

Поляризация света

Содержание лекции:

- **Поляризованный и естественный свет**
- **Закон Малюса**
- **Поляризация при отражении и преломлении**
- **Поляризация при двойном лучепреломлении**
- **Поляризационные устройства**
- **Интерференция поляризованных лучей**
- **Анализ поляризованного света**
- **Искусственное двойное лучепреломление**
- **Вращение плоскости поляризации**

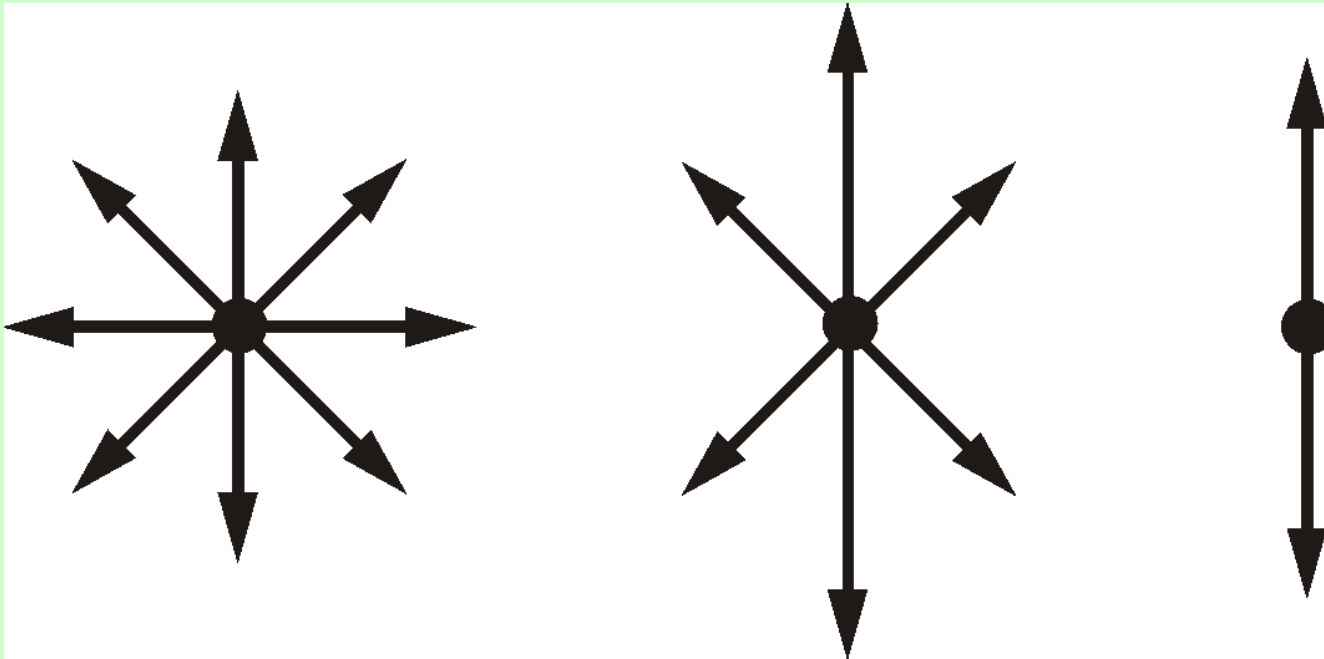
1. Поляризованный и естественный свет

Поляризованным называется свет, в котором направления светового вектора (\vec{E}) упорядочены каким-либо образом:

- в **плоско- (линейно) поляризованном** свете колебания светового вектора лежат только в одной плоскости, проходящей через луч
- **эллиптически поляризованный свет**: конец светового вектора описывает эллипс
- **поляризованный по кругу свет**: конец светового вектора описывает окружность.

Частично поляризованным светом называется свет с преимущественным направлением колебаний светового вектора.

В естественном свете колебания светового вектора совершаются во всех направлениях, перпендикулярных к лучу.



(a)

(б)

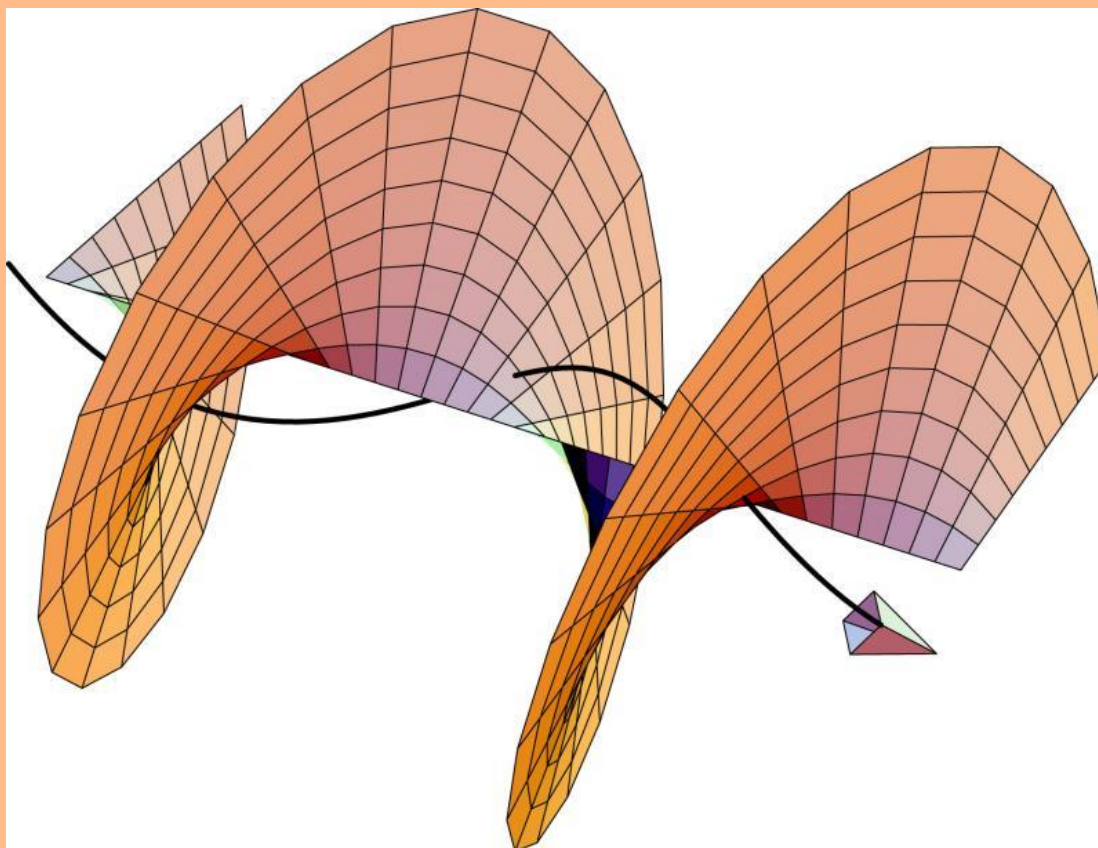
(в)

a - естественный свет;

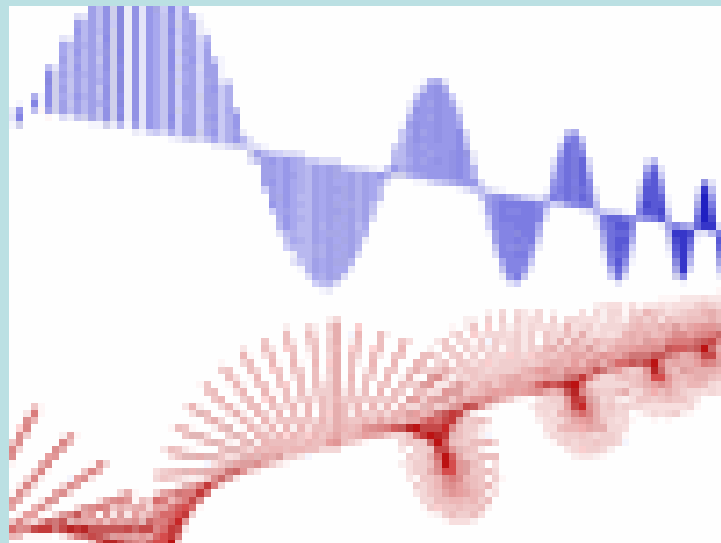
б - частично поляризованный свет (смесь естественного с плоскополяризованным);

в - линейно поляризованный свет.

Пространственная структура эллиптически поляризованных волн



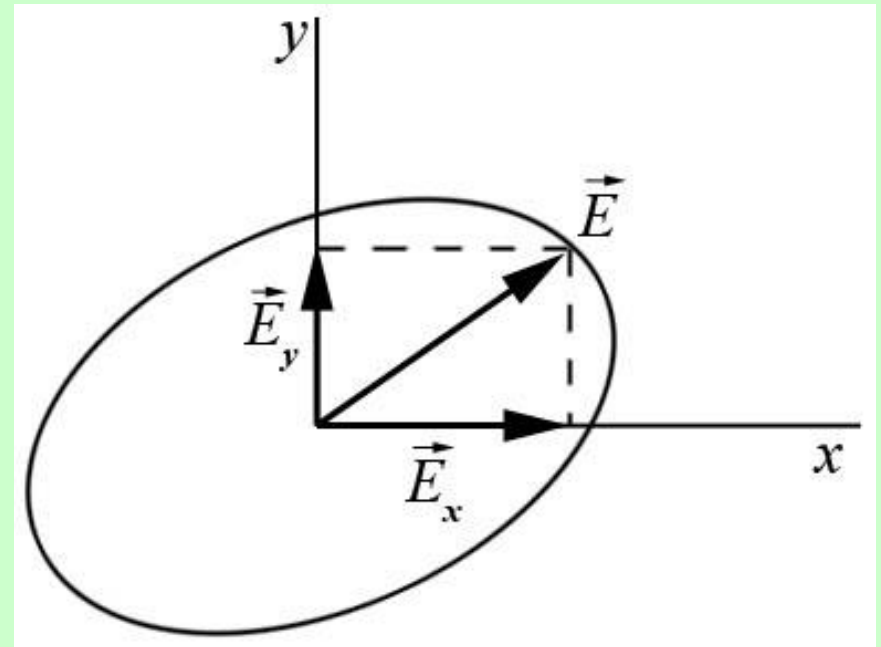
Линейно поляризованная электромагнитная волна и волна круговой поляризации.



Образование поляризованного света

Рассмотрим 2 взаимно перпендикулярных колебания, отличающихся по фазе на α :

$$\begin{cases} E_x = A_1 \cos \omega t \\ E_y = A_2 \cos(\omega t + \alpha) \end{cases}$$



Результат сложения:

1) $\alpha = 0$ или π –

плоскополяризованный свет;

2) $A_1 = A_2$ и $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$ – свет, поляризованный по кругу;

3) произвольные A и α – эллиптически поляризованный свет.

Различают эллиптическую и круговую поляризацию 2 видов:

- **правая**: если конец светового вектора вращается по часовой стрелке относительно направления, противоположного направлению луча;
- **левая**: если конец светового вектора вращается против часовой стрелки относительно направления, противоположного направлению луча.

Степень поляризации:

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

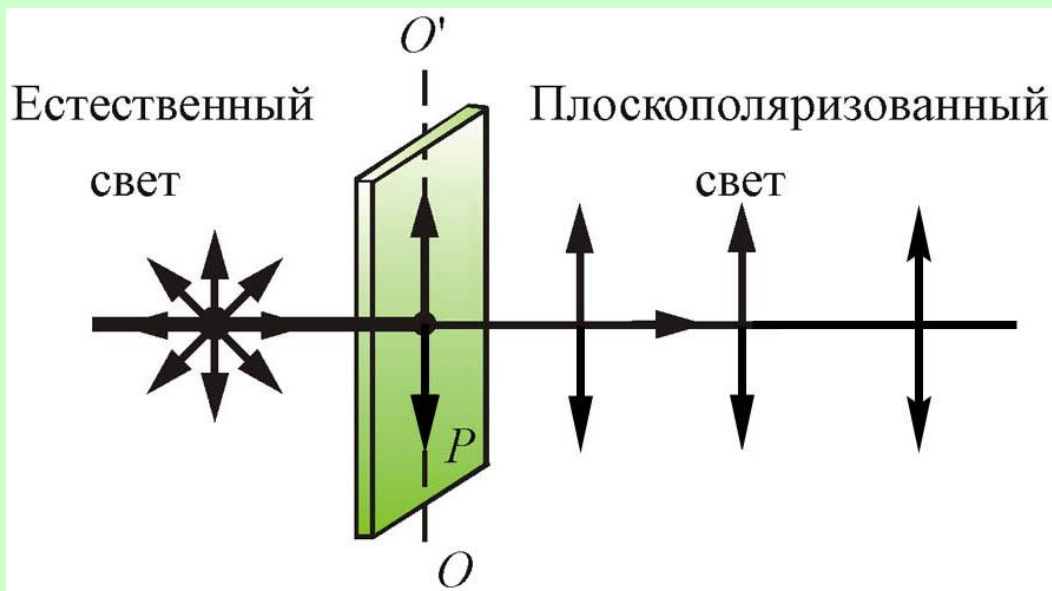
- 1) естественный свет: $I_{\max} = I_{\min}$, $P = 0$
- 2) плоскополяризованный свет: $I_{\min} = 0$, $P = 1$
- 3) для эллиптически поляризованного света понятие степени поляризации неприменимо (у такого света колебания полностью упорядочены)

Линейно поляризованный свет:

Устройства, позволяющие получать линейно поляризованный свет из естественного, называют *линейными поляризаторами*:

- свободно пропускают колебания, параллельные *плоскости поляризатора*,

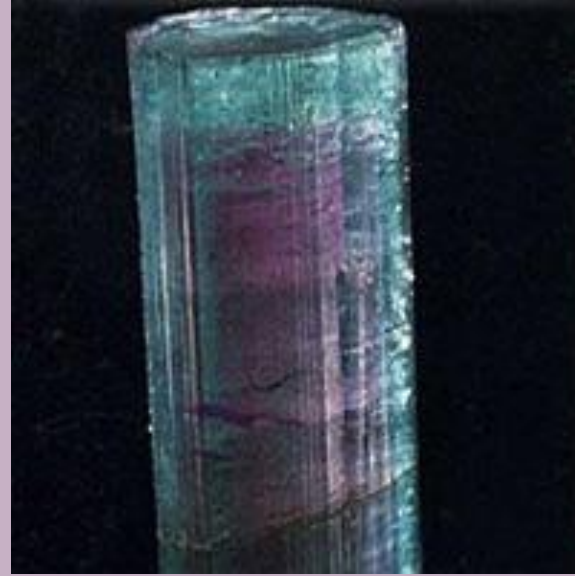
- полностью или частично задерживают колебания перпендикулярные к его плоскости.



После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO' .

Линейные поляризаторы:

- **оптически анизотропные кристаллы** (турмалин), вырезанные параллельно его оптической оси;
- **поляроиды** – целлулоидные плёнки, в которые введено большое количество одинаково ориентированных с помощью растяжения или сдвиговой деформации кристалликов.
- **оптические стопы изотропных пластинок**, прозрачных в нужной области спектра.



Полихромные кристаллы турмалина

Пример использования поляризационного фильтра в фотографии

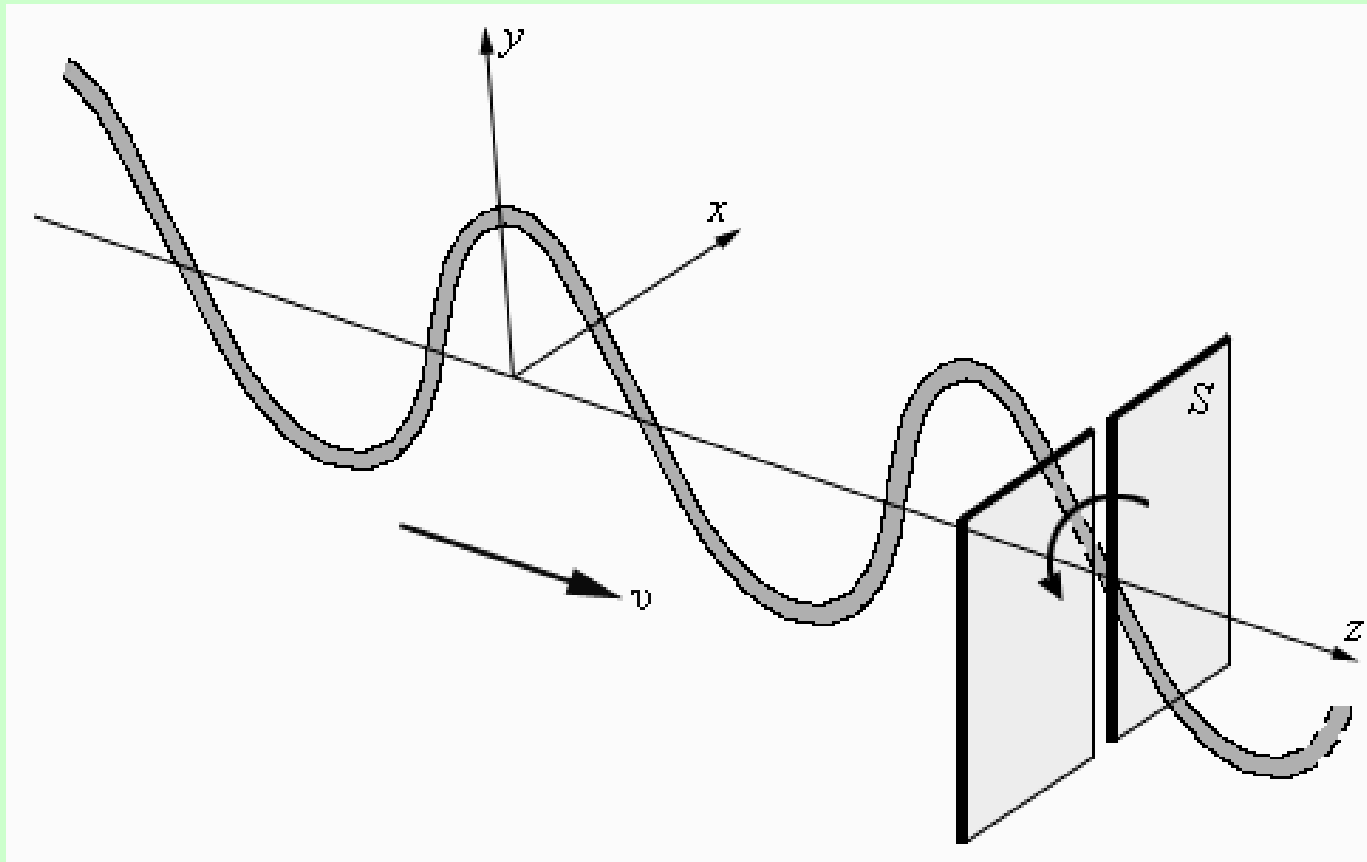


ВОЗМОЖНОСТЬ изменения яркости и контраста различных частей изображения:

- получение тёмного, густо-синего неба в солнечный день;
- избавление от отражения фотографа в стекле при съёмке находящихся за стеклом объектов.

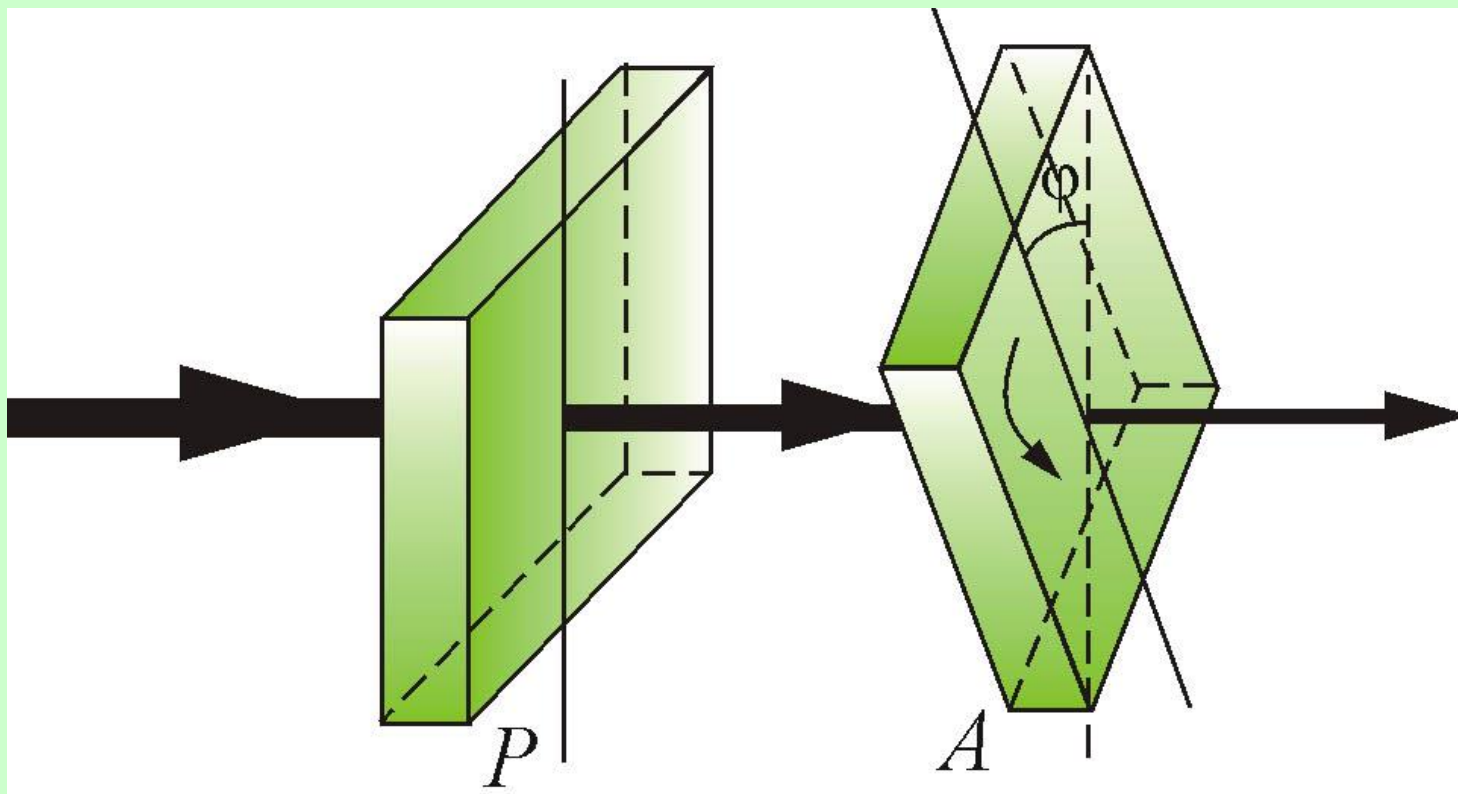
Аналогичное устройство, применяемое для исследования поляризации света – ***анализатор***.

- если на пути луча поставить анализатор, интенсивность прошедшего света будет изменяться в зависимости от того, как ориентированы друг относительно друга поляризатор и анализатор (при повороте щели из указанного положения будет происходить затухание света).

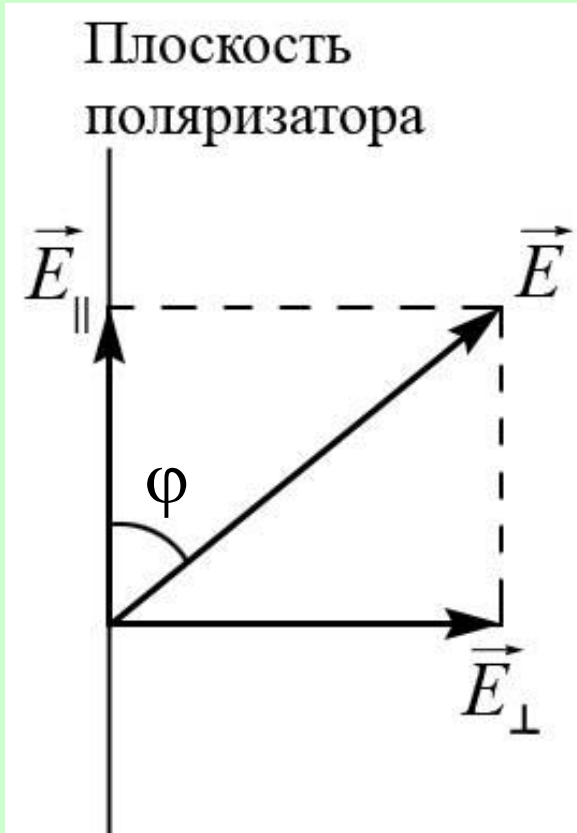


2. Закон Малюса

Рассмотрим процесс падения плоскополяризованного света (от поляризатора P) на Π поляризатор (A), плоскость которого составляет с плоскостью колебаний светового вектора угол φ :



Разложим световой вектор на составляющие:



$$\begin{cases} E_{\parallel} = E \cos \varphi & - \text{ пройдет через прибор} \\ E_{\perp} = E \sin \varphi & - \text{ будет задержано} \end{cases}$$

Интенсивность прошедшего
света:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad - \text{ закон Малюса}$$

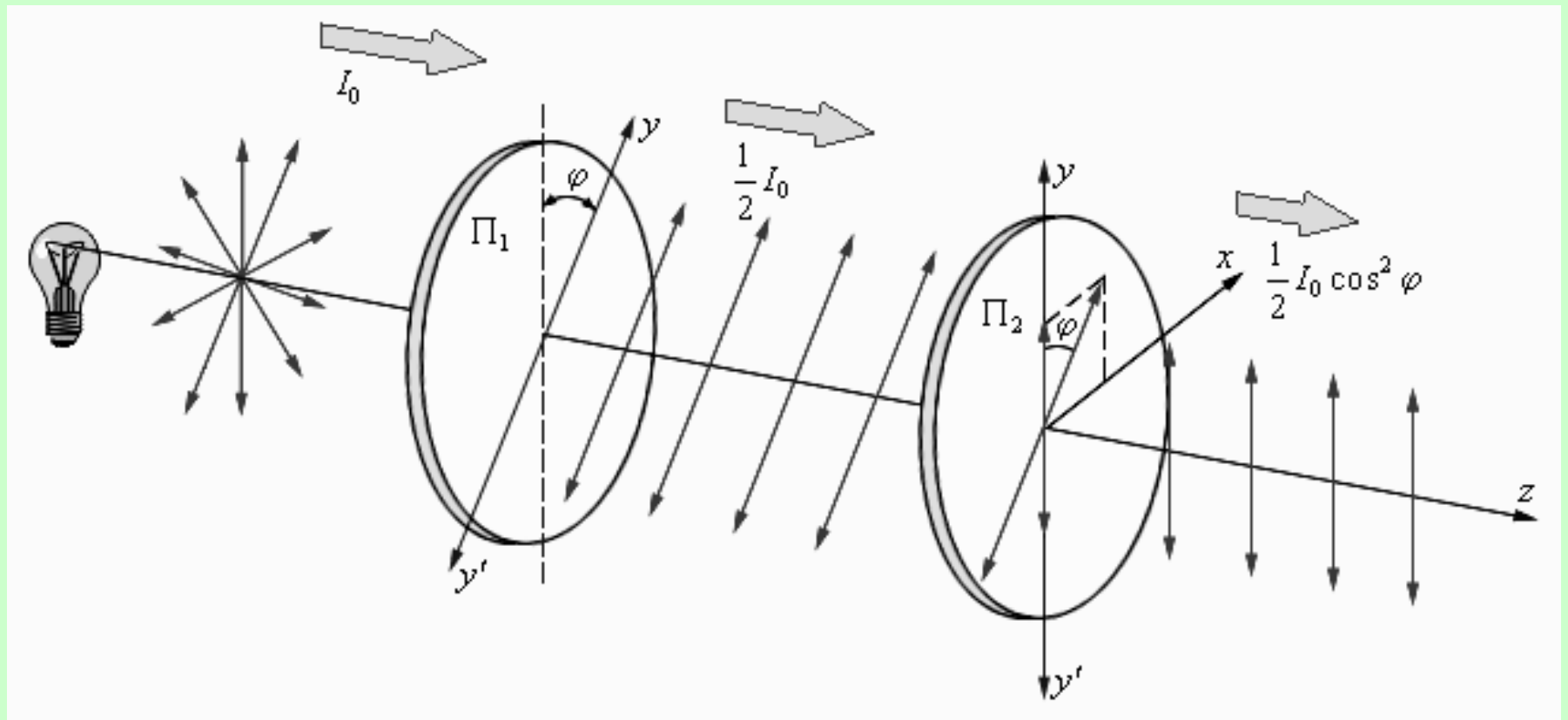
I_0 – интенсивность падающего на поляризатор света.

Для естественного света все значения φ равновероятны,
следовательно,

$$\langle \cos^2 \varphi \rangle = \frac{1}{2}$$

$$I = \frac{1}{2} I_{ест}$$

**- интенсивность света, прошедшего через поляризатор,
составляет половину интенсивности естественного света.**



При прохождении естественного света интенсивностью I_0 через 2 поляризатора с углом φ между их плоскостями:

• после первого поляризатора $I = \frac{1}{2} I_0$

• после второго поляризатора $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi$

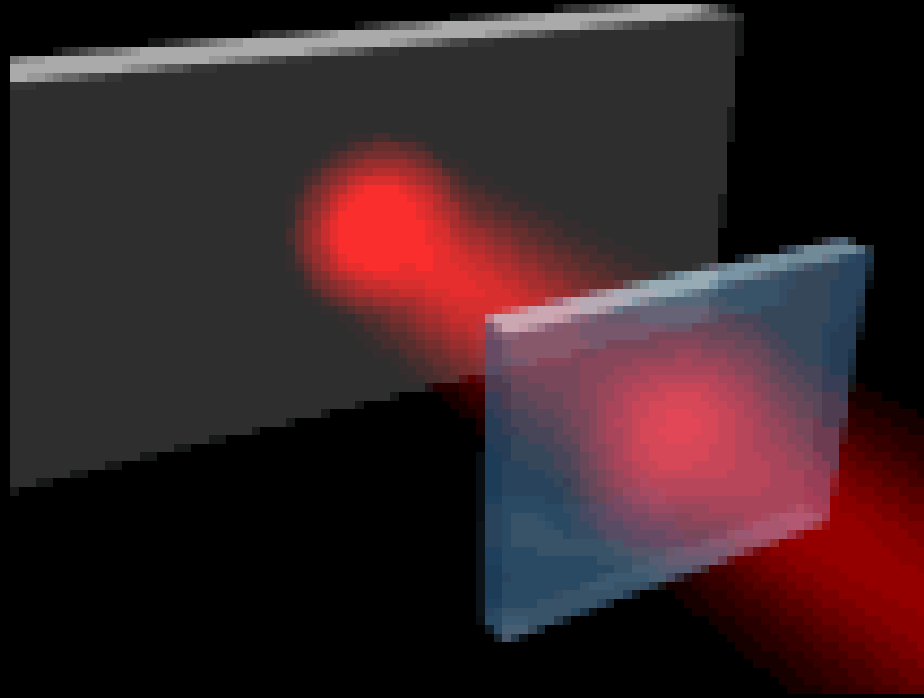
Поляризаторы параллельны ($\varphi = 0$):

$$I = I_{\max} = \frac{1}{2} I_0$$

Скрещенные поляризаторы ($\varphi = \pi/2$):

$$I = 0$$

- свет не пропускают.

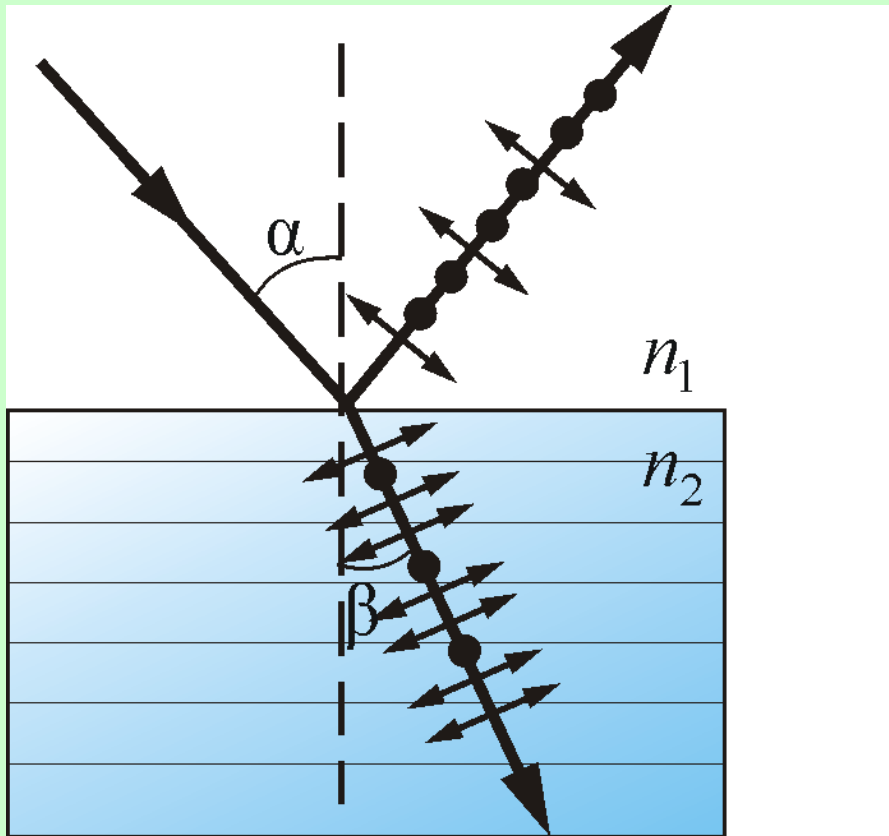


Прохождение линейно поляризованного света He-Ne лазера через вращающийся поляроид:

- Когда направление выделенной оси поляроида совпадает с направлением поляризации падающего света, на экране за поляроидом видно пятно с максимальной интенсивностью.
- Когда эти направления перпендикулярны, свет полностью поглощается поляроидом, и световое пятно на экране отсутствует.

3. Поляризация при отражении и преломлении

Если угол падения на границу раздела двух диэлектриков отличен от нуля, **отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными**.



- В отраженном луче преобладают колебания, **перпендикулярные** плоскости падения,
- в преломленном луче – колебания, **параллельные** плоскости падения.

Степень поляризации зависит от угла падения:

Если свет падает под углом, удовлетворяющим соотношению

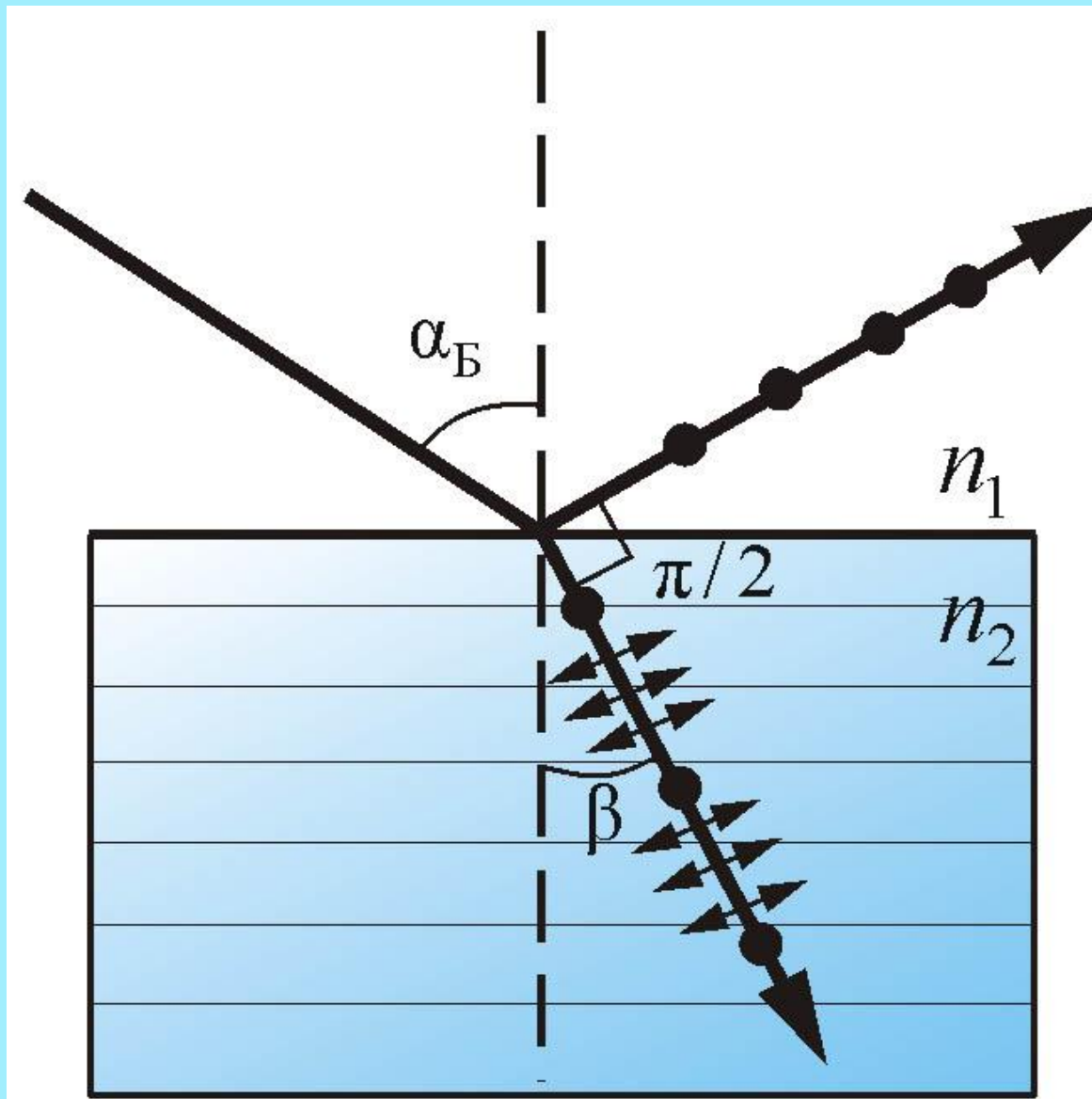
$$\boxed{\operatorname{tg} \alpha_B = n_{12}} \quad - \text{закон Брюстера}$$

- **отраженный луч полностью поляризован** (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения);
- **степень поляризации преломленного луча максимальна**, но он остается поляризованным частично.

α_B называется **углом Брюстера**.

При падении света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

Падение света под углом Брюстера



Формулы Френеля

При падении естественного света на границу раздела двух диэлектриков:

для отраженного луча:

$$\begin{cases} I_{r\perp} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \\ I_{r\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \end{cases}$$

для преломленного луча:

$$\begin{cases} I_{p\perp} = \frac{1}{2} I_0 \left[1 - \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \\ I_{p\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \left[1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \right] \end{cases}$$

Степень поляризации можно записать как

$$P = \frac{|I_{\perp} - I_{\parallel}|}{I_{\perp} + I_{\parallel}}$$

- В случае падения света под углом Брюстера:

$$\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}$$

Тогда в отраженном луче отсутствует составляющая, параллельная плоскости падения (как и упоминалось ранее):

$$I_{r\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{2}} = 0$$

- При нормальном падении света на границу раздела:

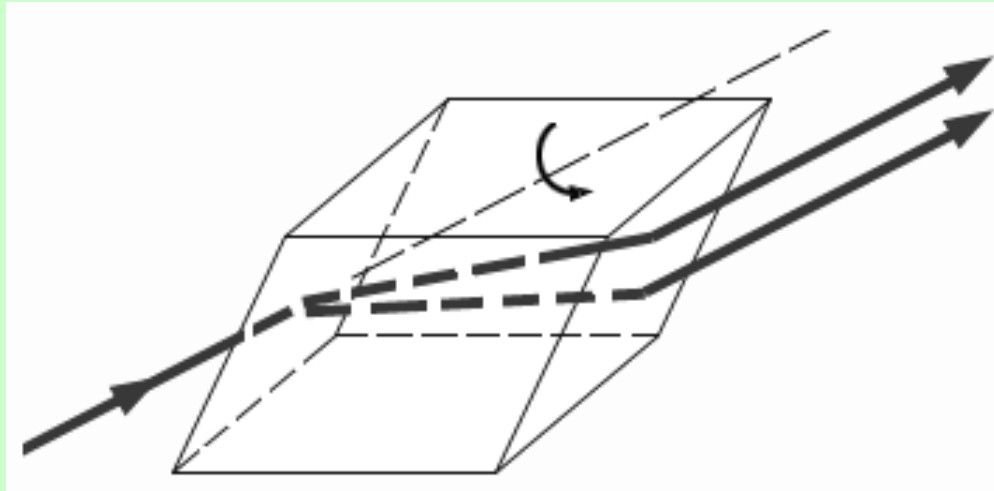
$$I_{r\perp} = I_{r\parallel} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

$$I_{p\perp} = I_{p\parallel} = \frac{4n_1 n_2}{(n_2 + n_1)^2}$$

- исчезает различие между перпендикулярной и параллельной компонентами.

4. Поляризация при двойном лучепреломлении

При прохождении через все прозрачные кристаллы (кроме принадлежащих к кубической системе) наблюдается **двойное лучепреломление** – упавший на кристалл луч разделяется внутри кристалла на 2 луча, распространяющиеся внутри кристалла с разными скоростями и в разных направлениях.



Кристаллы, обладающие двойным лучепреломлением, разделяют на

Одноосные (исландский шпат, турмалин):

- Один из преломленных лучей подчиняется закону преломления (располагаясь в плоскости падения) – *обыкновенный луч (o)*;
- Второй луч не подчиняется закону преломления – *необыкновенный луч (e)*.

Двуосные (гипс, слюда):

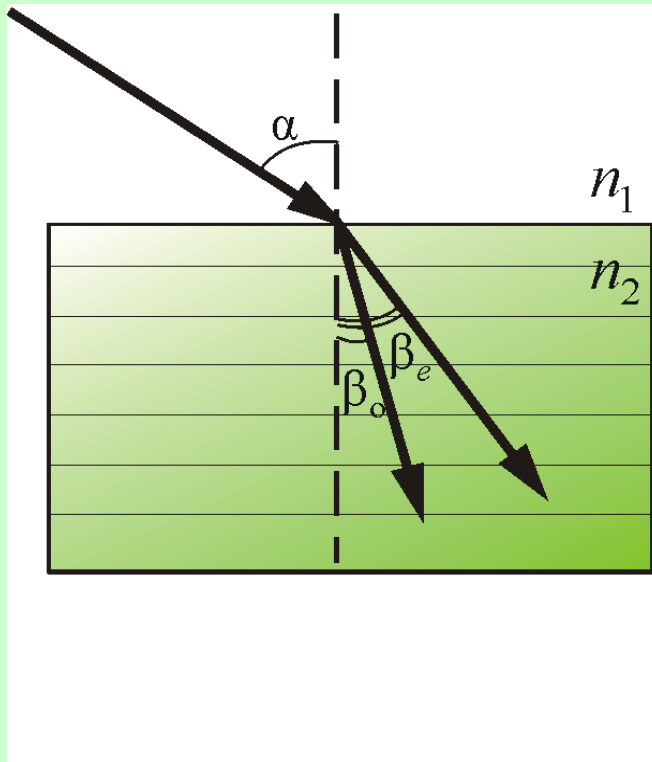
оба луча необыкновенные - показатели преломления для них зависят от направления в кристалле.

*Направление в одноосном кристалле, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи идут, не разделяясь и с одинаковой скоростью, называется **оптической осью кристалла** (у двуосного кристалла их две).*

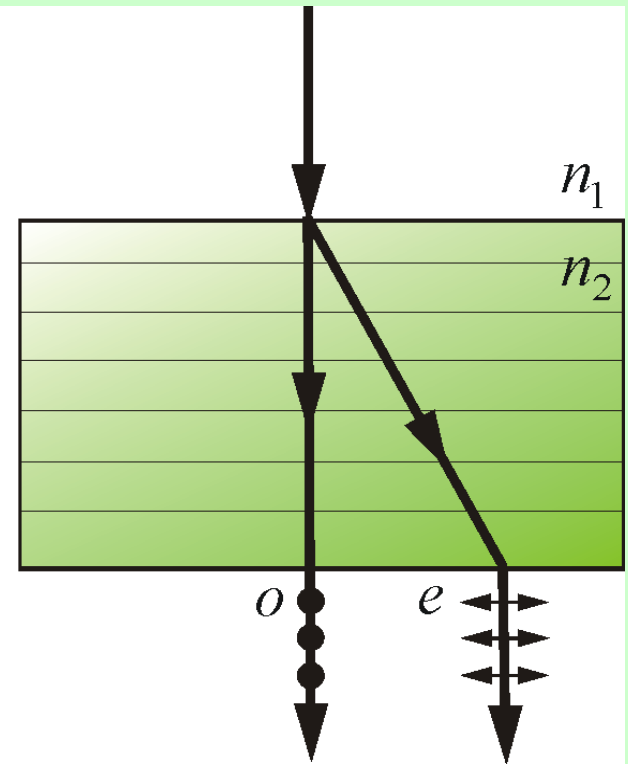
*Плоскость, проходящая через оптическую ось (и через световой луч), называется **главным сечением кристалла**.*

Обыкновенный и необыкновенный лучи полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях:

- плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна главному сечению кристалла;
- плоскость колебаний необыкновенного луча совпадает с главным сечением.



Ход обыкновенного и
необыкновенного лучей внутри
одноосного кристалла



Плоскости поляризации
обыкновенного и необыкновенного
лучей взаимно перпендикулярны

Двойное лучепреломление объясняется **анизотропией кристалла**:

в кристаллах некубической системы ϵ зависит от направления:

в одноосных кристаллах диэлектрическая проницаемость в направлении оптической оси и в направлениях, перпендикулярных ей, имеет разные значения ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} .

Так как

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon} \quad (\text{в диэлектриках } \mu \approx 1)$$

видно, что скорости лучей будут разные:

обыкновенного:

$$v_o = \frac{c}{n_o} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}}$$

необыкновенного:

$$v_e = \frac{c}{n_e} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\parallel}}}$$

n_o - показатель преломления обыкновенного луча;

n_e - показатель преломления необыкновенного луча (перпендикулярного к оптической оси).

Различают *положительные* и *отрицательные* одноосные кристаллы:

- Для положительного $v_o > v_e$
- Для отрицательного $v_o < v_e$

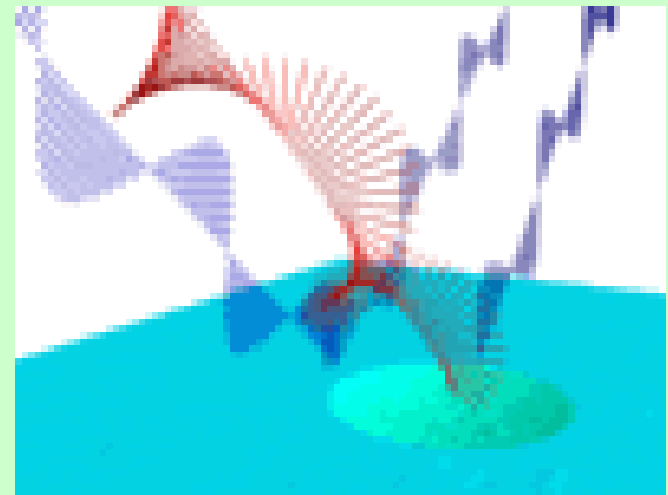
В некоторых кристаллах наблюдается *явление дихроизма* — *один из лучей поглощается сильнее другого*:

В кристалле турмалина **обыкновенный луч практически полностью поглощается на длине 1 мм, а необыкновенный луч выходит из кристалла.**

Это явление используется для создания **поляроидов** (на выходе поляроида получается один поляризованный луч).

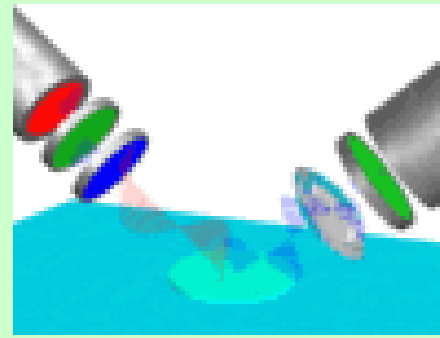
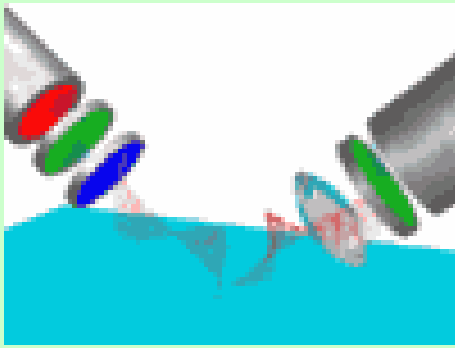
Две плоскополяризованные волны, падающие на подложку с образцом:

- одна волна, отражённая от подложки, остается линейно поляризованной.
- вторая меняет поляризацию на круговую.



Эллипсометрия - изучение поверхностей жидких и твёрдых тел по состоянию поляризации светового пучка, отражённого этой поверхностью и преломлённого на ней:

- *бесконтактные* исследования поверхности жидкости или твёрдых веществ, процессов адсорбции, коррозии...
- исследования атомного состава неоднородных и анизотропных поверхностей и плёнок
- переход к эллиптической поляризации при отражении и преломлении происходит вследствие наличия тонкого переходного слоя на границе раздела сред.
- Источник света – лазер.



Микроскопия с использованием принципов эллипсометрии

Излучение лазера (выделено красным) проходит через поляризатор (отмечено зелёным) и через двулучепреломляющую пластинку (отмечено синим), которая из волны линейной поляризации формирует эллиптически поляризованную волну.

При отражении от образца свет становится линейно поляризованным.

Объектив собирает свет, отражённый от образца и через анализатор (отмечено зелёным) подаёт этот свет на фотоприёмную матрицу.

Анализатор сориентирован так, что **задерживает свет линейной поляризации**, отражённый от образца, и **пропускает значительную часть света эллиптической поляризации**, отражённого от подложки.

В результате образец становится видимым на фоне подложки в виде тёмного пятна.

Изменяя взаимную ориентацию поляризатора, анализатора и двулучепреломляющей пластинки, можно получать позитивное и негативное изображение исследуемого объекта.

5. Поляризационные устройства

Для получения поляризованного света удобнее использовать не кристаллы, а их комбинации, называемые **поляризационными призмами**:

- состоят из двух или более трехгранных призм из одноосных двоякопреломляющих кристаллов с одинаковой или различной ориентацией оптических осей.
- призмы склеены между собой прозрачными веществами или разделены воздушной прослойкой (для работы в УФ).
- для склеивания применяются вещества с n , близким к среднему значению n_o и n_e лучей (канадский бальзам, глицерин, касторовое и льняное масла...).

Поляризационные призмы делятся на:

1) **однолучевые поляризационные призмы:**

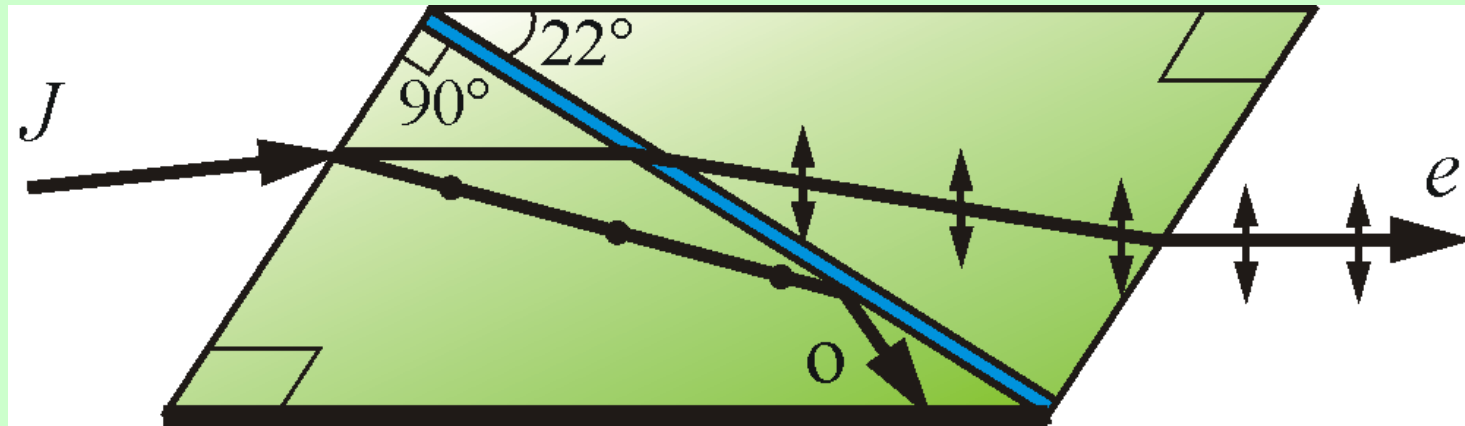
- из них выходит **один пучок линейно поляризованного света;**
- действуют по принципу **полного отражения**:
 - пропускается необыкновенный луч e ,
 - отсекается (поглощается или выводится в сторону (за счет внутреннего отражения)) обыкновенный луч o .

2) **двулучевые поляризационные призмы:**

пропускают обе взаимно-перпендикулярно линейно поляризованные компоненты исходного пучка, **пространственно разделяя их.**

Пример однолучевой призмы - *призма Николя (николь)*:

- призма из исландского шпата, разрезанная по диагонали и склеенная канадским бальзамом;
- углы в призме рассчитаны так, чтобы необыкновенный луч прошел через слой канадского бальзама, а обыкновенный претерпел на нем полное отражение и поглотился зачерненной гранью.



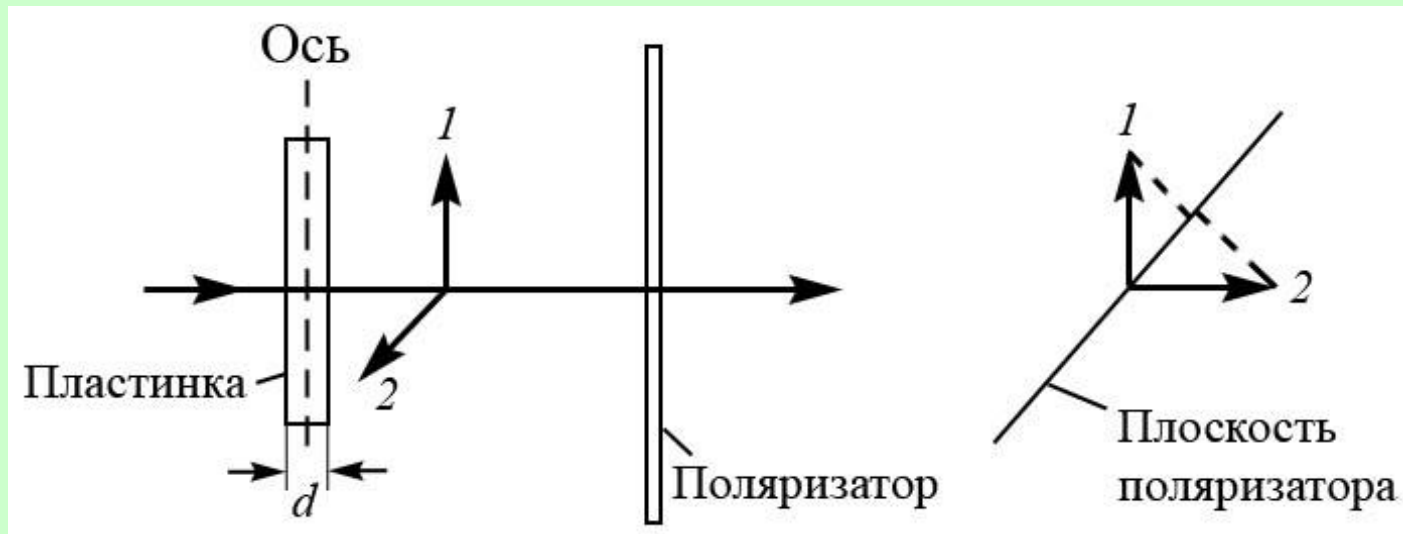
Показатель преломления канадского бальзама $n_e < n_{к.б} < n_o$

6. Интерференция поляризованных лучей

Если лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях, интерференции не будет.

Интерферировать могут лучи, поляризованные в одном направлении.

Рассмотрим нормальное падение плоскополяризованного света на кристаллическую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси. Обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются, не разделяясь, но с различной скоростью.



За время прохождения через пластинку между ними возникнет разность хода

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

Соответствующая разность фаз:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e) d \quad (\lambda_0 - \text{длина волны в вакууме}).$$

После прохождения через поляризатор колебания лучей *1*, *2* **будут лежать в одной плоскости** (с амплитудами, равными проекции амплитуд лучей *1*, *2* на плоскость поляризатора), и **лучи *1*, *2* могут интерферировать.**

Если на пластинку падает **естественный свет**, интерференции **не будет**, т.к. обыкновенный и необыкновенный лучи содержат колебания, принадлежащие разным цугам волн и вследствие этого **некогерентны.**

7. Анализ поляризованного света

Рассмотрим нормальное падение плоскополяризованного света на кристаллическую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси:

Разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучами

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

• Если

$$\Delta = m\lambda_0 + \frac{\lambda_0}{4} \quad \text{- пластинка в четверть волны.}$$

Разность фаз при прохождении через нее

$$\delta = \frac{\pi}{2}$$

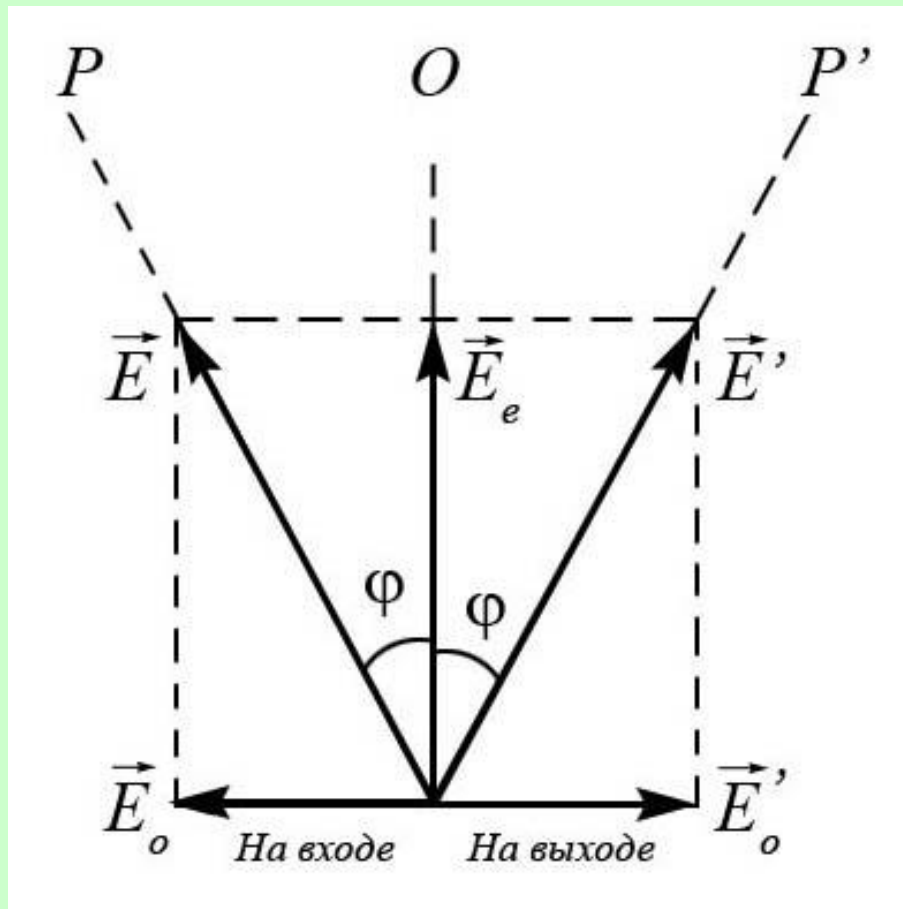
• Если

$$\Delta = m\lambda_0 + \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{- пластинка в полволны.}$$

Разность фаз при прохождении через нее

$$\delta = \pi$$

Прохождение плоскополяризованного света через пластинку в полволны:



На входе в пластинку плоскость поляризации света – P .

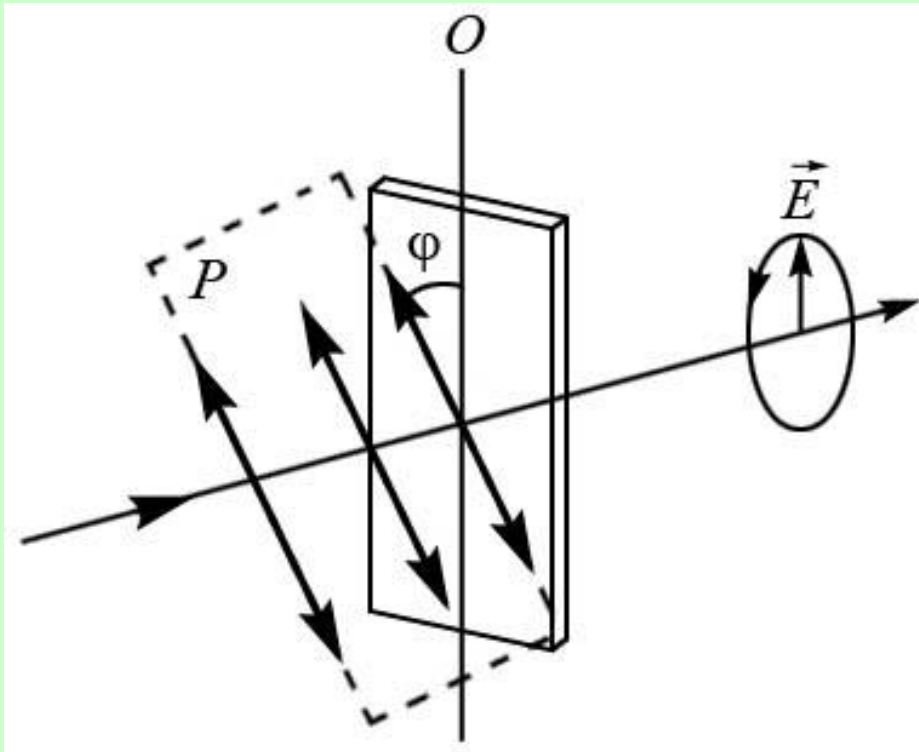
При прохождении через пластинку свет разделится на компоненты o и e , разность фаз между которыми составит π .

В результате на выходе из пластинки ориентация лучей станет зеркально отраженной, плоскость поляризации – P' .

Итак, **пластинка в полволны поворачивает плоскость колебаний прошедшего через нее света на угол 2φ** (φ – угол между плоскостью колебаний в падающем луче и осью пластинки).

Прохождение плоскополяризованного света через пластинку в четверть волны:

На входе в пластинку плоскость колебаний – P .



- При $\varphi = 45^\circ$

амплитуды лучей o и e одинаковы, разность фаз между ними составит $\pi/2$ – свет, вышедший из пластинки, будет поляризован по кругу.

- При произвольном φ

амплитуды o и e лучей разные – свет поляризован по эллипсу, одна из осей которого совпадает с осью пластинки.

Итак, **пластинка в четверть волны превращает плоскополяризованный свет в свет, поляризованный по кругу или по эллипсу** (в зависимости от угла между плоскостью колебаний в падающем луче и осью пластинки).

Независимо от толщины пластинки

- При $\varphi = 0$ – в пластинке будет распространяться только луч e ,
 - При $\varphi = \pi/2$ – в пластинке будет распространяться только луч o .
- **свет останется плоскополяризованным** (с плоскостью колебаний, совпадающей с P).

Отличие эллиптически поляризованного света от естественного с помощью пластинки $\lambda/4$:

(одна из осей эллипса совпадает с осью пластинки)

Пластинка $\lambda/4$ вносит дополнительную разность фаз $\pi/2$ между проходящими через нее лучами o и e . Результирующая разность фаз между ними станет равной 0 или π – **свет превратится в линейно поляризованный**, в чем можно убедиться с помощью поляризатора: при вращении Π свет гасится.

При прохождении через пластинку $\lambda/4$ естественного света он **останется естественным**, в этом случае гашения не будет.

8. Искусственное двойное лучепреломление

При механической деформации

*Возникновение двойного лучепреломления в изотропных телах (прозрачных аморфных телах и в кристаллах кубической системы) в результате механической деформации называется **фотоупругостью (пьезооптическим эффектом)**.*

Причиной является упорядочивание анизотропных молекул среды в результате механического воздействия, в отсутствие которого молекулы располагаются хаотически и среда является макроскопически изотропной.

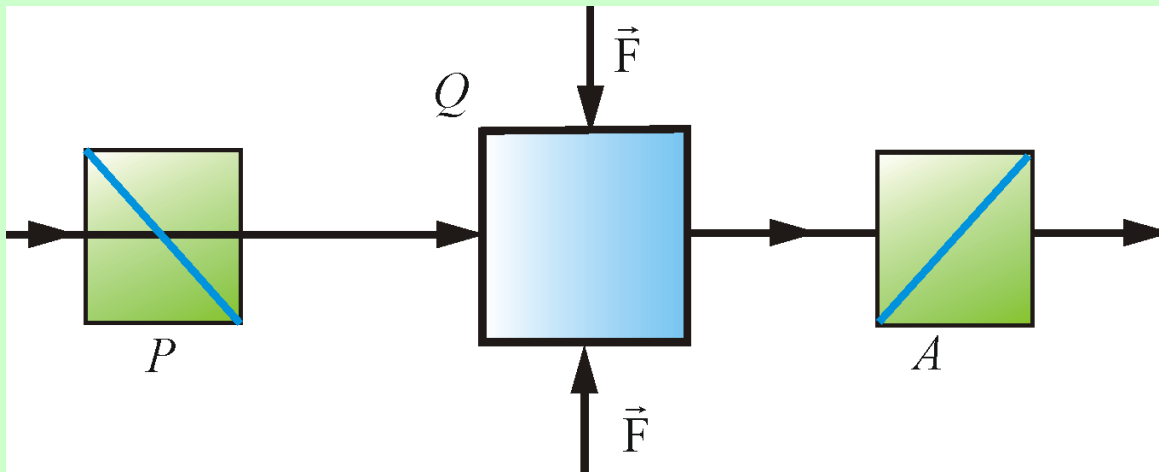
Мерой возникающей оптической анизотропии является разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

Экспериментально доказано, что она пропорциональна напряжению (силе, приходящейся на единицу площади):

$$n_o - n_e = k\sigma$$

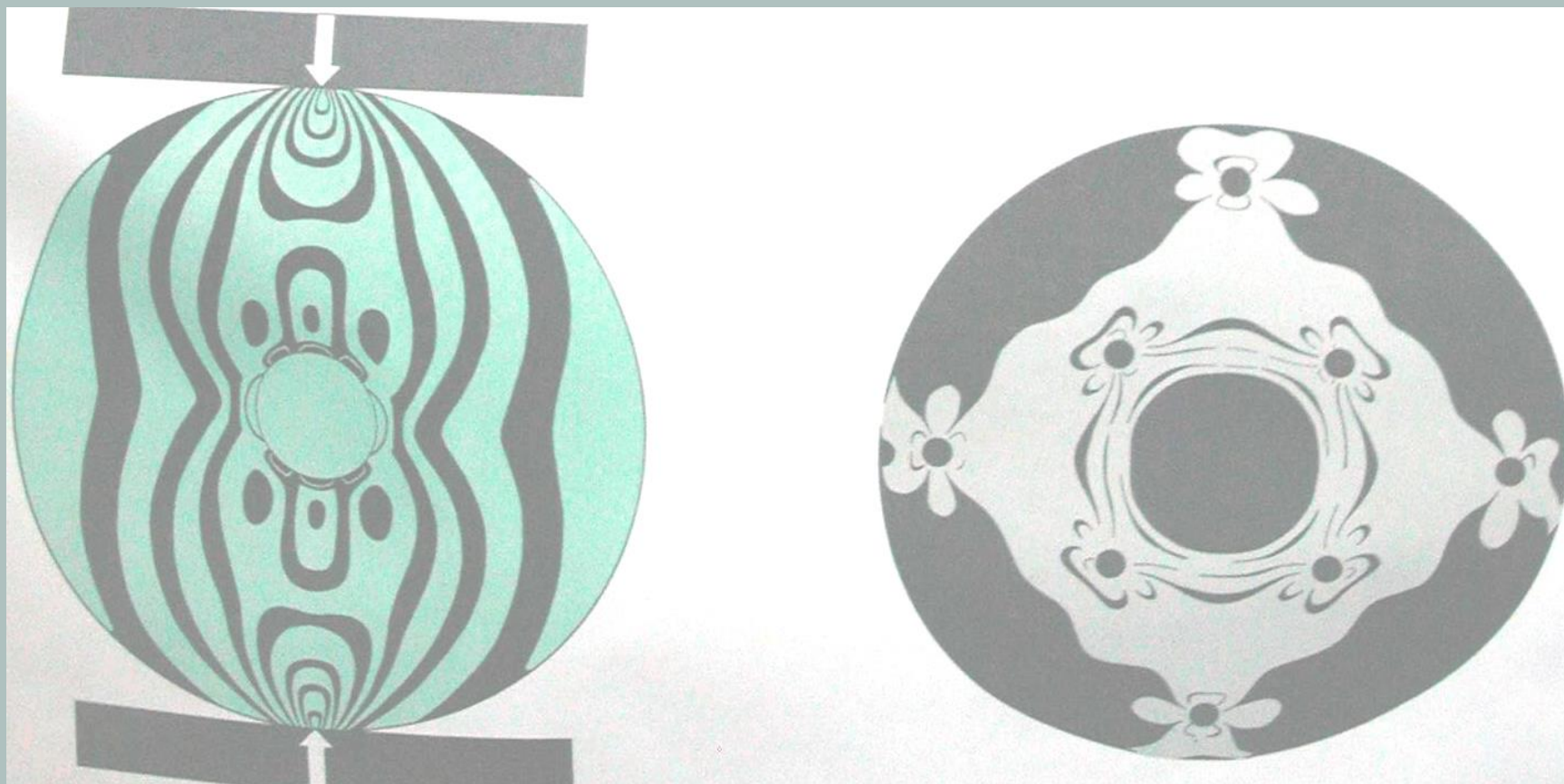
k – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств вещества и длины волны.

Рассмотрим стеклянную пластинку Q , помещенную между двумя скрещенными поляризаторами P и A :



В отсутствие механической деформации свет через них проходить не будет.

При деформировании свет начинает проходить, причем картина на экране получится цветная. По распределению цветных полос можно судить о распределении напряжений в стеклянной пластинке.

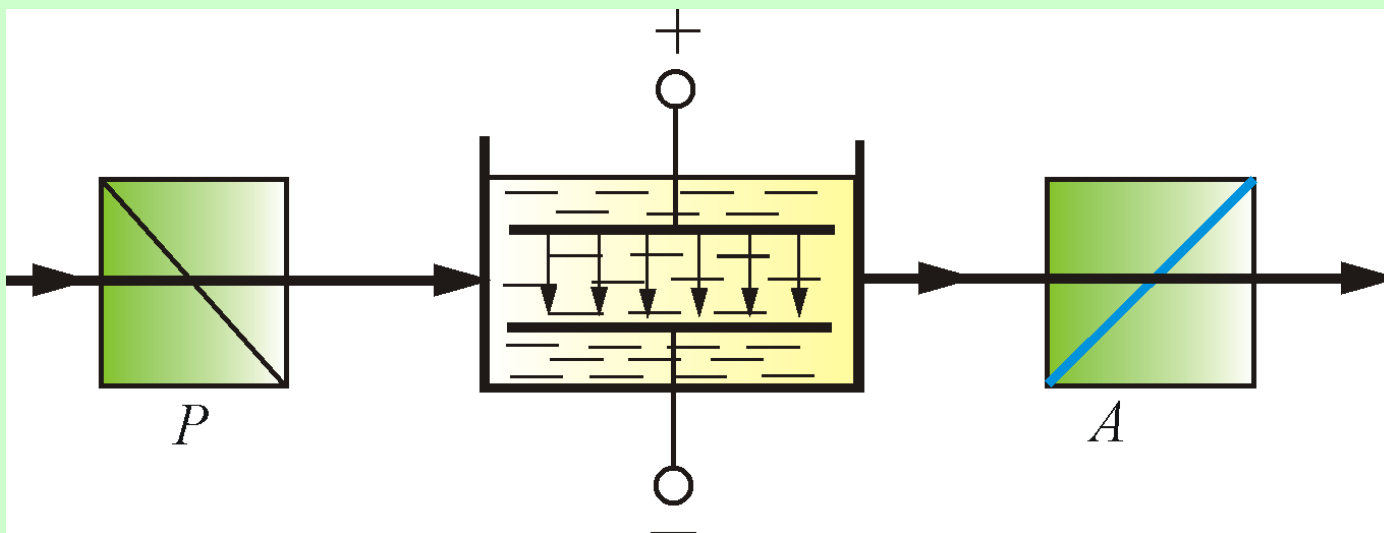


Распределение возникающих внутренних напряжений в прозрачных фотоупругих моделях для различных нагрузок

В электрическом поле

Возникновение двойного лучепреломления в изотропных средах (аморфных твердых телах, жидкостях и газах) под воздействием электрического поля называется **эффектом Керра**.

Рассмотрим **ячейку Керра** – кювету с жидкостью, в которую введены пластины конденсатора, помещенную между двумя скрещенными поляризаторами P и A :



В отсутствие внешнего электрического поля свет через систему не проходит.

При наложении электрического поля

- жидкость приобретает свойства одноосного кристалла с оптической осью, ориентированной вдоль поля,
- возникает двойное преломление,
- свет на выходе из конденсатора поляризован эллиптически,
- часть его пройдет через анализатор.

Разность показателей преломления лучей *o* и *e* пропорциональна квадрату напряжённости внешнего электрического поля E_0 :

$$n_o - n_e = qE_0^2$$

q – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств вещества и длины волны.

Разность фаз между лучами o и e после прохождения через конденсатор:

$$\delta = 2\pi B l E_0^2$$

l – толщина проходимого слоя вещества.

$$B = \frac{q}{\lambda} \text{ - постоянная Керра.}$$

Явление Керра объясняется различной поляризуемостью молекул в разных направлениях:

- в отсутствие внешнего поля молекулы ориентированы хаотически и среда является макроскопически изотропной.
- во внешнем поле молекулы ориентируются по полю, среда становится оптически анизотропной.

При росте T тепловое движение молекул препятствует действию внешнего поля – постоянная Керра уменьшается.

9. Вращение плоскости поляризации

Оптически активные вещества - среды, которые при прохождении через них плоскополяризованного света способны вращать его плоскость поляризации.

Выделяют 2 типа оптически активных веществ:

1. оптически активные в любом агрегатном состоянии (сахара, камфора, винная кислота): оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул,
2. оптически активны только в кристаллической фазе (кварц, киноварь); оптическая активность обусловлена специфической ориентацией молекул (ионов) в элементарных ячейках кристалла.

Оптически активные вещества существуют в 2 формах (в зависимости от направления вращения плоскости поляризации) - **правой и левой**; при этом молекула или кристалл правой формы зеркально-симметричны молекуле или кристаллу левой формы.

Направление вращения:

- «+» - **вправо** относительно наблюдателя, к которому свет приближается;
«-» - **влево** относительно данного наблюдателя.

- **В кристаллах:**

(сильнее всего вращают плоскость поляризации, если луч распространяется вдоль оптической оси).

$$\varphi = \alpha l$$

φ – угол поворота;

l – расстояние, пройденное лучом в кристалле;

α – ***постоянная вращения*** (зависит от длины волны).

- **В растворах:**

$$\varphi = [\alpha] c l$$

c – концентрация активного вещества;

$[\alpha]$ – ***удельная постоянная вращения***.