



Колебания и волны.
Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры
ОФ ЕНМФ ТПУ

Тема 10. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

10.1. Естественный и поляризованный свет

10.2. Поляризация при отражении и преломлении

10.3. Двойное преломление света

10.4. Закон Малюса

10.5. Интерференция поляризованного света

10.6. Искусственная анизотропия

10.1. Естественный и поляризованный свет

Основным свойством электромагнитных волн является *поперечность* колебаний векторов напряжённости электрического и магнитного полей

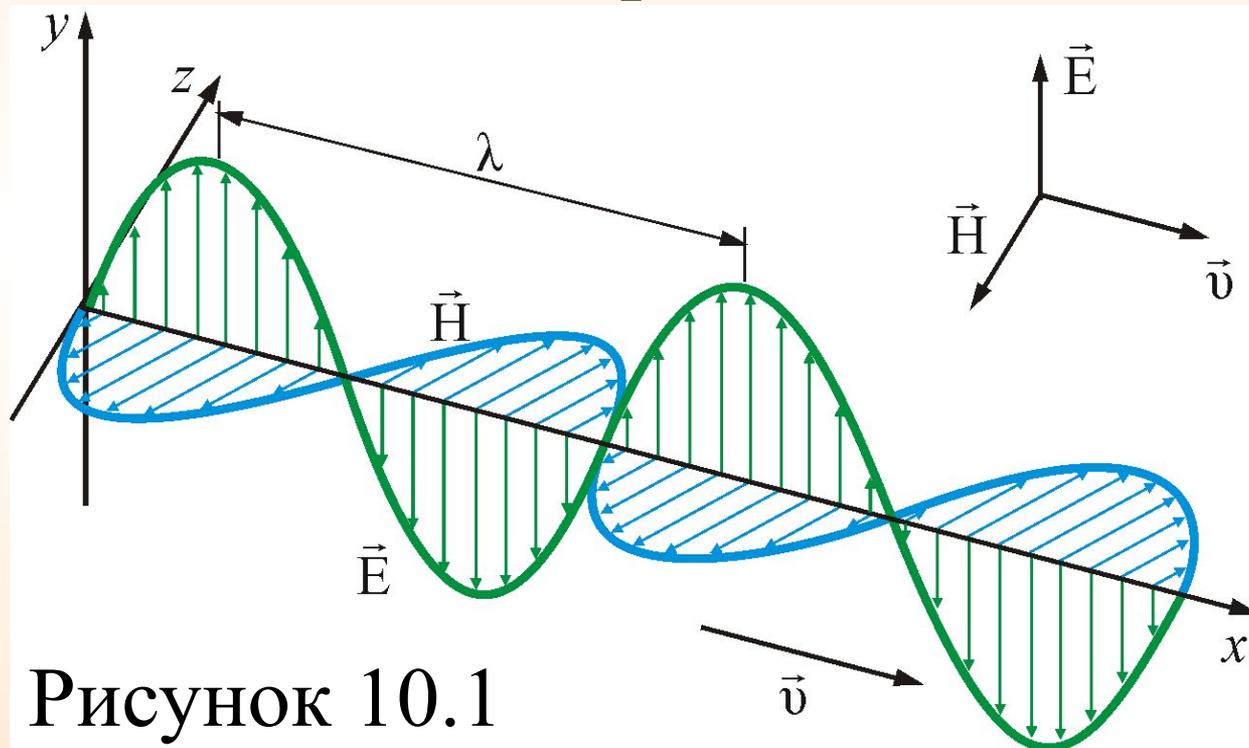
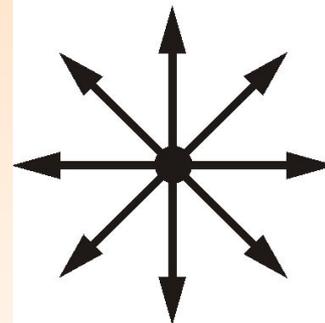


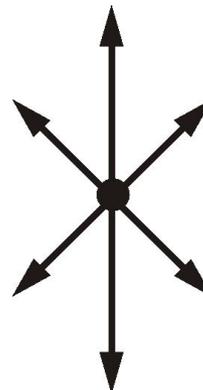
Рисунок 10.1

Продольная волна всегда симметрична относительно направления распространения.

Естественный свет —
неполяризованный:



Свет с преимущественным направлением колебаний вектора \vec{E} называют **частично поляризованным светом:**

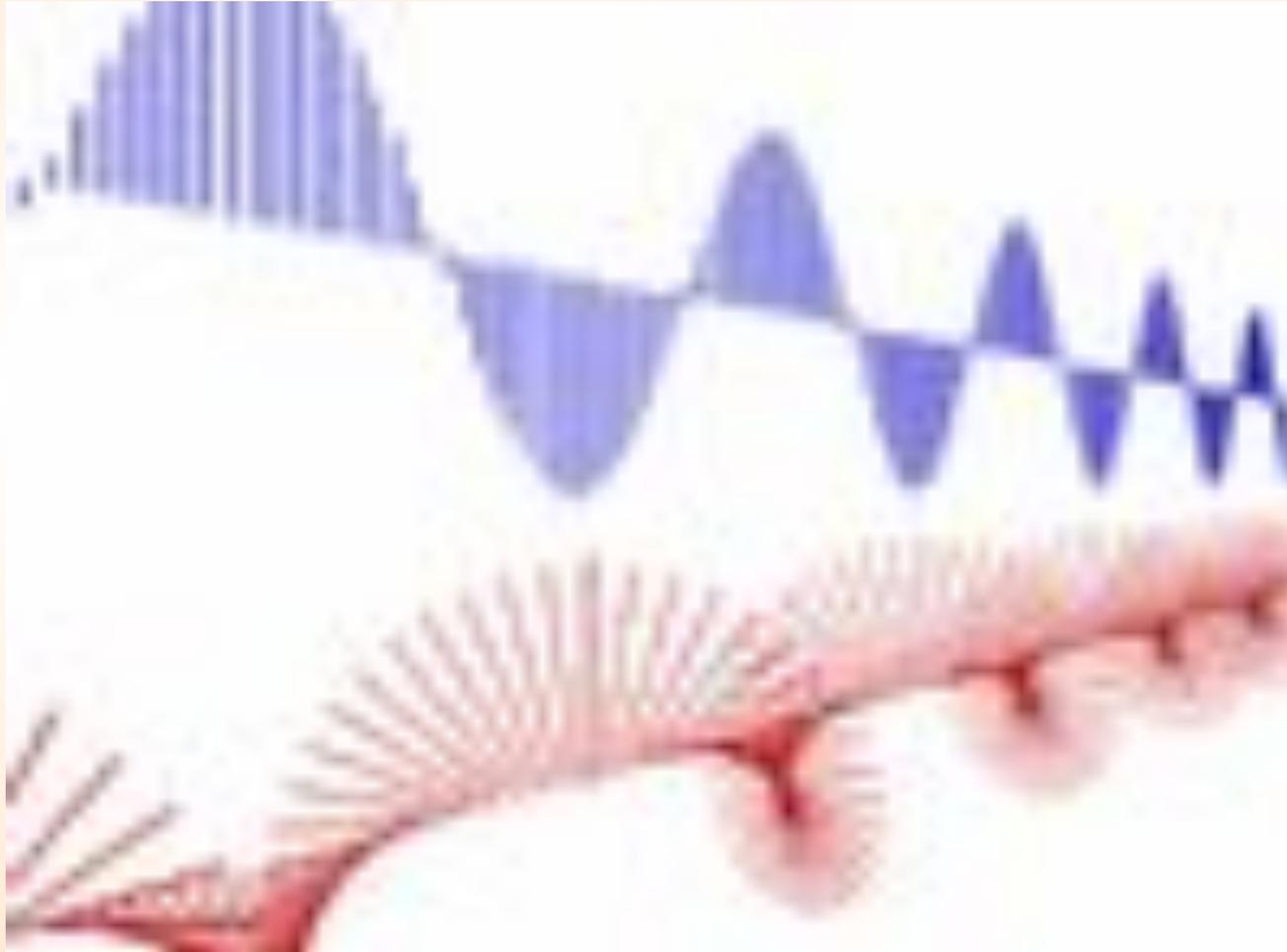


Линейная поляризация:

Электромагнитная волна в этом случае называется **полностью поляризованной.**



Линейно поляризованная электромагнитная волна и волна круговой поляризации.



Эллиптическая и круговая поляризация электромагнитной волны

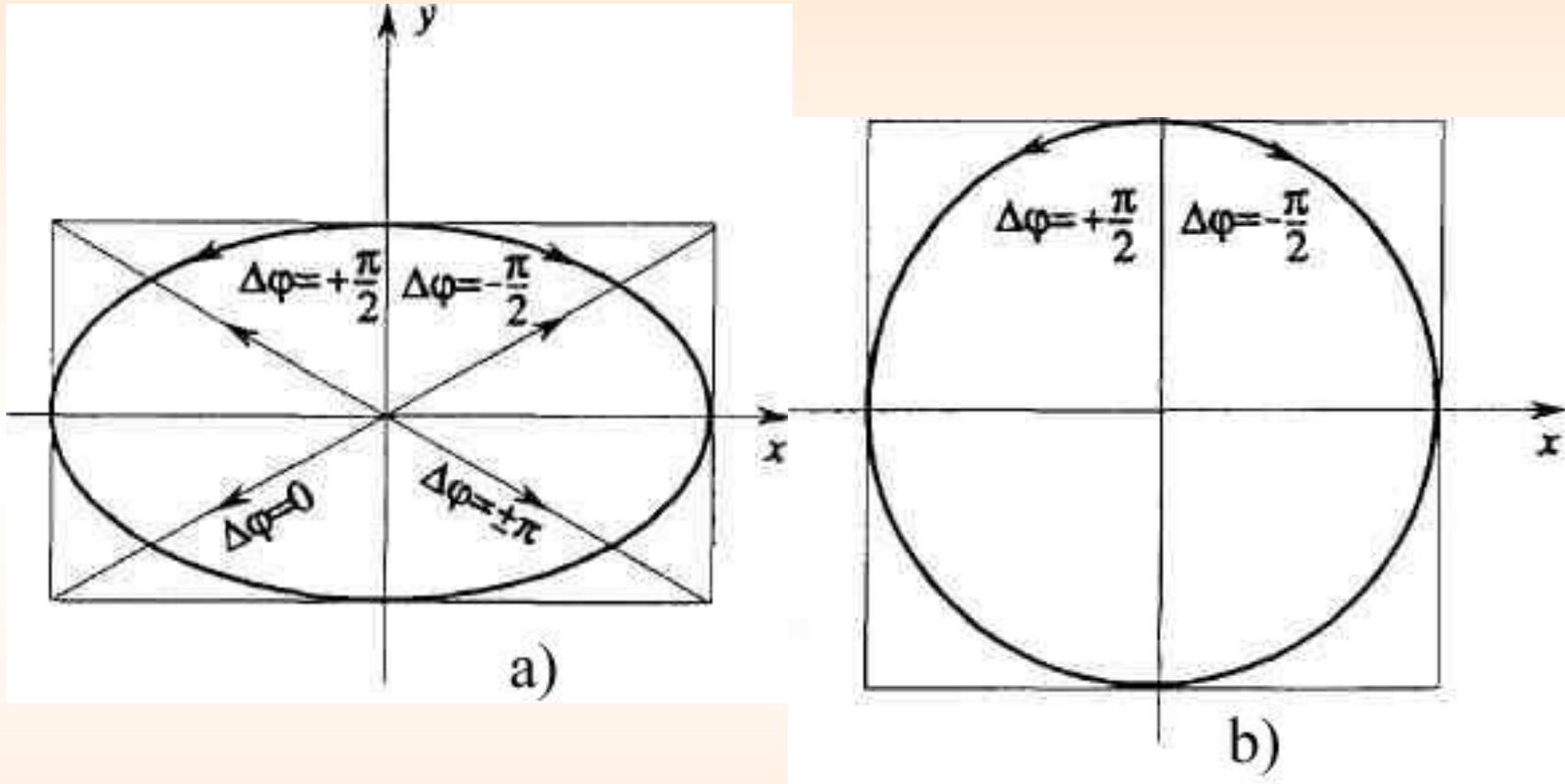


Рисунок 10.3

Пространственная структура эллиптически -поляризованных вол:

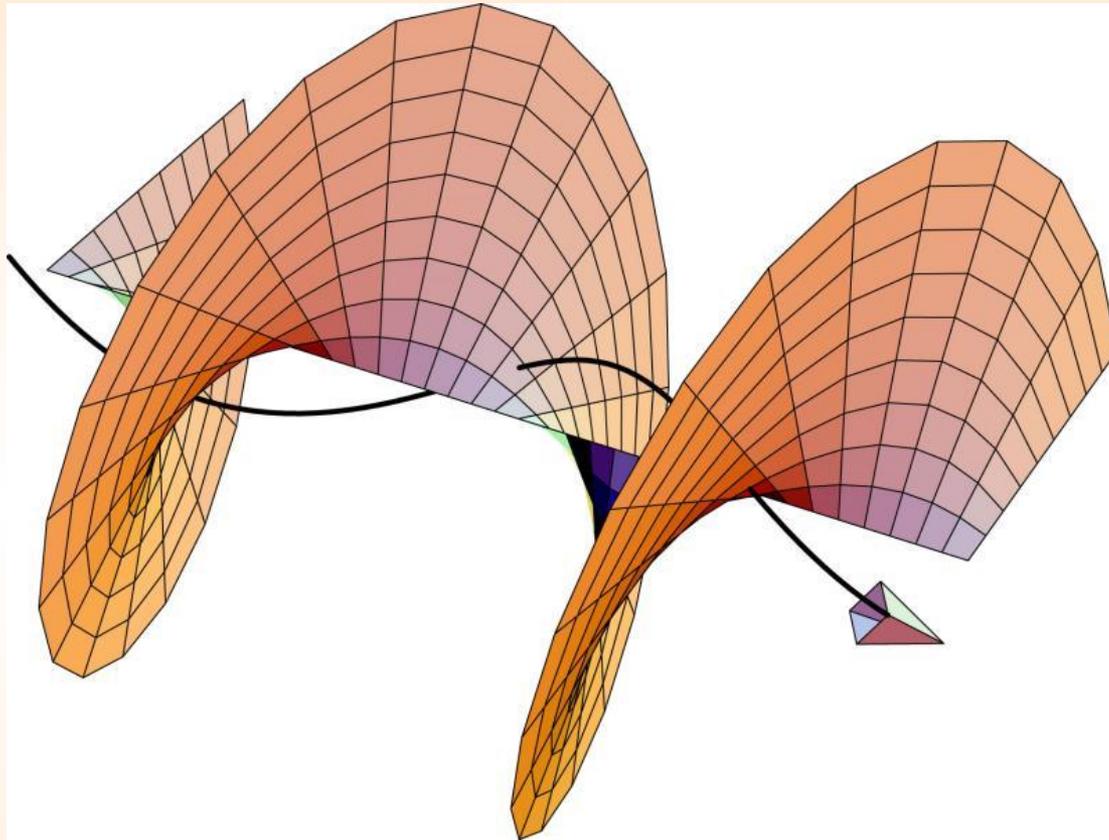


Рисунок 10.4

Винтовая линия, геометрическое место концов вектора E
Шаг винта равен длине волны λ .

Винтовая линия, не деформируясь, перемещается **со**
скоростью света в направлении распространения волны

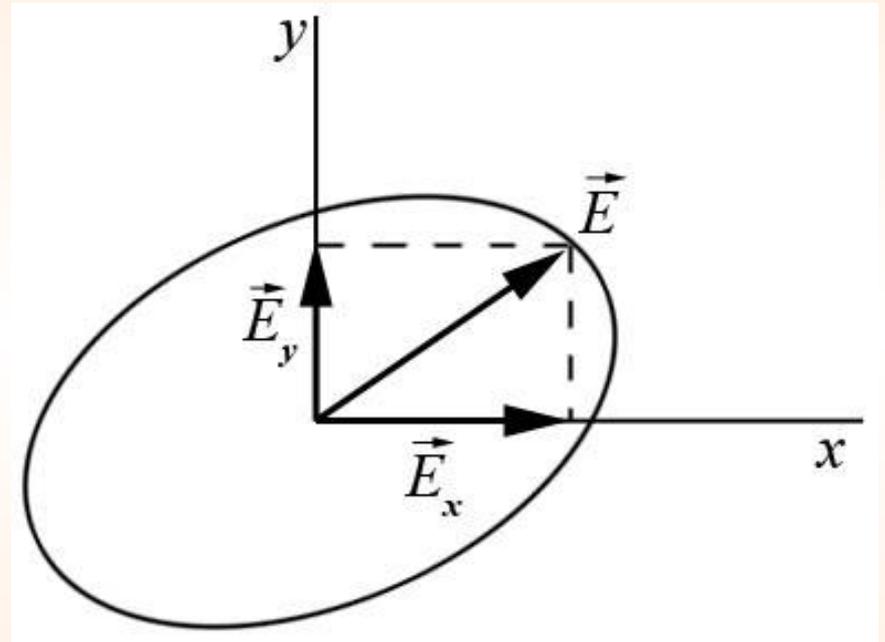
Образование поляризованного света

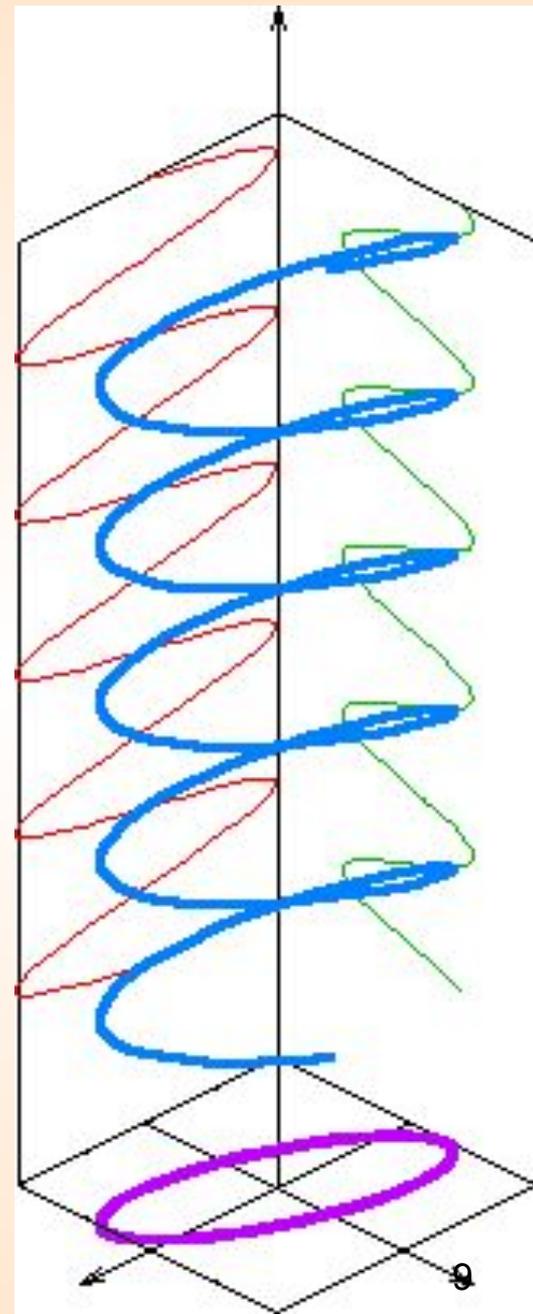
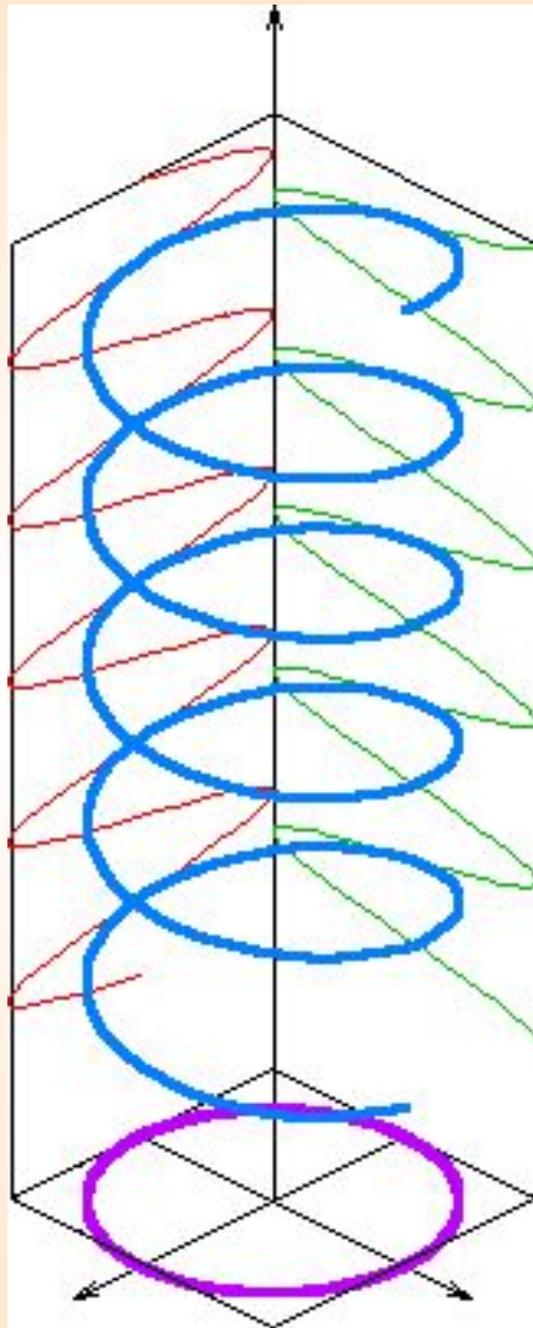
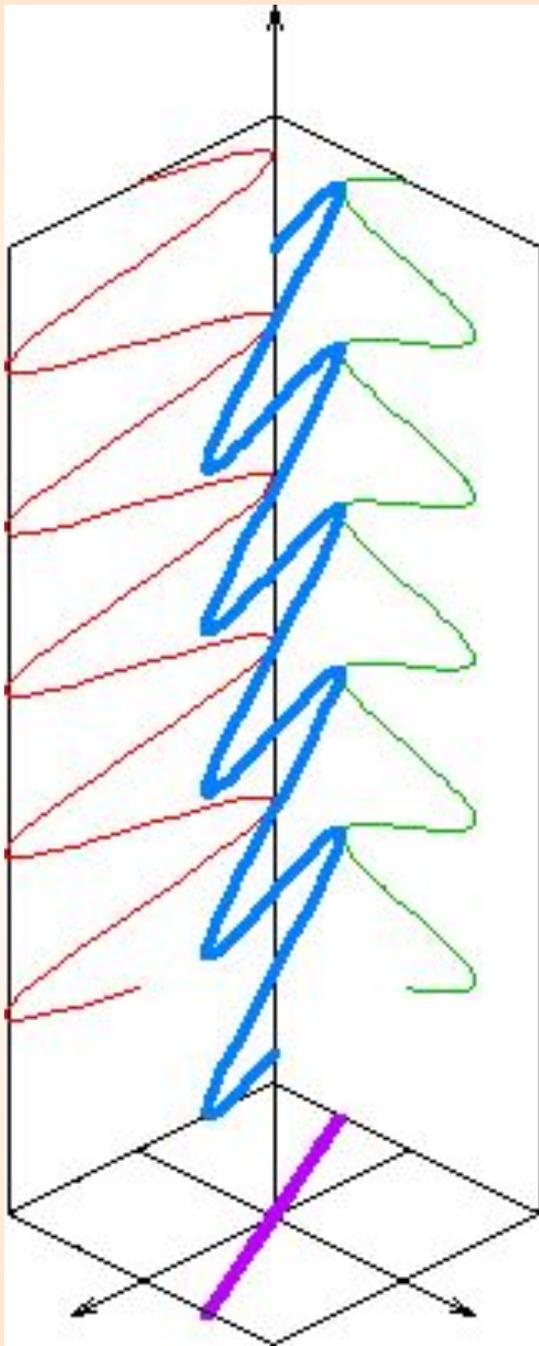
Рассмотрим 2 взаимно перпендикулярных колебания, отличающихся по фазе на α :

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

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.

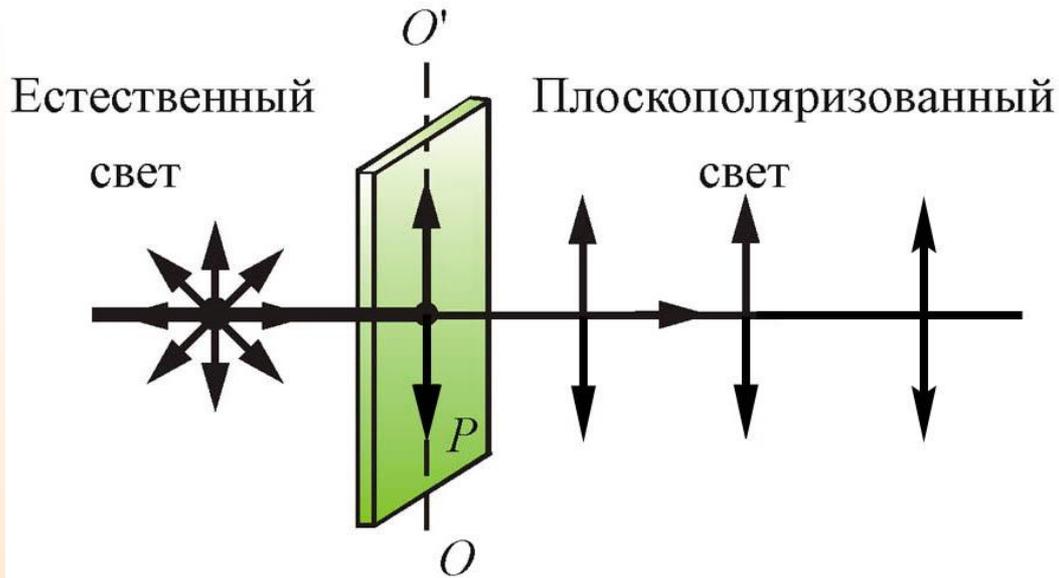




Линейно поляризованный свет:

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

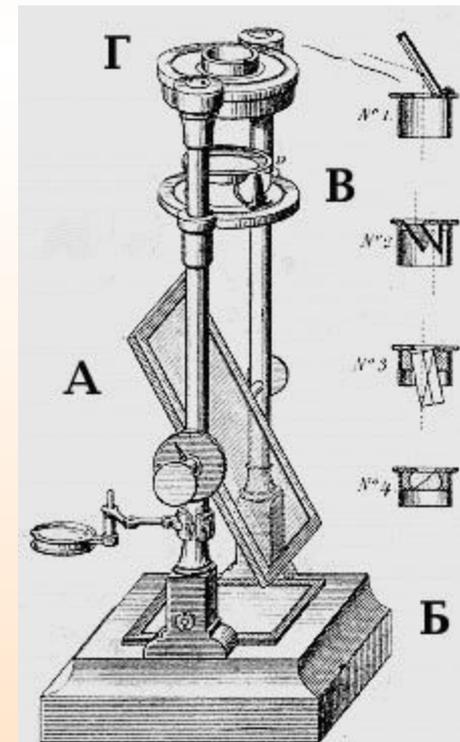
- свободно пропускают колебания, параллельные *плоскости поляризатора*,
- полностью или частично задерживают колебания перпендикулярные к его плоскости.

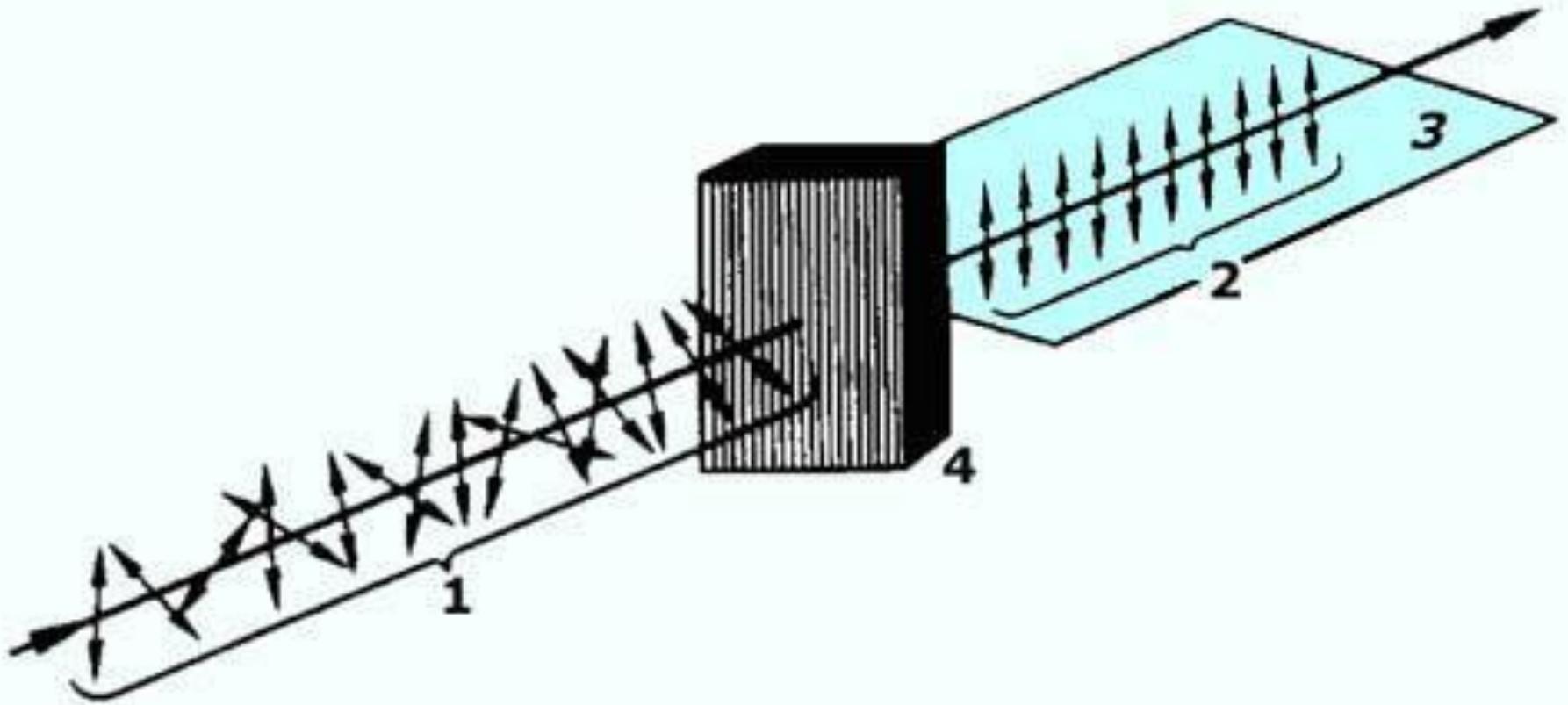


После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO' .

Линейные поляризаторы:

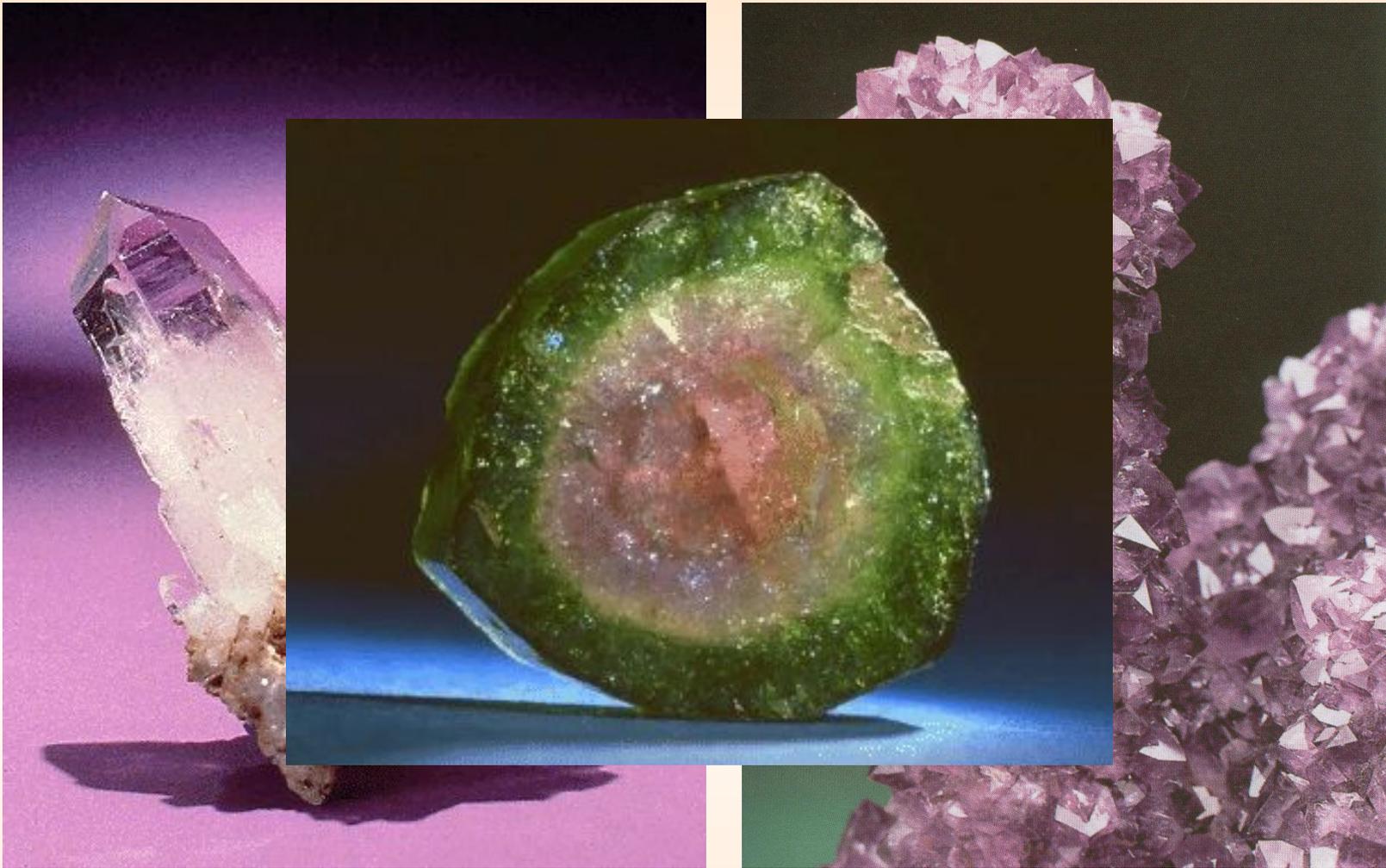
- **оптически анизотропные кристаллы** (турмалин), вырезанные параллельно его оптической оси;
- **поляроиды** – целлулоидные плёнки, в которые введено большое количество одинаково ориентированных с помощью растяжения или сдвиговой деформации кристалликов.
- **оптические стопы изотропных пластинок**,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







Полихромные кристаллы турмалина



Пример использования поляризационного фильтра в фотографии



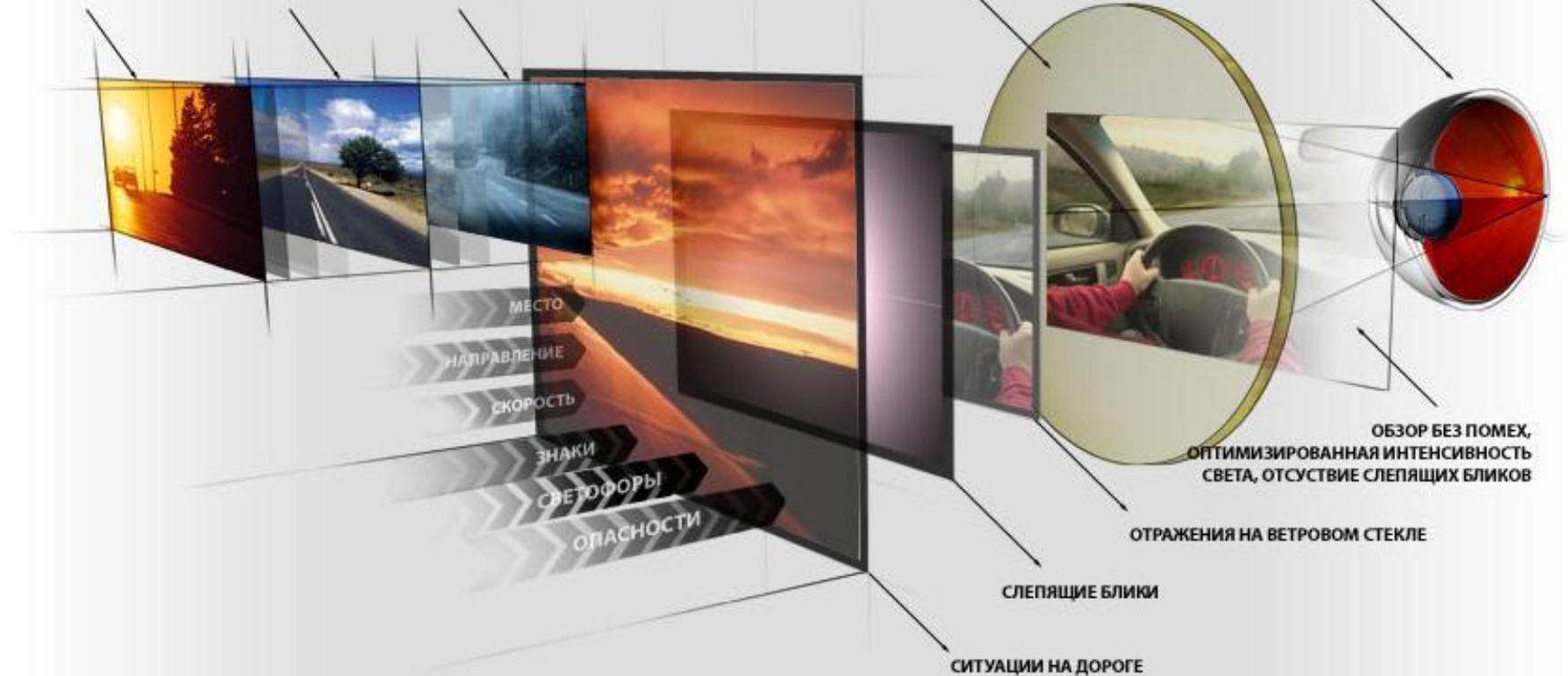
Возможность **изменения яркости и контраста** различных частей изображения:

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

СЛЕПЯЩИЕ БЛИКИ ЯРКОЕ СОЛНЦЕ ПАСМУРНАЯ ПОГОДА

ЛИНЗЫ DRIVEWEAR

ГЛАЗА ВОДИТЕЛЯ



В реальных средах возможно превращение неполяризованных волн в полностью поляризованные и наоборот.

Способы поляризации:

- ***Поляризация электромагнитной волны при отражении и преломлении.***
- ***Поляризация при распространении электромагнитных волн в оптически анизотропных средах.***

Ассиметрию поперечных световых лучей можно изучать, пропуская свет через анизотропные кристаллы.

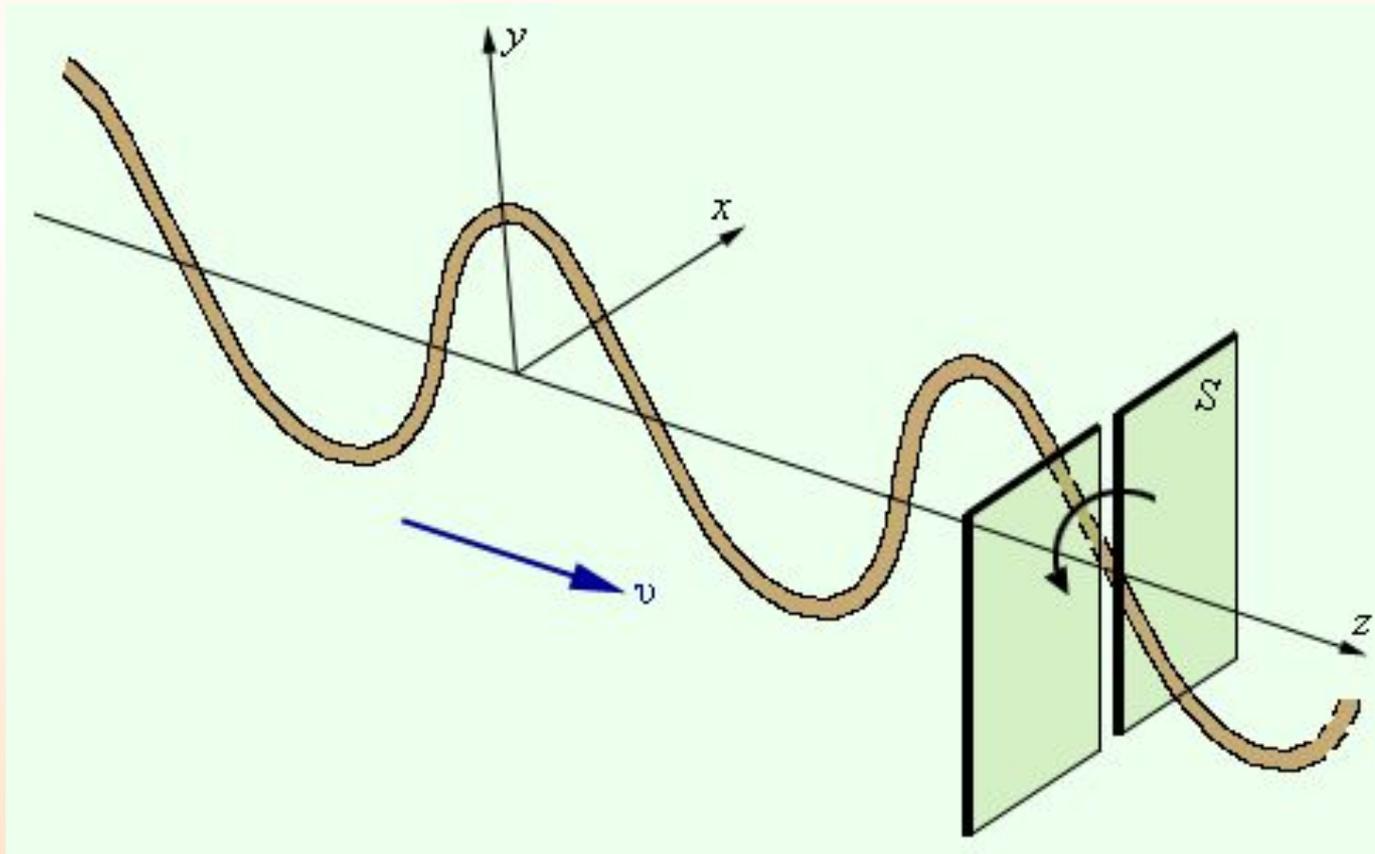
Устройства позволяющие получать линейно поляризованный свет, называют ***поляризаторами***.

Для анализа поляризации света, используют ***анализаторы***.

Главная плоскость поляризатора (анализатора¹⁷).

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).



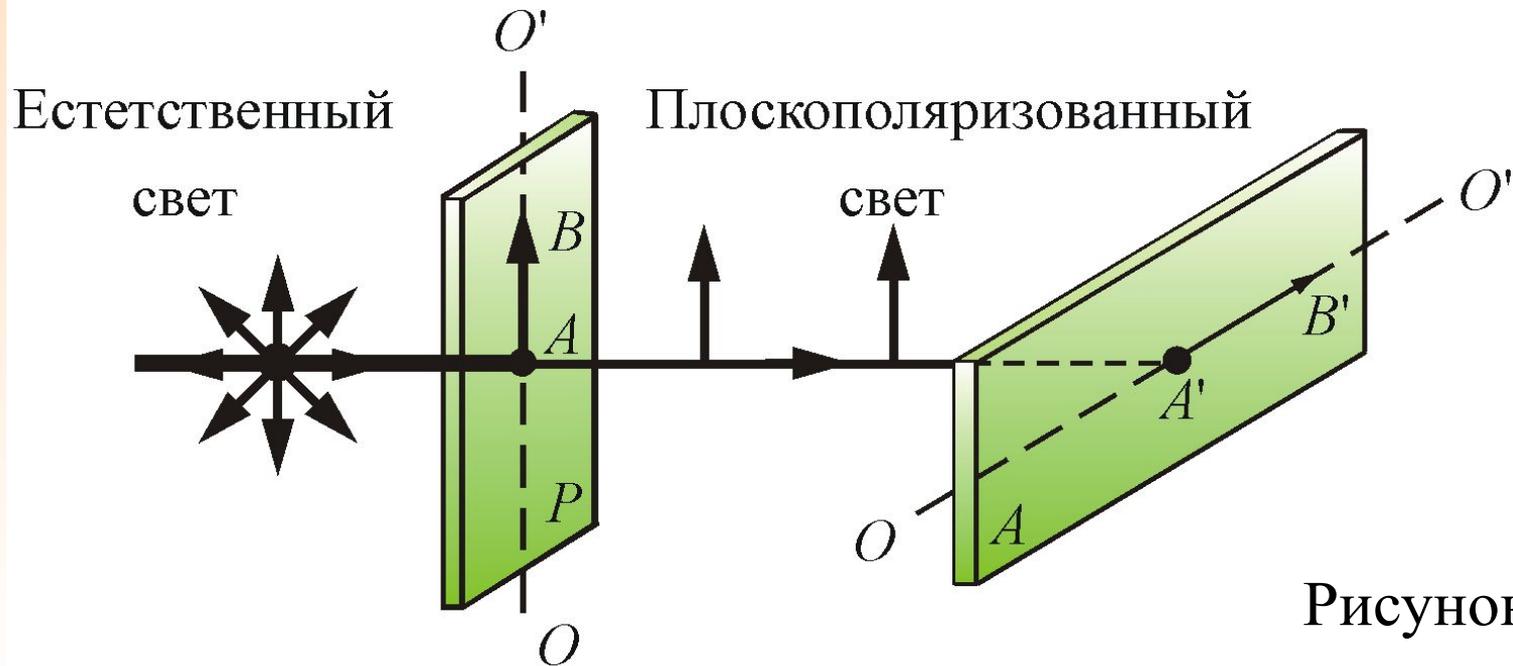


Рисунок 10.5

После прохождения **поляризатора** свет будет линейно поляризован в направлении OO' . **Интенсивность света, при этом, уменьшится на половину.**

Если на пути луча поставить второй кристалл – **анализатор** A , то интенсивность света будет изменяться в зависимости от того, как ориентированы друг относительно друга обе пластины.

Основные выводы

- *световые волны поперечны*, однако в естественном свете нет преимущественного направления колебаний;
- *кристалл поляризатора пропускает лишь те волны, вектор \vec{E} которых имеет составляющую параллельную оси кристалла.* (именно поэтому поляризатор ослабляет свет в два раза);
- *для анализа света* используется *кристалл анализатора*, который, пропускает свет, когда его ось параллельна оси поляризатора.

10.2. Поляризация при отражении и преломлении

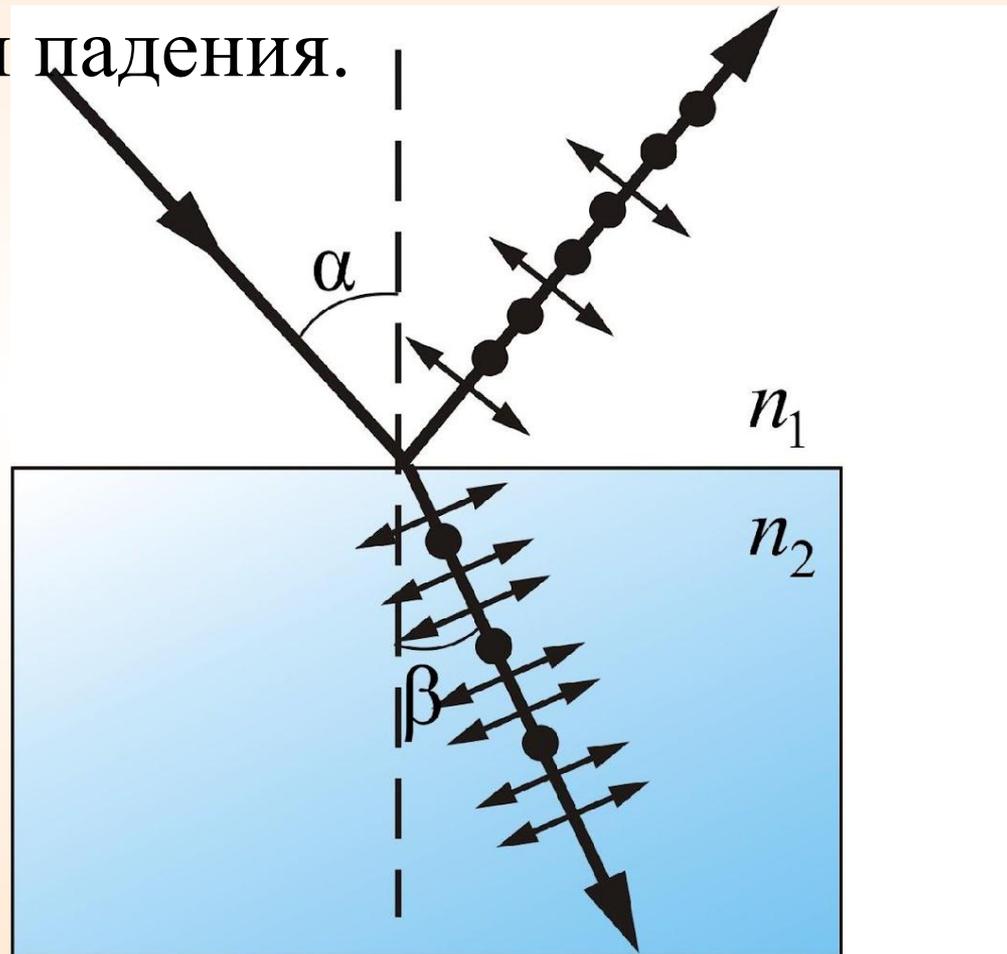
В этом и следующем параграфах мы рассмотрим способы получения линейно поляризованного света, используемые при изготовлении поляризаторов и анализаторов.

Свет поляризуется при *отражении* от границы двух сред и при прохождении границы – при *преломлении*.

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

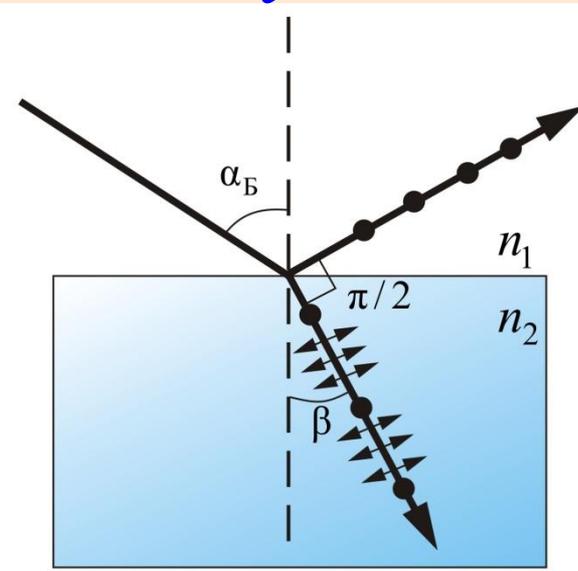
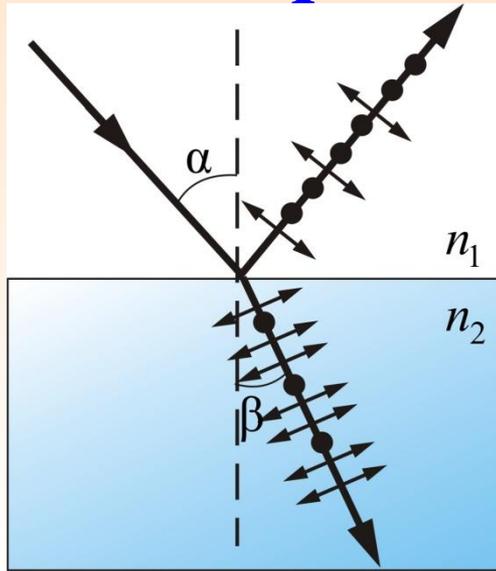
В отраженном луче преобладают колебания, *перпендикулярные* плоскости падения, а *в преломленном луче* – колебания *параллельные*

плоскости падения.



Степень поляризации зависит от угла падения:

Степень поляризации зависит от угла падения:



Если луч падает на границу двух сред под углом α , удовлетворяющему условию $\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$,

то **отраженный луч** оказывается **полностью поляризованным**.

Преломленный луч – **поляризован частично**.

Угол α – называется **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

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

Огюстен Жан Френель

Augustin Jean Fresnel

10.05.1788 – 14.07.1827

французский физик

Броли, Франция (Broglie, France)

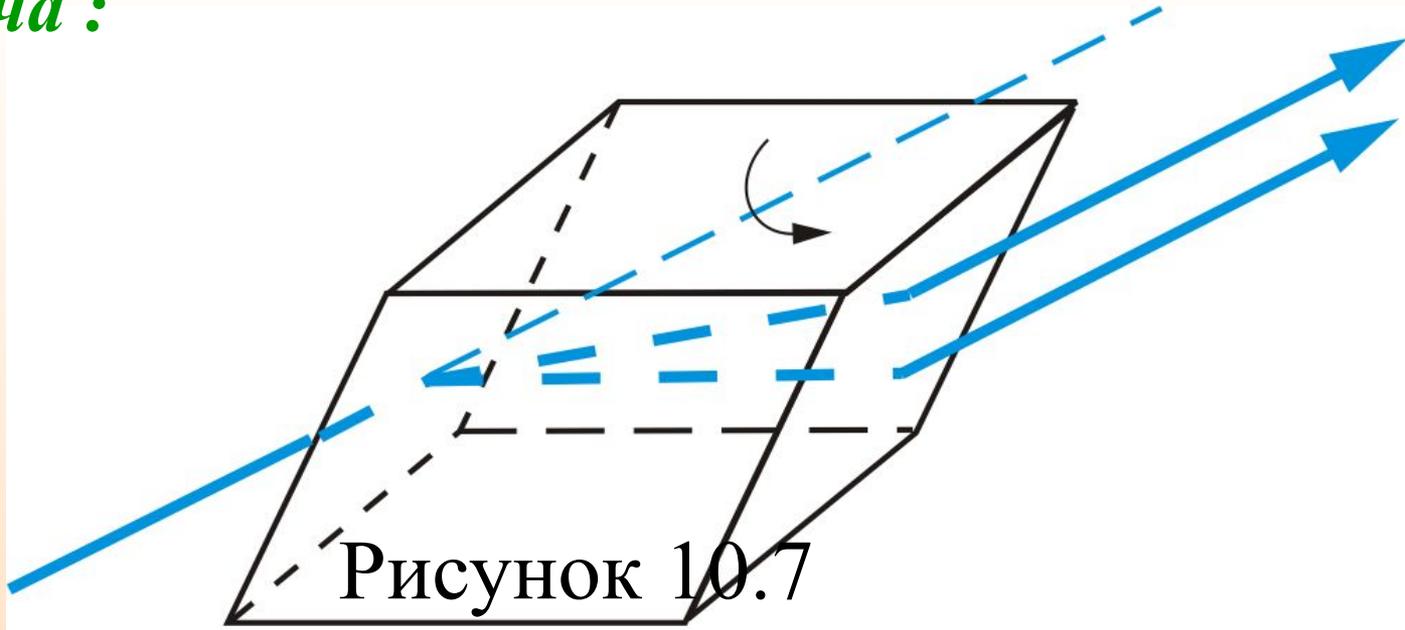
Ville-d'Avray, France



10.3. Двойное преломление света

В 1669 г. датский ученый *Эразм Бартолин* опубликовал работу, в которой сообщил об открытии нового физического явления – *двойного преломления света*.

В кристалле *исландского шпата* CaCO_3 Бартолин обнаружил, что *луч внутри кристалла расщепляется на два луча* :



Христиан Гюйгенс

Christiaan Huygens

14.04.1629 – 08.08.1695

*нидерландский механик, физик и
математик*

*Гаага, Нидерланды (Hague,
Netherlands)*



Объяснение этого явления дал современник Бартолина – голландский ученый Христиан Гюйгенс.

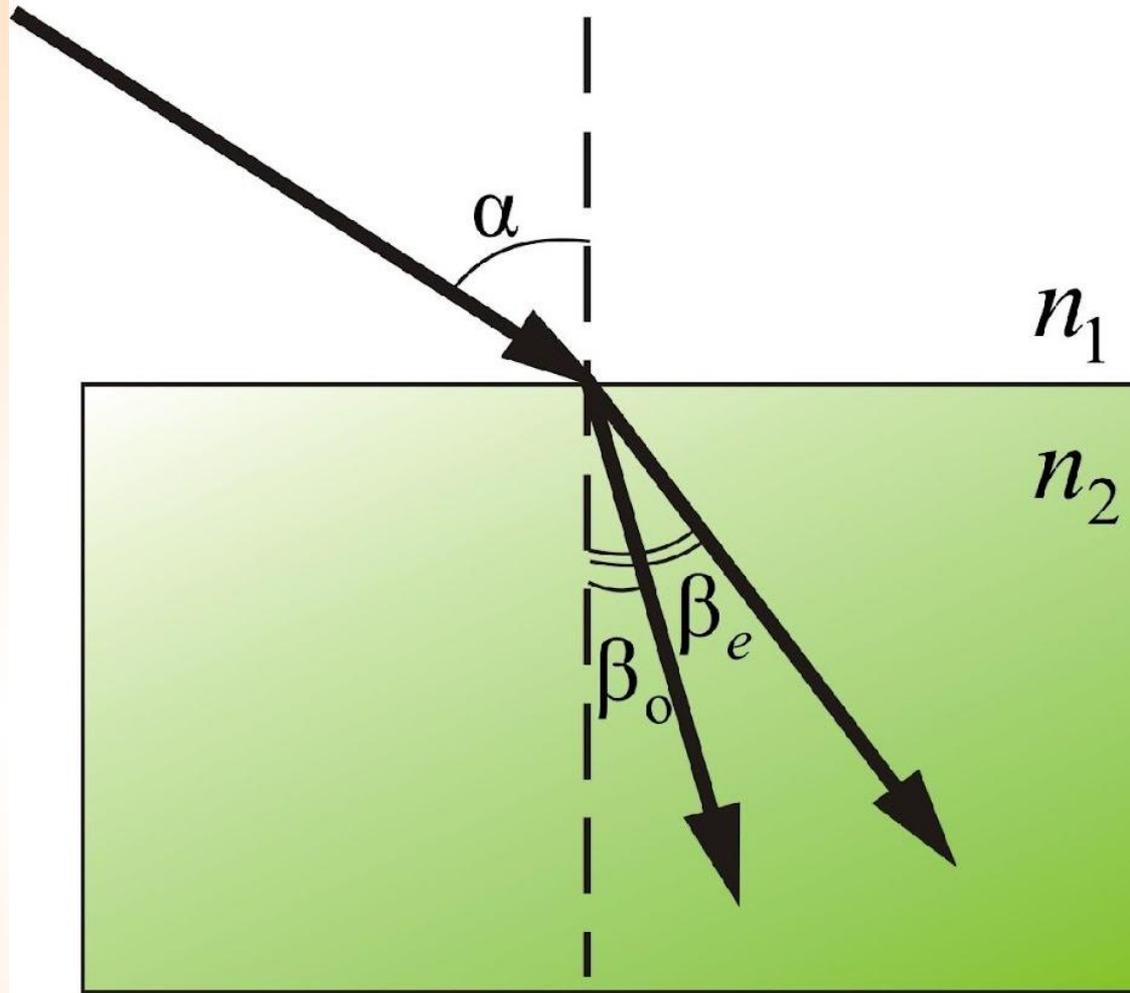
Расщепление луча света, проходящего через *исландский шпат*, связано с ***анизотропией кристалла***.

У анизотропных кристаллов имеется оптическая ось.

Плоскость, проходящая через ***оптическую ось***, называется ***главным сечением кристалла***

Одноосные кристаллы (исландский шпат, турмалин)

Кристаллы двухосные (гипс, слюда).

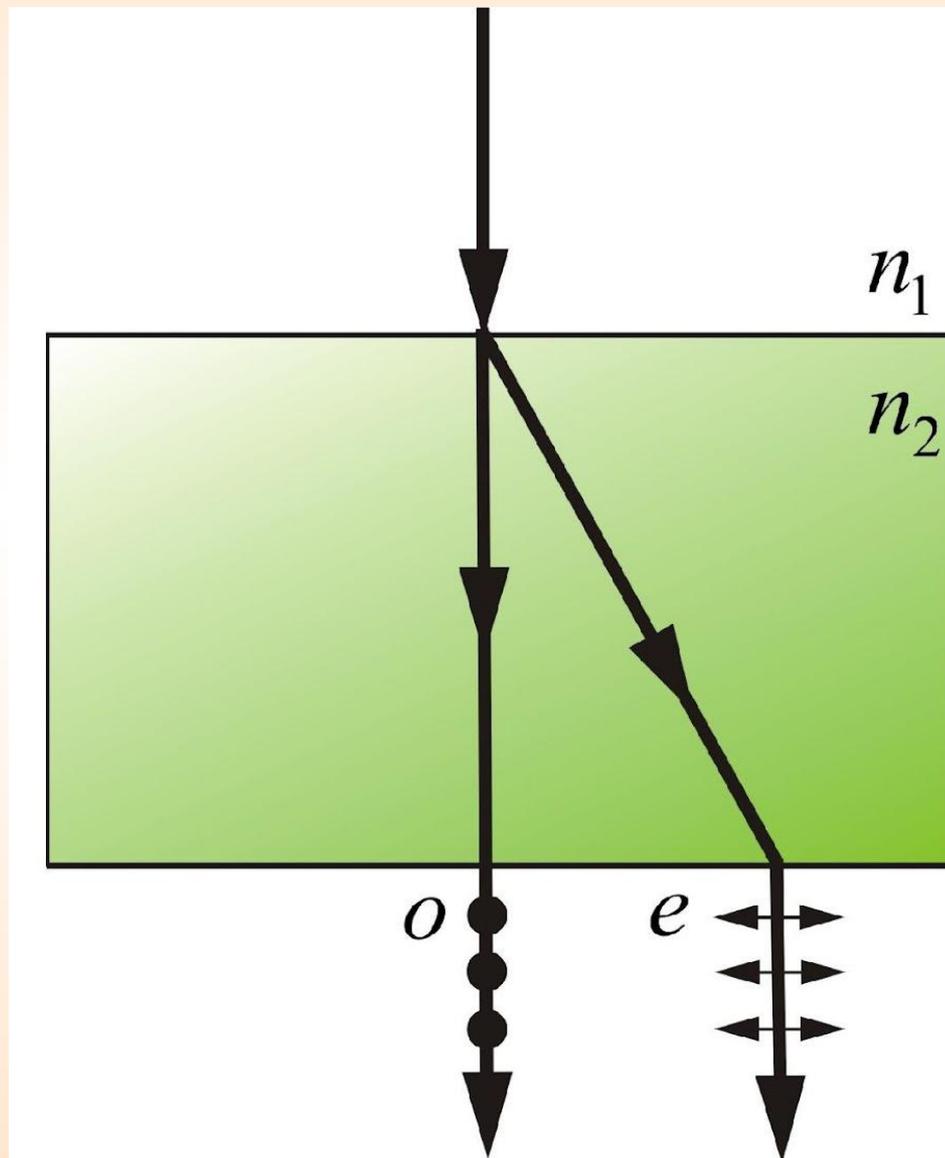


Закон преломления Снеллиуса: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$

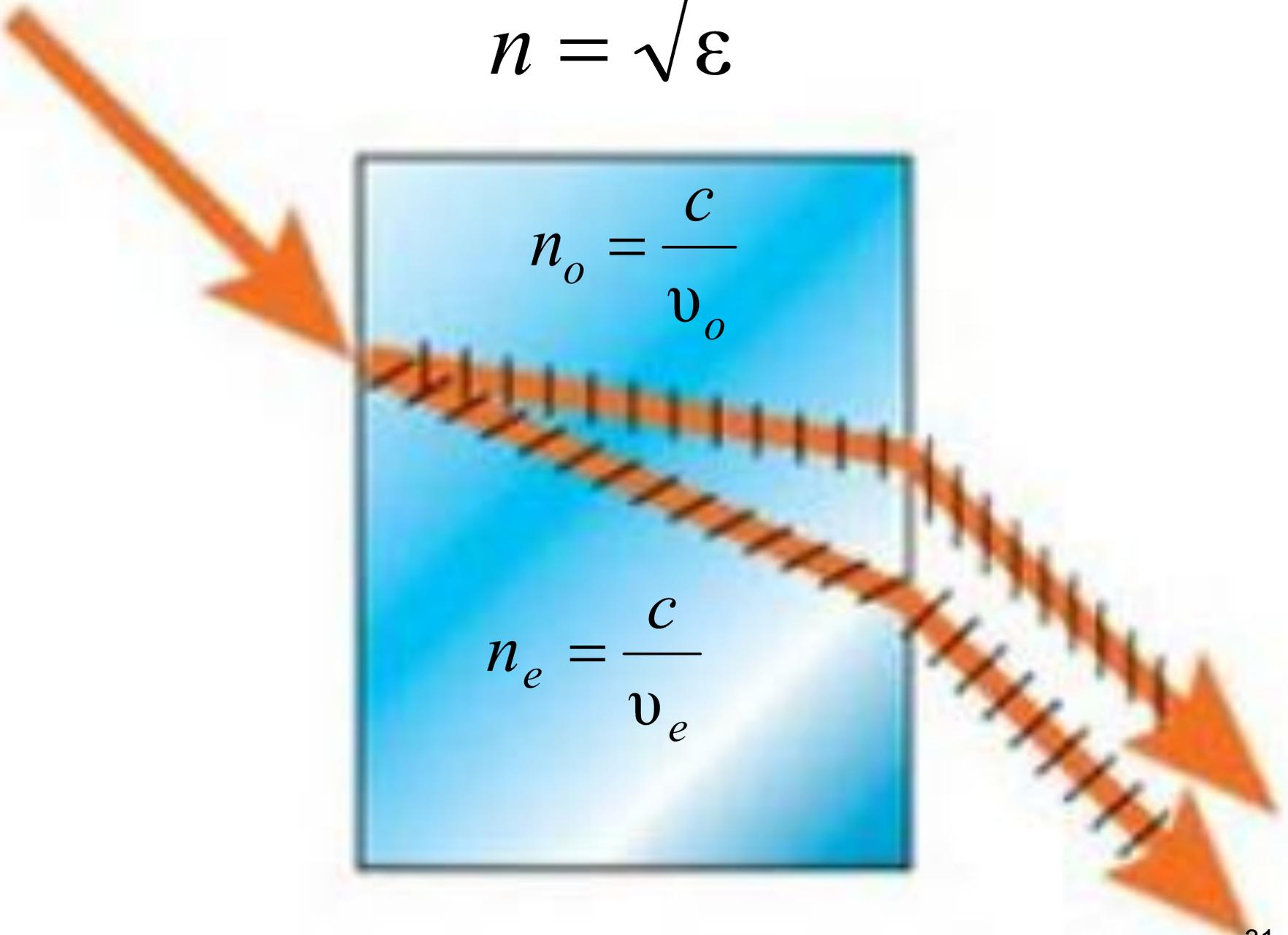
Подчиняется луч **обыкновенный** *o*

Не подчиняется – **необыкновенный** луч *e*.

Явление двойного лучепреломления используется для получения поляризованного света:



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

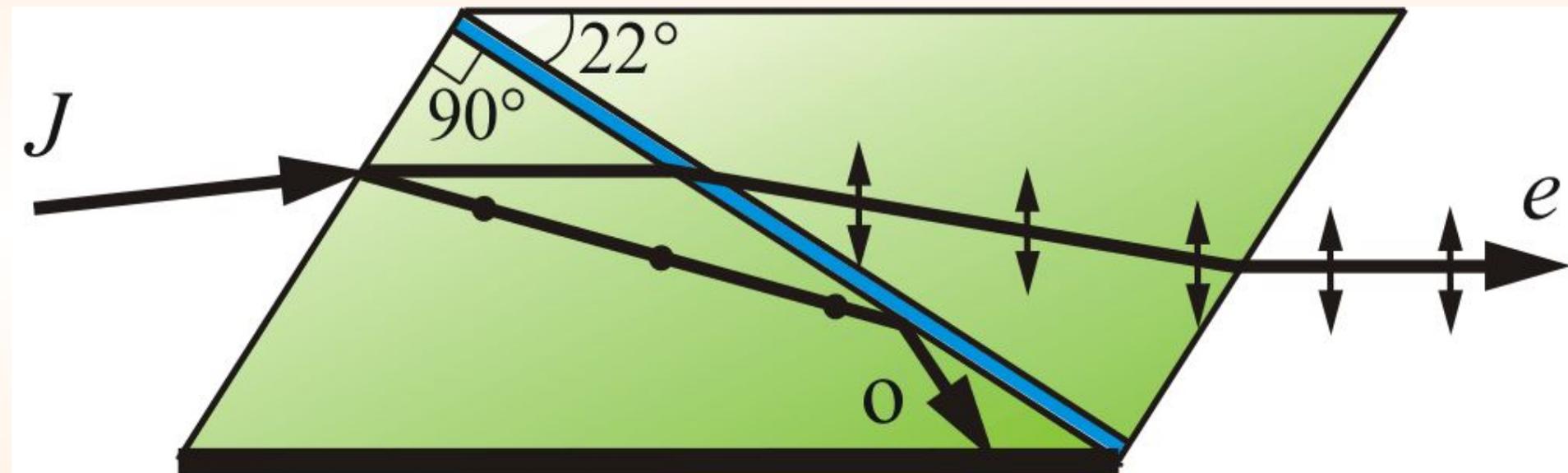


Дихроизм – один из лучей поглощается сильнее другого

В кристалле турмалина, обыкновенный луч практически полностью поглощается на длине 1 мм, а необыкновенный луч выходит из кристалла. В кристалле сульфата йодистого хинина один из лучей поглощается на длине 0,1 мм.

Это явление используется для создания поляроидов. На выходе поляроида получается один поляризованный луч.

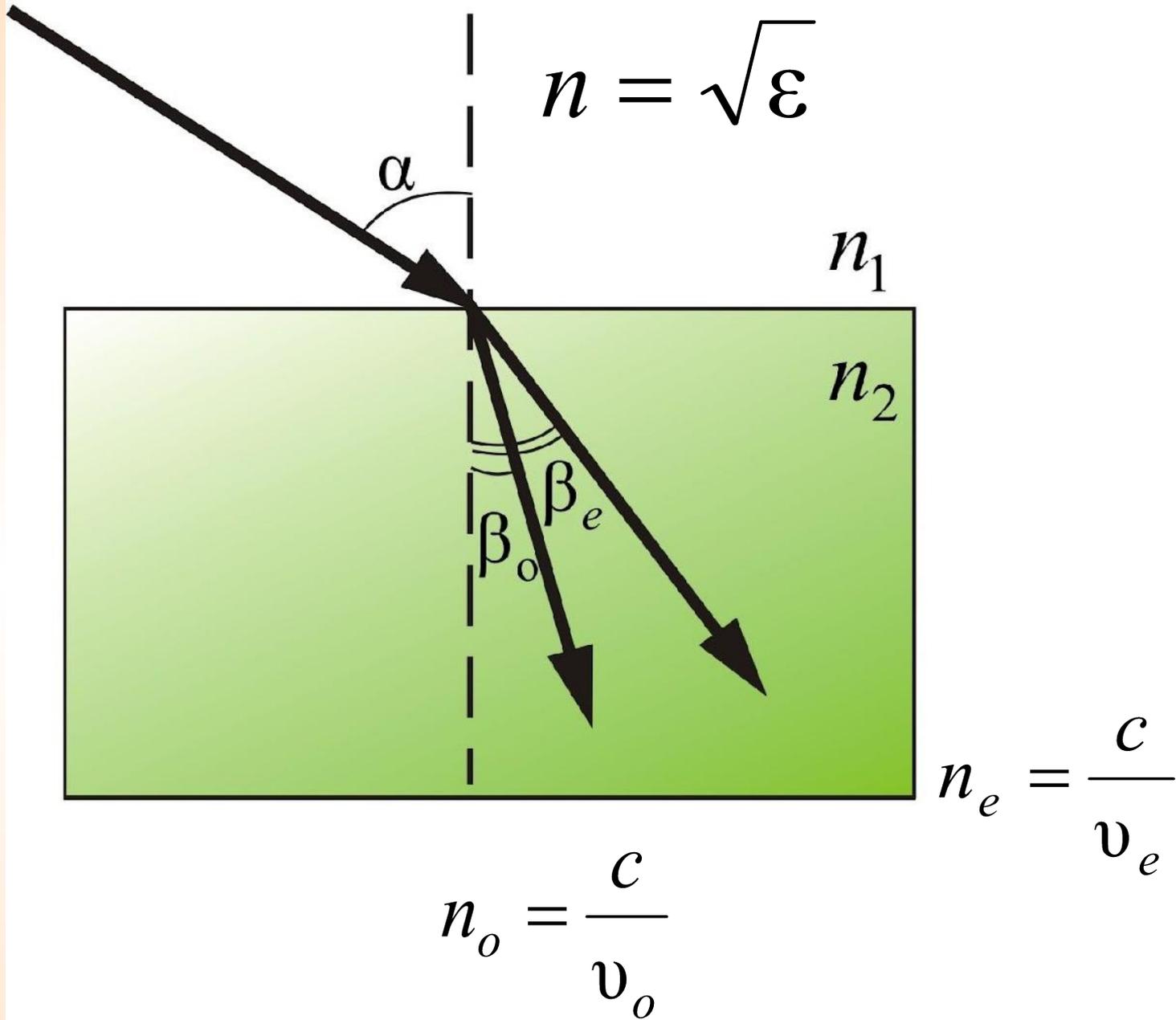
В качестве поляроида используется **призма Николя (николь)**. Это призма из **исландского шпата**, разрезанная по диагонали и склеенная **канадским бальзамом**



Показатель преломления **канадского бальзама**

$$n_o > n > n_e$$

Двойное лучепреломление объясняется *анизотропией кристалла*. Диэлектрическая проницаемость ε — зависит от направления. В одноосных кристаллах диэлектрическая проницаемость в направлении оптической оси ε_x и в направлениях перпендикулярных к ней ε_y , имеет разные значения.



Поскольку $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, а в диэлектриках $\mu = 1$, то

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

Скорость распространения обыкновенного луча

$$v_o = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_y}}, \text{ а необыкновенного } v_e = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_x}}$$

Показатель преломления обыкновенного луча

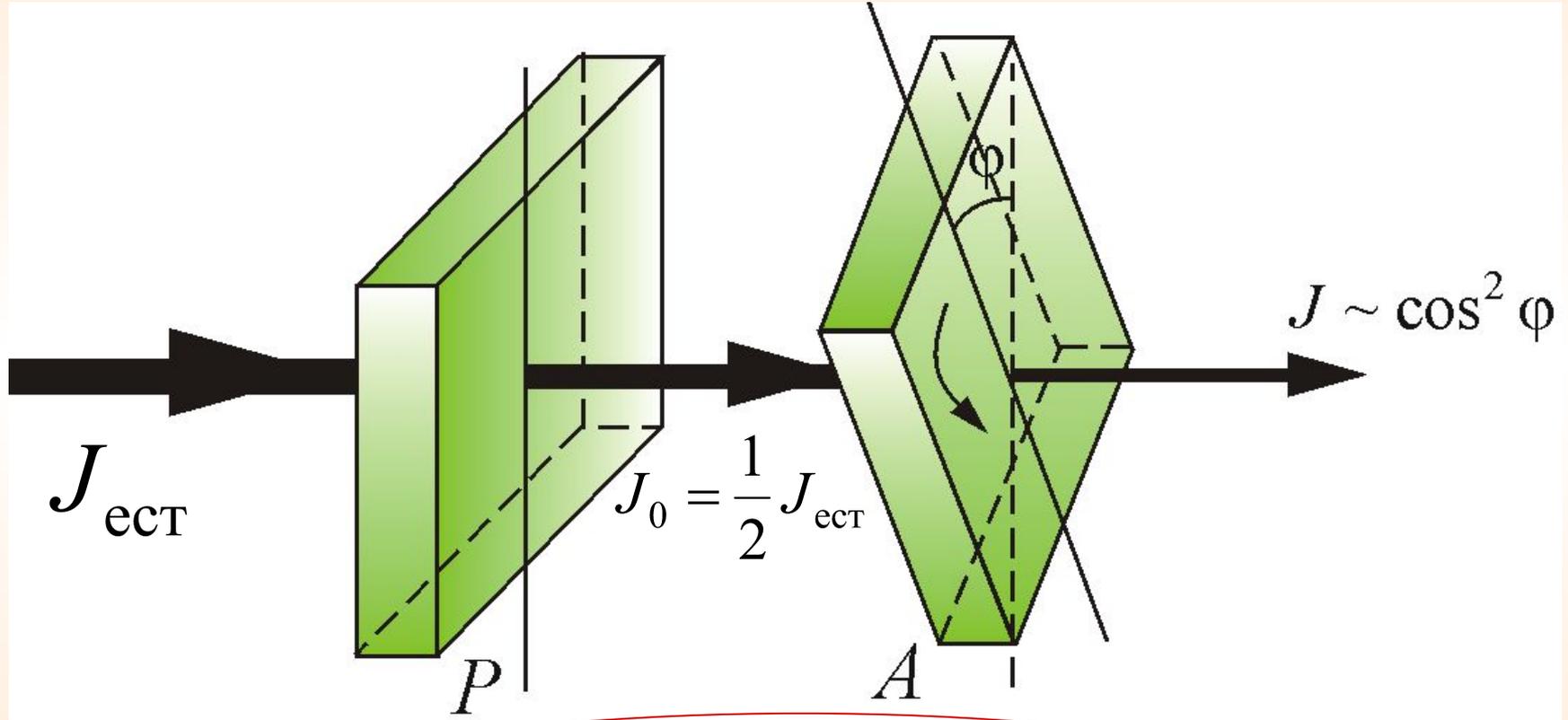
$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

и показатель преломления

$$\text{необыкновенного луча } n_e = \frac{c}{v_e}$$

10.4. Закон Малюса

В 1809 г. французский инженер Э. Малюс



$$J = J_0 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} J_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$

В поперечной волне направление колебаний и перпендикулярное ему направление не равноправны:

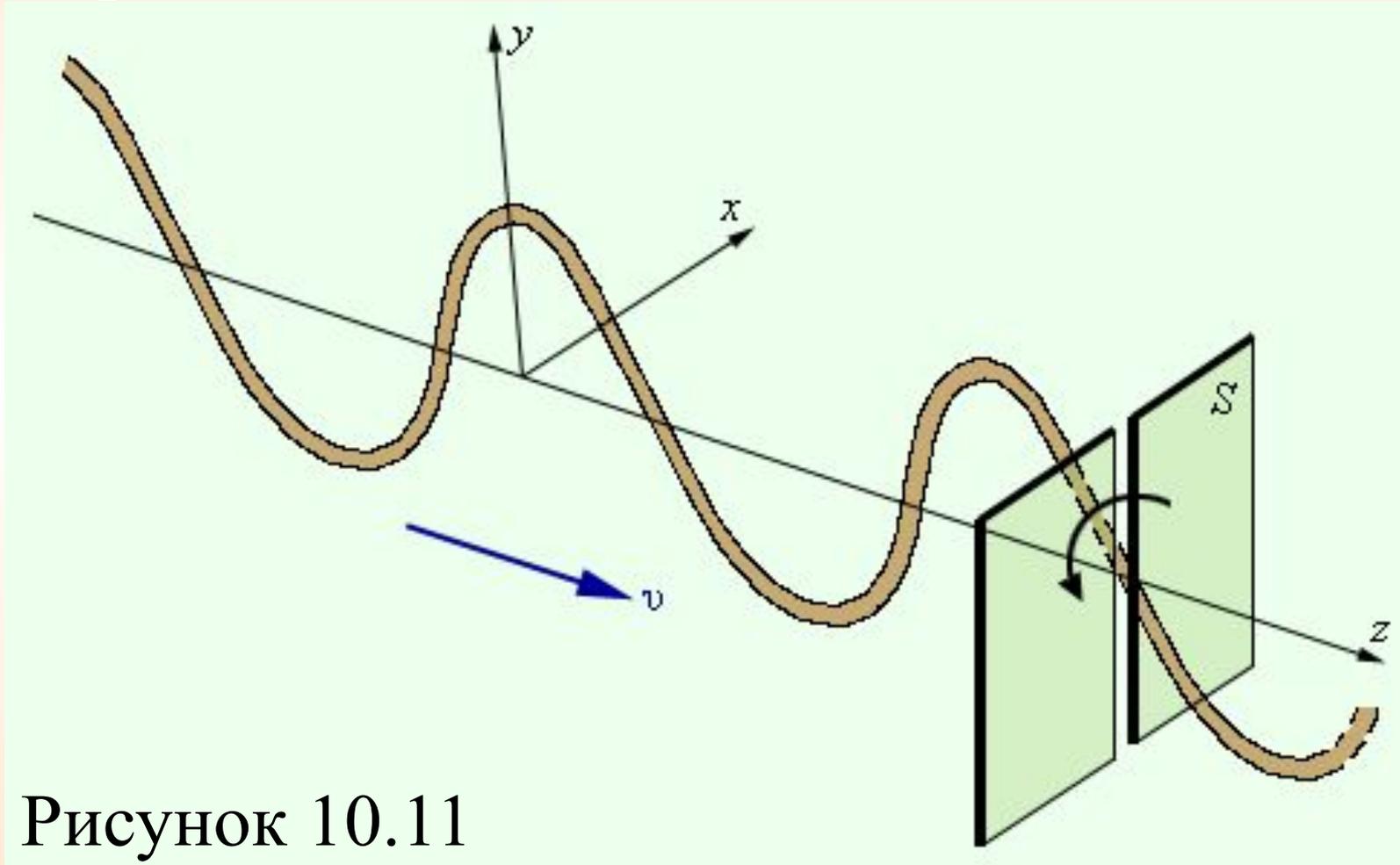


Рисунок 10.11

поворот щели S вызовет затухание волны

С помощью разложения вектора \vec{E} на составляющие по осям можно объяснить закон Малюса

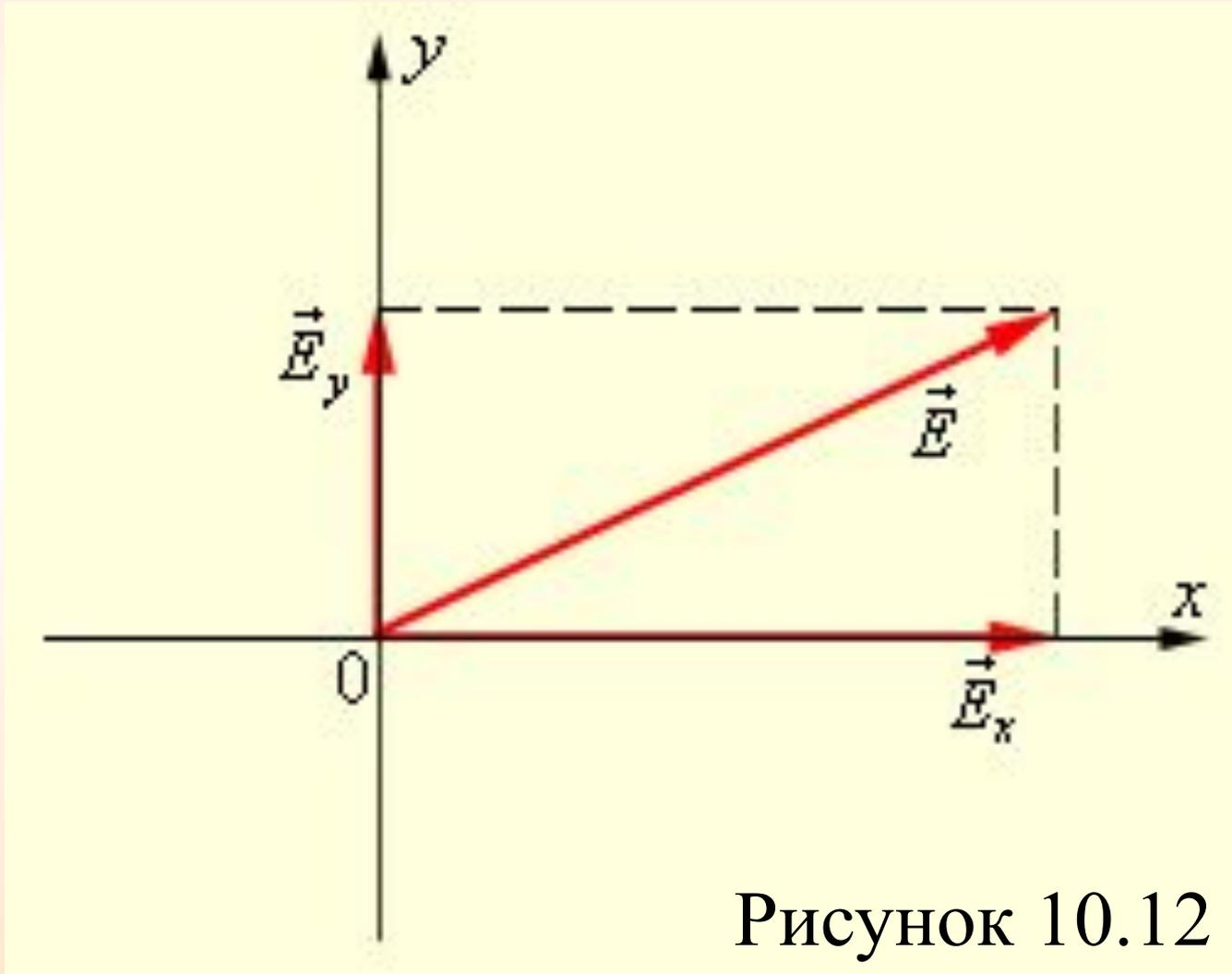


Рисунок 10.12

Световую волну с амплитудой E_0 разложим на две составляющие.

$$E_x = E_0 \cos \varphi \quad E_y = E_0 \sin \varphi$$

E_x – пройдет через поляризатор, а E_y – не пройдет.

Т.к $J \sim E^2$, то $J \sim E_0^2 \cos^2 \varphi$ и $J_0 \sim E_0^2$

Закон Малюса

$$J = J_0 \cos^2 \varphi \quad (10.4.1)$$

В естественном свете все значения φ равновероятны и среднее значение $\langle \cos^2 \varphi \rangle = 1/2$

Интенсивность естественного света,
уменьшается в два раза.

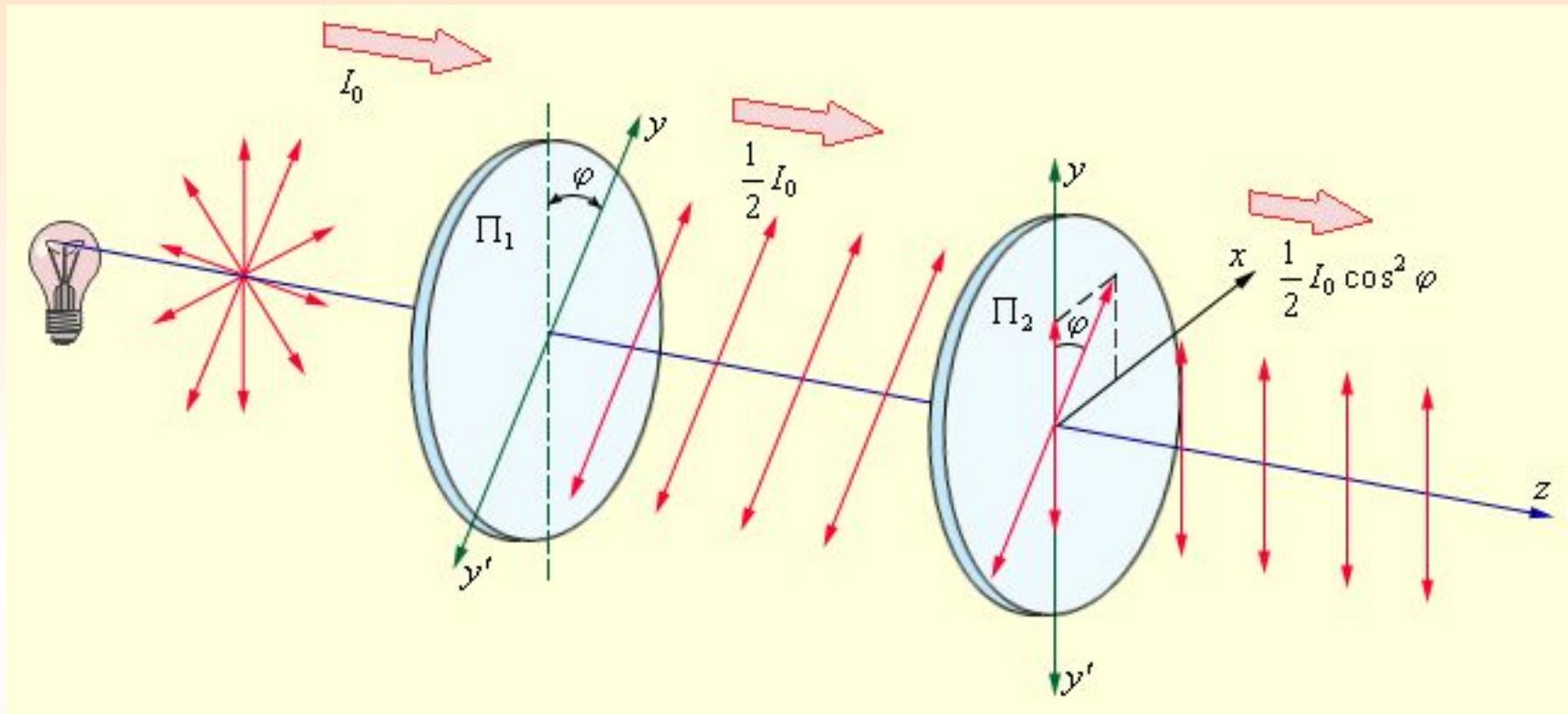


Рис. 11. Прохождение естественного света через два идеальных поляроида. yy' – разрешенные направления поляроидов

После первого поляризатора $J_0 = \frac{1}{2} J_{\text{ест}}$

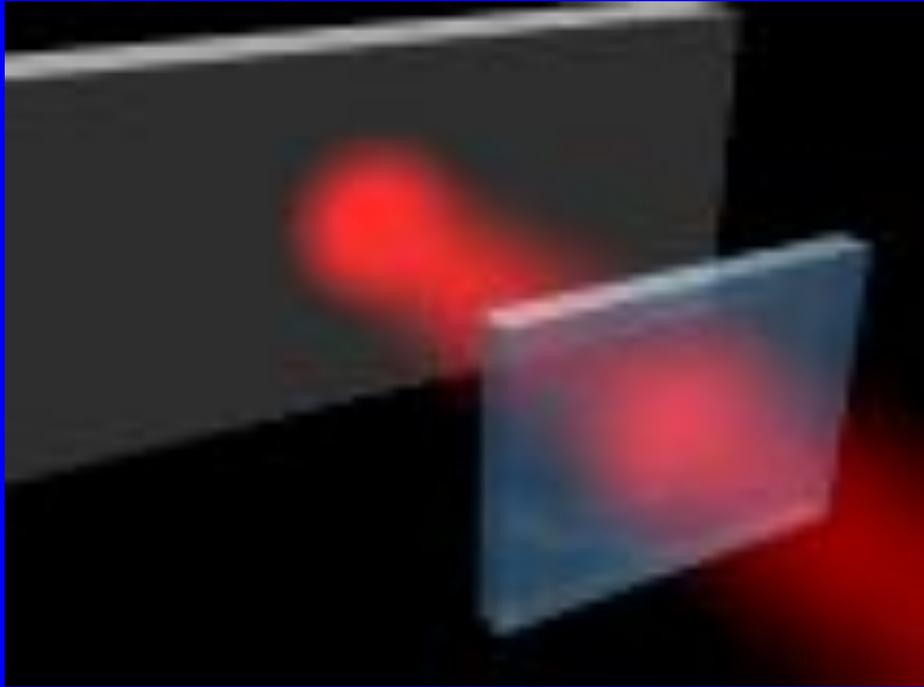
Второй поляризатор пропустит свет

$$J = J_0 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} J_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$

$$J = J_{\text{max}} = \frac{1}{2} J_{\text{ест}} \quad \text{при } \varphi = 0.$$

При $\varphi = \pi/2$, $J = 0$, т.е. скрещенные поляризаторы свет не пропускают

Таким образом, закон Малюса объясняется на основе разложения вектора E на составляющие.



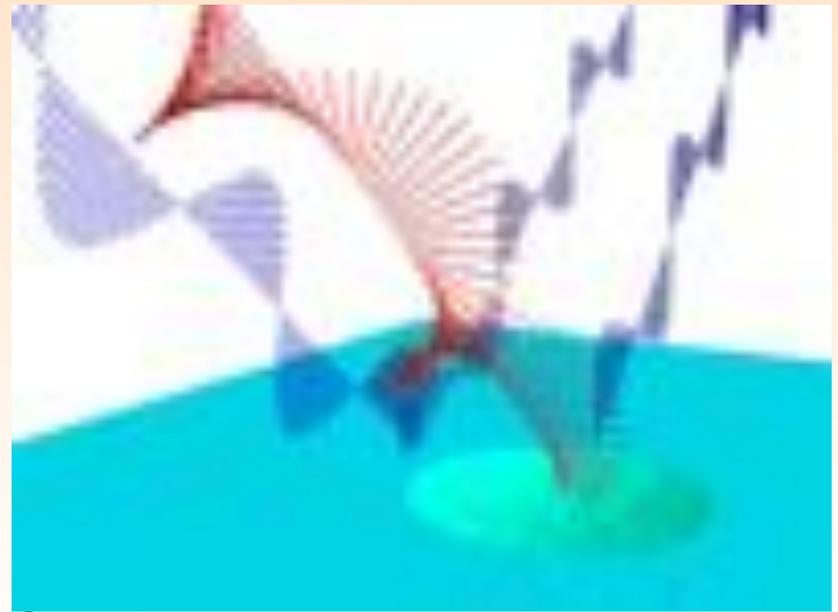
Прохождение линейно поляризованного света He-Ne лазера через вращающийся поляроид:

- 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.

Применение плоскополяризованных волн

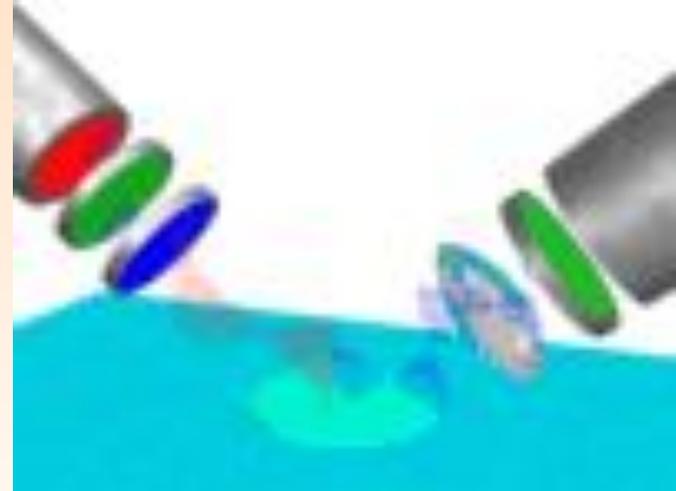
Две плоскополяризованные волны, падающие на подложку с образцом:

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



Эллипсометрия - изучение поверхностей жидких и твердых 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 эллисометрии

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

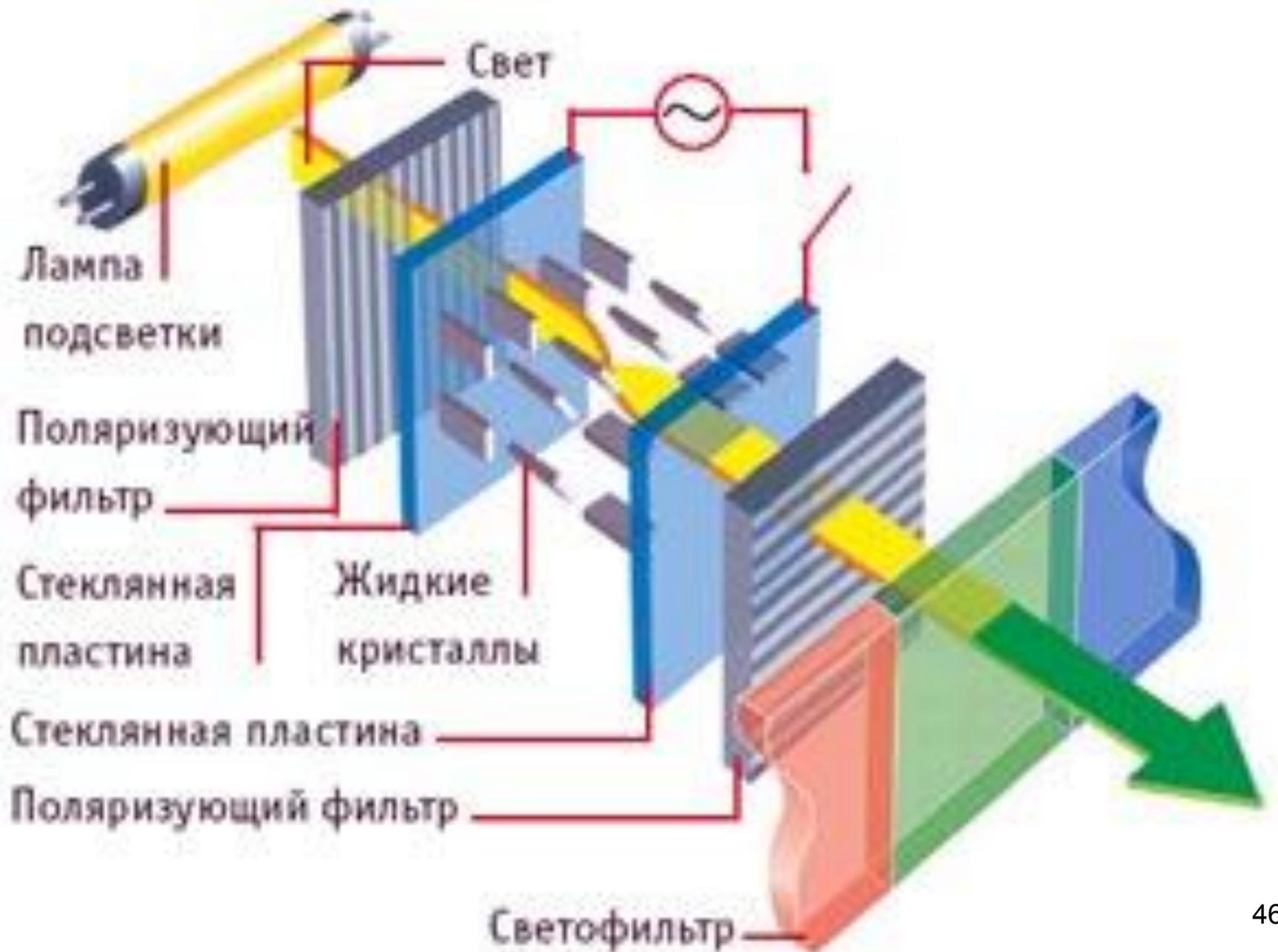
При отражении от образца свет становится линейно поляризованным. Объектив собирает свет, отражённый от образца и через анализатор (отмечено зелёным) подаёт этот свет на фотоприёмную матрицу.

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.

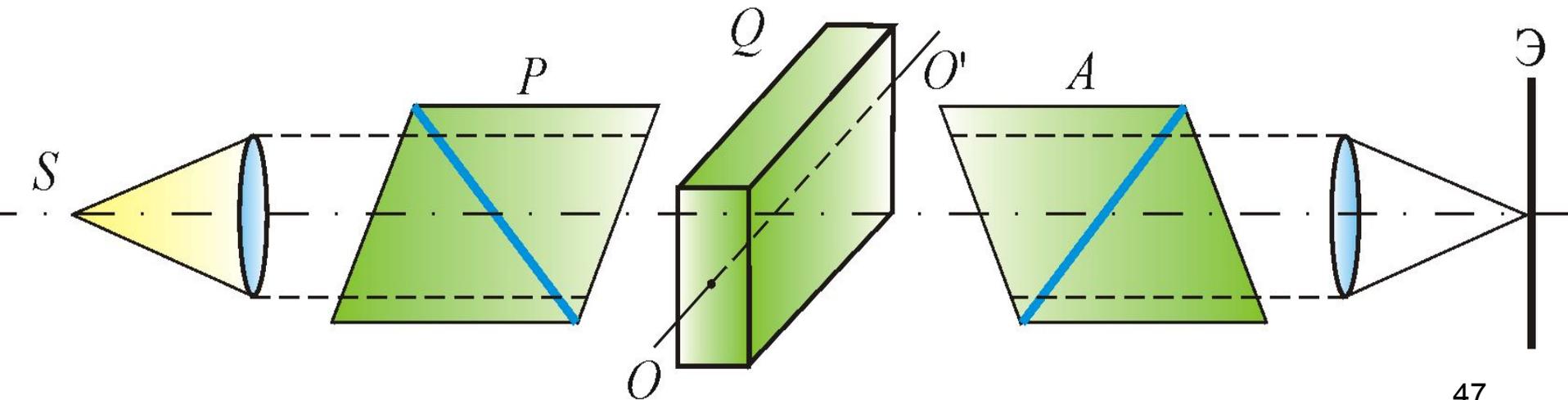
Жидкокристаллический дисплей



10.5. Интерференция поляризованного света

Явления интерференции поляризованных лучей исследовались в классических опытах Френеля и Арго (1816 г.), доказавших поперечность световых колебаний.

Схема получения интерференции поляризованных лучей





Араго Доминик Франсуа (26.II.1786 - 2.X.1853) - французский учёный, член

Парижской академии наук (с 1809 года), с 1830 года - неперемный секретарь Парижской АН и директор Парижской обсерватории. Научные работы относятся к

астрономии, физике, математике, метеорологии.

Автор многих открытий в области оптики и электромагнетизма. По указаниям Араго

французские физики И.Физо астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий

в области оптики и электромагнетизма. По

указаниям Араго французские физики И.Физо и Ж.

Фуко астрономии, физике, математике,⁴⁸

метеорологии. Автор многих открытий в области

Анализатор А здесь необходим также, для того чтобы свести колебания двух различно поляризованных лучей в одну плоскость.

Разность хода между двумя компонентами поляризации зависит от толщины пластинки, среднего угла преломления и разности показателей n_o и n_e . Разность фаз:

$$\delta = 2\pi\Delta / \lambda \quad (10.5.1)$$

Интенсивность на выходе при скрещенных поляризаторе и анализаторе.

$$J_i = 0,5I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \delta / 2 \quad (10.5.2)$$

10.6. Искусственная анизотропия

Двойное лучепреломление можно наблюдать в изотропных средах (аморфных телах), если *подвергнуть их механическим нагрузкам*.

Явление, открытое в 1818 г. Брюстером, получило название *фотоупругости* или **пьезооптического эффекта**.

Обозначим *напряжение* $\sigma = \frac{dF}{dS}$

От этого напряжения будет зависеть разность показателей преломления: $n_o - n_e = k\sigma$

Поместим стеклянную пластинку Q между двумя поляризаторами P и A :

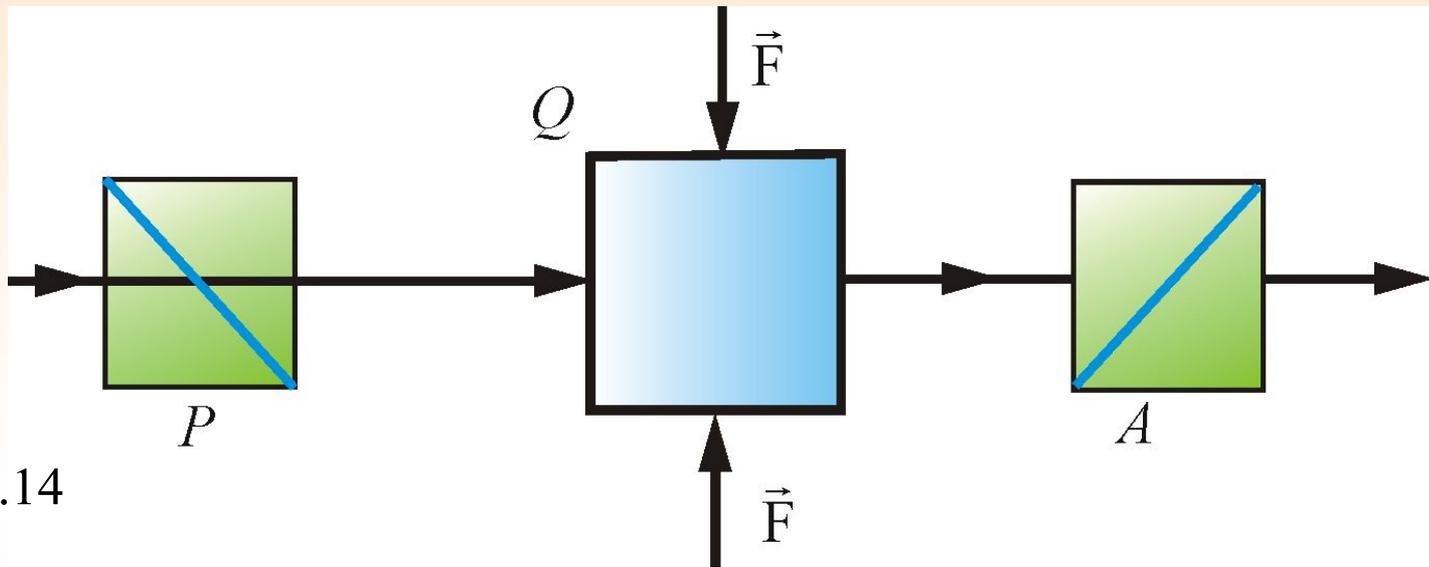


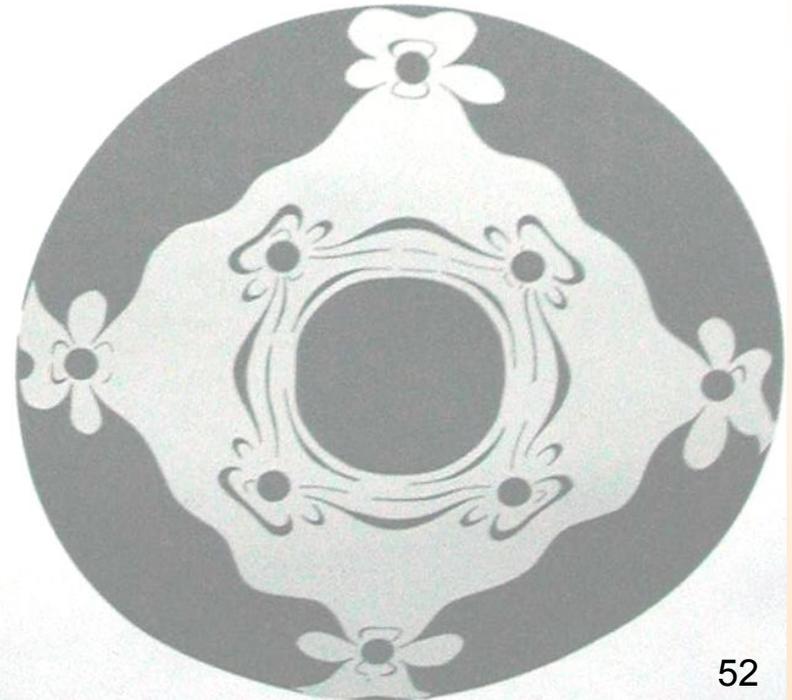
Рисунок 10.14

В отсутствие механической деформации свет через них проходить не будет.

Если же стекло подвергнуть деформации, то свет может пройти, причем картина на экране получится цветная.

По распределению цветных полос можно судить о распределении напряжений в стеклянной пластинке.

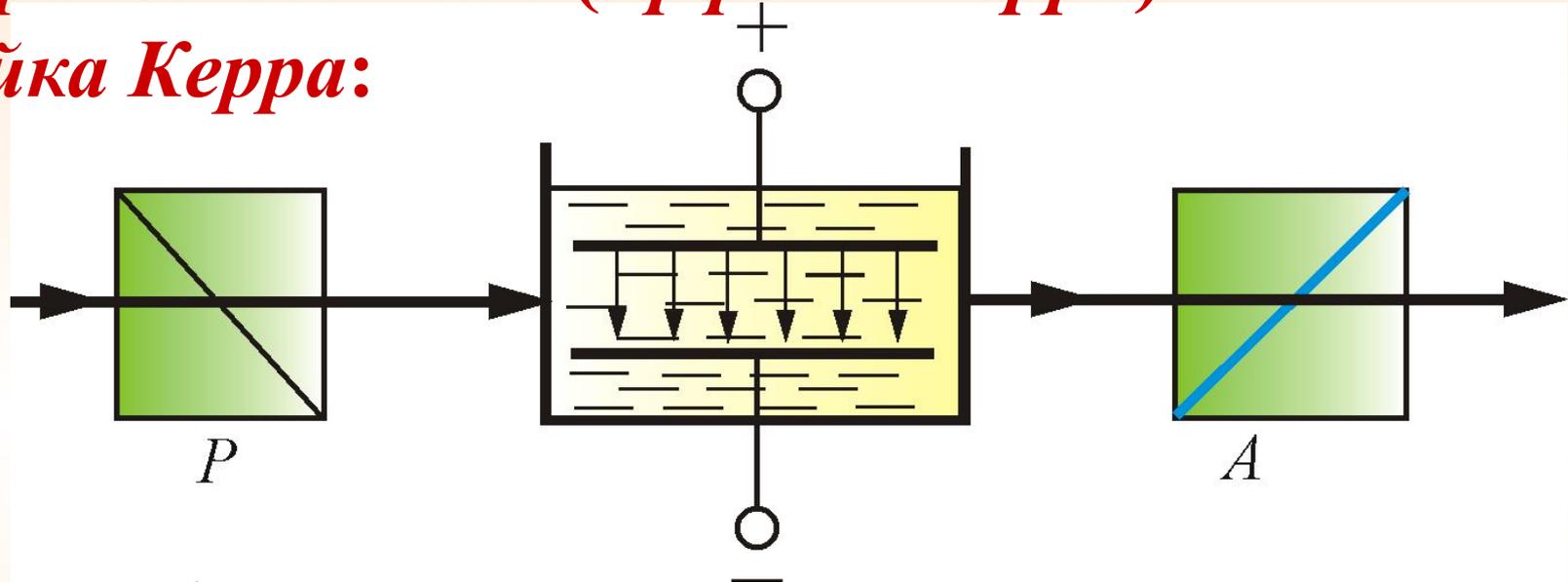
Помещая прозрачные фотоупругие модели между поляризатором и анализатором и подвергая их различным нагрузкам, *можно изучать распределения возникающих внутренних напряжений.*



Явление искусственной анизотропии МОЖЕТ

ВОЗНИКАТЬ В ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ *под воздействием электрического поля (эффект Керра).*

Ячейка Керра:



Свет, прошедший через кювету, поворачивает плоскость поляризации, и система становится прозрачной.

Ячейка Керра может служить затвором света, который управляется потенциалом одного из электродов конденсатора, помещенного в ячейку.

На основе ячеек Керра построены практически безинерционные затворы и модуляторы света с временем срабатывания до 10^{-12} с.

Величина двойного лучепреломления прямо пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля:

$$\Delta n = nkE^2 \quad (\text{закон Керра}).$$

Здесь n – показатель преломления вещества в отсутствии поля,

$\Delta n = n_e - n_o$ – показатели преломления для необыкновенной и обыкновенной волн,

k – постоянная Керра.

10.7. 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**.

Лекция окончена!

