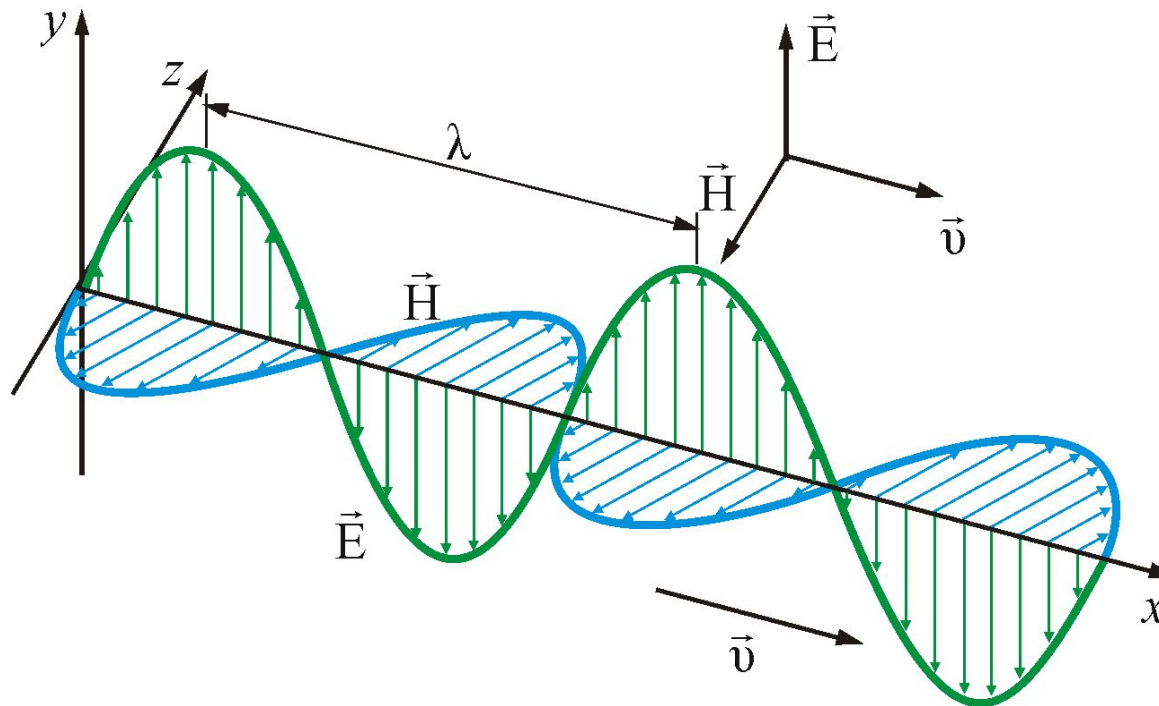


Поляризация света

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).

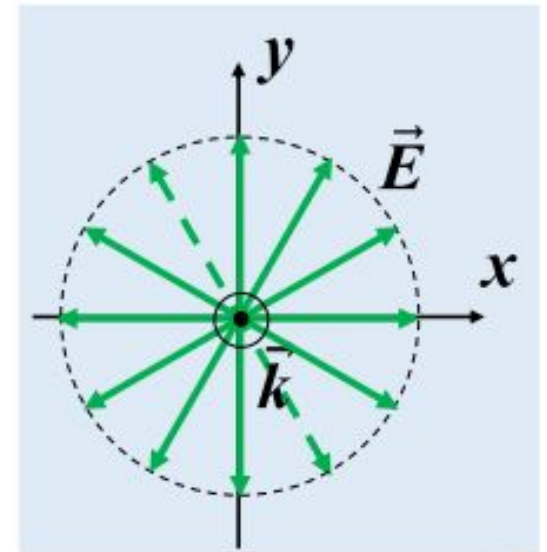
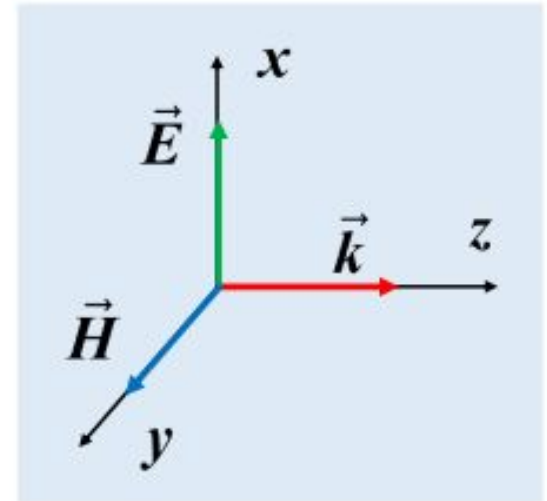


Поляризованный и естественный свет

- 1) Электромагнитные волны поперечны

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

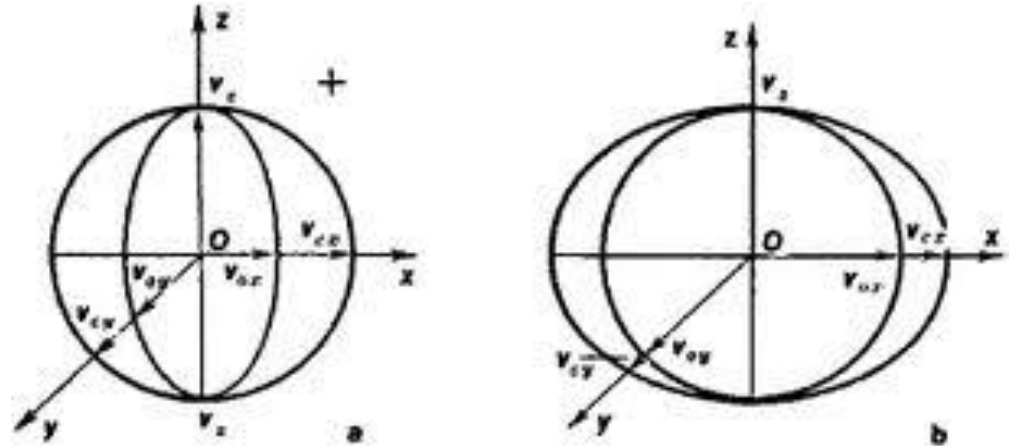
- 2) У **естественного (неполяризованного)** света все направления векторов \vec{E} и \vec{H} равновероятны



Распространение света в анизотропной среде

Среда называется *оптически анизотропной*, если ее оптические свойства (скорость распространения света или показатели преломления) различны в различных направлениях.

Скорость света в кристаллах зависит не только от направления распространения света, но и от ориентировки вектора E относительно плоскости падения. В кристаллах существует одно или несколько направлений, вдоль которых скорость света не зависит от ориентировки вектора E . Эти направления называются *оптическими осями* кристалла.



Оптическая ось это не одна какая-то линия в кристалле, наподобие оси симметрии, а определенное направление в кристалле; все прямые, параллельные этому направлению и взятые в любом месте кристалла, являются оптическими осями

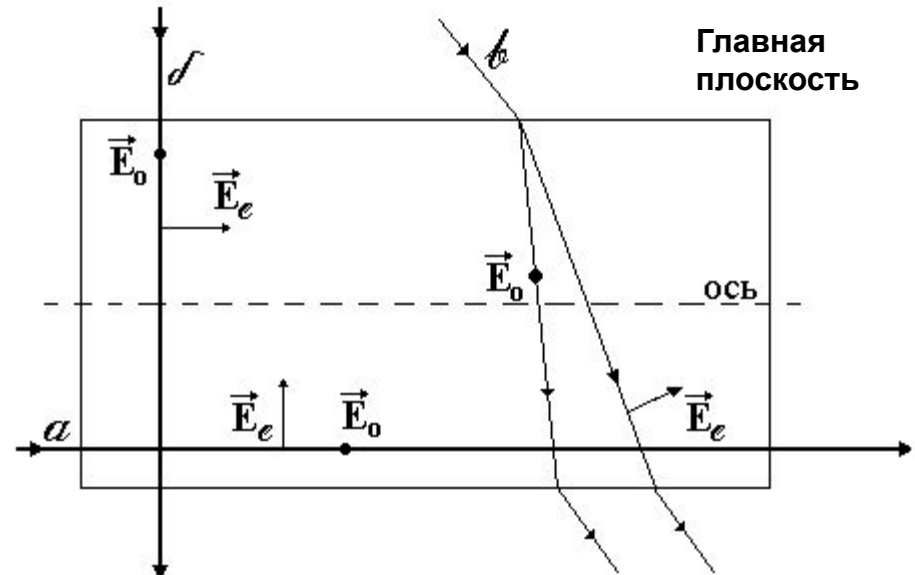
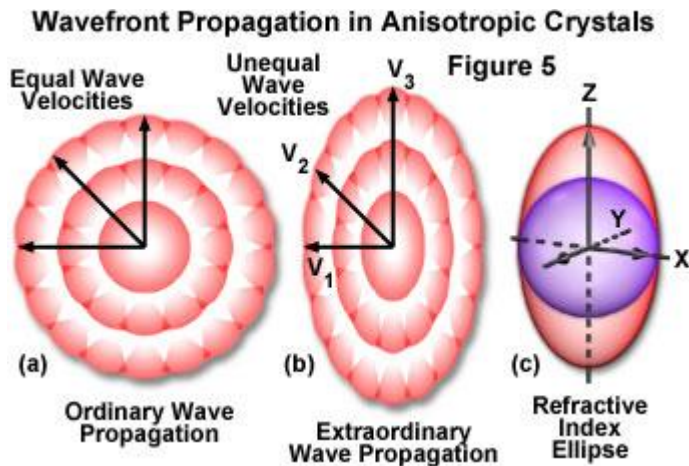
Так как вектор E перпендикулярен к своему лучу, то при распространении света вдоль оптической оси вектор E при всех его различных ориентировках в пространстве всегда перпендикулярен также и к оптической оси.

Распространение света в анизотропной среде

Плоскость, проходящая через данный луч и оптическую ось кристалла - **главная плоскость**. В кристаллах различают:

- 1) обыкновенные лучи, у которых вектор \vec{E} ориентирован перпендикулярно к главной плоскости (следовательно, перпендикулярен и к оптической оси);
- 2) необыкновенные лучи, у которых вектор \vec{E} лежит в главной плоскости (следовательно, образует с оптической осью некоторые углы).

Обыкновенные лучи распространяются по всем направлениям в кристалле с одной и той же скоростью c_0 . Необыкновенные лучи распространяются в кристалле с различными скоростями в зависимости от угла между вектором \vec{E} и оптической осью c_e .



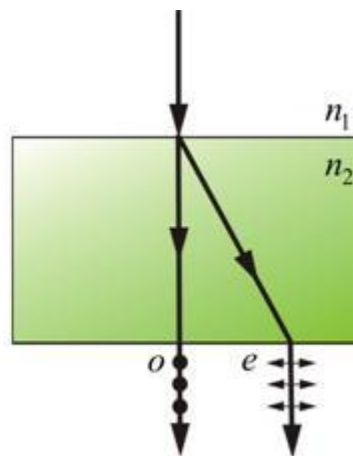
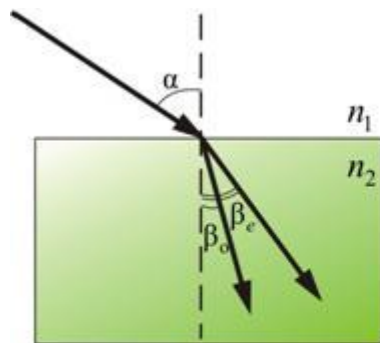
Оптическая ось кристалла – направление в кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления

Главная плоскость – плоскость, проходящая через направление луча света и оптическую ось кристалла

Колебания светового вектора в **обыкновенном** луче происходят **перпендикулярно** главной плоскости

В **необыкновенном** – в главной плоскости

Обыкновенный и необыкновенный лучи являются полностью поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях.



Для необыкновенной волны обычные законы преломления не соблюдаются

Так, по первому закону преломления $\sin\alpha/\sin\gamma = \text{const}$, поэтому при $\alpha = 0$ должно быть $\gamma = 0$. Это имеет место для обыкновенного луча и не соблюдается для необыкновенного.

Кроме того, если оптическая ось не лежит в плоскости падения, то необыкновенный луч также выйдет из плоскости падения, следовательно, для него не соблюдается и второй закон преломления (луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр в точке падения лежат в одной плоскости).

Еще одна особенность распространения света в анизотропных средах: направление распространения необыкновенной волны не перпендикулярно к ее фронту.

Двойное лучепреломление

- В обыкновенном луче колебания светового вектора происходят в направлении, перпендикулярном к главному сечению кристалла, поэтому при любом направлении о-луча, вектор E образует с оптической осью кристалла угол $\pi/2$ и скорость световой волны будет одна и та же, равная

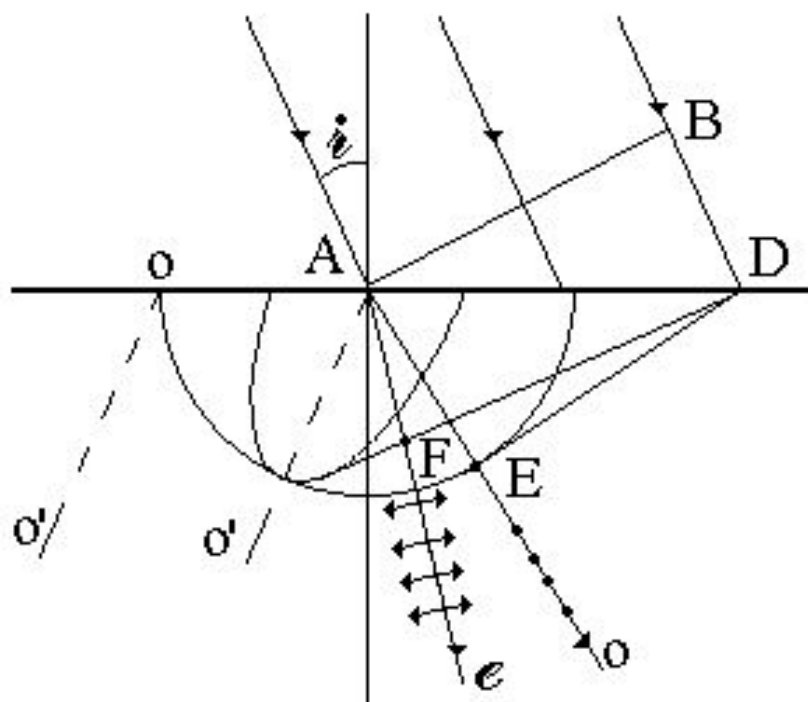
$$v_0 = c / \sqrt{\epsilon_{\perp}}$$

- Колебания в e-луче совершаются в главном сечении, поэтому для разных лучей направления вектора E образуют с оптической осью разные углы. Поэтому скорость e-луча изменяется от

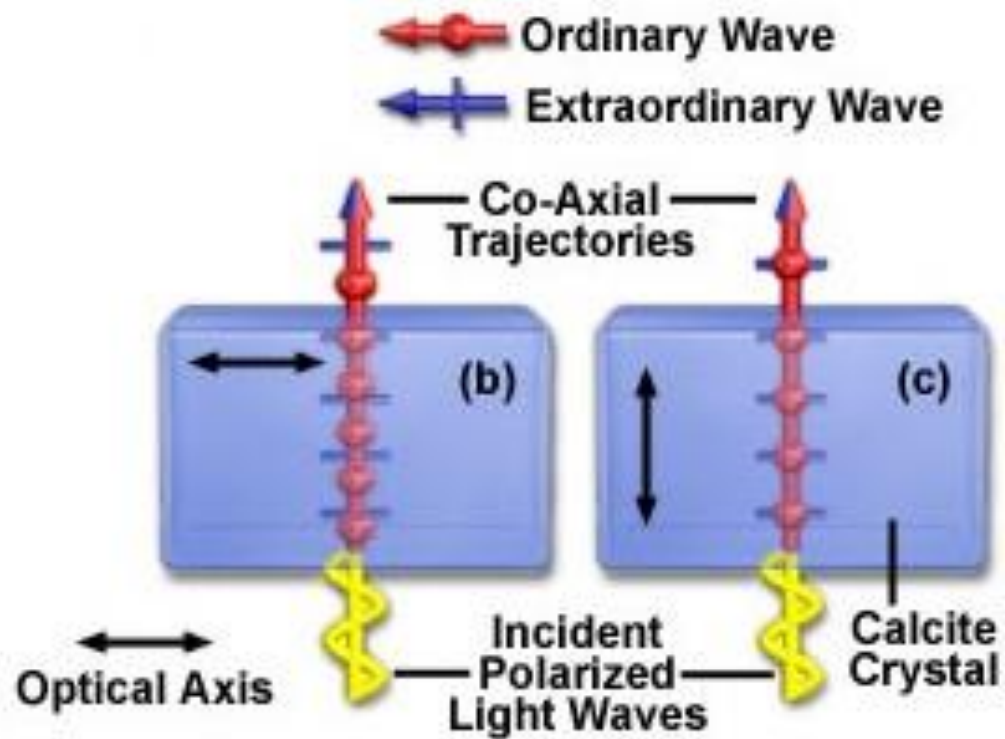
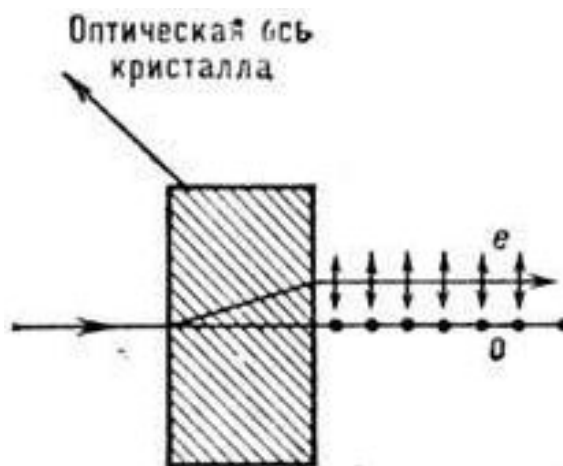
$$v_0 = c / \sqrt{\epsilon_{\perp}} \quad \text{до} \quad v_e = c / \sqrt{\epsilon_{\parallel}}$$

Двойное лучепреломление

Волновая поверхность обыкновенного луча – сфера,
волновая поверхность необыкновенного луча –
эллипсоид вращения.



Ход обыкновенного и необыкновенного лучей при падении света на анизотропный кристалл под различными углами к оптической оси

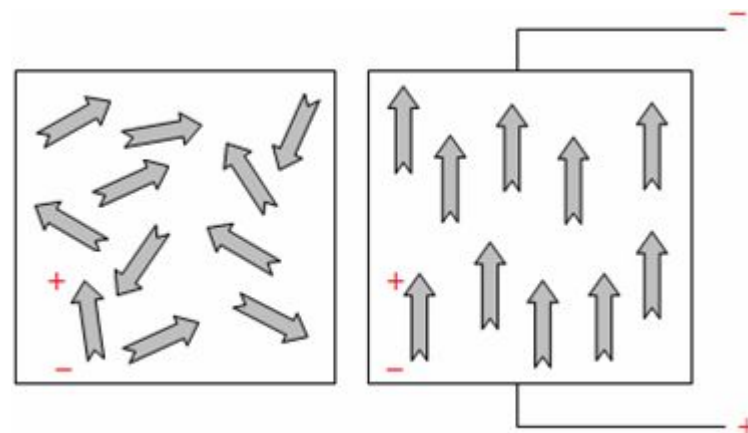
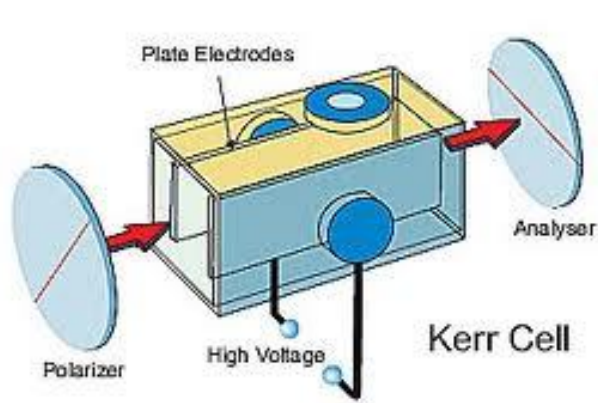


Двупреломление в анизотропных кристаллах

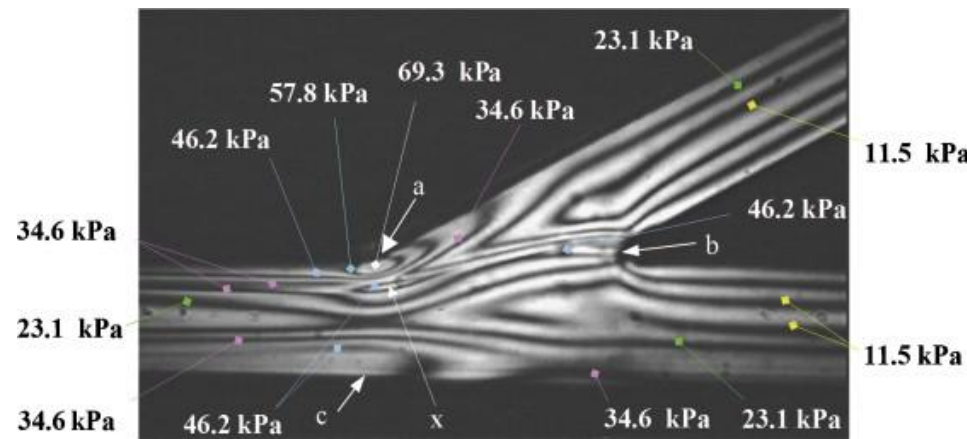


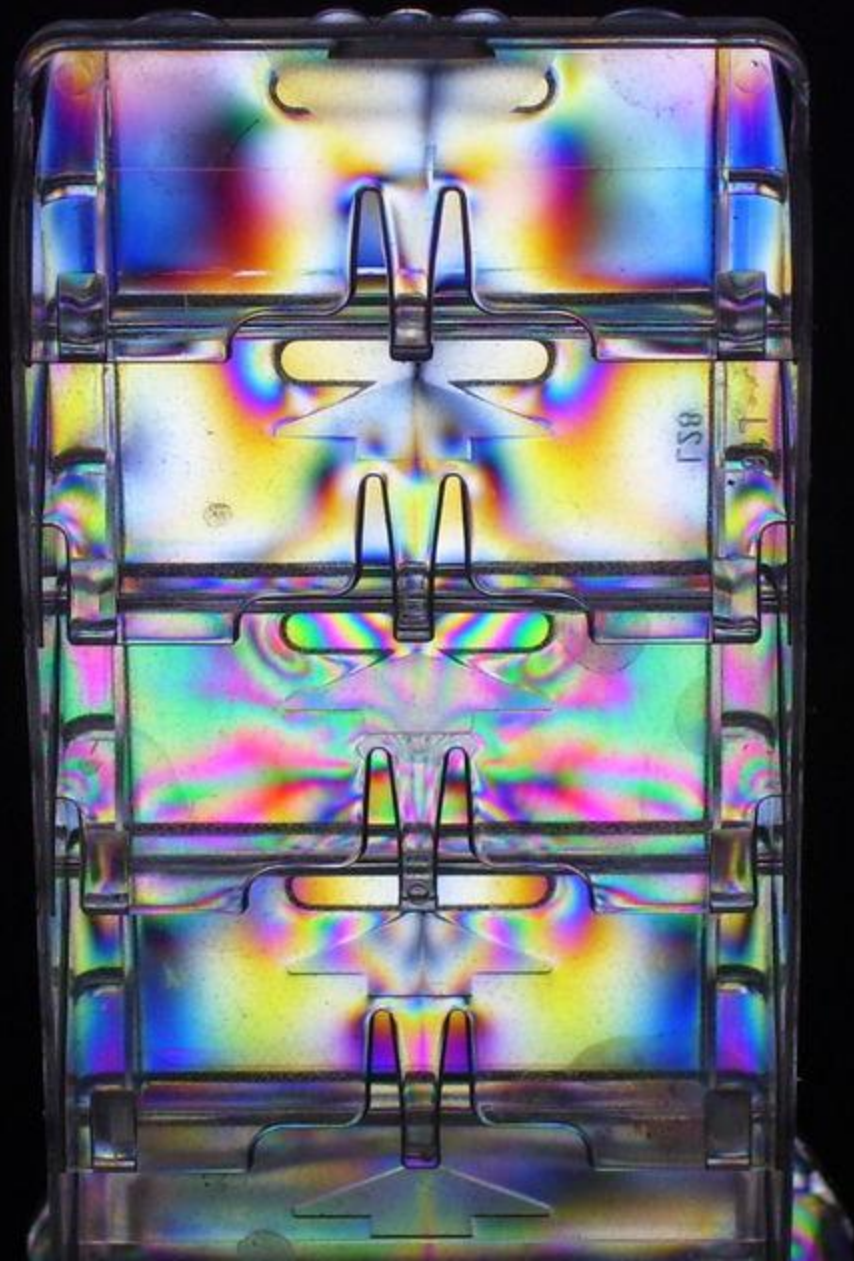
Искусственная анизотропия

1) Анизотропия за счет приложения электрического поля (эффект Керра)



2) Анизотропия за счет механической деформации





Способы получения поляризованного света

Свет, испускаемый различными источниками, в частности раскаленными твердыми телами или светящимися газами, обычно естественный. Это объясняется тем, что элементарные источники света — атомы и молекулы — движутся беспорядочно и испускаемые ими световые волны имеют всевозможные направления колебаний вектора E .

1) Лазеры.

Свет генерируемый лазером является плоскополяризованным за счет того, что имеет место не спонтанное, как в случае нагретых тел, а стимулированное излучение, при котором испускаемые фотоны в точности совпадают по частоте, фазе и направлению с фотонами, стимулировавшими излучение возбужденных атомов.

2) Рассеяние света.

Свет, рассеянный в направлении перпендикулярном пучку плоско поляризован.

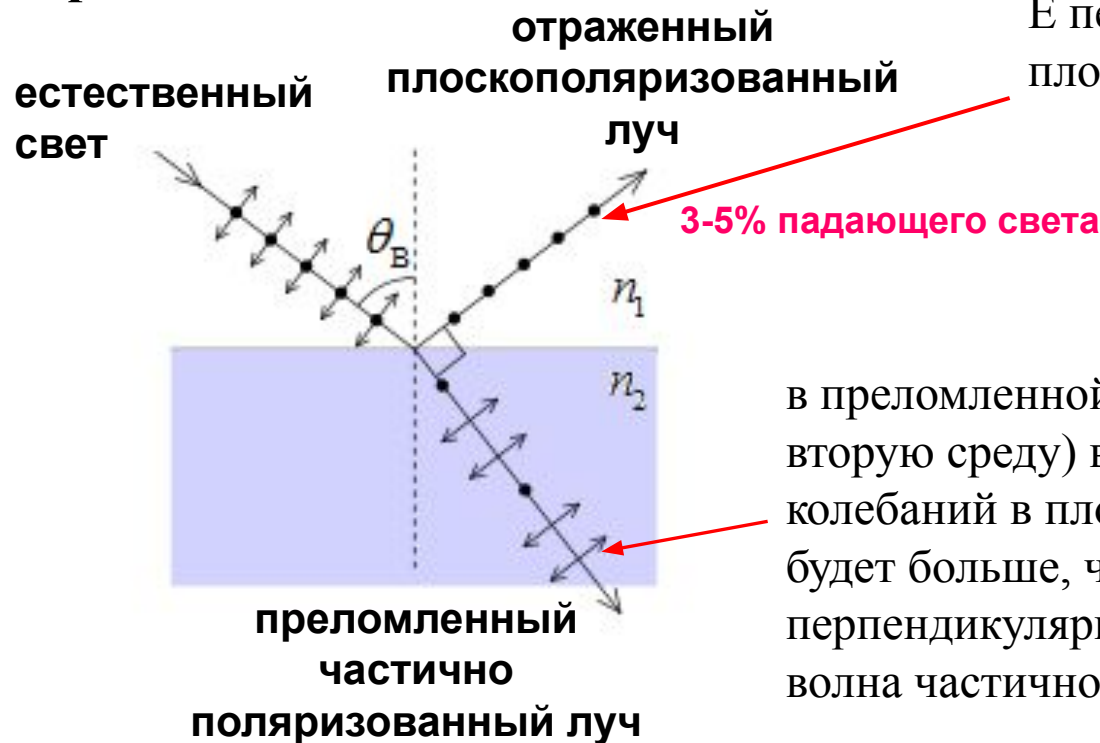
3) Поляризация при отражении и преломлении.

Если естественный свет падает на отражающую поверхность диэлектрика (стекла, слюды и т. п.) под углом α , удовлетворяющим условию Брюстера:

$$tg\Theta = \frac{n_2}{n_1}$$

то отраженная волна оказывается плоскополяризованной

«черное зеркало»



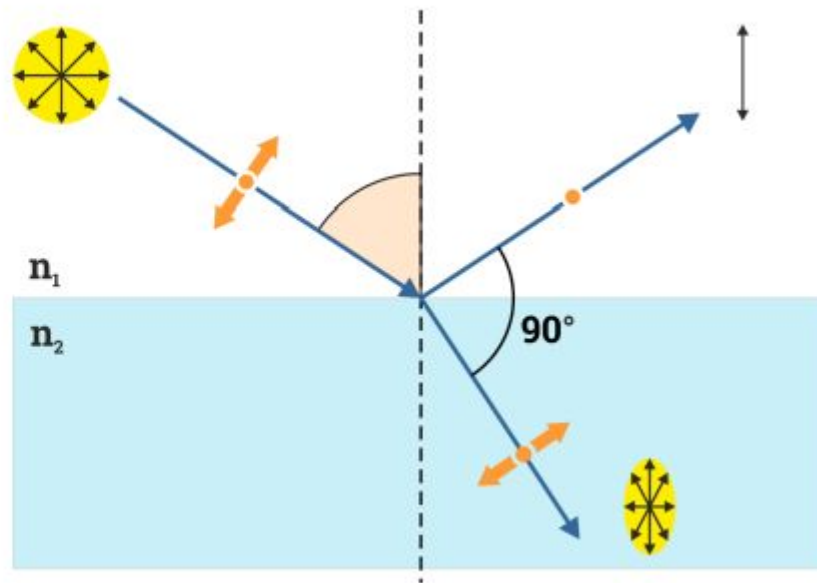
У отраженной волны вектор E перпендикулярен к плоскости падения

в преломленной (прошедшей во вторую среду) волне энергия колебаний в плоскости падения будет больше, чем в перпендикулярной плоскости, и волна частично поляризована.

Закон Брюстера

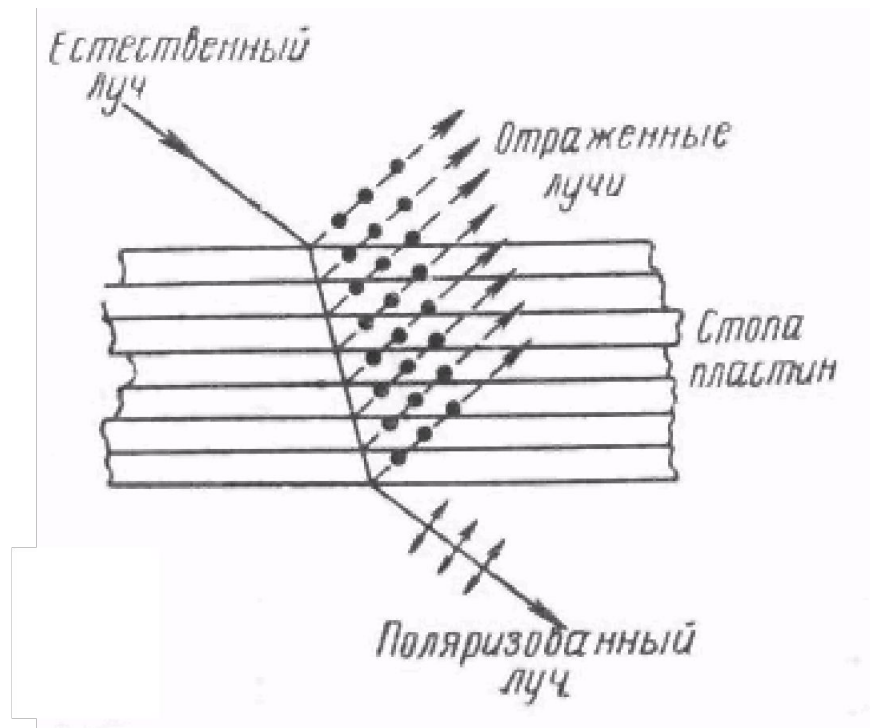
При угле падения $i_{\text{БР}}$
**отраженный луч является
плоскополяризованным.**
Преломленный же луч
поляризуется максимально,
но не полностью

$$\operatorname{tg} i_{\text{БР}} = n_{12} = \frac{n_1}{n_2}$$



3) Поляризация при отражении и преломлении.

На практике пользуются многократным отражением волны от «стопы пластин»; отраженные лучи уносят колебания, перпендикулярные к плоскости падения, и проходящий луч, постепенно «очищаясь» от этих колебаний, становится почти плоско поляризованным (с вектором E , лежащим в плоскости падения).



Стопа Столетова

Просветление оптики

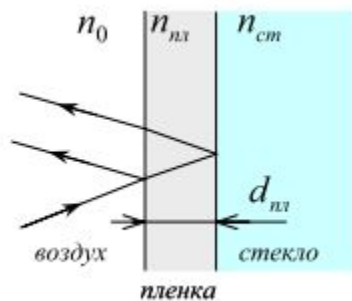
При прохождении света через сложные оптические системы с большим количеством оптических деталей на каждой поверхности теряется около 4% света. В результате через систему может пройти всего 20% светового потока. Применение тонкослойных пленок для ослабления френелевского отражения называется **просветлением оптики**. Просветляющие покрытия могут уменьшить отражение в 3-4 раза.

Принцип действия просветляющих покрытий основан на явлении интерференции. На поверхность оптической детали наносят тонкую пленку, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла $n_{пл} < n_{ст}$. Луч, отраженный от поверхности пленки, и луч, отраженный от границы пленка-стекло когерентны. Можно подобрать толщину пленки так, чтобы при интерференции они погасили бы друг друга, усиливая, таким образом, проходящий свет

Для этого:

Амплитуды двух отраженных волн должны быть равны

Фазы должны отличаться на половину периодов



$$E_1 - E_2 = \frac{\lambda}{2}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$$

Необходимо:

$$n_{пл} = \sqrt{n_{сп} \cdot n_{ст}}$$

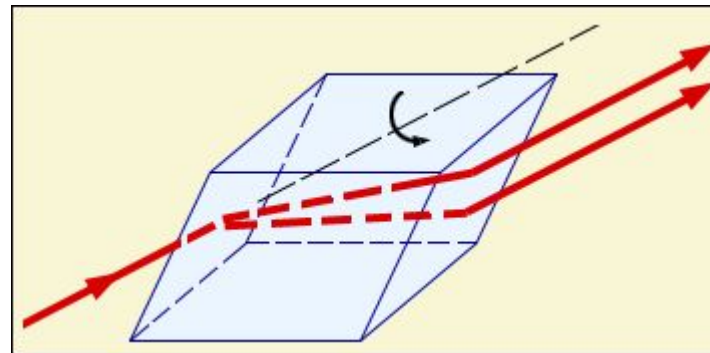
Если внешняя среда - воздух

$$n_{пл} = \sqrt{n_{ст}}$$

$$n_{пл} \cdot d_{пл} = \frac{\lambda}{4}$$

4) Поляризация при двойном лучепреломлении в кристаллах

Обыкновенный и необыкновенный лучи имеют в кристалле различные скорости распространения, следовательно, различные показатели преломления n_o и n_e ; этим объясняется двойное лучепреломление в точке падения волны на грань призмы



Это явление наблюдается в *оптически анизотропной среде*, если ее оптические свойства (скорость распространения света или показатели преломления) различны в различных направлениях.

в кристаллах существует одно или несколько направлений, вдоль которых скорость света не зависит от ориентировки вектора E . Эти направления называются оптическими осями кристалла.

Так как вектор E перпендикулярен к своему лучу, то при распространении света вдоль оптической оси вектор E при всех его различных ориентировках в пространстве всегда перпендикулярен также и к оптической оси.

Часто в качестве поляризатора используется так называемая призма Николя. Это призма из исландского шпата, разрезанная по диагонали и склеенная канадским бальзамом



Показатель преломления канадского бальзама лежит между значениями показателей n_o и n_e для обыкновенного и необыкновенного лучей в исландском шпате ($n_o > n > n_e$). За счет этого обыкновенный луч претерпевает на прослойке бальзама полное внутреннее отражение и отклоняется в сторону. Необыкновенный луч свободно проходит через эту прослойку и выходит из призмы.

5) Поляризация при прохождении света через поглощающие анизотропные вещества.

Некоторые кристаллические вещества обладают различным поглощением для лучей с различными ориентировками вектора E относительно осей этих кристаллов. Например, турмалиновая пластинка толщиной 0,1 мм почти полностью поглощает обыкновенные лучи (вектор E_0 перпендикулярен оптической оси), а необыкновенные лучи частично поглощаются, частично выходят из пластинки. Если на такую пластинку светит естественный свет, то из пластинки выходит только необыкновенный плоскополяризованный луч. Коэффициент поглощения таких веществ зависит от длины волны. Поэтому, если на такие вещества падает белый свет, то вышедший свет получается окрашенным, причем в различных направлениях окраска различна.

Нанося на стекло тонкий слой чешуйчатых кристалликов турмалина или герпатита получают так называемые поляроиды



Вращение плоскости поляризации

для оптически активных **кристаллов** и **чистых жидкостей**

$$\varphi = \alpha d$$

d – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе,

$\alpha, [\alpha]$ – удельное вращение, численно равное углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины

для оптически активных **растворов**

$$\varphi = [\alpha] C d$$

C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе, кг/м³

Численно равно углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины.

Оптическая активность обусловлена:

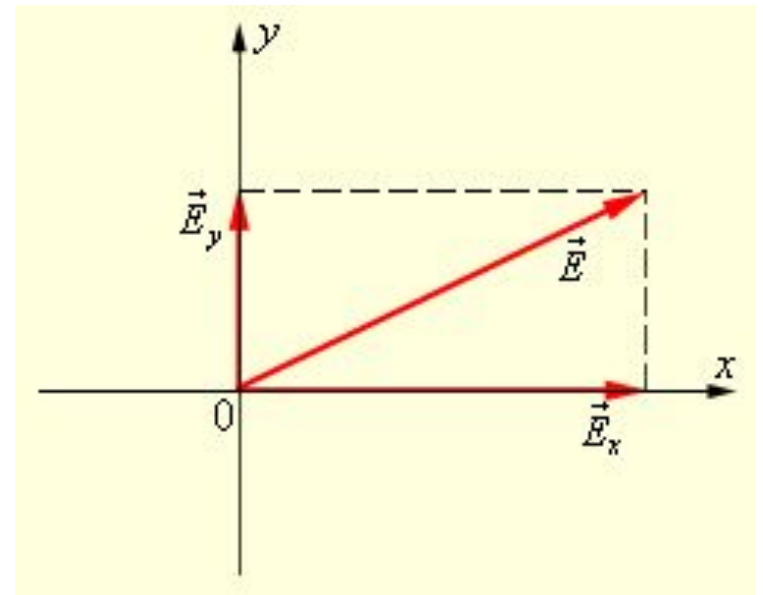
- Строением молекул вещества
- Особенности расположения частиц в кристаллической решетке

Интерференция поляризованных лучей

Интерференция поляризованных лучей имеет некоторые особенности по сравнению с интерференцией естественных лучей. Так, для взаимного гашения двух монохроматических плоскополяризованных когерентных волн, кроме равенства амплитуд векторов E_1 и E_2 и наличия разности фаз, необходимо одинаковое направление колебаний векторов интерферирующих лучей, иначе суммарный вектор $E = E_1 + E_2$ не будет равен нулю.

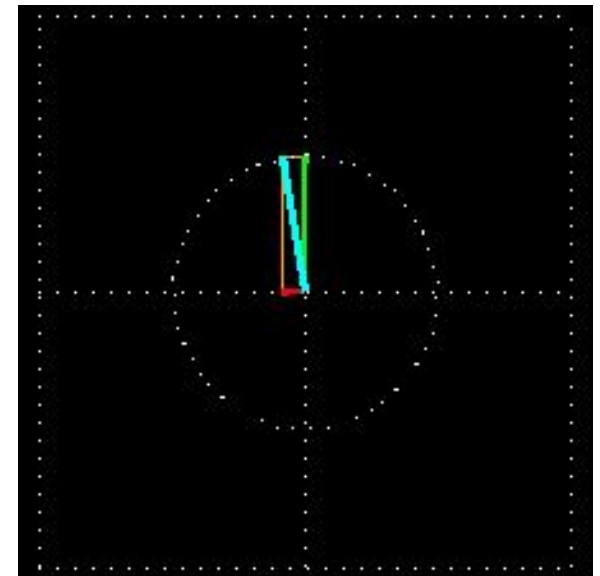
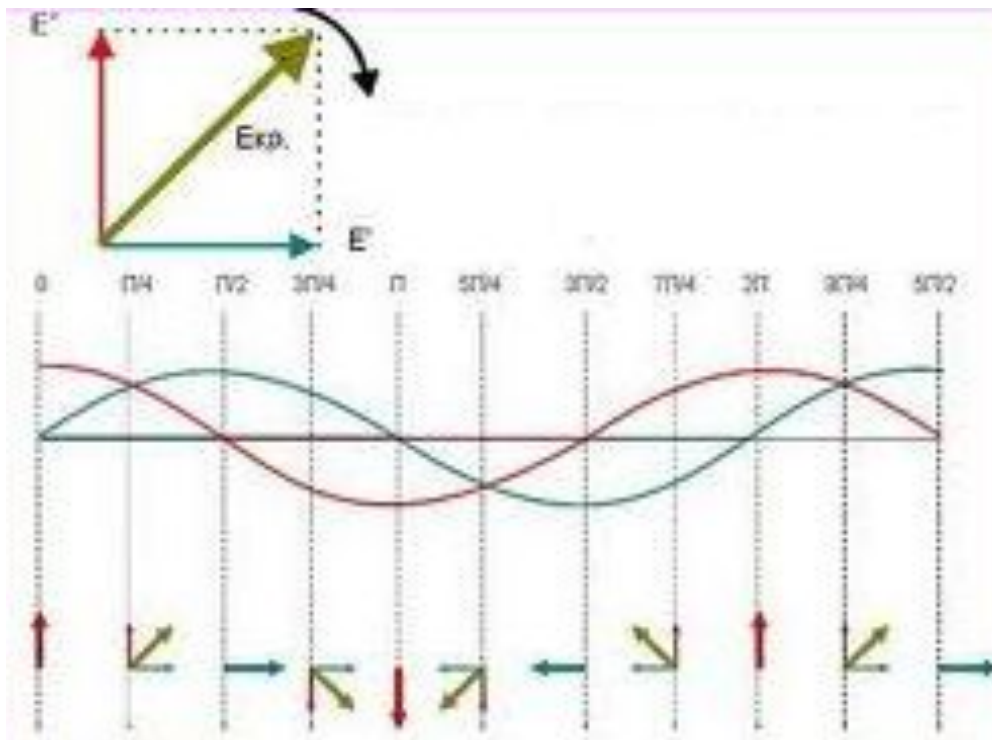
Рассмотрим интерференцию лучей, у которых векторы E колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Рассмотрим два случая:

- а) во всех точках луча разность фаз векторов E_1 и E_2 равна нулю.
В результате интерференции таких волн получается плоскополяризованная волна, но с иной ориентировкой плоскости колебаний суммарного вектора E .



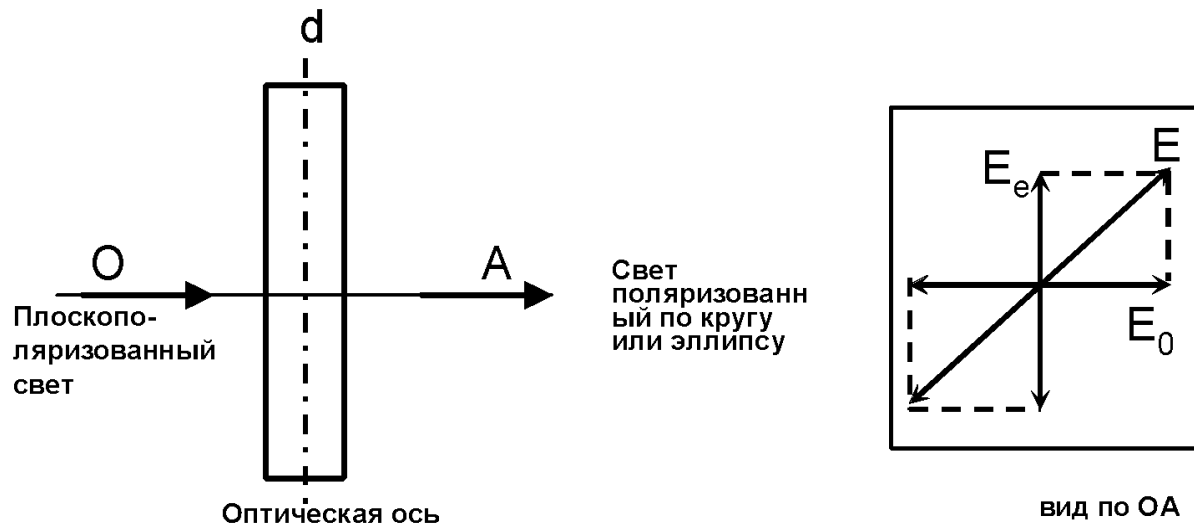
Интерференция поляризованных лучей

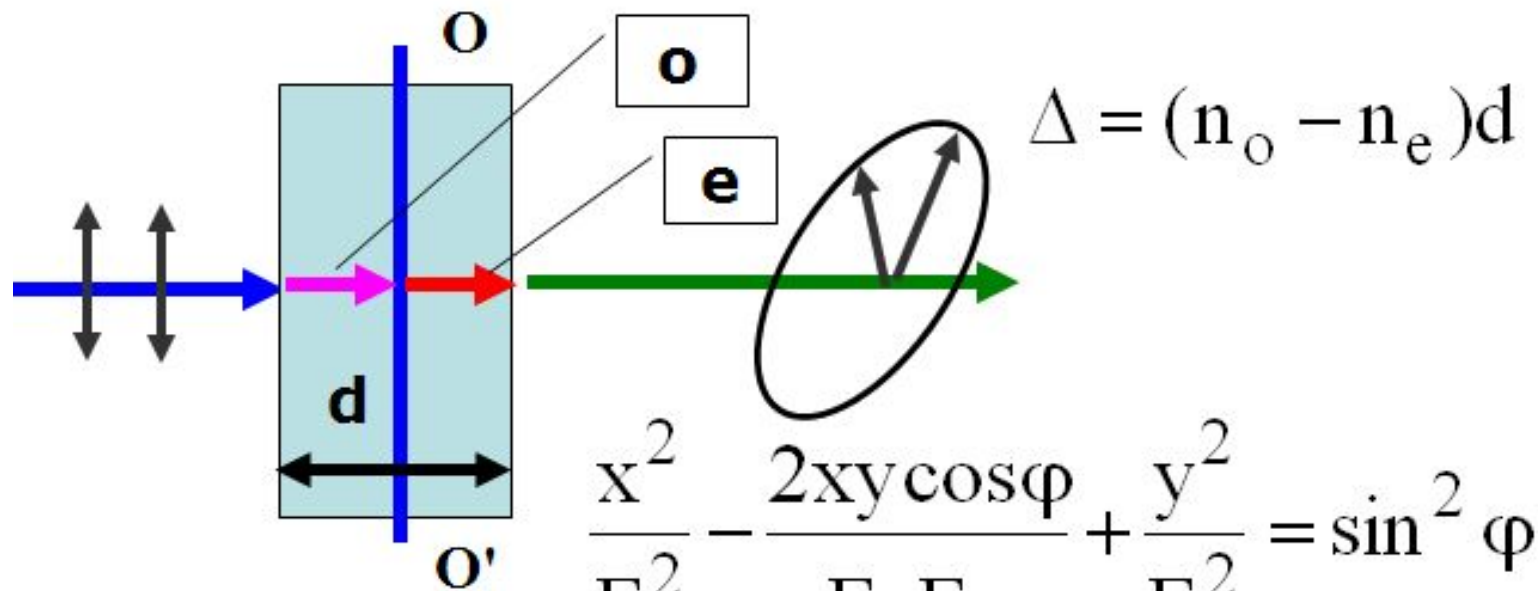
б) фазы векторов E_1 и E_2 отличаются на φ . В этом случае суммарный вектор вращается вдоль луча, сохраняя свое значение при $E_1 = E_2$ или меняя его при $E_1 \neq E_2$. При интерференции двух плоскополяризованных лучей с перпендикулярными плоскостями колебаний разность фаз между векторами напряженности равна нечетному числу $\pi/2$, то результирующий луч поляризован по кругу при $E_1 = E_2$ или по эллипсу при $E_1 \neq E_2$



Четвертьволновая пластинка

Такую интерференцию можно получить, пропуская плоскополяризованную волну через кристаллическую пластинку определенной толщины, вырезанную параллельно оптической оси. Вектор E волны разлагается в кристалле на обыкновенную E_o и необыкновенную E_e составляющие, распространяющиеся с разными скоростями c_o и c_e . Если нам необходимо получить разность фаз между E_o и E_e по выходе из пластинки, равную $\pi/2$, то нужно подобрать такую толщину d этой пластинки, чтобы один луч вышел раньше (или позже) другого луча на четверть периода T , т.е. $d/c_o - d/c_e = T/4$





$$\frac{x^2}{E_o^2} - \frac{2xy \cos \varphi}{E_o E_e} + \frac{y^2}{E_e^2} = \sin^2 \varphi$$

$\Delta = (m + \frac{1}{4})\lambda$ **Пластинка в четверть волны**

$\Delta = (m + \frac{1}{2})\lambda$ **Пластинка в пол волны**

$$\frac{x^2}{E_o^2} + \frac{y^2}{E_e^2} = 1$$

Умножив это равенство на скорость света d в воздухе c и обозначив $c/c_0 = n_0$; $c/c_e = n_e$; $Tc = \lambda$, получим формулу, по которой можно рассчитать толщину пластинки d : $d(n_0 - n_e) = \lambda/4$; $d = \lambda/4(n_0 - n_e)$.

Кристаллическая пластинка, удовлетворяющая этим условиям, называется «*пластинкой в четверть волны*». Она преобразует плоскополяризованный свет – в свет, поляризованный по кругу (если $\alpha = 45^\circ$ и, следовательно, $E_0 = E_e$) или по эллипсу ($\alpha \neq 45^\circ$, $E_0 \neq E_e$). Такая пластинка превращает луч, поляризованный по кругу или эллипсу, в плоско поляризованный луч. Очевидно, при помощи такой пластинки можно установить, поляризовано ли данное излучение по кругу (или эллипсу) или же оно является естественным.

