

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

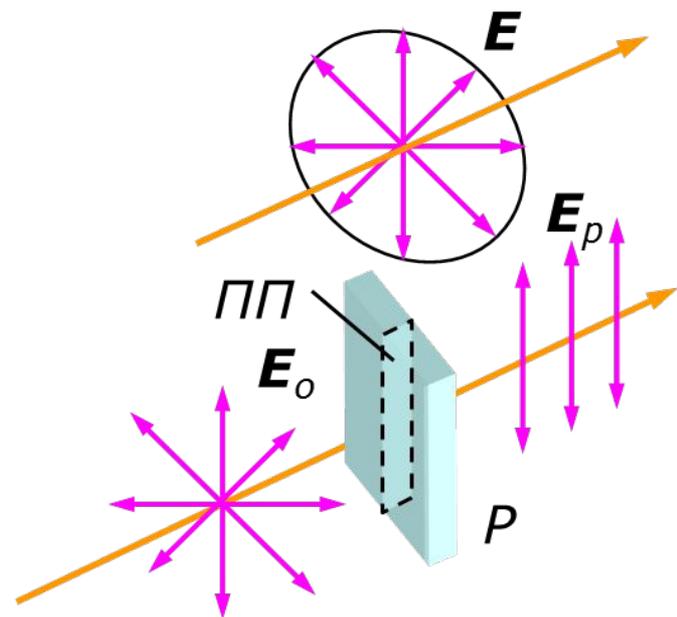
- Виды поляризованного света

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

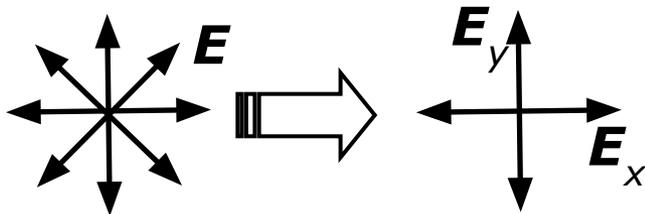
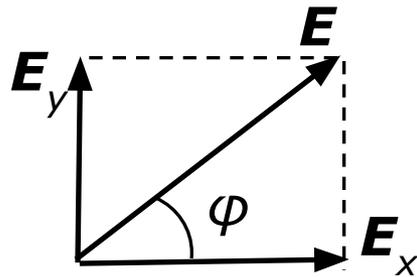
Рассмотрим два взаимно перпендикулярных электрических гармонических колебания, происходящих вдоль осей x , y и отличающихся по фазе на δ :

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

Результирующий вектор \mathbf{E} является векторной суммой \mathbf{E}_x и \mathbf{E}_y и ориентирован под углом φ 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 δ претерпевает случайные хаотические изменения, то и угол φ 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-

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

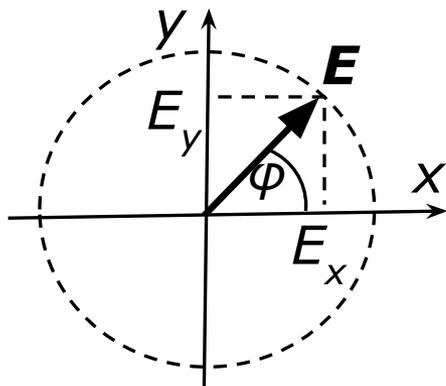
Естественный и поляризованный свет.

Виды поляризации

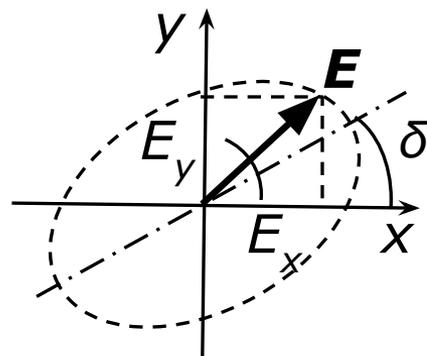
- Виды поляризованного света

Если световые волны и колебания $E_{x'}$, $E_{y'}$ – когерентны, причем $\delta = 0$ (π), 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 ω , 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.

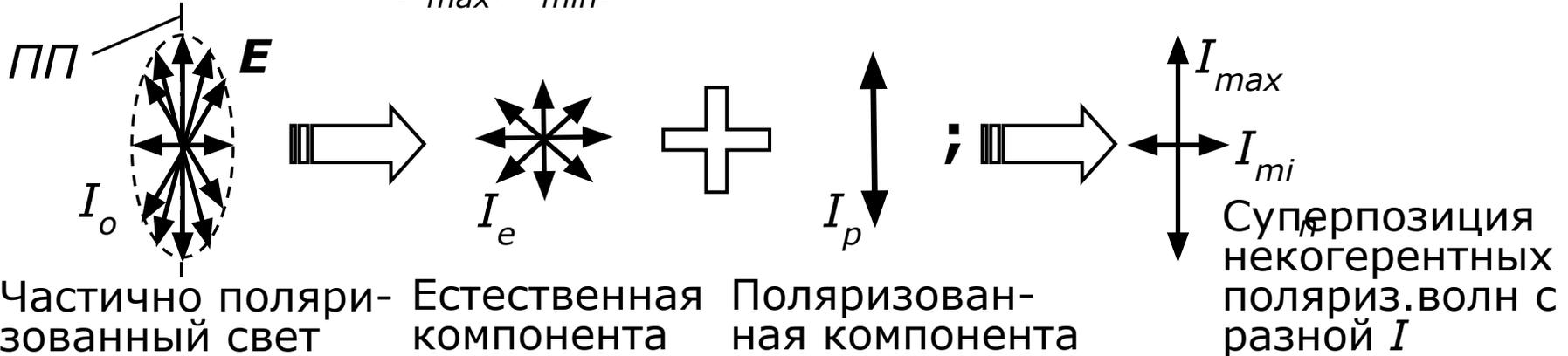
Виды поляризации

- 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:

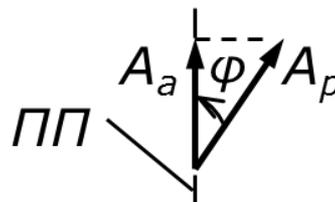
понятие степени поляризации – не применимо (так как колебания \mathbf{E} в нем полностью упорядочены).

Закон Малюса

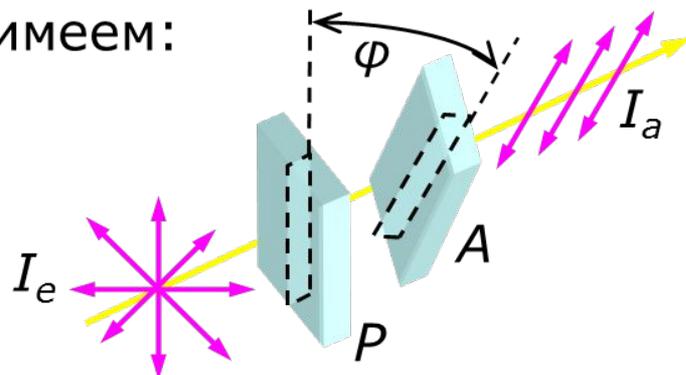
- Изменение интенсивности поляризованного света

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 φ – 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**:

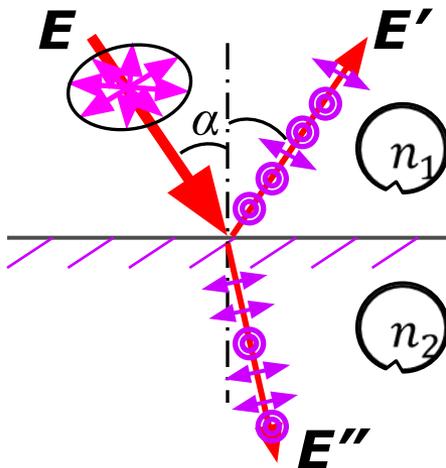

$$I_a = I_p \cdot \cos^2 \varphi \quad (4)$$

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 α 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:

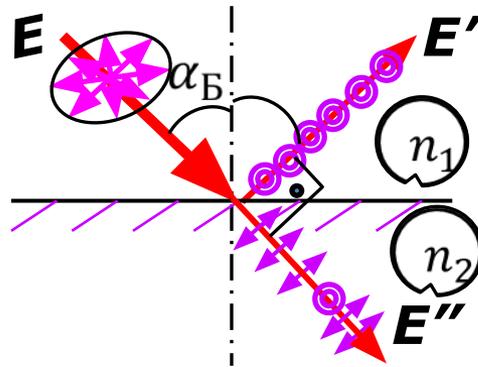
$$\operatorname{tg} \alpha = n_2/n_1 \quad (6)$$

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}).

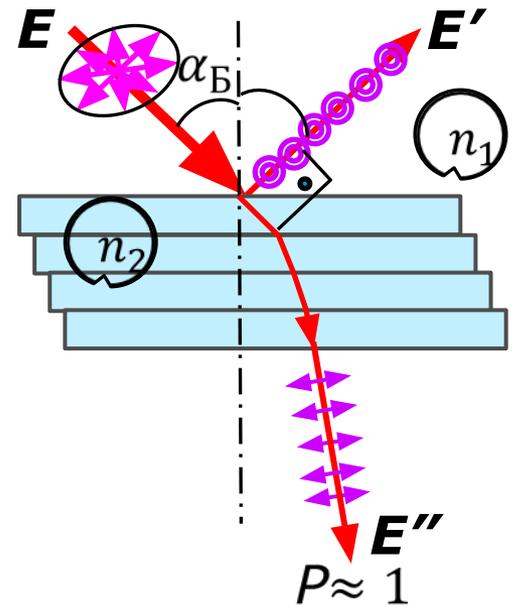
Замечание. Можно легко убедиться, что в этом случае отраженный и преломленный луч - взаимно перпендикулярны.



Поляризация при отражении и преломлении

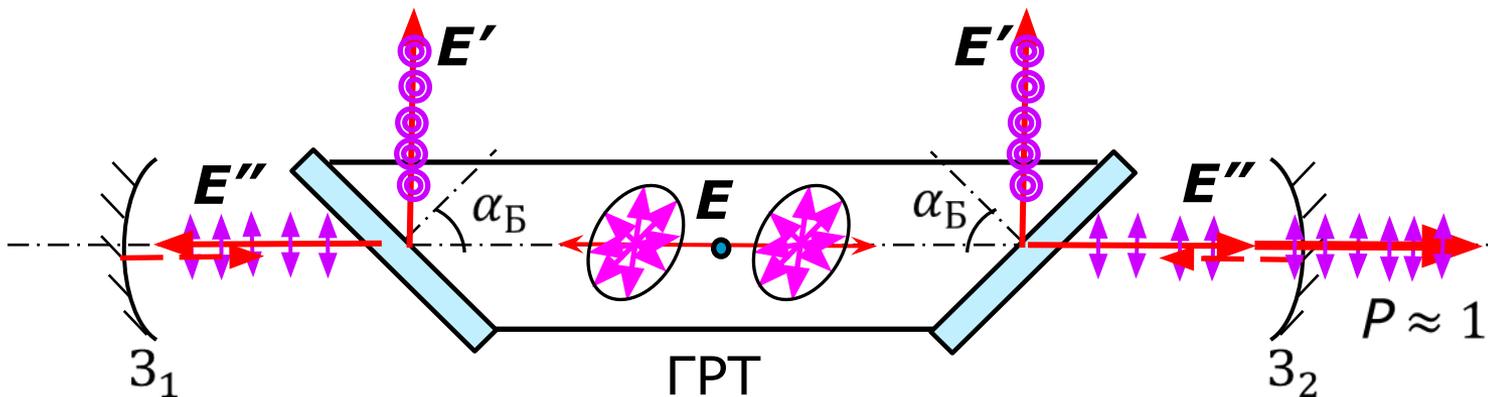
- Для повышения степени поляризации преломленного света падающий световой пучок направляют под углом Брюстера α_B на целую «стопу» одинаковых и параллельных друг другу пластинок; и за счет ряда последовательных отражений и преломлений получающий проходящий через «стопу» свет практически полностью плоскополяризованным 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 α 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 β - 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 \mathbf{E} соответственно перпендикулярны и параллельны плоскости падения.

Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении

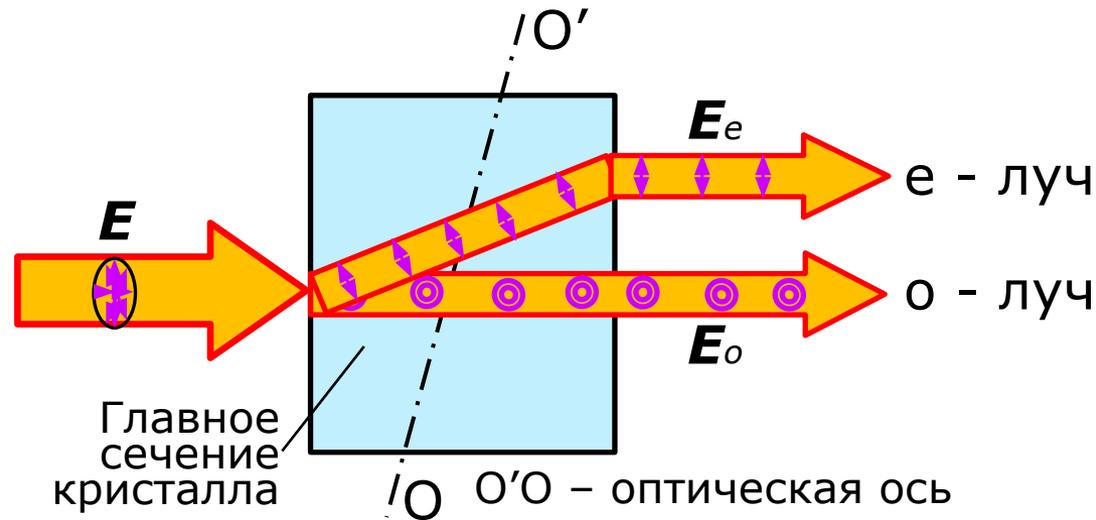
При прохождении света через все прозрачные кристаллы-диэлектрики, за исключением принадлежащих к кубической кристаллической системе, типа NaCl, наблюдается **явление двойного лучепреломления**. Это явление связано с оптической анизотропией кристаллов, т. е. зависимостью характеристик света от направления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

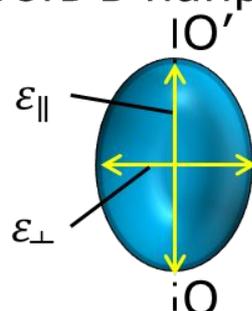
Распространение световых волн в одноосных кристаллах

- Показатели преломления и скорости обыкновенного и необыкновенного лучей

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

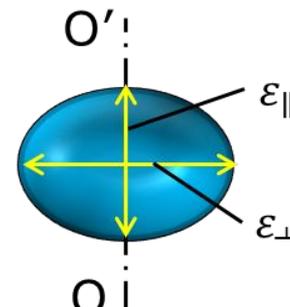
В то время как скорость обыкновенного луча v_o не зависит от направления в кристалле, скорость необыкновенного луча v_e по мере отклонения его от направления оптической оси (вдоль которой: $v_e = v_o$) будет все больше отличаться, достигая максимального различия в направлении, перпендикулярном оптической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

В одноосных кристаллах диэлектрическая проницаемость ε зависит от направления; здесь различают: ε_{\perp} - проницаемость в направлении, перпендикулярном оптической оси кристалла, и ε_{\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) $n_e = c/v_e$.

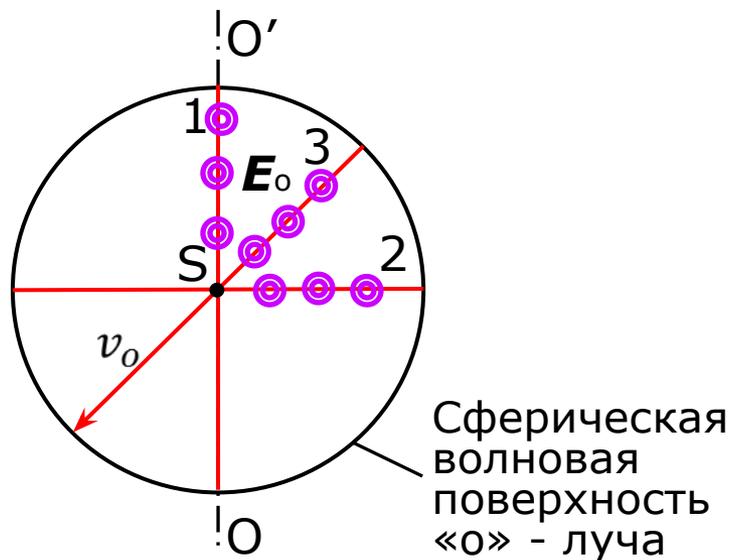
Пример. Для длины волны $\lambda = 550$ нм у кристаллов разной ориентации (вообще, n_o и n_e – несколько зависят от λ) имеем (см. таблица):

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

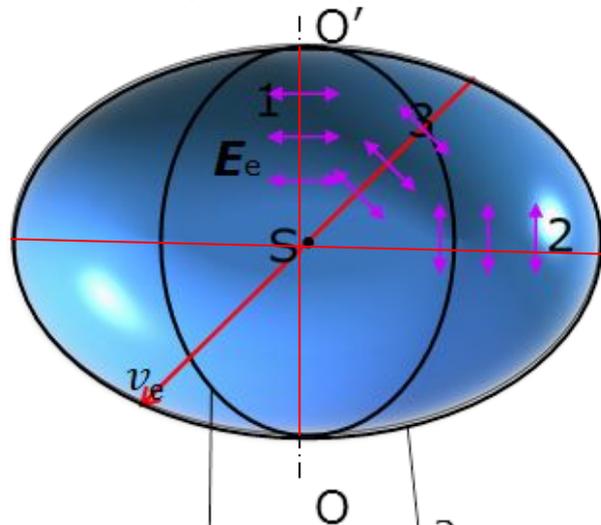
■ В обыкновенном луче колебания вектора \mathbf{E}_o , как известно, происходят в направлении, перпендикулярном к главному сечению кристалла, поэтому при любом направлении обыкновенного луча вектор \mathbf{E}_o образует с оптической осью угол $\alpha = \pi/2$, и скорость «о»-луча будет одна и та же: $v_o = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}}$. 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 α - разный (для направления 1 - $\alpha = \pi/2$, для направления 2 - $\alpha = 0$, для направления 3 - α - 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.

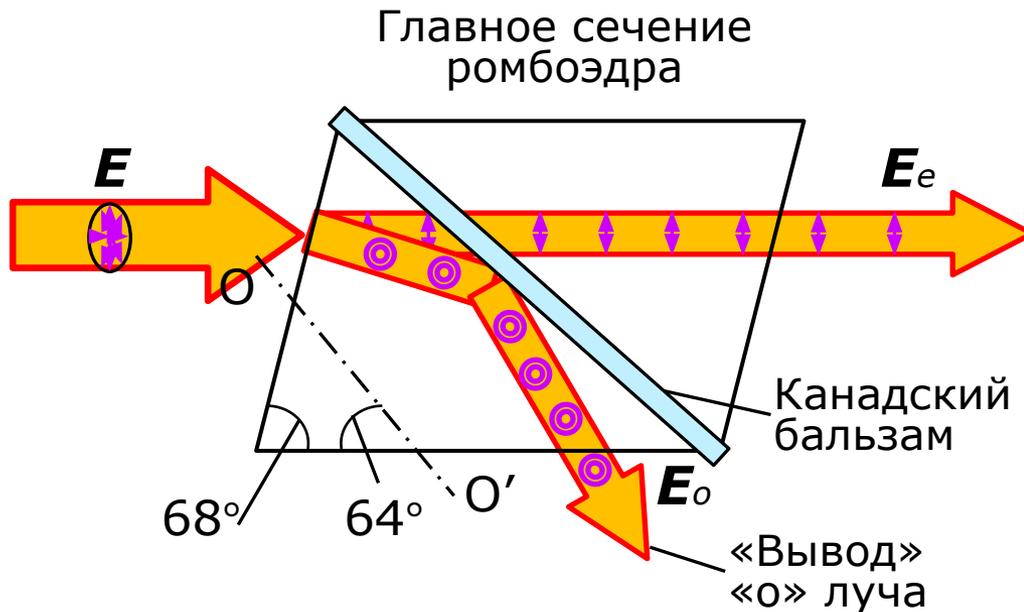
Определение. В зависимости от того, какая из скоростей, v_0 или v_e , больше, одноосные кристаллы подразделяют на *положительные* и *отрицательные*; у положительных кристаллов: $v_0 > v_e$ ($n_0 < n_e$), а у отрицательных кристаллов: $v_0 < v_e$ ($n_0 > n_e$) (см. рис. и табл.).

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 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 «о» (от бальзама), который «выводится» из призмы и далее не используется.

Необыкновенный луч «е», 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.

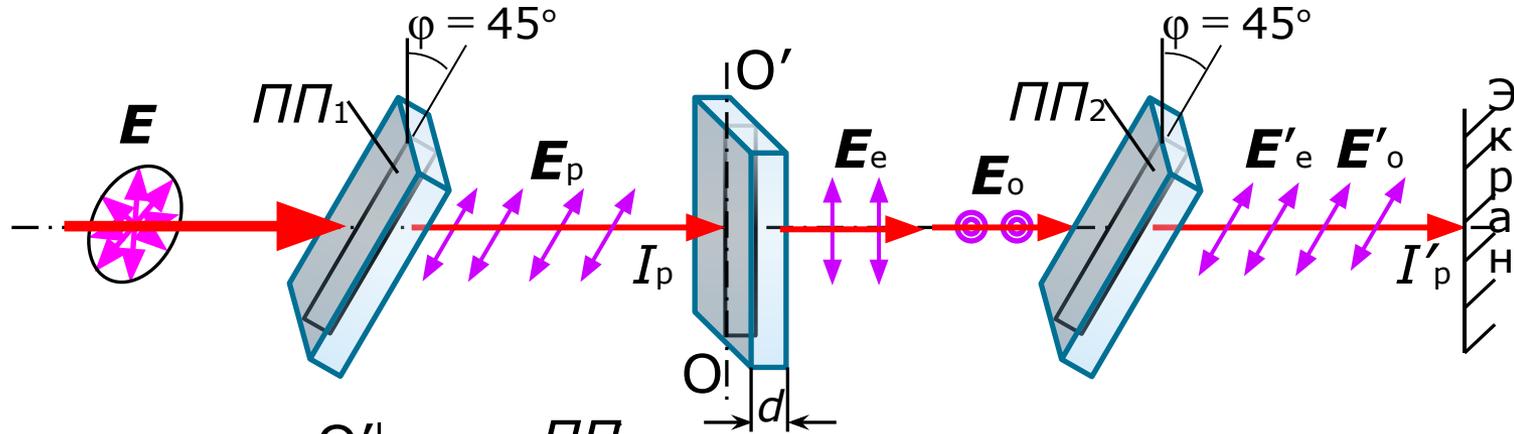
Интерференция поляризованных волн

- 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 λ_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).

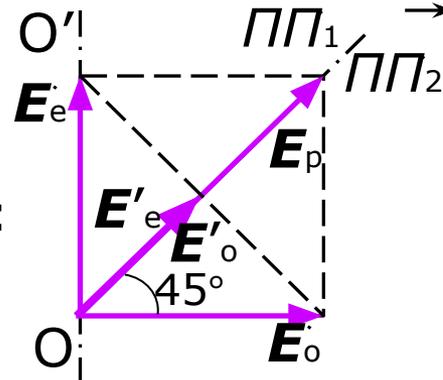
Интерференция поляризованных лучей

- 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.