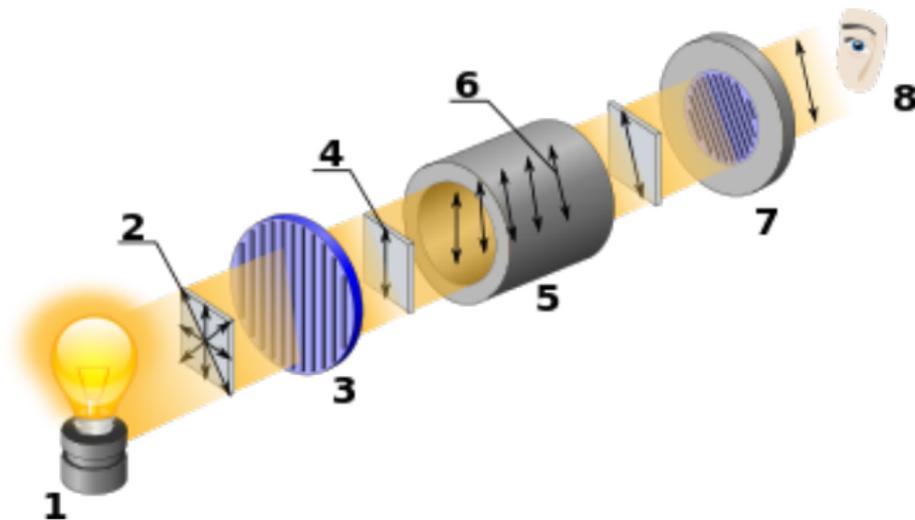
$$\alpha = c[\beta]l \quad (28)$$

где $[\beta]$ - удельная вращательная способность оптически активного вещества, c - концентрации оптически активного вещества в растворе.

Закон Био показывает, что для растворенных веществ, вращение плоскости поляризации зависит от числа молекул (атомов) на пути светового луча.

Поляриметр

Поляриметр - прибор для измерения угла вращения плоскости поляризации линейно-поляризованного света. Используется для изучения оптически активных (т.е. способных поворачивать плоскость поляризации сред) в химической, пищевой промышленности и в медицине.



Поляриметры

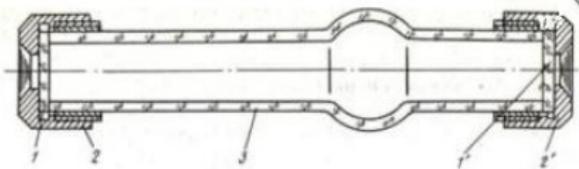


Рис. 1.4.11. Поляриметрическая трубка:
1, 1' – покровные стекла; 2, 2' – гайки; 3 – стеклянная трубка





Чарли! Проверь! Сколько они положили сахара в мой чай!
Напишите соответствующую формулу