

ОПТИКА

Лекция №3

Поляризация света.

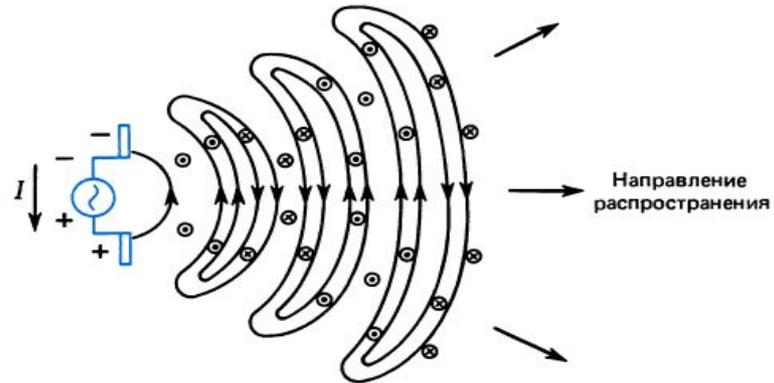
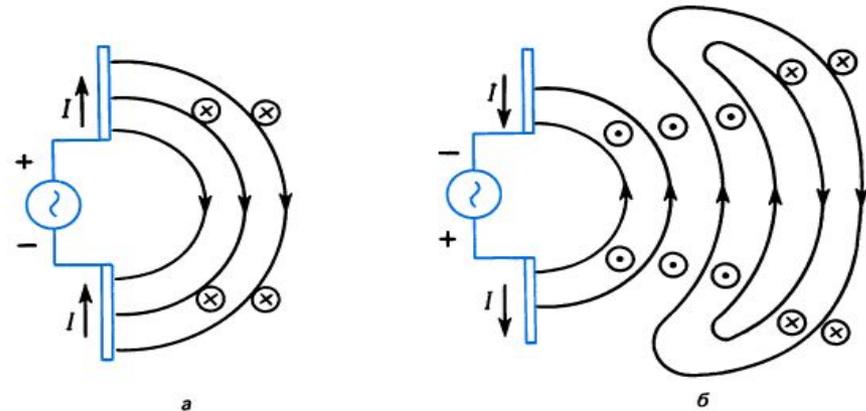
Электромагнитные волны

Антенна из двух проводящих стержней подключена к генератору переменного тока

I – направление перемещения положительных зарядов

Силовые линии магнитной индукции – окружности, охватывающие стержни

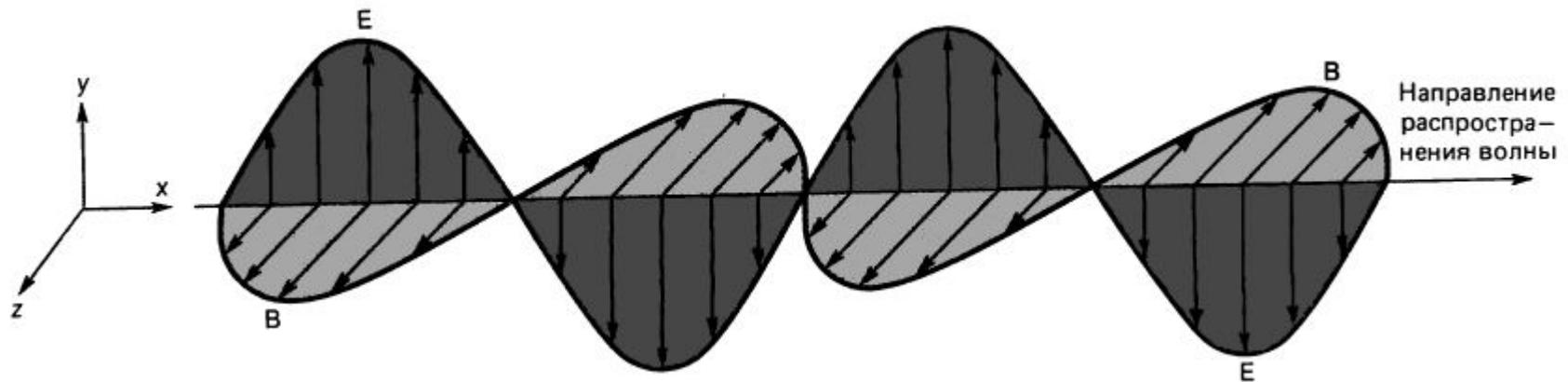
Электрическое и магнитное поля перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения



Меняется направление тока. Направление полей меняется, но прежние поля продолжают существовать. **Замыкание линий**

Распространение

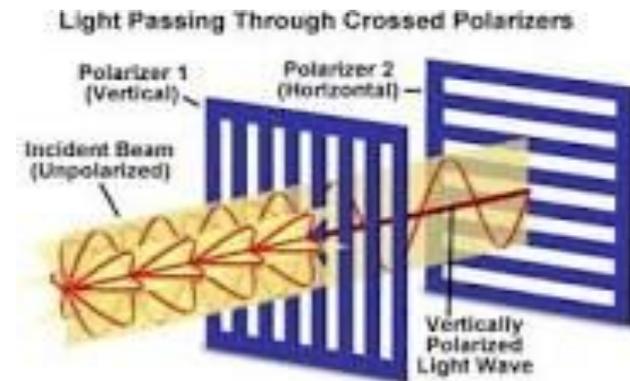
Электромагнитные волны



- Изменяющиеся электрическое и магнитное поля в вакууме в процессе взаимной генерации
- Электрическое и магнитное поля перпендикулярны
- Вся картина перемещается в направлении, перпендикулярном полям

Поперечность электромагнитных волн и поляризация

При распространении электромагнитной волны в ней совершают колебания вектор напряжённости электрического поля E и вектор магнитной индукции B . Эти векторы всегда взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.



Излучение макроскопического источника света (электрической лампочки, Солнца, свечи) является суммой излучений огромного числа атомов. Плоскость колебаний ориентирована случайным образом. В естественном свете все эффекты, связанные с поляризацией усредняются, и его называют неполяризованным. Для выделения из неполяризованного света части, обладающей желаемой поляризацией, используют поляризаторы (например, исландский шпат или турмалин, а также искусственные поляризаторы)

- **Поляризация света** – процесс упорядочения колебаний вектора напряжённости электрического поля световой волны при прохождении света сквозь некоторые вещества (при преломлении) или при отражении светового потока.
- **Поляризатор** – вещество (или устройство) служащее для преобразования естественного света в плоскополяризованный.
- **Плоскость поляризации** – плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны

Сложение компонент полей, типы поляризаций

$$E_x = A_1 \cos \omega t, \quad E_y = A_2 \cos (\omega t + \delta).$$

Угол между компонентами:
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos (\omega t + \delta)}{A_1 \cos \omega t}$$

1.  - случайная величина

 случайные скачки направления результирующего поля, естественный свет – суперпозиция некогерентных волн, поляризованных в перпендикулярных плоскостях

2. Поля когерентны, разность фаз – 0 или 

$\operatorname{tg} \varphi = \pm \frac{A_2}{A_1} = \operatorname{const.}$ - колебания в фиксированном направлении, поле плоскополяризовано (частный случай – линейная поляризация)

3.  $\delta = \pm \pi/2$  $\operatorname{tg} \varphi = \mp \operatorname{tg} \omega t$ - плоскость колебаний поворачивается вокруг направления луча с частотой , круговая поляризация

Интенсивности и выражения через комплекснозначные амплитуды для линейной и круговой поляризации - ?

Эллиптическая поляризация

$$x = A_1 \cos \omega t ; \quad y = A_2 \cos(\omega t + \Delta \phi)$$

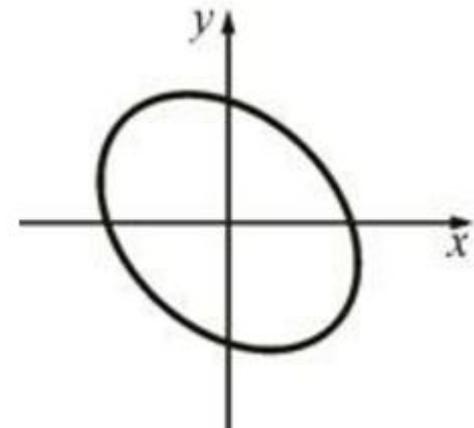
$$\frac{x}{A_1} = \cos \omega t \quad \sin \omega t = \sqrt{1 - \frac{x^2}{A_1^2}}$$

$$\frac{y}{A_2} = \cos \omega t \cos \Delta \phi - \sin \omega t \sin \Delta \phi = \frac{x}{A_1} \cos \Delta \phi - \sin \Delta \phi \sqrt{1 - \frac{x^2}{A_1^2}}$$

$$\left(\frac{y}{A_2} - \frac{x}{A_1} \cos \Delta \phi \right)^2 = \left(-\sin \Delta \phi \sqrt{1 - \frac{x^2}{A_1^2}} \right)^2$$

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} \cos^2 \Delta \phi - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos \Delta \phi = \sin^2 \Delta \phi - \frac{x^2}{A_1^2} \sin^2 \Delta \phi$$

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} (\cos^2 \Delta \phi + \sin^2 \Delta \phi) - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos \Delta \phi = \sin^2 \Delta \phi$$



Уравнение эллипса с произвольно расположенными осями

Частные случаи:

- прямая
- круг



$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\phi_2 - \phi_1) = \sin^2(\phi_2 - \phi_1)$$

Степень поляризации

Пропускание частично поляризованного света через поляризатор:

 ,  - пределы изменения интенсивности при повороте поляризатора вокруг оси луча (на )

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

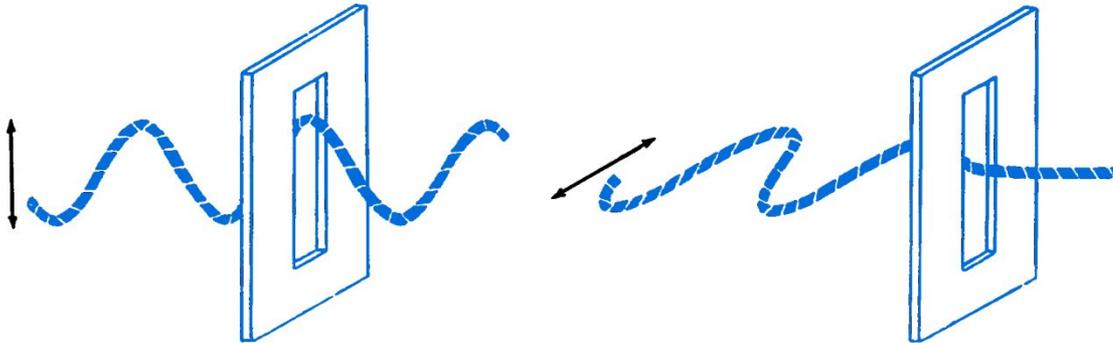
Естественный свет:



Плоскополяризованный свет:



Идея поляризатора



Поляризатор

Пропускает колебания параллельные **плоскости поляризатора** и задерживают колебания перпендикулярные этой плоскости

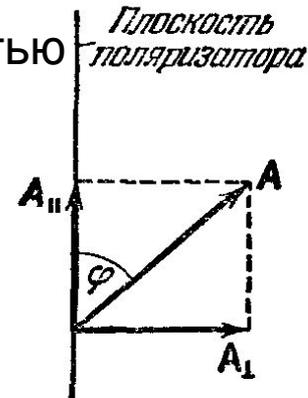
Скращенные поляризаторы

Если пропускать свет через последовательно установленные поляризаторы, плоскости которых перпендикулярны то будет наблюдаться затемнение.



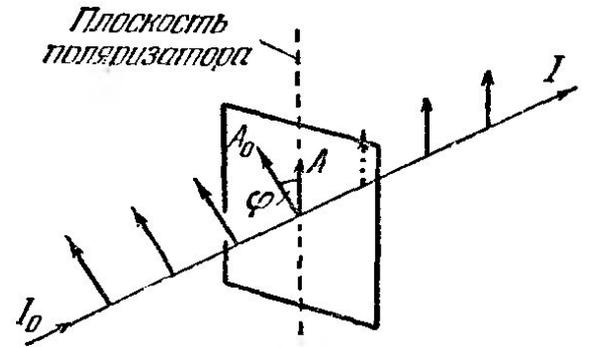
Закон Малюса

Колебания, составляющие угол с плоскостью поляризатора, можно разложить:



$$A_{\parallel}^2 = A^2 \cos^2 \varphi$$

Интенсивность:



Закон Малюса: для плоскополяризованного света $I = I_0 \cos^2 \varphi$.

В естественном свете все углы равновероятны:



Интенсивность естественного света, прошедшего через два поляризатора:

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$

В случае круговой поляризации интенсивность прошедшего света не меняется при вращении поляризатора

Поляризация при отражении и преломлении

Падение света на границу раздела двух **диэлектриков**

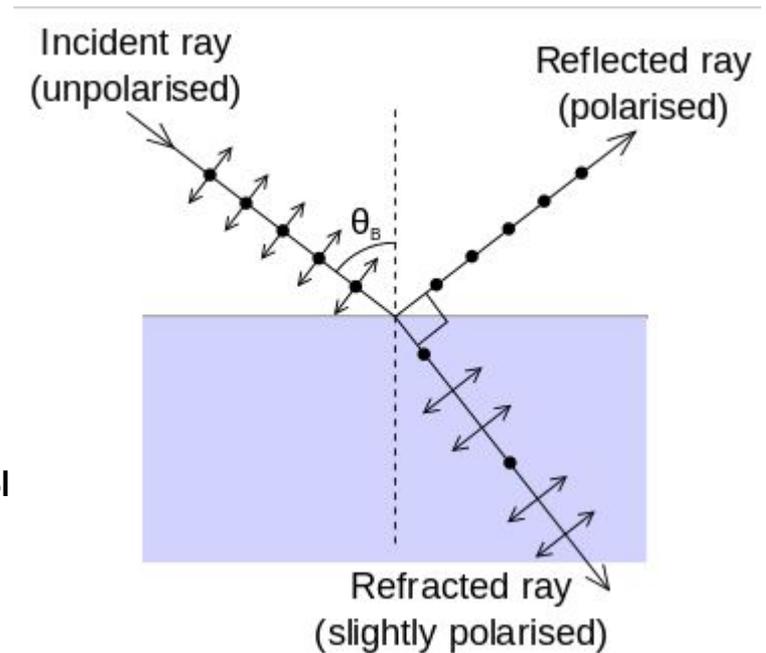
$$\operatorname{tg} \theta_{Br} = n_{21}$$

$$n_{21} = n_2/n_1$$



$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

При падении под углом Брюстера отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны



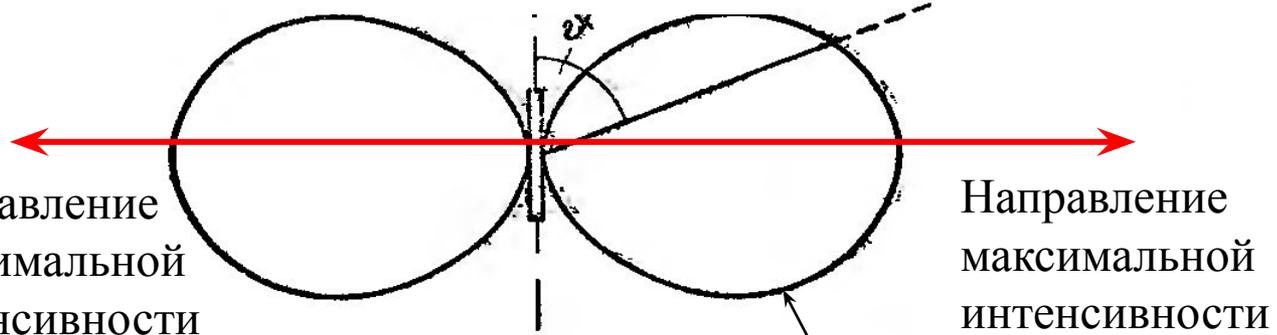
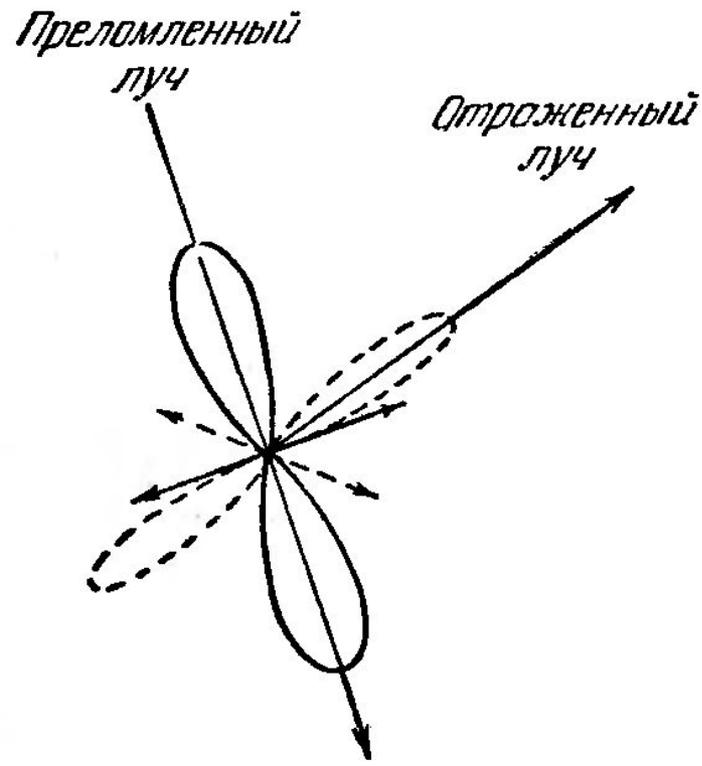
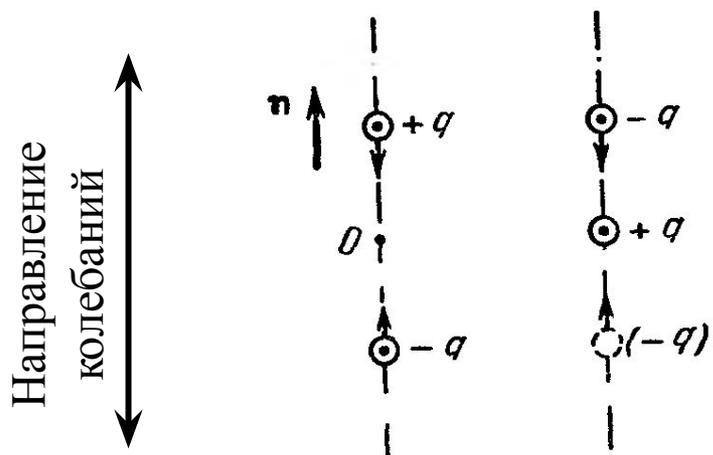
Поляризующий эффект:

- Свет, отражённый от границы раздела диэлектриков, будет полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (отражённый луч полностью поляризован)
- Преломлённый луч **частично** поляризуется в плоскости падения (Помним о законе сохранения энергии – «если где-то стало больше, где-то должно стать меньше»)

Направленность излучения

- Колебание двух зарядов одновременно аналогично колебанию одного заряда, с большей амплитудой
- Колеблющийся заряд будет излучать
- Максимальная интенсивность в направлении перпендикулярном направлению колебаний
- В направлении колебаний излучения **НЕТ** !!!

Сплошная линия – колебания в плоскости падения. Штриховая – в плоскости перпендикулярной плоскости падения



В данном примере составляющая отраженного излучения с колебаниями в плоскости параллельной плоскости падения еще будет присутствовать

Фигура вращения

Определение степени поляризации

Решение уравнений Максвелла

+

Граничные условия:

- равенство тангенциальных составляющих векторов **E** и **H**
- равенство нормальных составляющих векторов **D** и **B**

A_1 – амплитуда падающей световой волны,

A_1' – амплитуда отраженной волны,

A_2 – амплитуда преломленной волны

⊥ - составляющая перпендикулярная к плоскости падения, -

∥ составляющая параллельная плоскости падения

$$(A_1')_{\perp} = - (A_1)_{\perp} \frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)},$$

$$(A_2)_{\perp} = (A_1)_{\perp} \frac{2 \sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2)},$$

$$(A_1')_{\parallel} = (A_1)_{\parallel} \frac{\operatorname{tg}(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}(i_1 + i_2)},$$

$$(A_2)_{\parallel} = (A_1)_{\parallel} \frac{2 \sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)}$$

Если сумма углов отражения i_1 и преломления i_2 составляет 90 градусов, тогда амплитуда составляющей отраженной волны параллельной плоскости падения будет равна нулю.

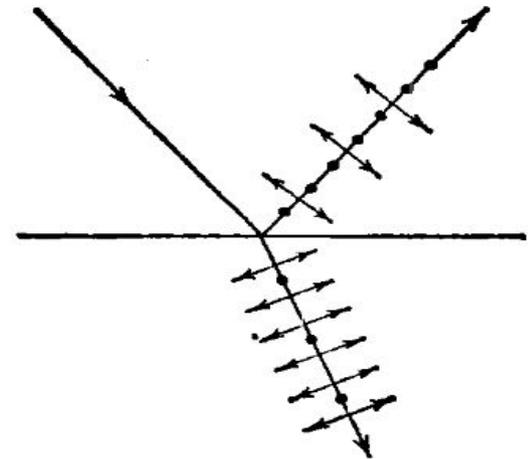
Плоскость падения – плоскость, образованная падающим лучом и нормалью к поверхности

Формулы Френеля

Соотношения между амплитудами и фазами падающей, отражённой и преломленной волн (граничные условия для уравнений Максвелла)

Свет как «упругая волна, распространяющаяся в эфире»

$$\rho_{\perp} = \frac{I'_{\perp}}{I_1} = \frac{\sin^2(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\sin^2(\vartheta_1 + \vartheta_2)}, \quad \rho_{\parallel} = \frac{I'_{\parallel}}{I_{\parallel}} = \frac{\operatorname{tg}^2(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\operatorname{tg}^2(\vartheta_1 + \vartheta_2)}$$



- угол падения



- угол преломления

Коэффициенты отражения линейно поляризованного света:



- с плоскостью поляризации, перпендикулярной плоскости падения



- с плоскостью поляризации, параллельной плоскости падения

Падение под углом Брюстера:

$$\vartheta_1 + \vartheta_2 = \pi/2$$

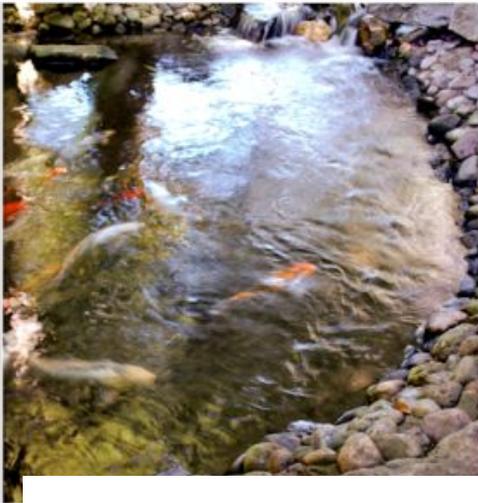
$$\operatorname{tg}(\pi/2) \rightarrow \infty$$



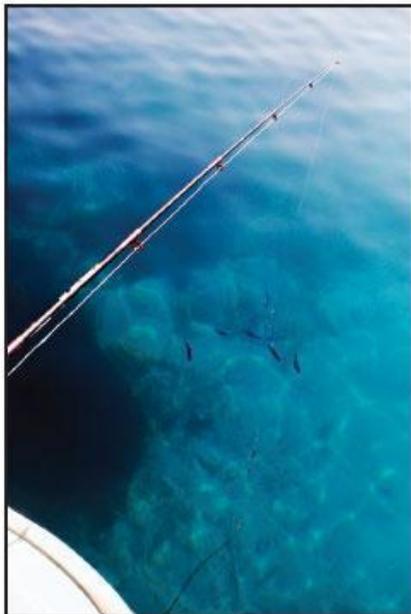
Отражённый свет полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения

Примеры поляризации естественного света при отражении от поверхностей

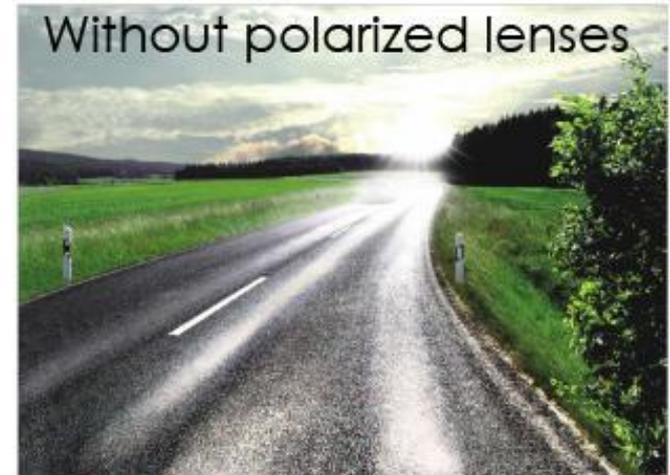
Поляризатор естественное излучение ослабляет в 2 раза, а частично поляризованное излучение (отражение от плоских поверхностей) ослабляет значительно.



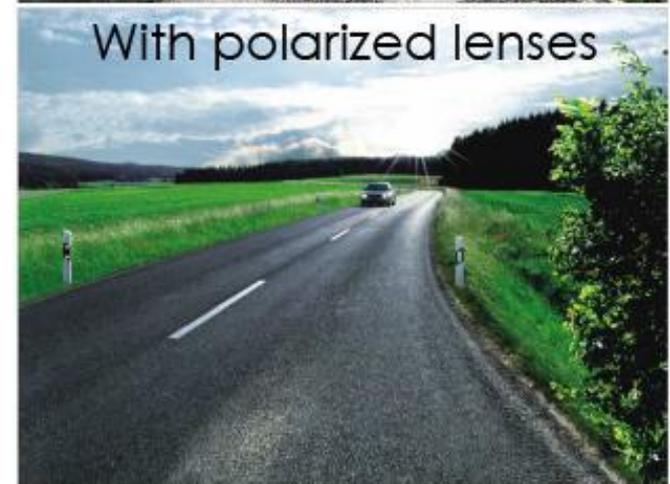
UA Performance Polarized



Non-Polarized



Without polarized lenses

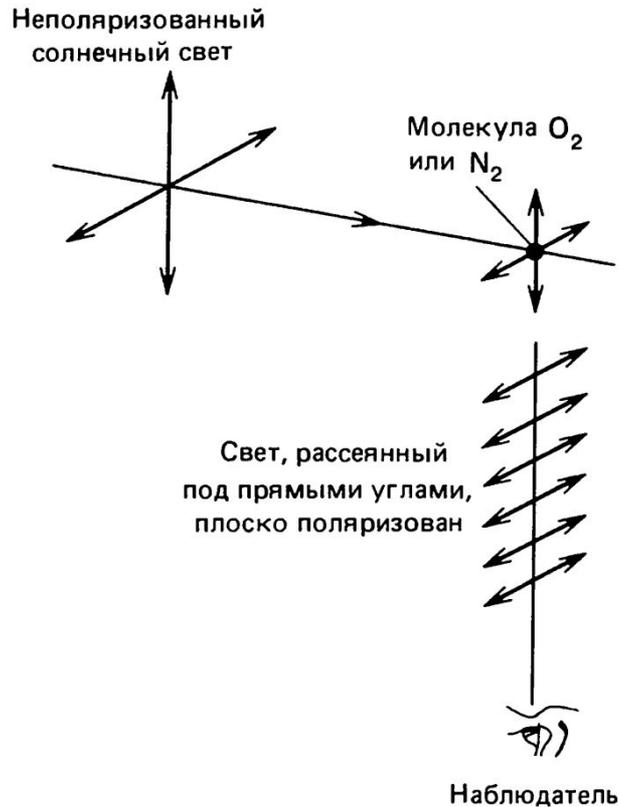


With polarized lenses

Оптическая ось поляризатора направляется вертикально, т.к. большинство поверхностей, от которых отражается естественный свет горизонтальные

Рассеяние на частицах Атмосфера

Размеры частиц $l \ll \lambda$ длины световой волны

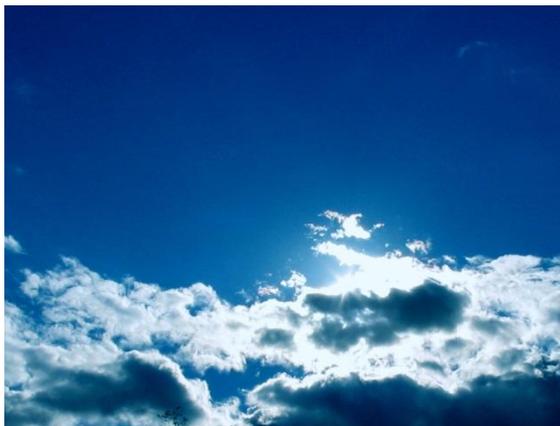


- Рассеиваемый пучок вызывает колебания частиц в плоскости перпендикулярной его направлению распространения. Колебания вектора E во вторичной волне происходят в плоскости, проходящей через направление колебаний зарядов. Поэтому свет, рассеиваемый в направлениях, перпендикулярных к пучку, будет полностью поляризован.

- С увеличением длины волны рассеяние ослабевает как $1/\lambda^4$



Наиболее сильно рассеивается фиолетовый и синий цвета.



Двойное лучепреломление

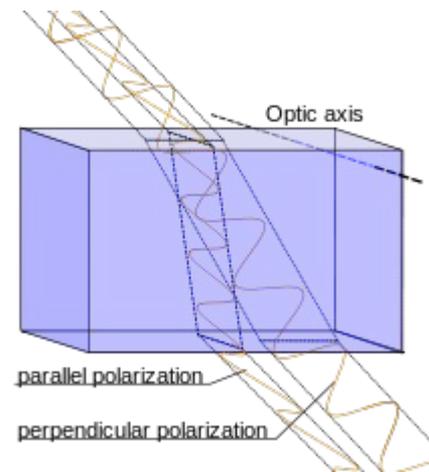
Эффект расщепления в анизотропных средах луча света на две составляющие, распространяющиеся с разными скоростями и в разных направлениях.

Кристаллы с двойным лучепреломлением:

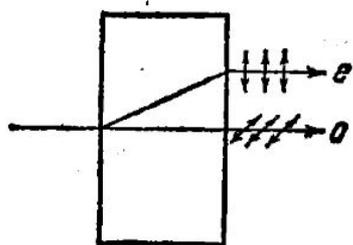
- Одноосные
- Двуосные

Одноосные кристаллы (шпат, кварц, турмалин).

Один из лучей – **обыкновенный**, подчиняется обычному закону лучепреломления Второй – **необыкновенный**, соотношение углов падения и преломления зависит от угла падения (при нормальном падении отклоняется от нормали)



Эффект был открыт достаточно давно (конец XVII века)



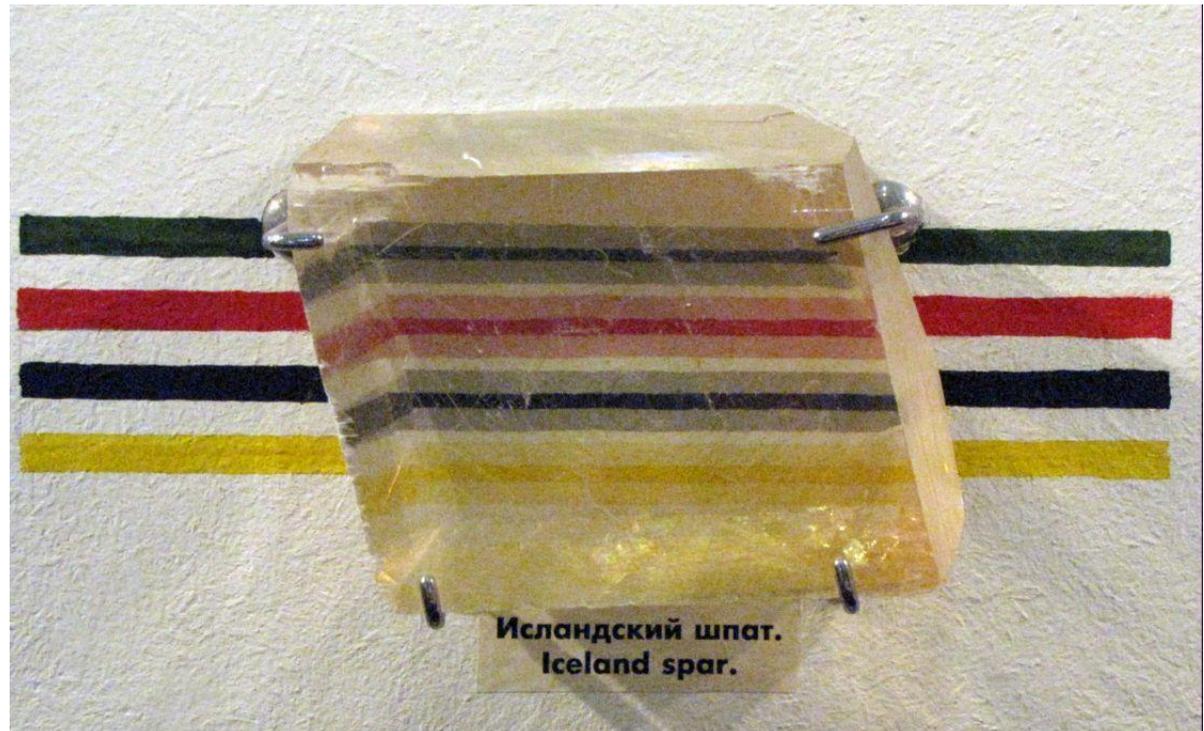
Двуосные кристаллы (слюда, гипс).

Оба луча - необыкновенные

Примеры двойного лучепреломления



Исландский шпат
(разновидность кальцита)

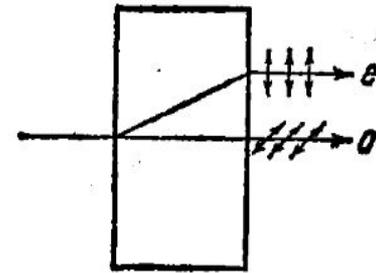


Одноосные и двуосные кристаллы

У одноосных кристаллов есть направление (**оптическая ось**), вдоль которого лучи распространяются без разделения и с одинаковой скоростью. Плоскость, проходящая через оптическую ось – **главное сечение**.

У двуосных кристаллов, соответственно есть два направления, вдоль которых лучи распространяются без разделения

Обыкновенный и необыкновенный лучи поляризованы в перпендикулярных направлениях.



Дихроизм – в некоторых кристаллах один луч поглощается сильнее другого (турмалин – минерал сложного состава).

По выходе из кристалла лучи отличаются только направлением поляризации

Быстрое поглощение обыкновенного луча – основа для изготовления **поляроидов**. Поляроид – целлулоидная плёнка с большим количеством кристаллов йодистого хинина

o – “ordinary” – обыкновенный луч (закон преломления выполняется)

e – “extraordinary” – необыкновенный луч (закон преломления **не выполняется**, $\sin i_1 / \sin i_2 \neq const$, может не лежать в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности)

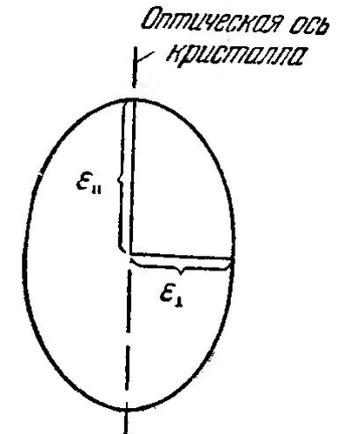
оба этих луча существуют только в пределах анизотропной области, за пределами кристалла – это уже обычные световые лучи.

Анизотропия диэлектрической проницаемости

Двойное лучепреломление – результат анизотропии диэлектрической проницаемости

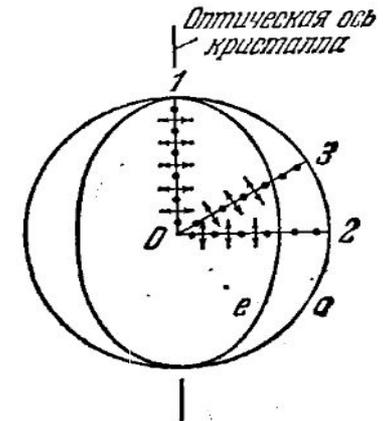
ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} - диэлектрические проницаемости в направлении оптической оси и перпендикулярно ей различны (имеют промежуточные значения в прочих направлениях)

$$n = \sqrt{\epsilon}$$



В обыкновенном луче колебания светового вектора происходят в направлении, перпендикулярном к главному сечению кристалла. Вектор E образует с оптической осью кристалла прямой при любом направлении распространения, и скорость световой волны будет одна и та же $v_o = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}}$

Сфера – волновая поверхность от точечного источника



Колебания в необыкновенном луче – в главном сечении, но под **разными углами к главной оси**, скорость распространения – между

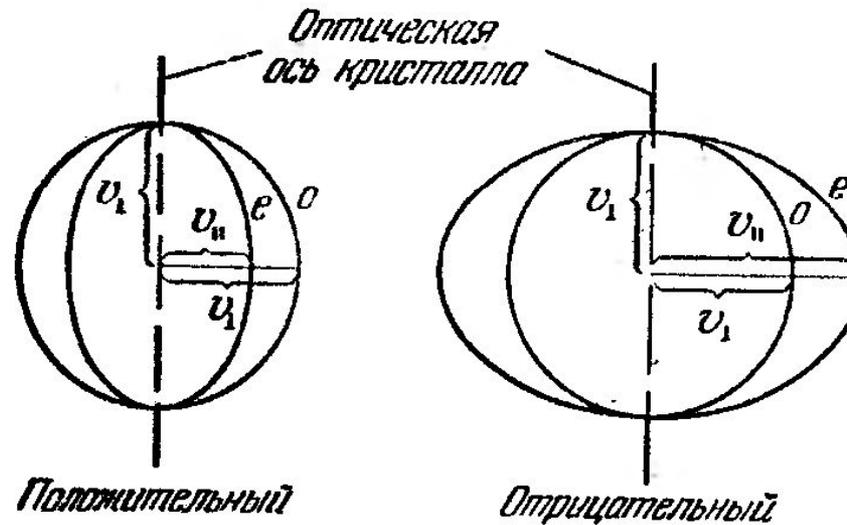
$$v_o = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}} \quad v_e = c/\sqrt{\epsilon_{\parallel}} \text{ (угла)}$$

Луч

Луч

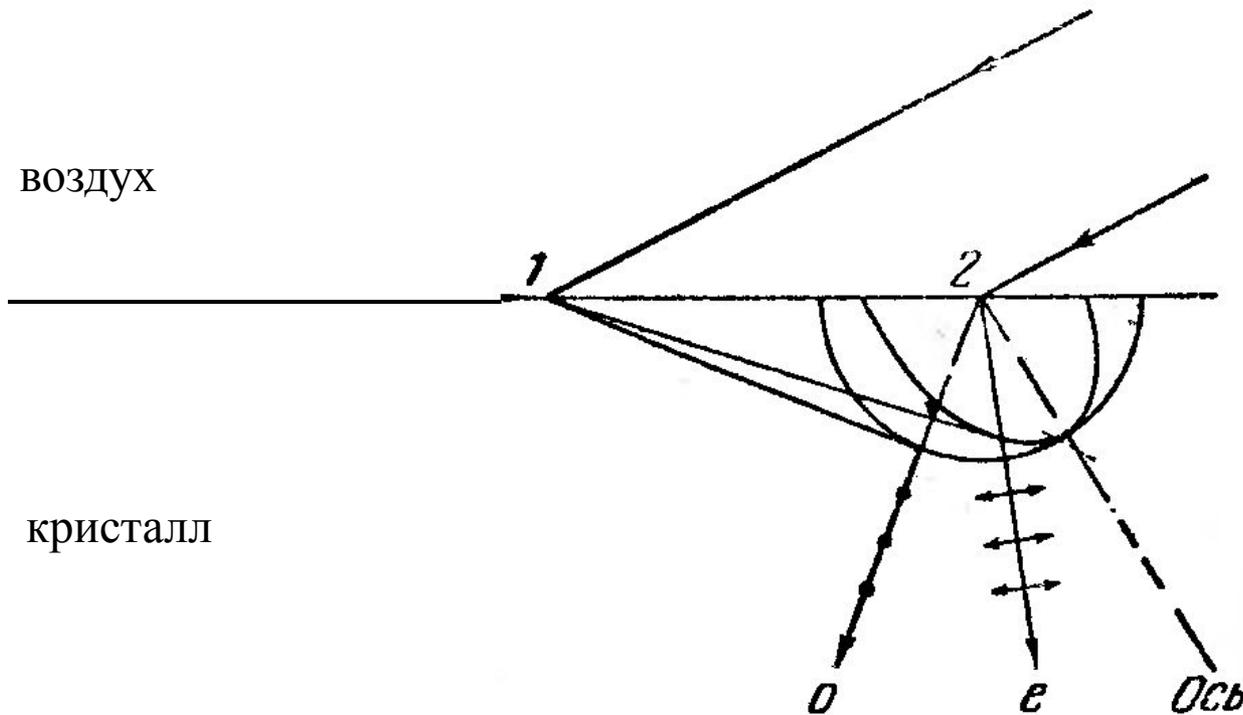
Волновая поверхность от точечного источника – эллипсоид вращения

Анизотропия диэлектрической проницаемости



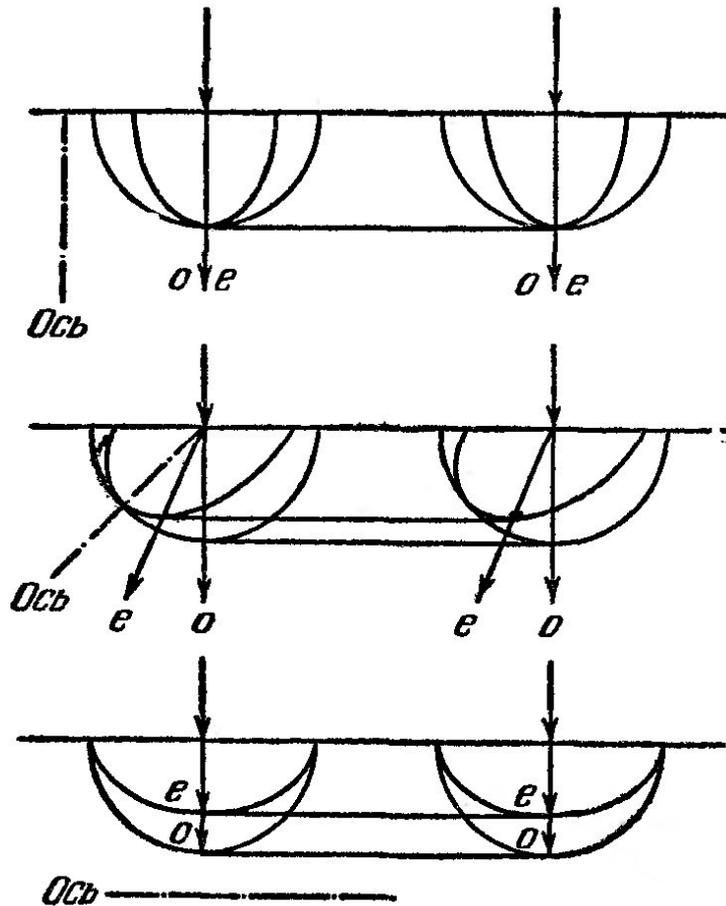
В зависимости от типа кристалла скорость необыкновенного луча может быть как меньше (положительный кристалл), так и больше (отрицательный кристалл) скорости обыкновенного луча

Объяснение с помощью принципа Гюйгенса



- Для обыкновенного луча – сферические вторичные волны и стандартный закон преломления. Огибающая вторичных волн – плоскость. Луч распространяется перпендикулярно волновому фронту.
- Для необыкновенного луча – вторичные волны представляют эллипсоид, вытянутый вдоль главной оси (максимальная скорость распространения). Огибающая вторичных волн – плоскость. Направление распространения луча (энергии) определяется точкой касания огибающей с соответствующей волновой поверхностью и не будет совпадать с нормалью к волновой поверхности.

Примеры распространения света в кристалле



Распространение параллельно оптической оси
– нет разделения. Скорости одинаковые.

Распространение под углом к оптической оси
– разделение лучей.

Распространение под прямым углом к
оптической оси – нет пространственного
разделение лучей. Скорости разные.

Интерференция поляризованных лучей

При наложении двух когерентных лучей, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях, никакой интерференционной картины, с характерным для нее чередованием максимумов и минимумов интенсивности, получиться не может. Интерференция возникает только в том случае, если колебания во взаимодействующих лучах совершаются вдоль одного и того же направления.

? Интерференция вышедших из кристалла обыкновенного и необыкновенного лучей ?

При нормальном падении света на пластинку обыкновенный и необыкновенный лучи будут распространяться не разделяясь, но с различной скоростью. Поэтому, за время прохождения пластины, они приобретут разность хода:

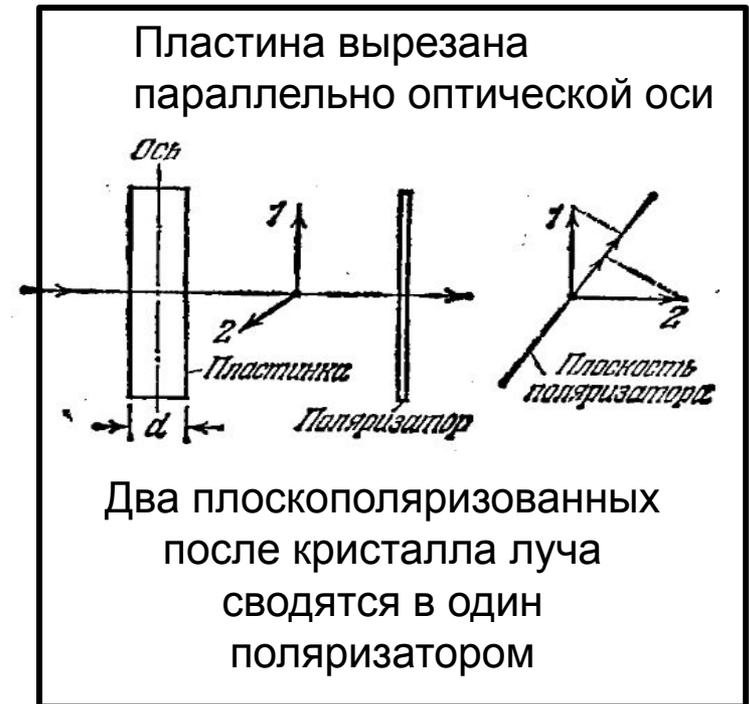
Разность

$$\Delta = (n_o - n_e) d$$

хода:

Разность фаз:

$$\delta = \frac{(n_o - n_e) d}{\lambda_0} 2\pi$$



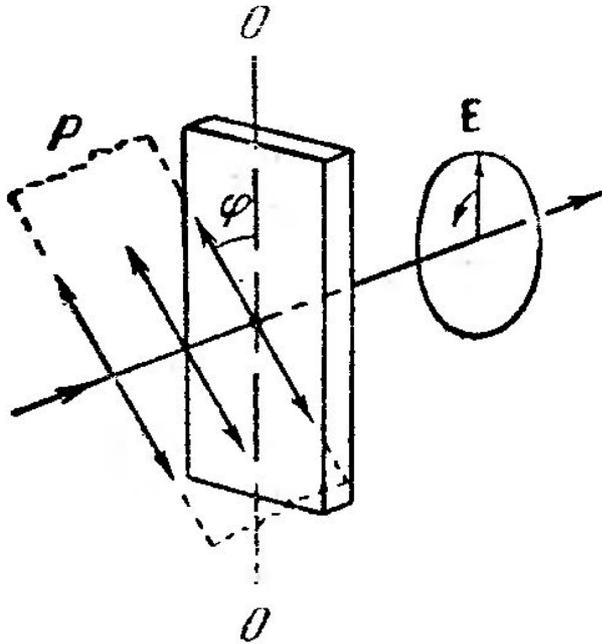
! Интерференция возможна, но только для исходно плоскополяризованного света !

Четвертьволновая пластинка

Вырезана параллельно оптической оси кристалла. Толщина, такая, что $(n_o - n_e)d = \lambda_0/4$.

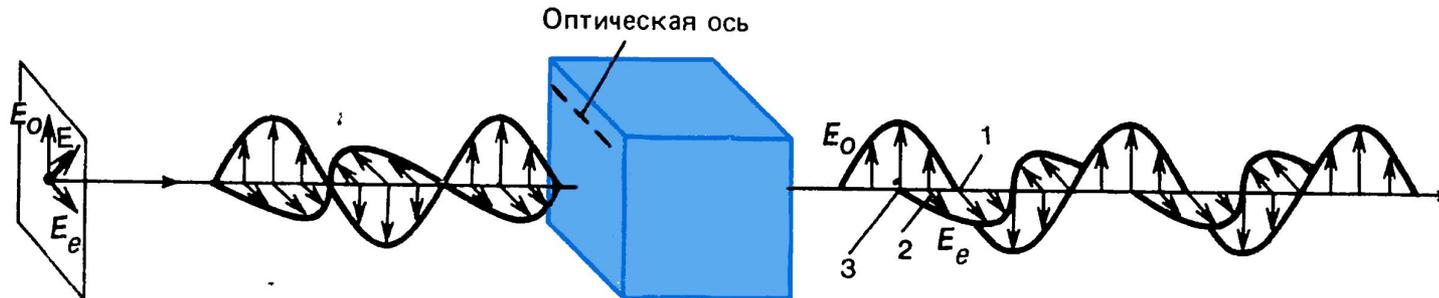
$$(n_o - n_e)d = (k + 1/4)\lambda_0$$

Падают плоскополяризованный свет. Направление поляризации составляет угол φ с осью кристалла.



- Если $\varphi = 0$ или $\varphi = \pi/2$ то луч пройдет без изменений (в кристалле будет распространяться только один луч – либо обыкновенный, либо необыкновенный).

- Если $\varphi = 45^\circ$, то амплитуды обоих лучей, вышедших из пластинки будут равны, а фазы отличаться на $\pi/2$. В таком случае можно говорить, что свет, вышедший из пластинки будет иметь круговую поляризацию.



При других углах φ вышедший из пластинки свет будет эллиптически поляризованным из-за неравенства амплитуд составляющих.

Четвертьволновая пластинка

Падает эллиптически поляризованный свет или свет с круговой поляризацией. Ось пластинки совпадает с одной из полуосей эллипса.



Четверть волновая пластинка вносит дополнительную разность фаз $\pi/2$



Суммарная разность фаз станет 0 или π



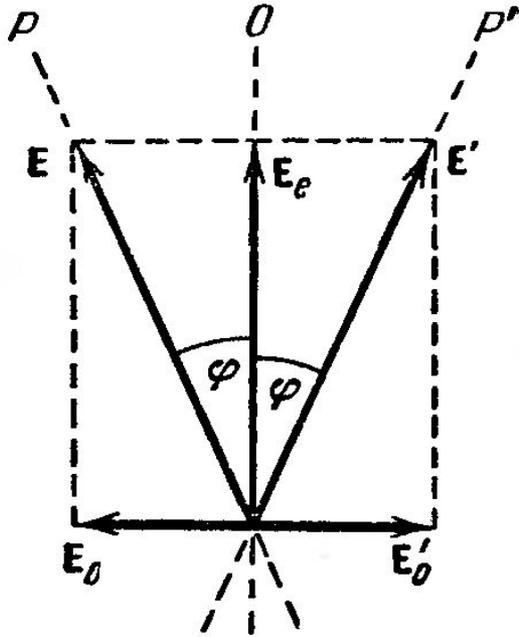
При суперпозиции получаем плоскополяризованную волну



Метод различения естественного света и поляризованного по кругу или эллиптически (*вращая поляризатор возможно получить полное затемнение плоскополяризованного света, а естественного нет*)

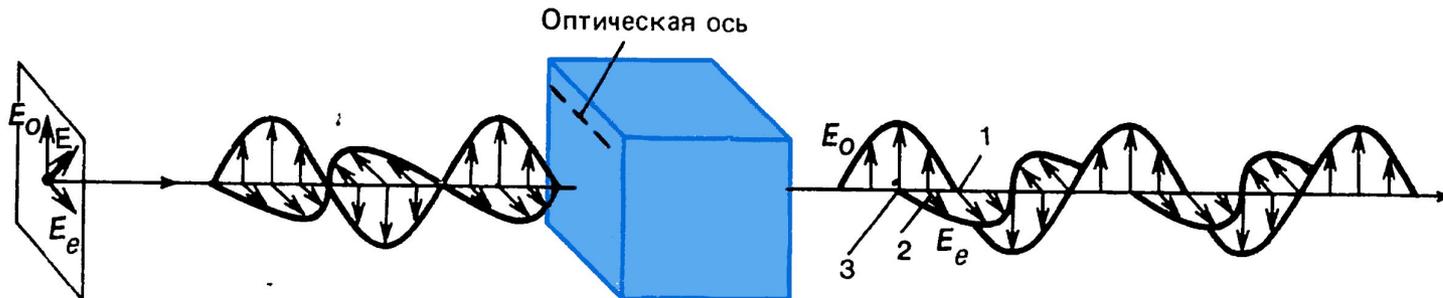
Полуволновая пластинка

$$(n_o - n_e)d = \lambda_0/2,$$



Падают плоскополяризованный свет. Направление поляризации составляет угол φ с осью кристалла.

- Если $\varphi = 0$ или $\varphi = \pi/2$ то луч пройдет без изменений (в кристалле будет распространяться только один луч – либо обыкновенный, либо необыкновенный).
- При других углах φ вышедший из пластинки свет будет плоскополяризованным, но **плоскость поляризации будет повернута на угол 2φ .**



Искусственное двойное лучепреломление

Оптическая анизотропия в аморфном теле под действием механической деформации:



σ - напряжение, k – коэффициент пропорциональности, зависит от свойств вещества

Помещённая между скрещенными поляризаторами пластина при деформации начинает пропускать свет



Оптический метод исследования внутренних напряжений

Эффект Керра – возникновение двулучепреломления в аморфных жидкостях и твёрдых телах под воздействием электрического поля (различная поляризуемость молекул по разным направлениям)

$$n_o - n_e = kE^2$$

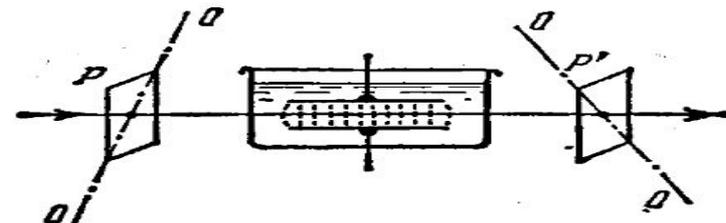


Время

10^{-10} с

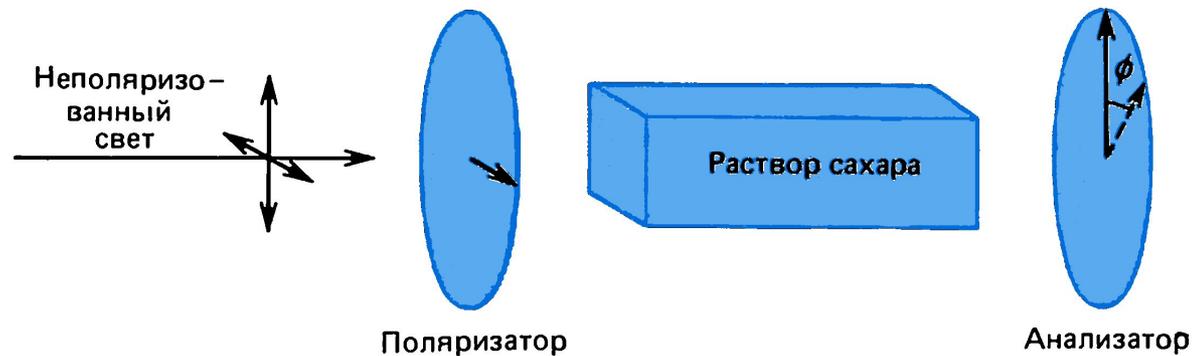
установления:

Безынерционный оптический затвор



Ячейка Керра. Напряжение подаётся на пластины (скрещенные поляризаторы), жидкость приобретает свойства оптического кристалла

Вращение плоскости поляризации



Кристаллические вещества

- Максимальный поворот наблюдается при распространении вдоль оптической оси кристалла.
- Угол поворота $\varphi = \alpha l$ пропорционален пройденному пути в кристалле l и постоянной вращения α , которая зависит от длины волны падающего излучения и материала кристалла

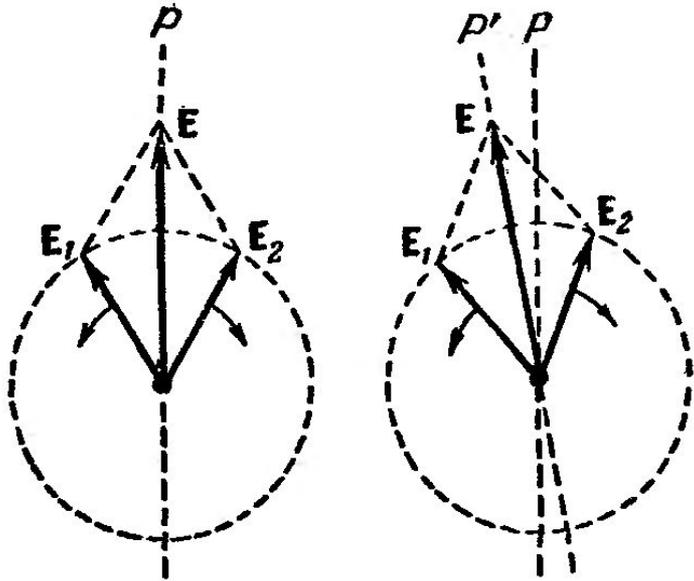
Растворы

- Угол поворота $\varphi = [\alpha]cl$ пропорционален пройденному пути в растворе l , концентрации оптически активного вещества и удельной постоянной вращения $[\alpha]$.

При прохождении плоскополяризованного света через некоторые (**оптически активные** вещества) наблюдается поворот плоскости поляризации. Кристаллические вещества (кварц), чистые жидкости (скипидар), растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях.

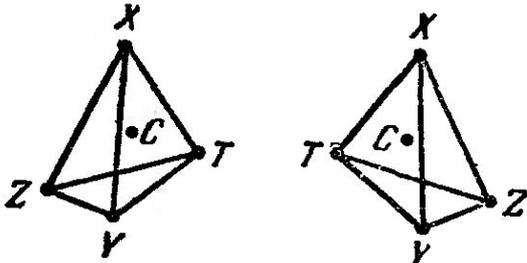
Вращение плоскости поляризации.

Причина.



- Плоскополяризованную волну можно представить как суперпозицию двух волн - с правой и левой круговой поляризацией. Если скорости распространения этих двух волн не одинаковы, то будет наблюдаться вращение плоскости поляризации результирующей плоскополяризованной волны.

Асимметрия молекул



По часовой стрелке - ZYTZ

Против часовой стрелки - ZTYZ

Отличие скоростей для право- и лево-поляризованных волн