

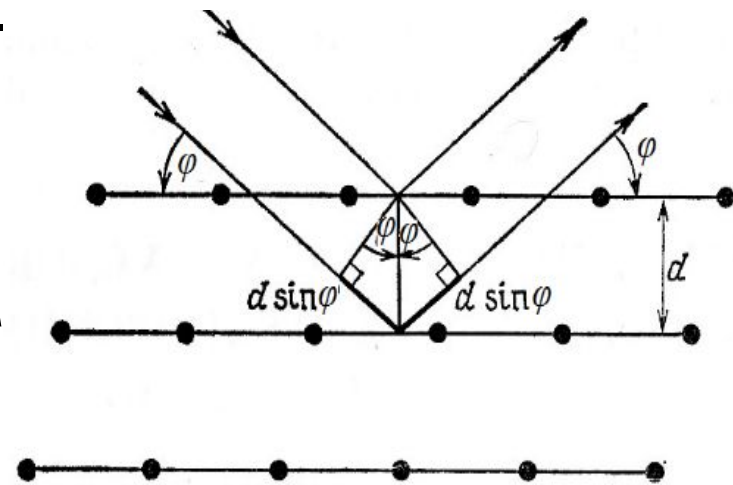
Лк-38

Дисперсия, поляризация света

Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах

Падающая на тело электромагнитная волна вызывает колебания электронов в атомах. При этом атомы излучают электромагнитные волны с той же длиной волны и сферическим фронтом. В результате, волна рассеивается по всем направлениям. Каждый из атомов становится источником рассеянных волн, которые в результате интерференции могут усиливать или ослаблять друг друга. Это означает, что энергия излучения рассеивается в разных направлениях с различной

Длина волны видимого света значительно превышает межатомные расстояния кристаллических тел. Отражение от них не приводит к заметным интерференционным явлениям. Рентгеновские лучи имеют меньшие длины волн, сравнимые с межатомными расстояниями (10^{-10} м). Это позволяет использовать рентгеновские лучи для исследования кристаллических тел или использовать кристаллические тела в роли дифракционных решеток для рентгеновских лучей. Пусть на кристалл под углом скольжения φ , падает пучок монохроматических рентгеновских лучей с длиной волны λ



Лучи отражаются от параллельного поверхности семейства атомных плоскостей с межплоскостным расстоянием d под таким же углом φ . Как видно из рисунка, разность хода лучей, отраженных от соседних плоскостей расположения атомов равна $\Delta=2d\sin(\varphi)$. Если эта разность хода равна целому числу длин волн, отраженные лучи создадут интерференционный максимум, который можно зарегистрировать, изменяя угол φ . Условие максимума

$$2d\sin(\varphi)=n\lambda \quad (38.1)$$

Называют условием *Вульфа-Бреггов*.

Исследование дифракционного рассеяния рентгеновских лучей составляет целую отрасль материаловедения – **рентгеноструктурный анализ**.

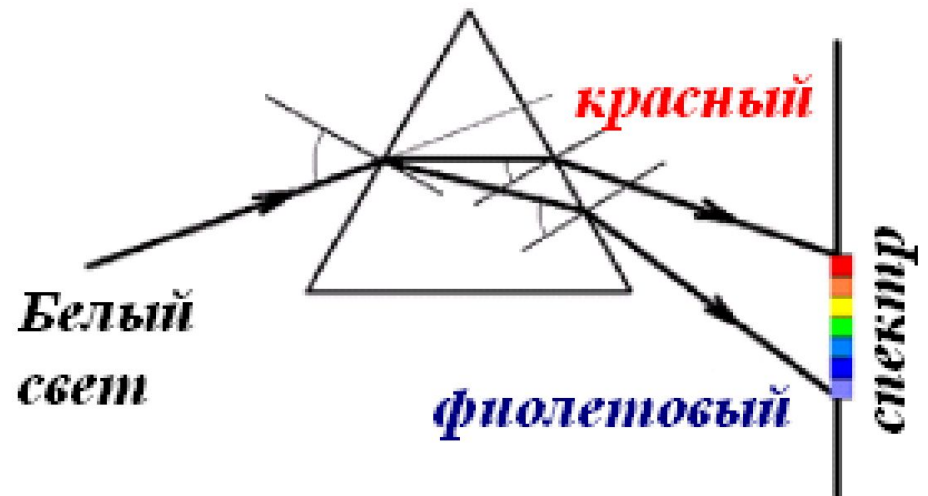
Пятиминутка: На грань кристалла падает параллельный пучок рентгеновских лучей с длиной волны 0.075 нм . Расстояние между атомными плоскостями равно 0.2 нм . Под каким углом скольжения следует направить лучи на поверхность, чтобы получить дифракционный максимум 1 порядка.

Дисперсия света.

Нормальная и аномальная дисперсия

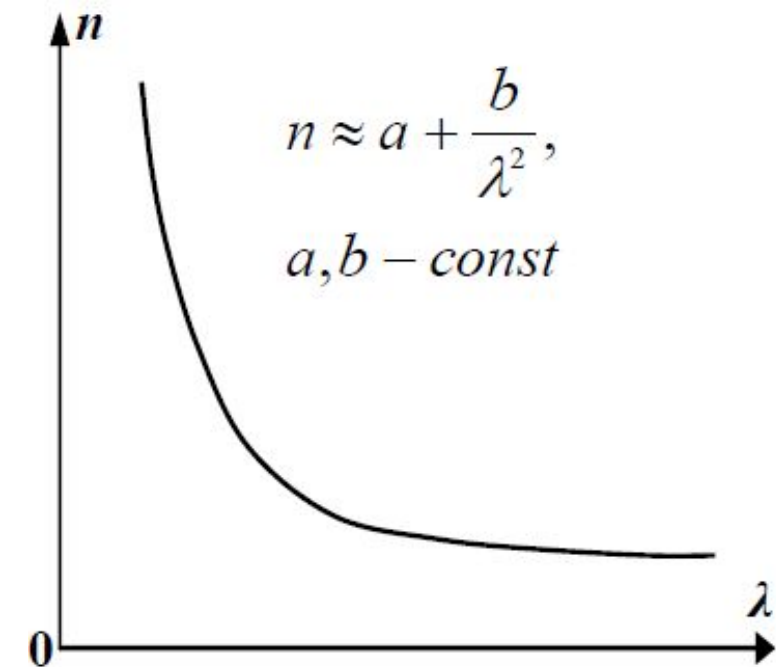
Дисперсия света – зависимость фазовой скорости света (показателя преломления) в среде от его частоты $n = \varphi(\nu)$ или (от длины волны λ): $n = f(\lambda)$.

Следствие дисперсии
разложение в спектр пучка белого света при прохождении через стеклянную призму



Зависимости $n=\varphi(\nu)$; $n = f(\lambda)$ –нелинейные и немонотонные.

Дисперсия вещества–величина, определяемая соотношениями: $D = \frac{dn}{d\lambda}$; $D = \frac{dn}{d\nu}$



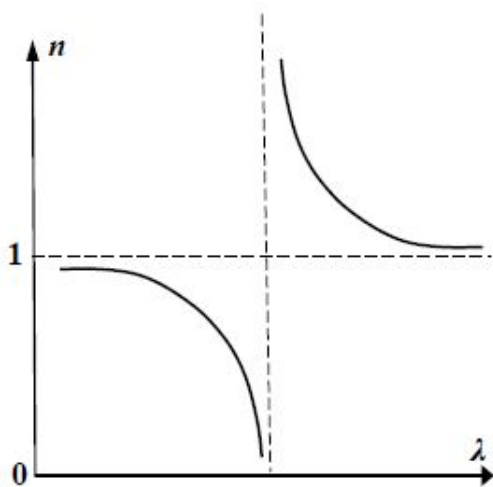
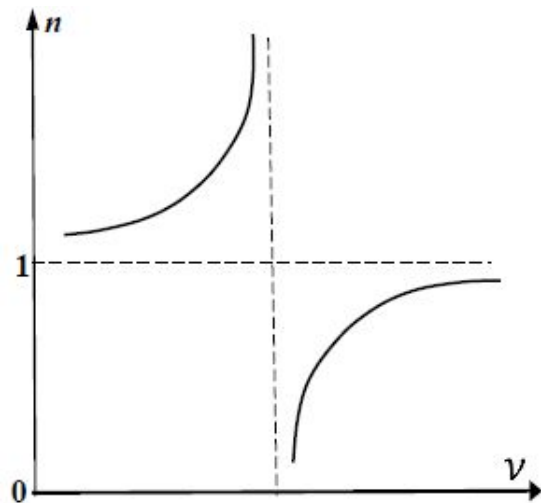
Области значений ν , λ , в которых дисперсия D увеличивается по модулю с ростом ν , с уменьшением λ

соответствуют *нормальной дисперсии света*.

Нормальная дисперсия света
наблюдается у веществ прозрачных для
света.

Например, обычное стекло прозрачно
для видимого света, и в этой области
наблюдается нормальная дисперсия
света в стекле

Если вещество поглощает часть лучей, то в области поглощения и вблизи неё ход дисперсии обнаруживает аномалию, т.е. на некоторых участках более короткие волны преломляются меньше, чем более длинные. Такой характер дисперсии называется *аномальной дисперсией*. Например, у обычного стекла эти полосы находятся в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра.



Волновой пакет. Групповая скорость

Гармоническая волна описывается уравнением:

$$s = S_m \cos(\omega t - kz)$$

$k = \frac{\omega}{v_\phi}$ - волновое число,

фазовая скорость $v_\phi = \frac{\omega}{k}$.

Чисто гармоническая волна является абстракцией. Реальная волна является суммой множества гармонических волн, отличающихся друг от друга по частоте (длине волны). Такую сумму волн называют волновым пакетом или группой волн.

Рассмотрим для простоты пакет из двух волн с одинаковой амплитудой и близкими частотами, распространяющихся вдоль оси Z , результирующая волна представляется в

виде:
$$s = S_m \cos(\omega_1 t - k_1 z) + S_m \cos(\omega_2 t - k_2 z) = 2S_m \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} z\right) \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} z\right)$$



Обозначим разности $\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega$, $k_1 - k_2 = \Delta k$.

Назовем групповой скоростью скорость перемещения какого-либо максимума этого пакета.

Для точки максимума $\cos(\Delta\omega t - \Delta k z) = 1$, т.е. $\Delta\omega t - \Delta k z = 0$. Откуда определится скорость перемещения максимума:

$$v_{\text{гр}} = \frac{z}{t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk} \quad (38.2)$$

По определению показатель преломления среды (n) – это отношение фазовых скоростей света в вакууме и среде:

$$n = \frac{v_{\phi 0}}{v_{\phi}} = \frac{\omega v_{\phi 0}}{\omega v_{\phi}} = \frac{k v_{\phi 0}}{\omega} \Rightarrow k = \frac{n\omega}{v_{\phi 0}}$$

Если показатель преломления не зависит от частоты колебаний, то $\frac{dk}{d\omega} = \frac{n}{v_{\phi 0}}$, откуда $v_{\text{гр}} = \frac{v_{\phi 0}}{n} = v_{\phi}$.

Если показатель преломления является частотно зависимым, то

$$\frac{dk}{d\omega} = \frac{\omega \frac{dn}{d\omega} + n}{v_{\phi 0}} \Rightarrow v_{\text{гр}} = \frac{v_{\phi 0}}{\omega \frac{dn}{d\omega} + n} = \frac{v_{\phi}}{\frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega} + 1} \quad (38.3)$$

Как видно из этой формулы, групповая скорость может быть меньше или больше фазовой в зависимости от знака производной $\frac{dn}{d\omega}$. При нормальной дисперсии $\frac{dn}{d\omega} > 0$ и групповая скорость меньше фазовой. В случае аномальной дисперсии $\frac{dn}{d\omega} < 0$ и $v_{\text{гр}} > v_{\phi}$.

Электронная теория дисперсии света.

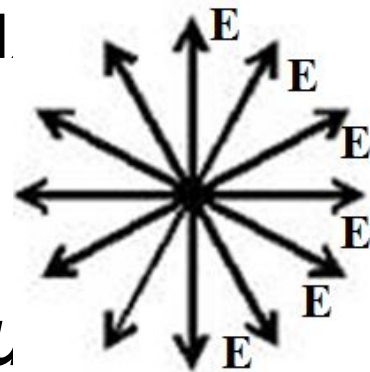
Показатель преломления связан с диэлектрической проницаемостью вещества формулой $n = \sqrt{\varepsilon}$. Диэлектрическая проницаемость определяется величиной смещения «оптических» электронов вещества под действием электрического поля. Чем больше смещение, тем больше ε . Если на электроны действует переменное поле световой волны величина смещения их зависит также от близости частоты волны к частоте собственных колебаний электронов, т.е. от близости вынужденных колебаний к резонансу.

Если частота колебаний световой волны близка к резонансу, мы имеем аномальную дисперсию. В этой области происходит сильное поглощение света веществом, оно теряет прозрачность. На остальных частотах дисперсия нормальная.

Поляризация световых волн. Электромагнитные волны, в частности, - свет являются поперечными волнами. Поперечность означает, что колебания, переносимые волной, происходят в направлении перпендикулярном распространению волны. В случае ЭМ волны векторы напряженностей электрической и магнитной составляющих колеблются в направлении перпендикулярном движению волны. Поперечные волны характеризуются дополнительной величиной – ***поляризацией***, которая определяет направление колебаний в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

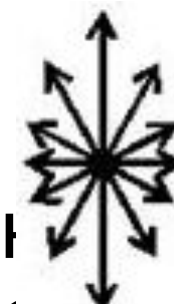
Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор E , который называют световым вектором. По направлению колебаний светового вектора определяется характер поляризации света.

Виды поляризации света. В поперечной волне колебания могут происходить в любых направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Если направления колебаний при этом беспорядочно меняются амплитуды их во всех направлениях одинаковы, то такой свет называется **естественным – неполяри-**

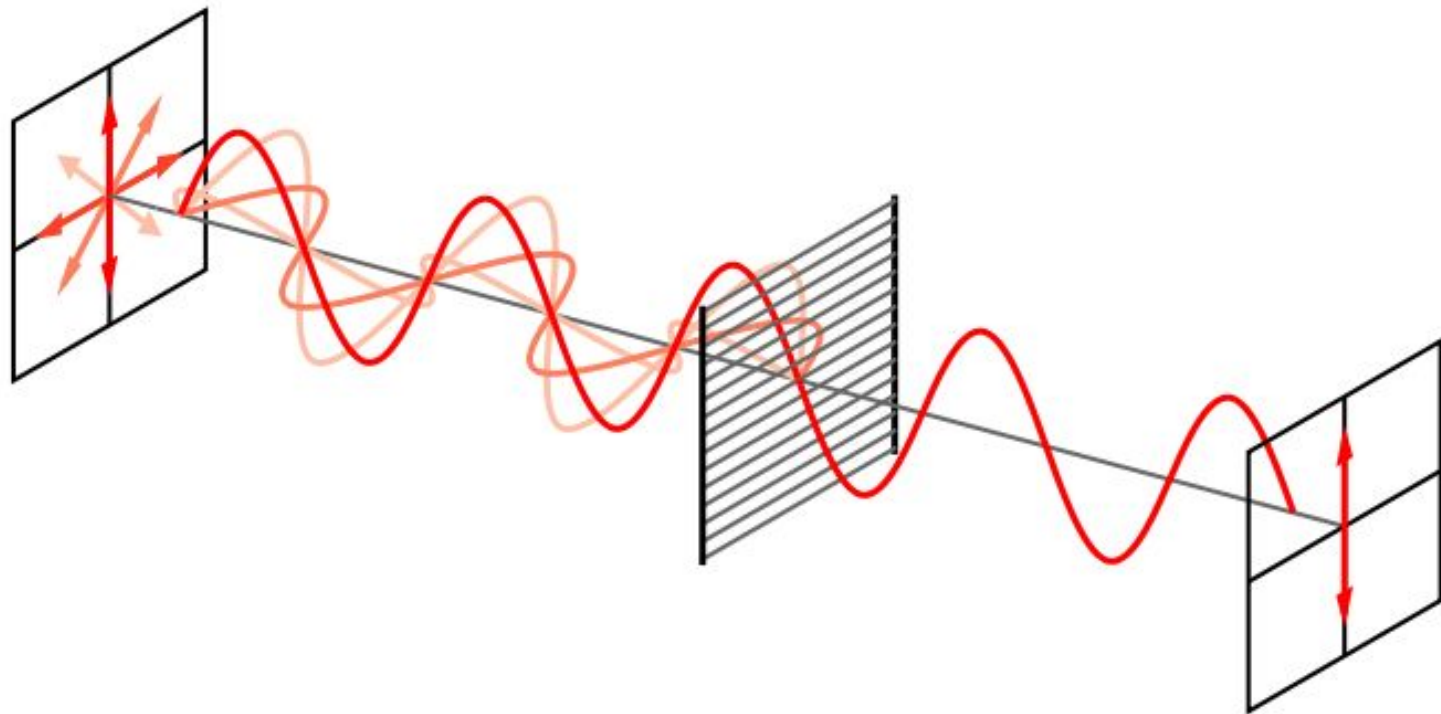


Если колебания происходят только в одном постоянном направлении, то такой свет называется **плоско поляризованным**.



A star-like diagram with multiple arrows of varying lengths radiating from a central point, representing oscillations in multiple directions with different amplitudes, characteristic of partially polarized light.
Если колебания происходят в различных направлениях, но в определенных направлениях амплитуды колебаний больше, чем в других, свет называется **частично поляризованным**. Искусственную поляризацию можно осуществить, пропуская волну через **поляризатор**.

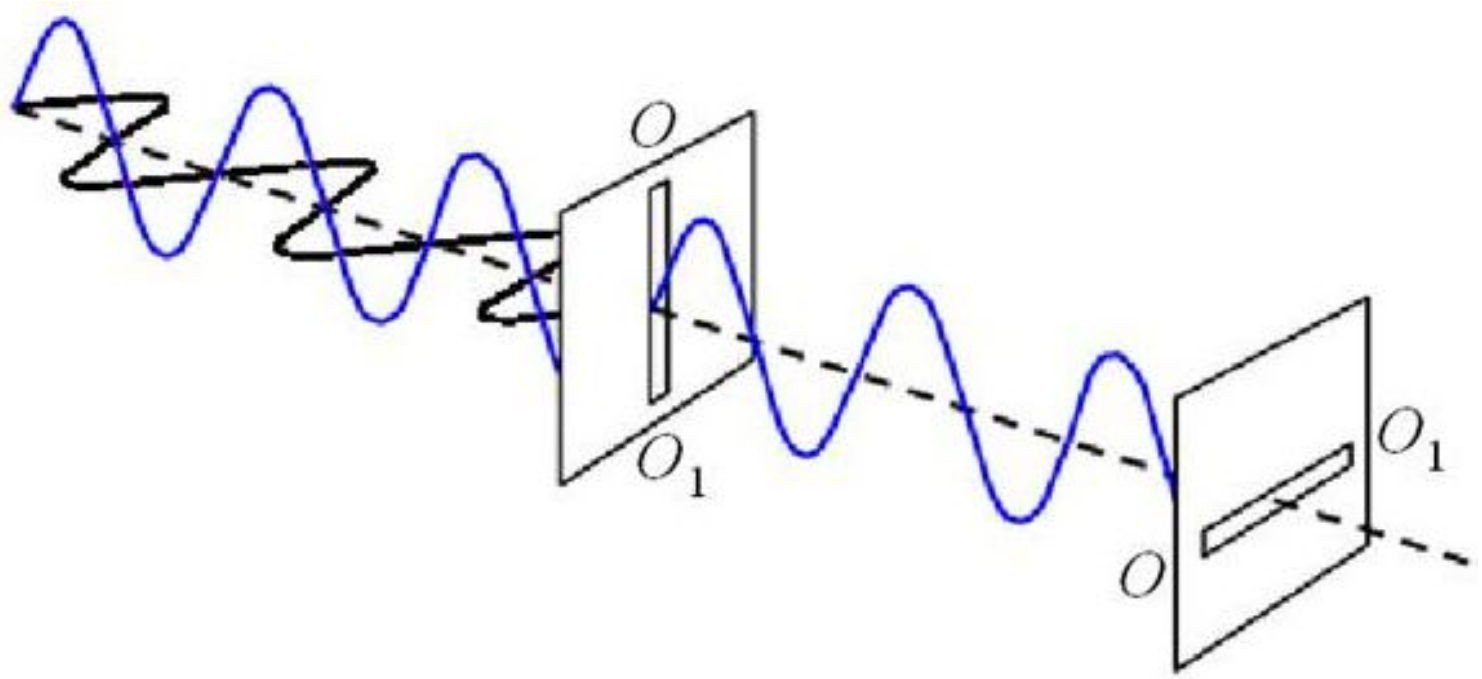
Поляризатор - устройство для получения полностью или частично поляризованного света из света с произвольными поляризационными характеристиками. На рисунке показано действие поляризатора механических волн



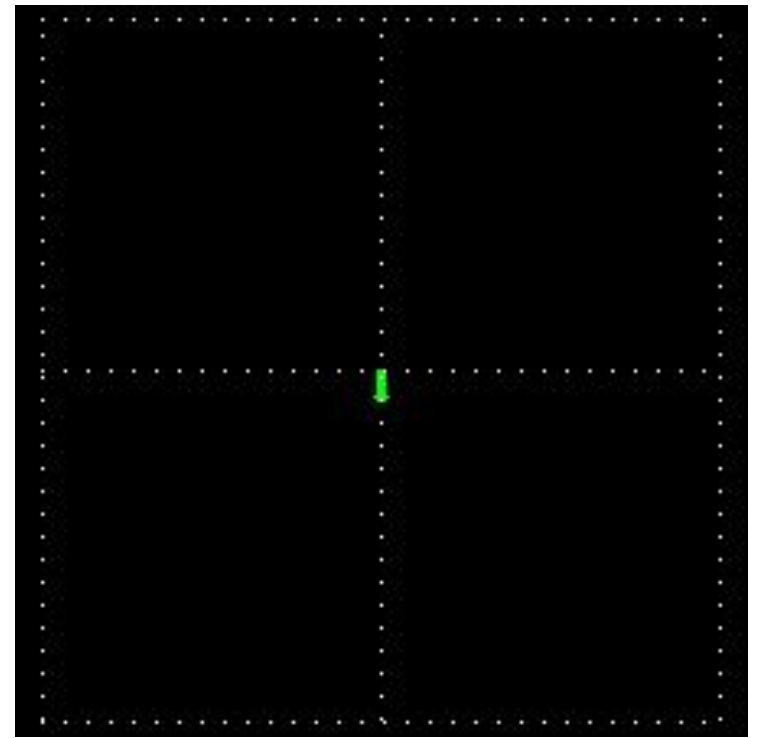
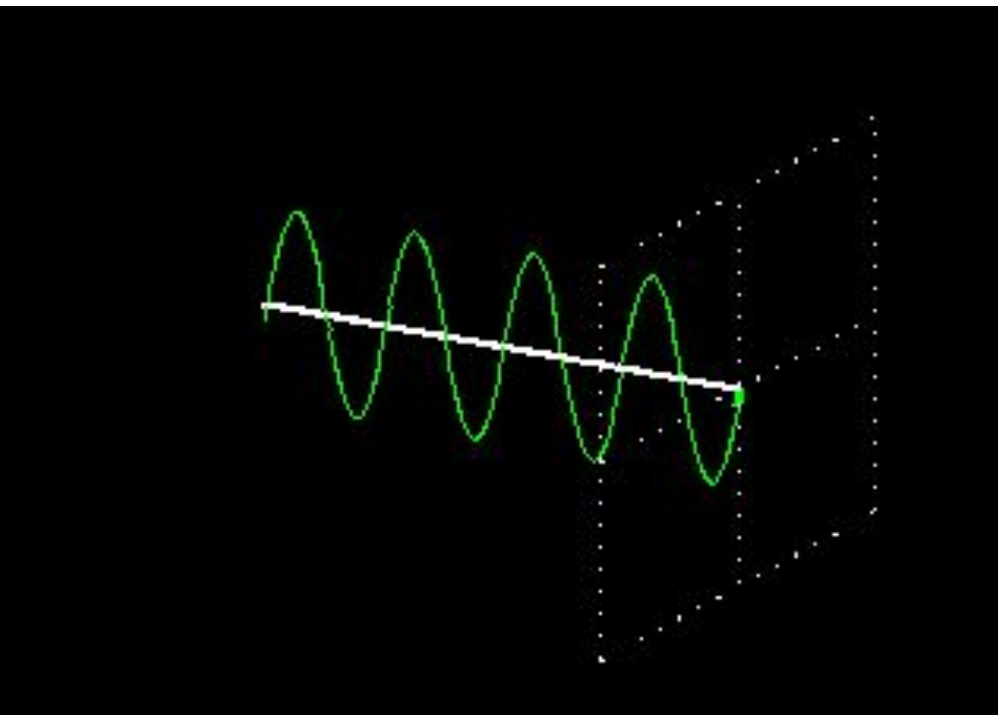
(Поляризатор -пластина посередине)

Как действует поляризатор

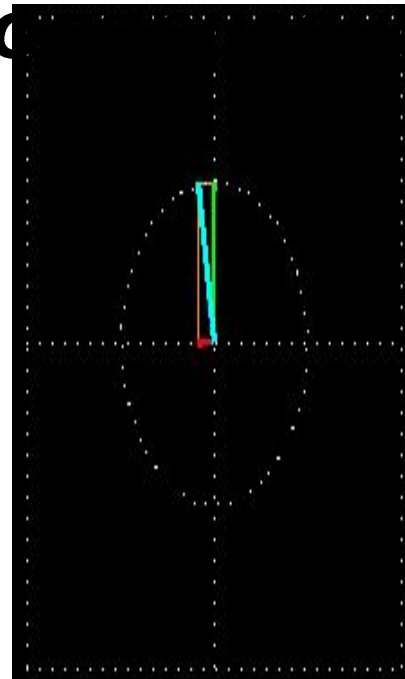
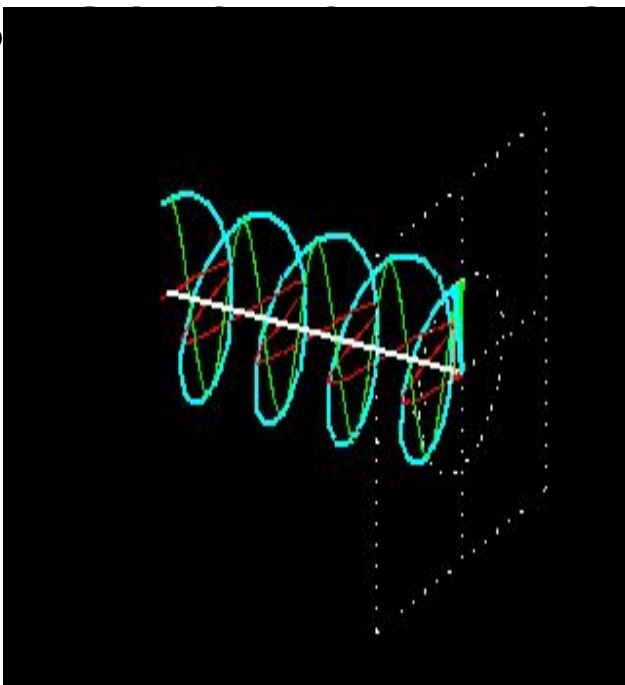
Этот прибор свободно пропускает волны, с поляризацией, параллельной его внутренней плоскости, и не пропускает волны с поляризацией, перпендикулярной плоскости поляризации прибора. Поляризатор в виде тонкой пластинки называется **поляроид**.



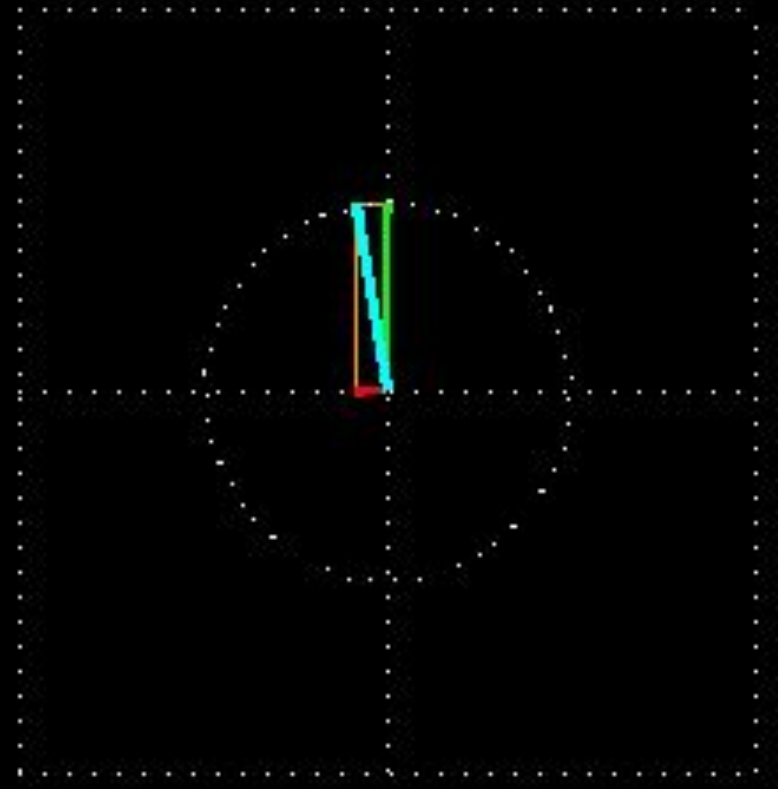
Виды поляризации света: Плоско поляризован-ный свет



Виды поляризации света: Эллиптически поляризованный свет. В эллиптически-поляризованной волне в любой плоскости P , перпендикулярной направлению распространения волны, конец результирующего вектора E за один период светового колебания обегает эллипс, который называется **эллипсом поляризации**.

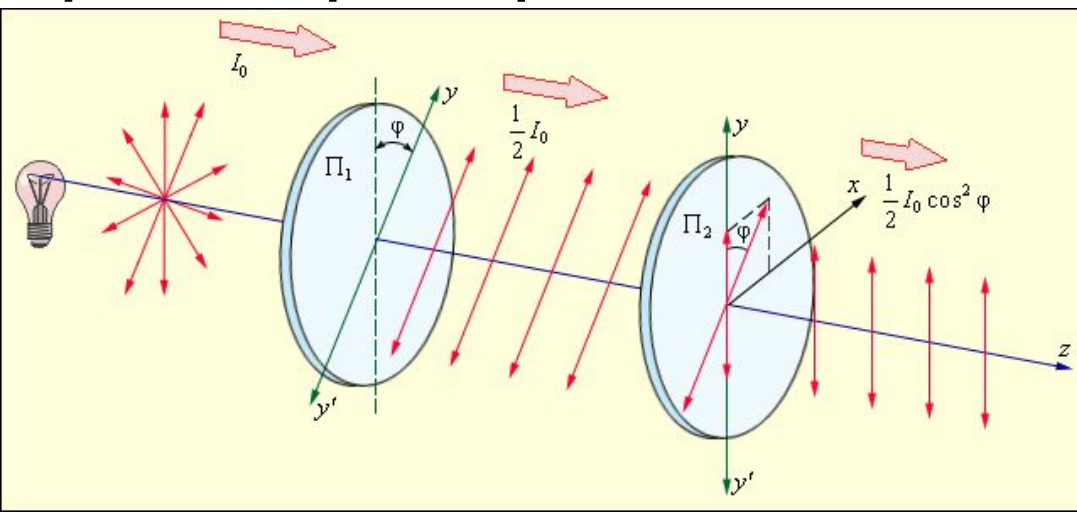


Частным случаем эллиптически-поляризованной волны является волна с **круговой поляризацией**



Закон Малюса

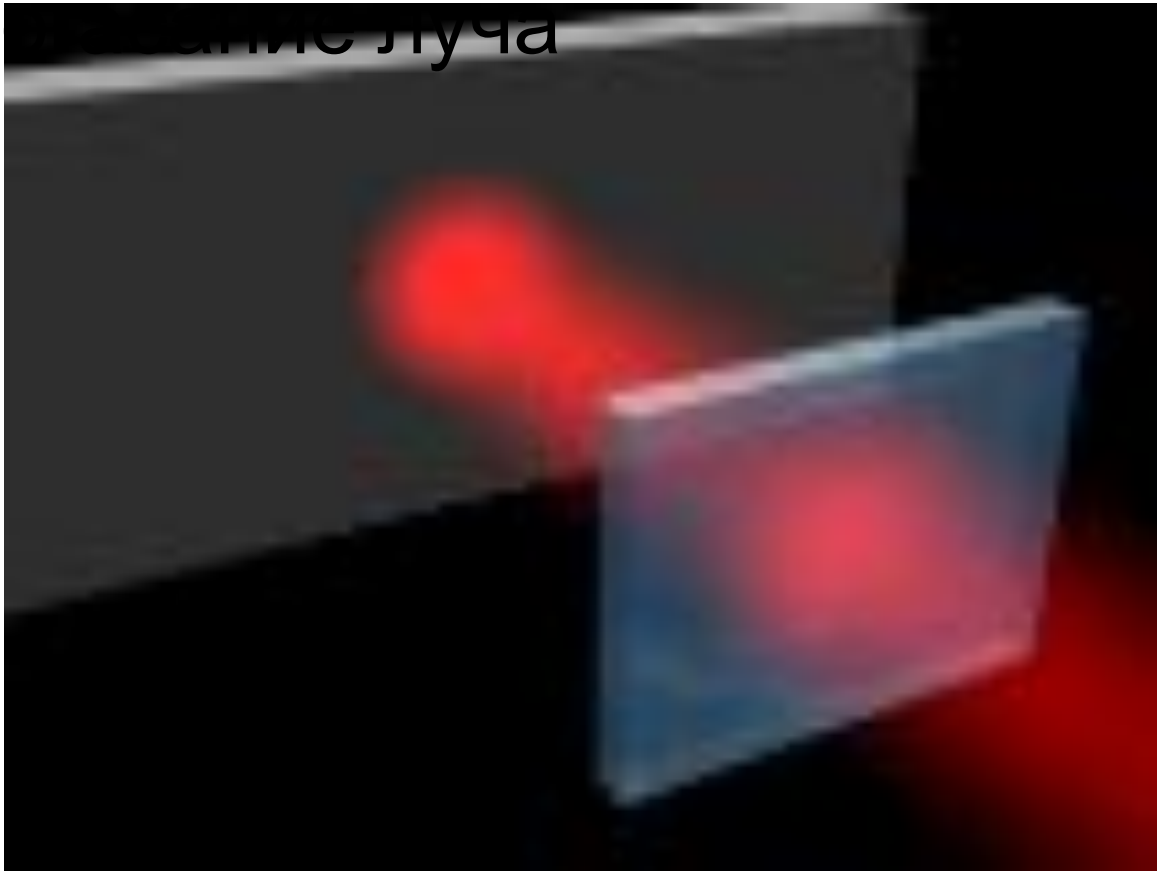
В опытах Малюса свет последовательно пропус-кался через два одинаковых поляроида – пластин-ки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски). Пластинки можно было поворачивать друг относительно друга на угол ϕ . Интенсивность прошедшего света оказалась прямо пропорциональной $\cos^2 \phi$, где ϕ – угол



$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2(\phi) \quad (38.4)$$

Закон Малюса

В соответствии с законом Малюса, если на поляризатор падает плоско поляризованный свет, то при вращении поляризатора через каждые 180° на экране будет наблюдаться полное погашение луча



Поляризация света играет важную роль в процессах преломления и отражения его от границы раздела прозрачных сред. Пусть граница раздела плоская. Плоскостью падения света на нее называется плоскость образованная падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела. Все три луча: падающий, отраженный и преломленный находятся в плоскости падения. Существенным оказывается Положение светового вектора падающего луча по отношению к плоскости падения. При этом падающая волна мысленно раскладывается на две плоско поляризованные волны.



Световой вектор первой волны лежит в плоскости падения и обозначается как $E_{1\parallel}$. Световой вектор второй волны перпендикулярен плоскости падения, его обозначают — $E_{1\perp}$. Каждая из этих, мысленно выделенных волн, испытывает преломление и отражение на границе раздела независимо от другой волны. Обозначив углы падения, отражения и преломления соответственно как $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, можно выразить световые векторы отраженных преломленных волн через световые векторы падающих волн.

.

$$E_{2\parallel} = E_{1\parallel} \frac{\frac{n_2}{n_1} - \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)}}{\frac{n_2}{n_1} + \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)}} \quad (38.5)$$

$$E_{3\parallel} = E_{1\parallel} \frac{2}{\frac{n_2}{n_1} + \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)}}$$

$$(38.6) \quad E_{2\perp} = E_{1\perp} \frac{\cos(\alpha_1) - \frac{n_2}{n_1} \cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1) + \frac{n_2}{n_1} \cos(\alpha_3)}$$

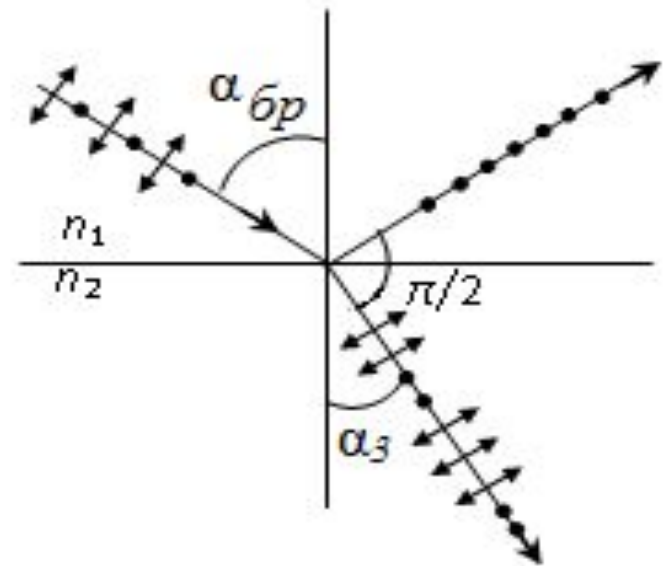
$$E_{3\perp} = \frac{2E_{1\perp}}{\frac{n_2}{n_1} \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\alpha_1)} + 1}$$

Эти формулы называются формулами Френеля для отражения и преломления света. Из них можно получить формулы для интенсивностей отраженных и преломленных волн:

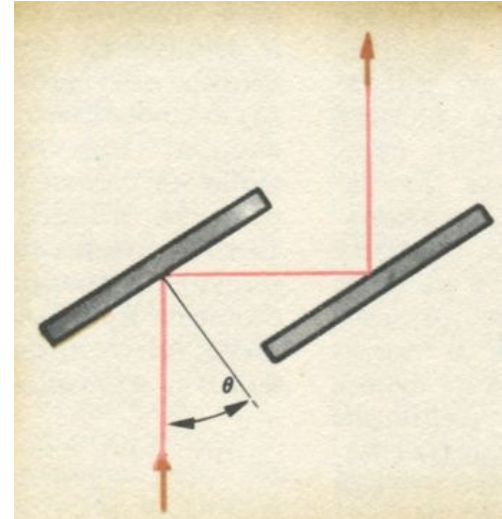
$$\begin{aligned} I_{2\parallel} &= I_{1\parallel} \frac{tg^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{tg^2(\alpha_1 + \alpha_3)} \\ I_{3\parallel} &= I_{1\parallel} \left[1 - \frac{tg^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{tg^2(\alpha_1 + \alpha_3)} \right] \end{aligned} \quad (38.7)$$

$$\begin{aligned} I_{3\perp} &= I_{1\perp} \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_3)} \\ I_{3\perp} &= I_{1\perp} \left[1 - \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_3)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_3)} \right] \end{aligned} \quad (38.8)$$

Из первой формулы (38.7) вытекает интересное свойство процесса отражения: если $\alpha_1 + \alpha_3 = \pi/2$, т.е. преломленный и отраженный лучи перпендикулярны друг другу, то $\text{tg}(\alpha_1 + \alpha_3) = \infty$ и интенсивность отраженного света оказывается равной нулю. Угол падения, соответствующий этому случаю называется углом ***Брюстера***. Если на границу раздела диэлектриков под углом Брюстера направить естественный свет, то отраженный луч будет линейно поляризован, так как он не будет содержать компоненту с поляризацией параллельной плоскости падения. Преломленный луч будет частично поляризован.



На этом принципе основано устройство отражательного поляризатора. Обычно это одна или несколько пластин из прозрачного материала. Их устанавливают под углом Брюстера θ к падающему свету. Для различных материалов угол



Брюстера неодинаков и зависит от показателя преломления ($\theta = \arctg(n)$). Степень поляризации отражательных поляризаторов высока, она достигает 99,5 %. Однако интенсивность света на выходе мала и составляет единицы процентов от интенсивности падающего света.