

# *Лекция 17.* Поляризация света

## ***Вопросы:***

- Естественный и поляризованный свет. Виды поляризации
- Закон Малюса
- Поляризация при отражении и преломлении. Закон Брюстера
- Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении
- Распространение световых волн в одноосных кристаллах
- Поляризационные призмы и поляроиды
- Интерференция поляризованных волн

# Естественный и поляризованный свет.

## Виды поляризации

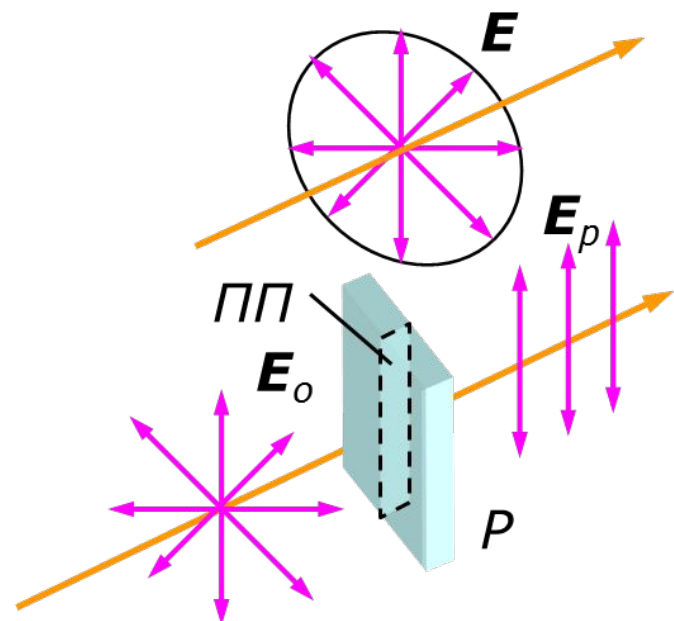
- Виды поляризованного света

В *естественном свете*, испускаемом обычными (некогерентными) источниками (т.е. не лазерами), колебания светового вектора  $\mathbf{E}$  (как в прочем, и вектора  $\mathbf{H}$ ) происходят в направлениях, которые быстро и беспорядочно сменяют друга, иначе говоря, эти колебания никак не урегулированы и не обнаруживают асимметрии относительно светового луча.

*Световую волну* (или просто свет), в которой направление колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом, называют *поляризованной* (поляризованным светом).

Если колебания  $\mathbf{E}$  происходят только в одной плоскости, проходящей через сам луч, то имеем *плоско-* (или *линейно-*) *поляризованную волну* (свет).

Плоскополяризованный свет получают из естественного с помощью



поляризатора  $P$  – устройства, свободно пропускающего колебания, параллельные плоскости пропускания  $ПП$  поляризатора.

# Естественный и поляризованный свет.

## Виды поляризации

- Виды поляризованного света

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных электрических гармонических колебания, происходящих вдоль осей  $x$ ,  $y$  и отличающихся по фазе на  $\delta$ :

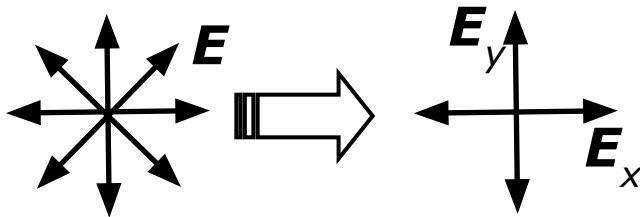
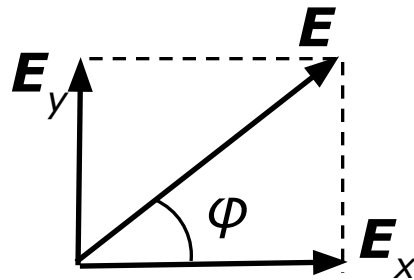
$$E_x = E_{mx} \cdot \cos \omega t, \quad E_y = E_{my} \cdot \cos(\omega t + \delta) \quad (1)$$

Результирующий вектор  $\mathbf{E}$  является векторной суммой  $\mathbf{E}_x$  и  $\mathbf{E}_y$  и ориентирован под углом  $\varphi$  к вектору  $\mathbf{E}_x$ , так что

$$\operatorname{tg} \varphi = E_y / E_x = E_{my} \cdot \cos(\omega t + \delta) / E_{mx} \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

Если разность фаз  $\delta$  претерпевает случайные хаотические изменения, то и угол  $\varphi$  скачкообразно неупорядоченно изменяется, а вместе с ним и направление  $\mathbf{E}$ .

Поэтому естественный свет можно представить как суперпозицию двух некогерентных э/м волн, поляризованных во взаимно пер-



перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковые амплитуды  $E_{mx} = E_{my}$ .

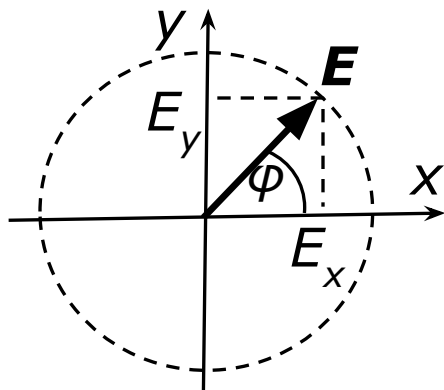
# Естественный и поляризованный свет.

## Виды поляризации

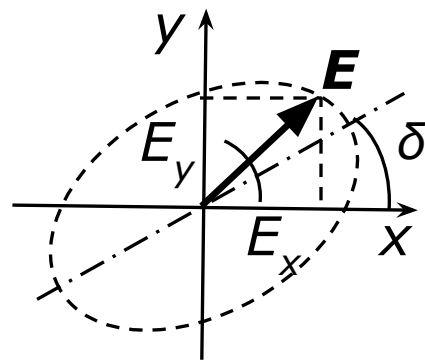
- Виды поляризованного света

Если световые волны и колебания  $E_{x'}$ ,  $E_{y'}$  – когерентны, причем  $\delta = 0 (\pi)$ , тогда получаем  $\text{tg } \varphi = \pm E_{my'} / E_{mx} = \text{const}$ , т.е. результирующее колебание совершается в фиксированном направлении, и волна получается *плоскополяризованной*.

В случае, когда  $\delta = \pm \pi/2$  и равенства амплитуд  $E_{mx} = E_{my'}$ , имеем  $\text{tg } \varphi = -/+ \text{tg } \omega t$ , т. е. плоскость колебаний поворачивается вокруг луча с угловой скоростью, равной частоте колебаний  $\omega$ , и свет в этом случае будет *поляризованным по кругу*.



Волна поляризованная по кругу



Волна с левой эллиптической поляризацией

В случае произвольной постоянной разности фаз  $\delta = \text{const}$  и неравенства амплитуд  $E_{mx} \neq E_{my'}$  образуется *эллиптически поляризованная волна с левым (или правым) вращением вектора E*.

*Замечание.* Такую волну всегда можно разложить на две когерентные взаимно ортогональные плоскополяризованные волны.

# Естественный и поляризованный свет.

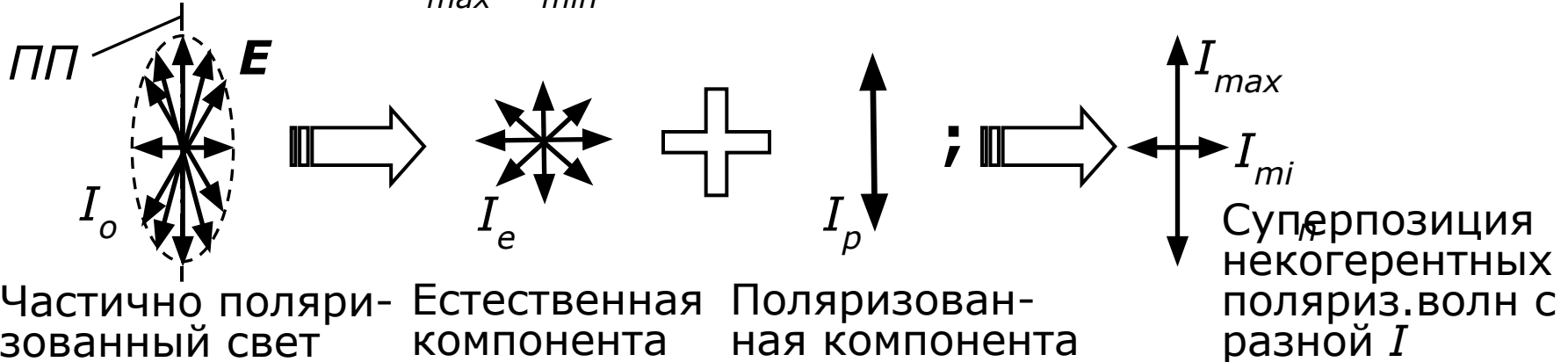
## Виды поляризации

- Степень поляризации света

Реальные поляризаторы в той или иной степени несовершенны, т.е. они частично пропускают колебания, перпендикулярные к их плоскости (плоскость пропускания). Поэтому на выходе из несовершенного поляризатора получается *частично поляризованный свет*, в котором колебания  $E$  в направлении плоскости поляризатора преобладают над колебаниями других направлений.

Частично поляризованный свет можно:

- 1) рассматривать как смесь естественного и плоскополяризованного света;
- 2) представить как суперпозицию двух некогерентных взаимно перпендикулярных плоскополяризованных волн с разной интенсивностью ( $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ).



# Естественный и поляризованный свет.

## Виды поляризации

- Степень поляризации света

Если пропустить частично поляризованный (ч/п) свет через другой (аналогичный) поляризатор, который в этом случае называют *анализатором*, то при вращении последнего вокруг луча интенсивность прошедшего света будет изменяться от  $I_{max}$  до  $I_{min}$  (при повороте анализатора на угол  $\pi/2$ ). В связи с этим определяется *степень поляризации света*:

$$P = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \text{ или } P = I_p / I_o \quad (3)$$

где  $I_o = I_{max} + I_{min}$  – полная интенсивность ч/п света,  $I_p$  – интенсивность поляризованной компоненты.

*Частные случаи.* 1. Для идеального плоскополяризованного света:

$$P = 1 \text{ (так как } I_{min} = 0\text{)}.$$

2. Для естественного света:

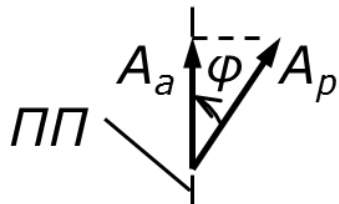
$$P = 0 \text{ (так как } I_{max} = I_{min}\text{)}.$$

3. Для эллиптически поляризованного света:

понятие степени поляризации – не применимо (так как колебания  $\mathbf{E}$  в нем полностью упорядочены).

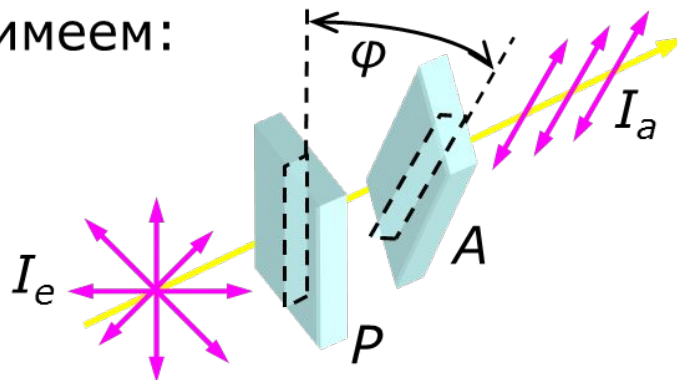
# Закон Малюса

- Изменение интенсивности поляризованного света  
Если на поляризатор (анализатор) падает плоско-поляризованный свет с амплитудой колебаний светового вектора  $A_p$  и интенсивностью  $I_p$ , то сквозь анализатор пройдет составляющая  $A_a = A_p \cdot \cos \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между плоскостью колебаний падающего света и плоскостью анализатора ПП.  
Тогда, с учетом  $I \sim A^2$ , интенсивность прошедшего анализатор света определяется по **закону Малюса**:



$$I_a = I_p \cdot \cos^2 \varphi \quad (4)$$

В случае падения естественного света с интенсивностью  $I_e$  на систему «поляризатор + анализатор» на выходе из анализатора имеем:

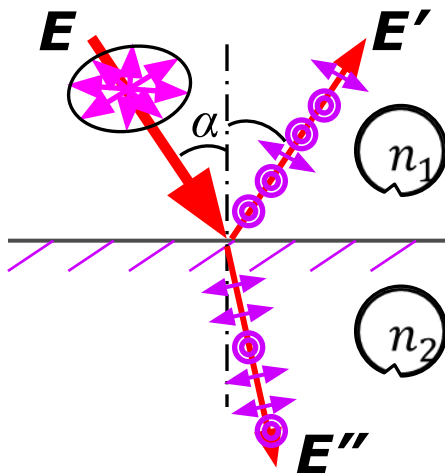


$$I_a = 1/2 \cdot I_e \cdot \cos^2 \varphi \quad (5)$$



# Поляризация при отражении и преломлении

Если угол падения  $\alpha$  естественного света  $E$  на границу раздела двух прозрачных диэлектриков отличен от нуля, то отраженный и преломленный лучи оказываются частично-поляризованными. В отраженном свете преобладают колебания вектора  $E'$ , перпендикулярные к плоскости падения, а в преломленном луче  $E''$  - колебания параллельны плоскости падения.



- Степень поляризации обоих лучей зависит от угла падения.

○ **Брюстером** был установлен **закон**, определяющий соотношение для угла падения, соответствующего полной поляризации отраженного луча:

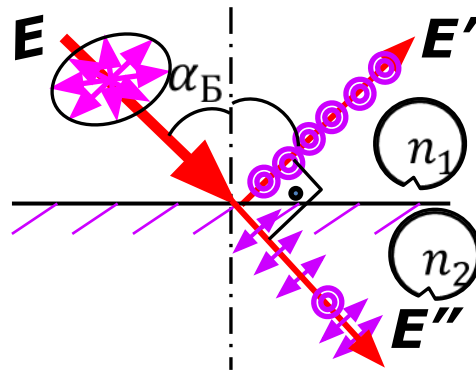
$$\operatorname{tg} \alpha = n_2/n_1 \quad (6)$$

где  $n_1, n_2$  - показатели преломления первой и второй сред.

# Поляризация при отражении и преломлении

- Преломленный луч при  $\alpha = \alpha_B$  остается частично поляризованным с наибольшей степенью поляризации ( $P_{\max}$ ).

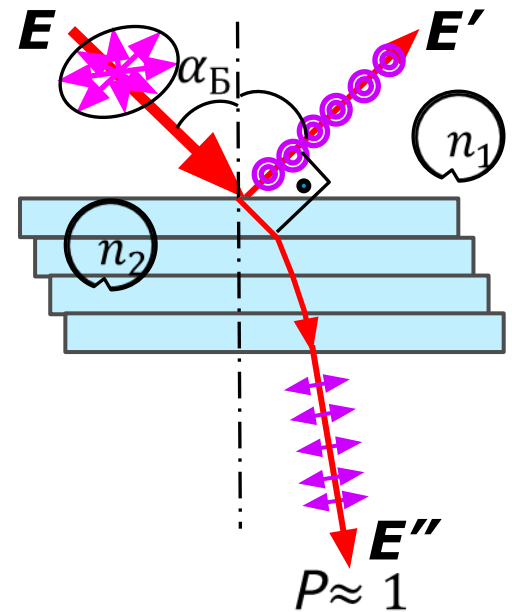
*Замечание.* Можно легко убедиться, что в этом случае отраженный и преломленный луч - взаимно перпендикулярны.



# Поляризация при отражении и преломлении

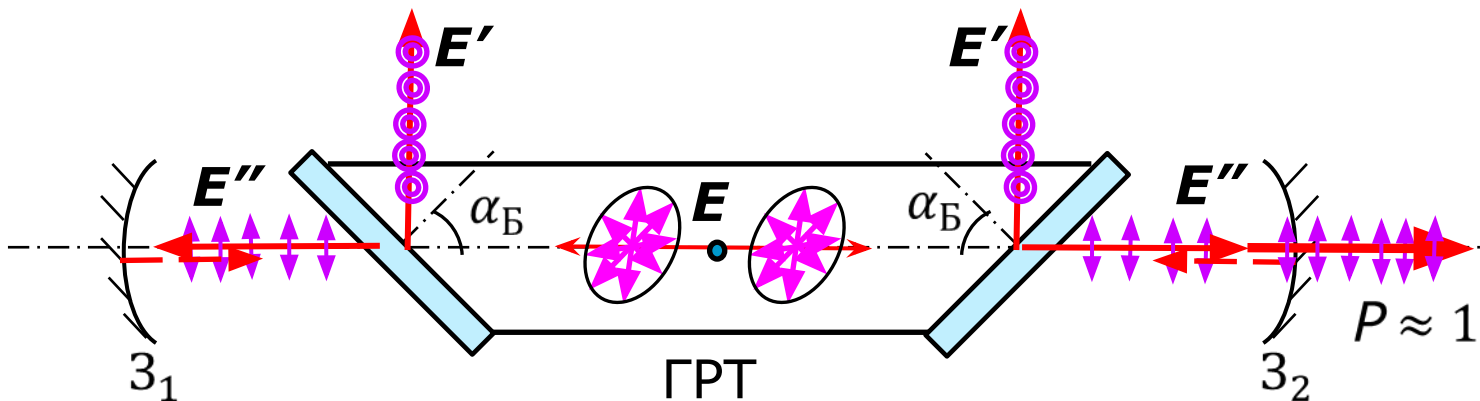
- Для повышения степени поляризации преломленного света падающий световой пучок направляют под углом Брюстера  $\alpha_B$  на целую «стопу» одинаковых и параллельных друг другу пластинок; и за счет ряда последовательных отражений и преломлений получают проходящий через «стопу» свет практически полностью плоскополяризованным в плоскости падения исходного пучка.

Интенсивность прошедшего света (в предположении отсутствия поглощения) будет равна  $\frac{1}{2}$  интенсивности падающего естественного света ( $I \approx \frac{1}{2} I_{\text{ест.}}$ ).



# Поляризация при отражении и преломлении

- Эта идея получения плоскополяризованного света нашла воплощение в газовых лазерах, где торцы газоразрядной трубки (ГРТ) представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластинки, расположенные под углом Брюстера к оси трубки.



$З_1, З_2$  - зеркала оптического резонатора

Выходной луч поляризован в плоскости падения на торцевые пластинки.

Составляющая генерируемого излучения, плоскость поляризации которой перпендикулярна плоскости падения, почти полностью удаляется из пучка благодаря отражениям.

# Поляризация при отражении и преломлении

- *Замечание.* Степень поляризации отраженного и преломленного лучей при произвольном угле падения света  $\alpha$  можно получить с помощью формул Френеля, которые вытекают из условий, налагаемых на электромагнитное поле на границе раздела двух диэлектриков (равенство тангенциальных составляющих векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , а так же равенство нормальных составляющих векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  по обе стороны границы раздела).

Так же, исходя из формул Френеля, можно получить коэффициенты отражения плоскополяризованных лучей: 1) с плоскостью поляризации, перпендикулярной

плоскости падения  $\rho_{\perp} = \frac{I'_{\perp}}{I_{\perp}} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}$ , где  $\beta$  - угол

преломления;

2) с плоскостью поляризации, параллельной плоскости

падения  $\rho_{\parallel} = \frac{I'_{\parallel}}{I_{\parallel}} = \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)}$ .

# Поляризация при отражении и преломлении

- *Замечание.* Формулы Френеля для интенсивности света, отраженного от границы раздела двух диэлектриков:

$$I'_{\perp} = I_{\perp} \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad I'_{\parallel} = I_{\parallel} \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)}$$

где  $I_{\perp}$  и  $I_{\parallel}$  – интенсивности падающего света, у которого колебания вектора **E** соответственно перпендикулярны и параллельны плоскости падения.

# Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении

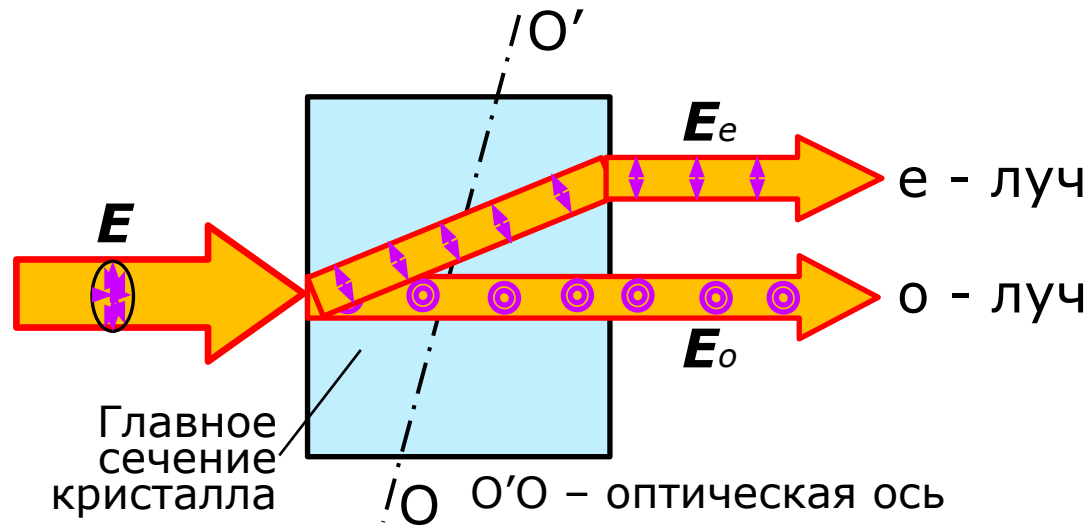
При прохождении света через все прозрачные кристаллы-диэлектрики, за исключением принадлежащих к кубической кристаллической системе, типа NaCl, наблюдается **явление двойного лучепреломления**. Это явление связано с оптической анизотропией кристаллов, т. е. зависимостью характеристик света от направления его распространения в кристалле.

*Определение.* Явление двойного лучепреломления заключается в том, что упавший на кристалл луч разделяется внутри кристалла на два луча, распространяющихся, вообще говоря, в различных направлениях и с разными скоростями.

*Замечание.* Существуют кристаллы одноосные и двуосные.

# Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении

- У одноосных кристаллов один из преломленных лучей подчиняется обычному закону преломления ( $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$ ), лежит в одной плоскости с падающим **лучом** и нормалью к поверхности и его называют



Другой **луч**, называемый **необыкновенным** не подчиняется обычному закону преломления, и даже при нормальном падении света на кристалл необыкновенный луч «e» может отклоняться от нормали, и, как правило, e-луч не лежит в плоскости падения.



# Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении

Наиболее сильно двойное лучепреломление выражено у таких *одноосных кристаллов*, как исландский шпат (разновидность  $\text{CaCO}_3$  - с гексагональной кристаллической системой), кварц, турмалин.

*Замечание.* К *двуосным кристаллам* относятся: слюда, гипс; у них оба луча - необыкновенные.

*Определение.* У одноосных кристаллов имеется особое направление, вдоль которого «о» и «е» - лучи распространяются не разделяясь и с одинаковой скоростью; это направление называется *оптической осью* (ОО' - см. рис.).

У двуосных кристаллов имеются два таких направления.

# Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении

*Определение.* Любая плоскость, проходящая через оптическую ось, называется *главным сечением* (или *главной плоскостью*) *кристалла*.

*Замечание.* На практике обычно пользуются главным сечением, проходящим через  $OO'$  и световой луч.

Исследования показывают, что оба луча – «о» и «е» – полностью поляризованы во взаимно перпендикулярном направлениях, а именно: плоскость колебаний вектора  $\mathbf{E}_o$  в обыкновенном луче перпендикулярна к главному сечению кристалла, а в необыкновенном луче колебания вектора  $\mathbf{E}_e$  совершаются в плоскости, совпадающей с главным сечением кристалла.

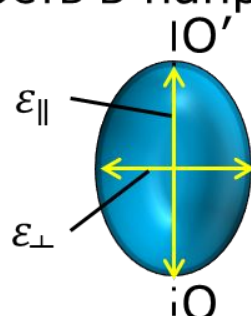
# Распространение световых волн в одноосных кристаллах

- Показатели преломления и скорости обыкновенного и необыкновенного лучей

Анизотропия кристалла по-разному отражается на скорости распространения обыкновенной и необыкновенной волн.

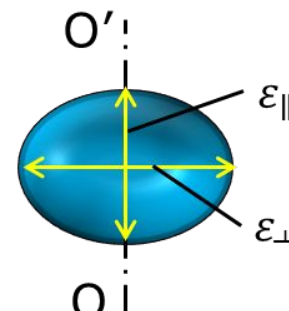
В то время как скорость обыкновенного луча  $v_o$  не зависит от направления в кристалле, скорость необыкновенного луча  $v_e$  по мере отклонения его от направления оптической оси (вдоль которой:  $v_e = v_o$ ) будет все больше отличаться, достигая максимального различия в направлении, перпендикулярном оптической оси.

В одноосных кристаллах диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  зависит от направления; здесь различают:  $\varepsilon_{\perp}$  - проницаемость в направлении, перпендикулярном оптической оси кристалла, и  $\varepsilon_{\parallel}$  - проницаемость в направлении, параллельном оптической оси.



Положительный кристалл

Эллипсоиды диэлектрической проницаемости





Отрицательный кристалл

# Распространение световых волн в одноосных кристаллах

*Вывод.* В связи с этим и с учетом связи:  $n \approx \sqrt{\varepsilon}$ , вытекает, что электромагнитным волнам с различными направлениями колебаний вектора  $\mathbf{E}$  соответствуют разные значения показателя преломления  $n$ , и разные скорости распространения  $v$  (т.к.  $v = c/n$ ).

- Так как колебания  $\mathbf{E}$  в обыкновенном и необыкновенном лучах происходят в двух ортогональных плоскостях, то соответственно различают: **показатель преломления обыкновенного луча**:  $n_o = c/v_o$  и **показатель преломления необыкновенного луча** (перпендикулярного оптической оси)  $n_e = c/v_e$ .

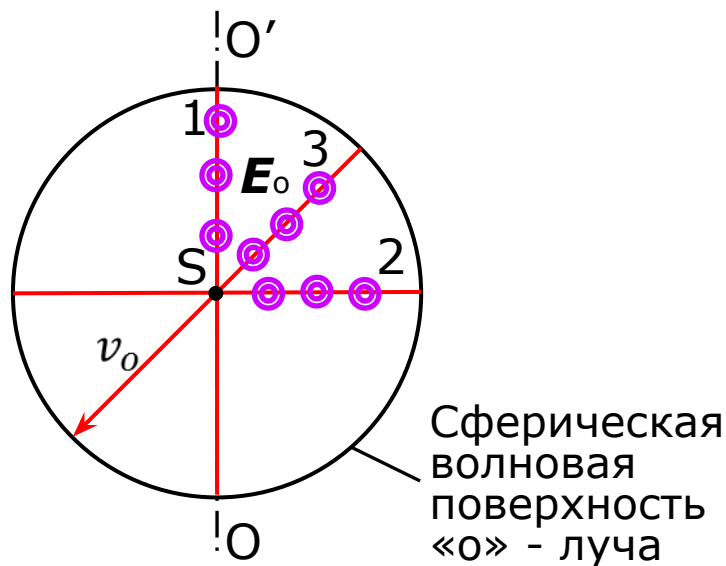
*Пример.* Для длины волны  $\lambda = 550$  нм у кристаллов разной ориентации (вообще,  $n_o$  и  $n_e$  – несколько зависят от  $\lambda$ ) имеем (см. таблица):

Эллипсоид	Материал	$n_o$	$n_e$	$ n_o - n_e $	$v$	Тип крист.
	Исл. шпат	1,658	1,486	0,172	$v_o < v_e$	Отриц. кр.
	Кварц	1,545	1,554	0,009	$v_o > v_e$	Полож. кр.

# Распространение световых волн в одноосных кристаллах

- Скорости обыкновенных и необыкновенных лучей

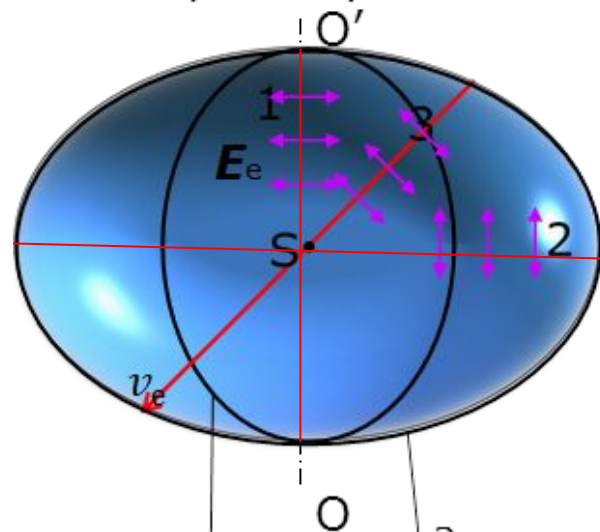
■ В обыкновенном луче колебания вектора  $\mathbf{E}_o$ , как известно, происходят в направлении, перпендикулярном к главному сечению кристалла, поэтому при любом направлении обыкновенного луча вектор  $\mathbf{E}_o$  образует с оптической осью угол  $\alpha = \pi/2$ , и скорость «о»-луча будет одна и та же:  $v_o = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}}$ . Изображая скорость  $v_o$  в виде отрезков, отложенных из общего центра  $S$  (допустим как из источника света) по разным направлениям, получаем *сферическую волновую поверхность* радиуса  $v_o$  (см. рис.).



# Распространение световых волн в одноосных кристаллах

- Скорости обыкновенных и необыкновенных лучей

Колебания вектора  $\mathbf{E}_e$  в необыкновенном луче совершаются в главном сечении кристалла, поэтому для разнонаправленных «е»-лучей угол  $\alpha$  - разный (для направления 1 -  $\alpha = \pi/2$ , для направления 2 -  $\alpha = 0$ , для направления 3 -  $\alpha$  - промежуточное значение), и, соответственно, скорость в 1-ом направлении  $v_e = v_0 = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}}$ , во 2-ом направлении  $v_e = c/\sqrt{\epsilon_{\parallel}}$  и для 3-его направления имеет промежуточное значение  $v_e$ .



Эллиптическая волновая поверхность «е» - луча  
Пол.кристалл

Эллиптическая волновая поверхность «е» - луча  
Отр.кристалл

*Вывод.* Таким образом, волновая поверхность необыкновенных лучей представляет собой эллипсоид вращения.

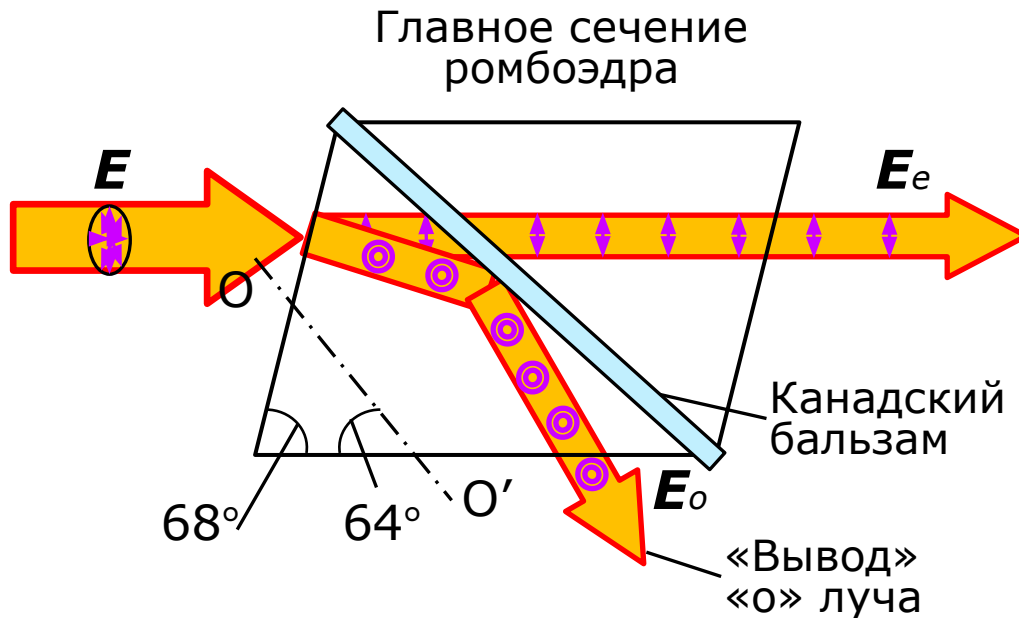
*Определение.* В зависимости от того, какая из скоростей,  $v_0$  или  $v_e$ , больше, одноосные кристаллы подразделяют на *положительные* и *отрицательные*; у положительных кристаллов:  $v_0 > v_e$  ( $n_0 < n_e$ ), а у отрицательных кристаллов:  $v_0 < v_e$  ( $n_0 > n_e$ ) (см. рис. и табл.).

# Поляризационные призмы и поляроиды

- Эффект двойного лучепреломления используется в **поляризаторах** – устройствах для преобразования естественного света в плоскополяризованный.

*Призма Николя* (или просто «николь») – как поляризатор.

Эта призма изготавливается из исландского шпата (разновидность  $\text{CaCO}_3$  с гексагональной кристаллической решеткой). Призма в форме ромбоэдра распиливается на две половинки, которые затем склеиваются канадским бальзамом (смола канадской сосны), для которого выполняется условие по показателю преломления:  $n_e < n_b < n_o$ .



В «николе» происходит полное внутреннее отражение обыкновенного луча «o» (от бальзама), который «выводится» из призмы и далее не используется.

Необыкновенный луч «e», который поляризован в плоскости чертежа, проходит призму и далее применяется как плоскополяризованный свет.



# Поляризационные призмы и поляроиды

- Для создания плоскополяризованного света также используется **явление дихроизма**, т. е. поглощение одного из лучей («о» или «е») при прохождении света через определенные кристаллы.

Сильным дихроизмом обладают: турмалин (сложный природный минерал) - «о»-луч в нем практически полностью поглощается на длине  $L \approx 1$  мм; сульфат йодистого хенина - длина поглощения  $L \approx 0,1$  мм.

Существуют *дихроические пластинки* - **поляроиды** и пленки, которые называют **поляроидными пленками**. Некоторые поляроиды могут исполнять роль светофильтров, позволяющих плавно изменять интенсивность проходящего света (эта система из двух и более поляризационных фильтров, работающих в соответствии с законом Малюса). Такой фильтр представляет собой тонкую (до 0,1 мм) целлулоидную пленку, в которую внедрено большое количество одинаково ориентированных кристалликов сульфата йодистого хенина.



# Интерференция поляризованных лучей

- Для интерференции волн необходимы два условия: 1) когерентность волн; 2) одинаковое направление колебаний светового вектора в налагаемых волнах.

Когда на одноосный кристалл падает естественный свет, первое условие не соблюдается, т.к. выходящие обыкновенная и необыкновенная волны, в основном, порождаются разными цугами (излучающих атомов), входящими в состав естественного света; поэтому «о» и «е» - лучи некогерентны.

Обе волны можно сделать когерентными , если на пути естественного света установить поляризатор перед кристаллической пластинкой, причем так, чтобы плоскость поляризатора составляла угол  $\varphi = 45^\circ$  с оптической осью кристалла (будем рассматривать пластинку, вырезанную параллельно оптической оси). Тогда колебания каждого луча разделятся поровну между обыкновенной и необыкновенной волнами, и лучи «о» и «е» - окажутся на выходе пластинки когерентными. Однако такие волны – не интерферируют, а, как известно, дают волну поляризованную по кругу, так как они поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

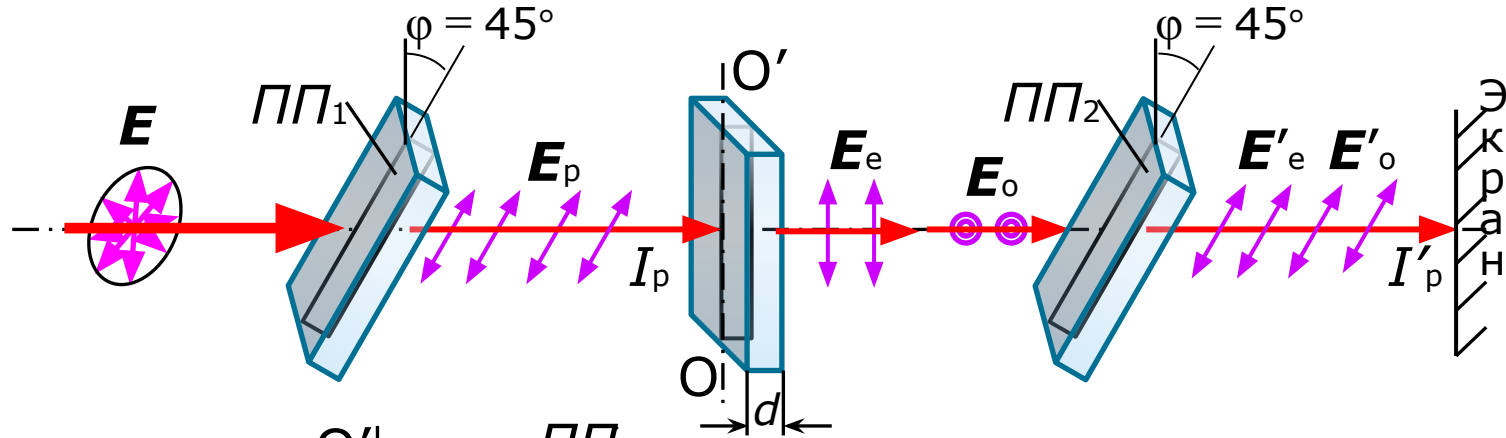
# Интерференция поляризованных волн

- Выполнение второго условия интерференции обеспечивается установкой еще одного поляризатора – анализатора; он сведет ортогональные когерентные колебания векторов  $\mathbf{E}_o$  и  $\mathbf{E}_e$  к одной плоскости, и интерференция будет обеспечена.
- Результат интерференции поляризованных лучей будет зависеть от их оптической разности хода, которая в случае нормального падения света на кристаллическую пластинку определяется как:  $\Delta = (n_o - n_e)d$ , где  $d$  - толщина пластинки.  
Разность фаз налагаемых «о»- и «е»-волн при этом  $\delta = \frac{(n_o - n_e)d}{\lambda_o} 2\pi$ , где  $\lambda_o$  - длина волны в вакууме.  
В случае, когда  $\Delta = (n_o - n_e)d = \pm m\lambda_o$  ( $m = 0, 1, 2...$ ) имеем усиление света (максимумы интенсивности).

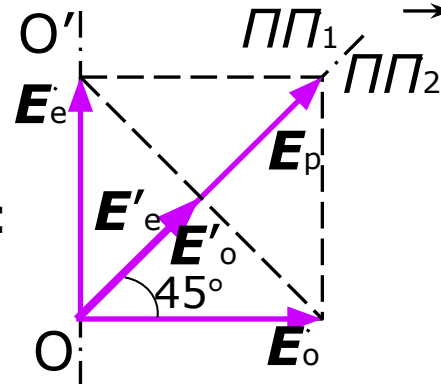
# Интерференция поляризованных лучей

- Схема эксперимента

(когда плоскость первого поляризатора параллельна плоскости второго поляризатора, т.е.  $ПП_1 \parallel ПП_2$ )



Векторная диаграмма:



$E_p$  – амплитуда после 1-го поляризатора

$E_o$  и  $E_e$  – амплитуды «о» и «е»-лучей после  $O'O$ -кристалла

$E'o$  и  $E'e$  – амплитуды «о» и «е» лучей после 2-го поляризатора

*Замечание.* Можно показать, что интенсивность света, прошедшего 2-ой поляризатор:

$$I'_p = I_p \cos^2(\delta/2),$$

где  $I_p$  – интенсивность света на выходе из первого поляризатора.