

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

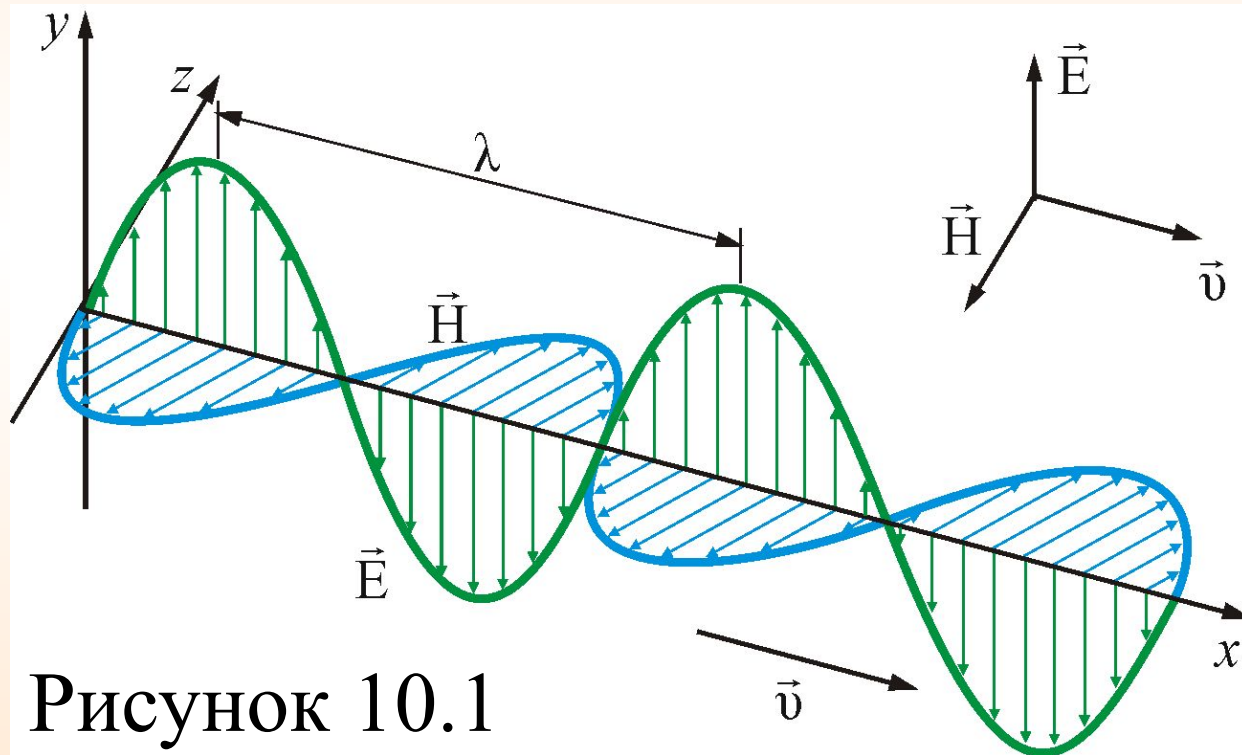
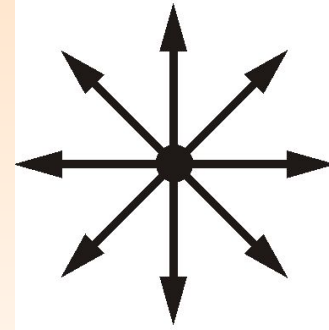


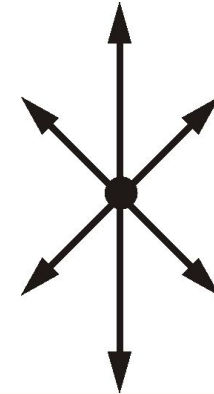
Рисунок 10.1

Продольная волна всегда симметрична относительно направления распространения.

Естественный свет — неполяризованный:



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

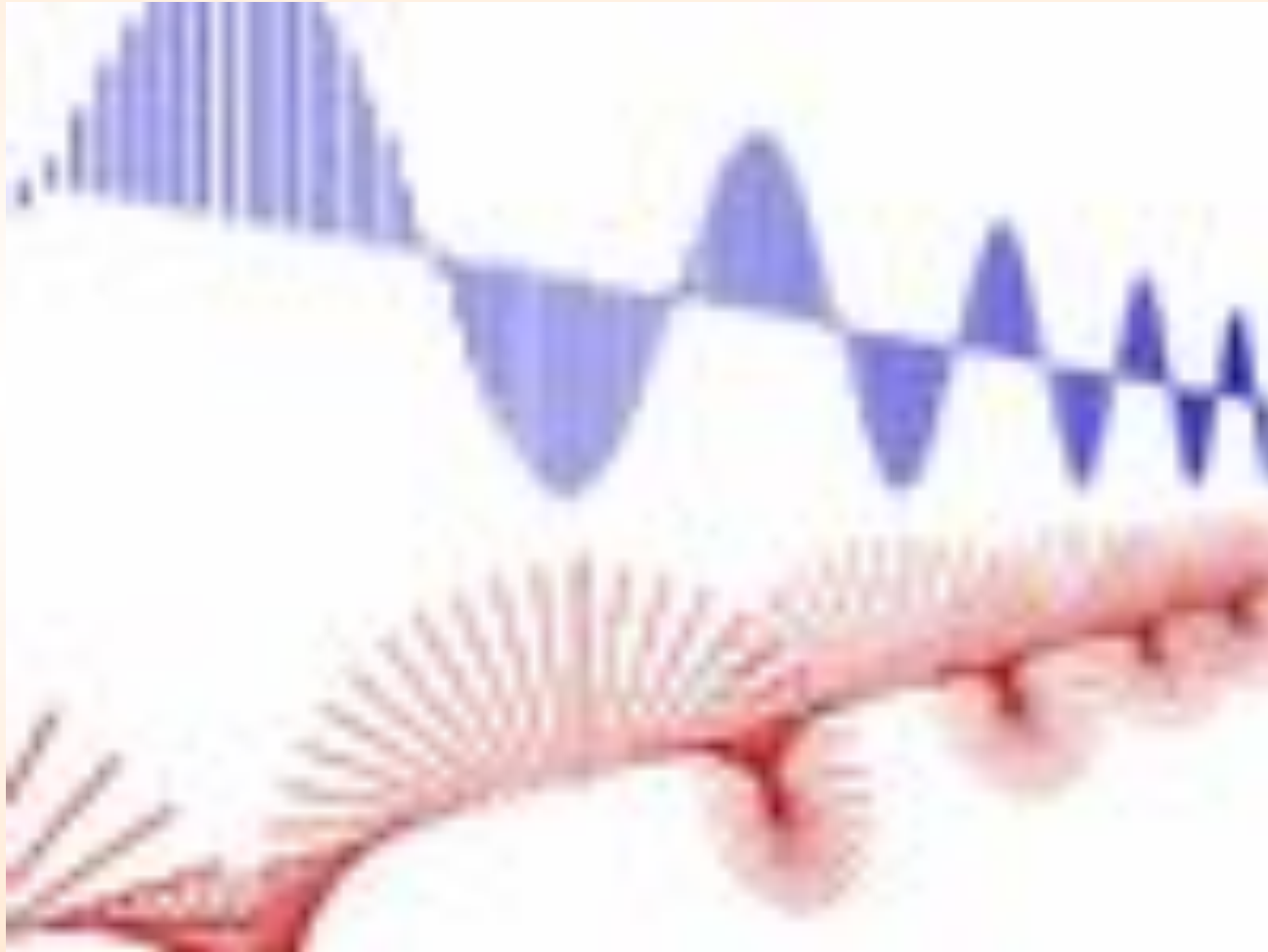


Линейная поляризация:

Электромагнитная волна в этом случае называется *полностью поляризованной.*



Линейно поляризованная электромагнитная волна и волна круговой поляризации.



Эллиптическая и круговая поляризация электромагнитной волны

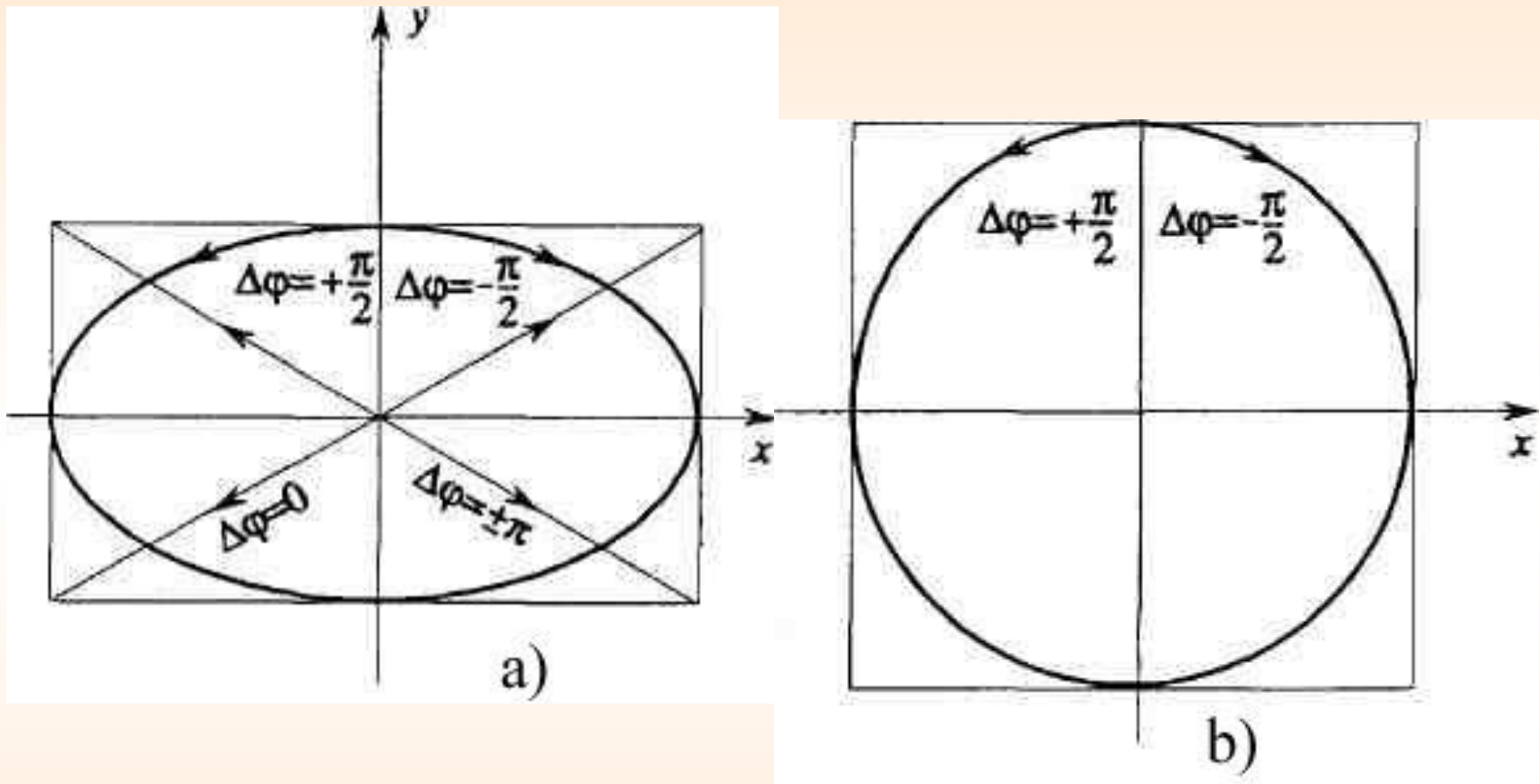


Рисунок 10.3

Пространственная структура эллиптически-поляризованных вол:

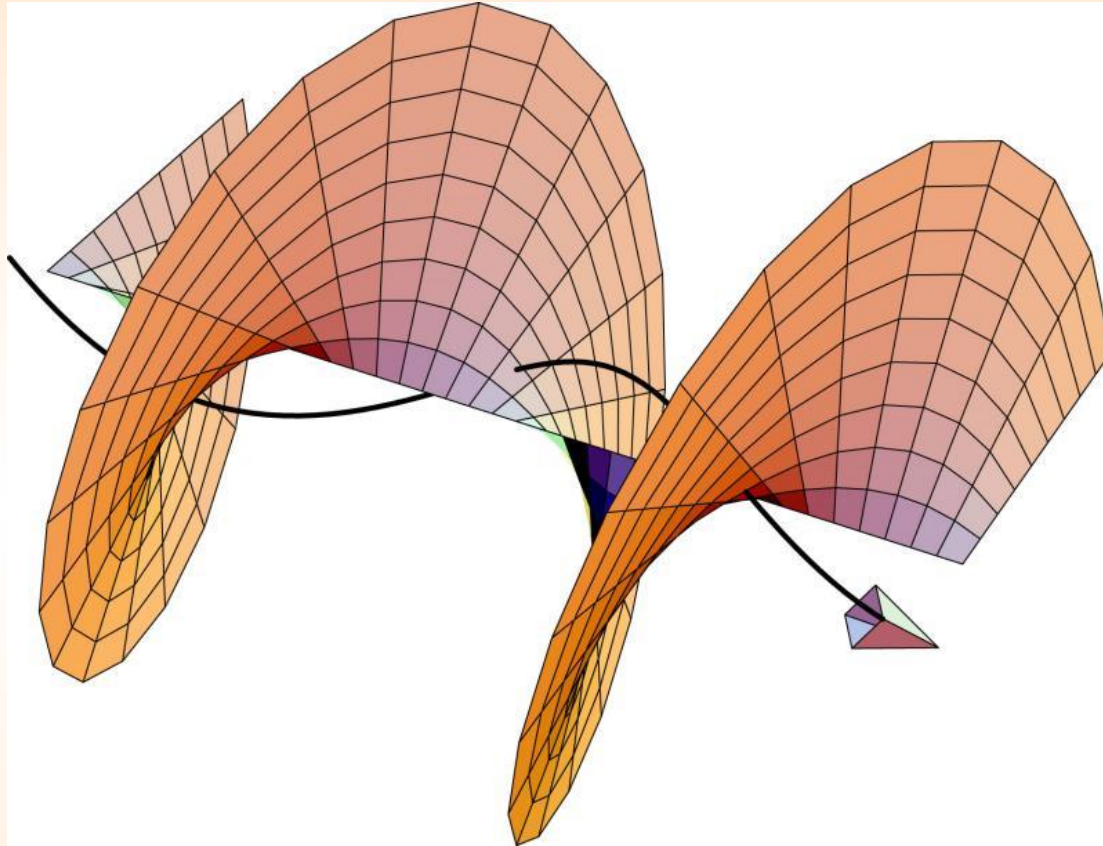


Рисунок 10.4

Винтовая линия, геометрическое место концов вектора $\mathbf{E}$
Шаг винта равен длине волны λ .

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

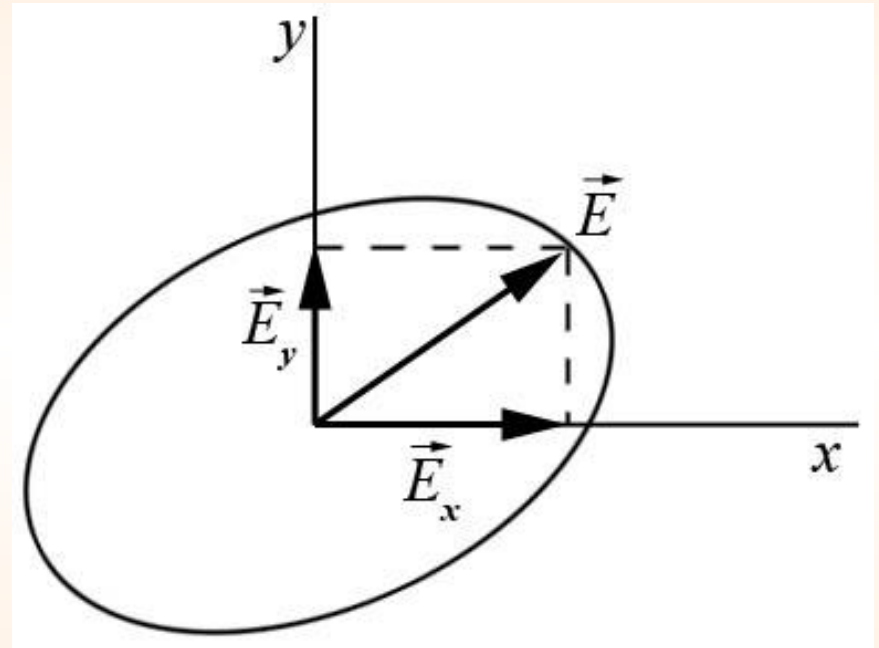
Образование поляризованного света

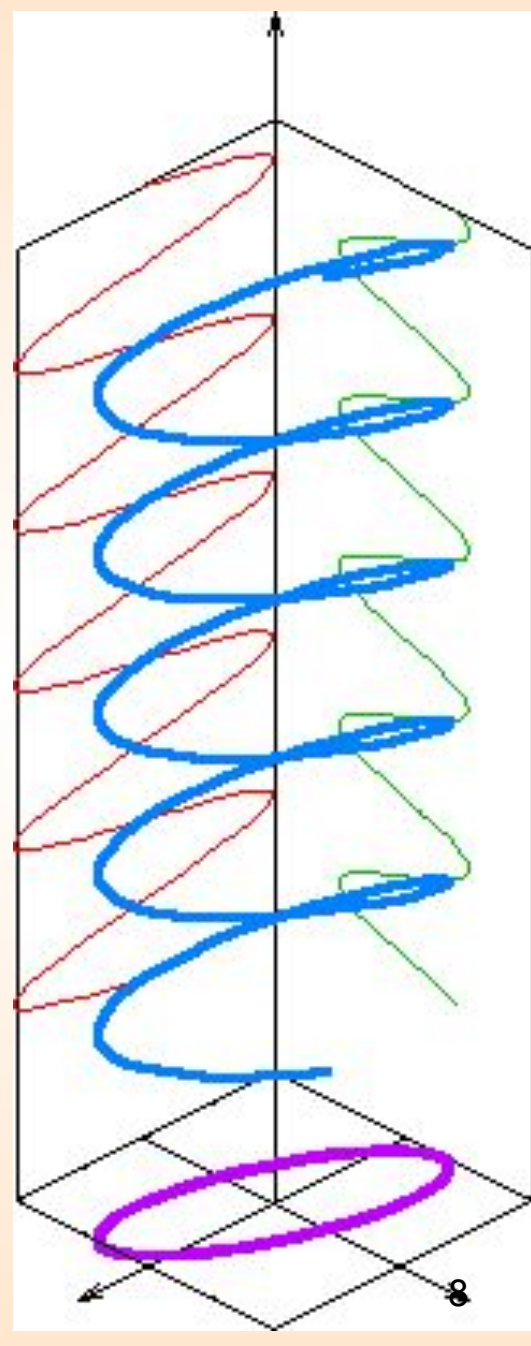
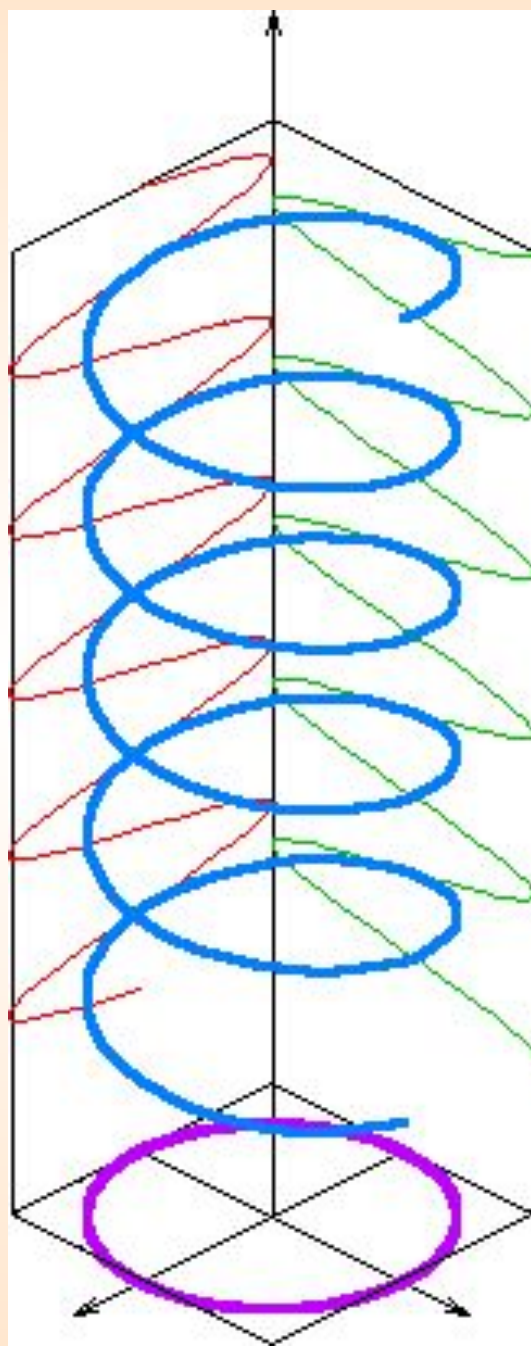
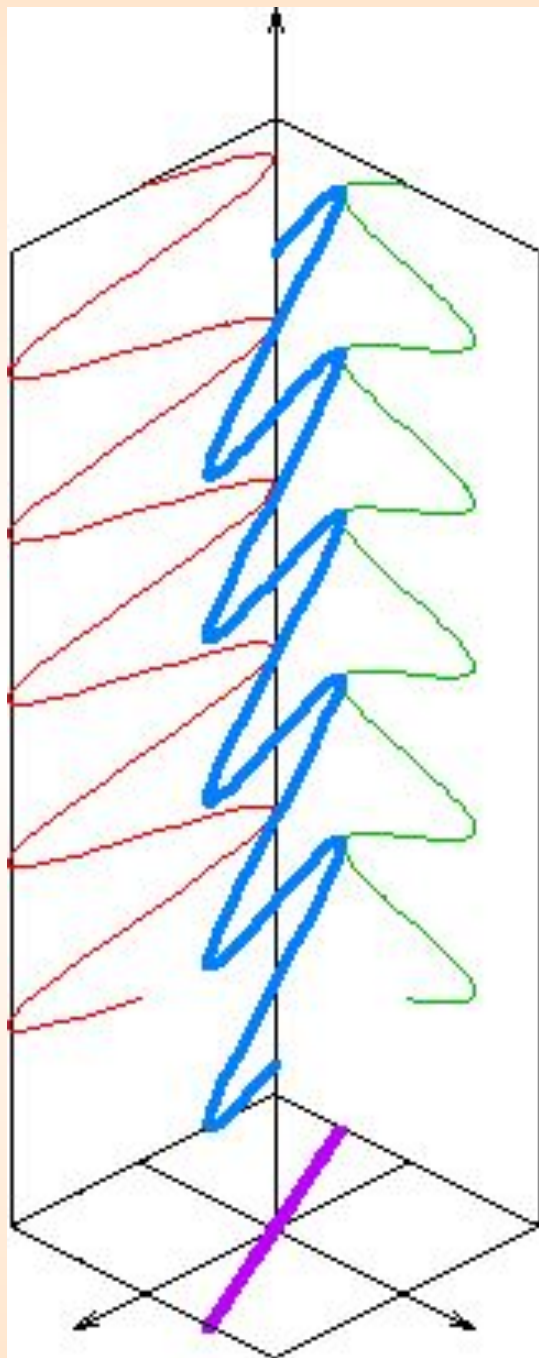
Рассмотрим 2 взаимно перпендикулярных колебания, отличающихся по фазе на α :

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

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.

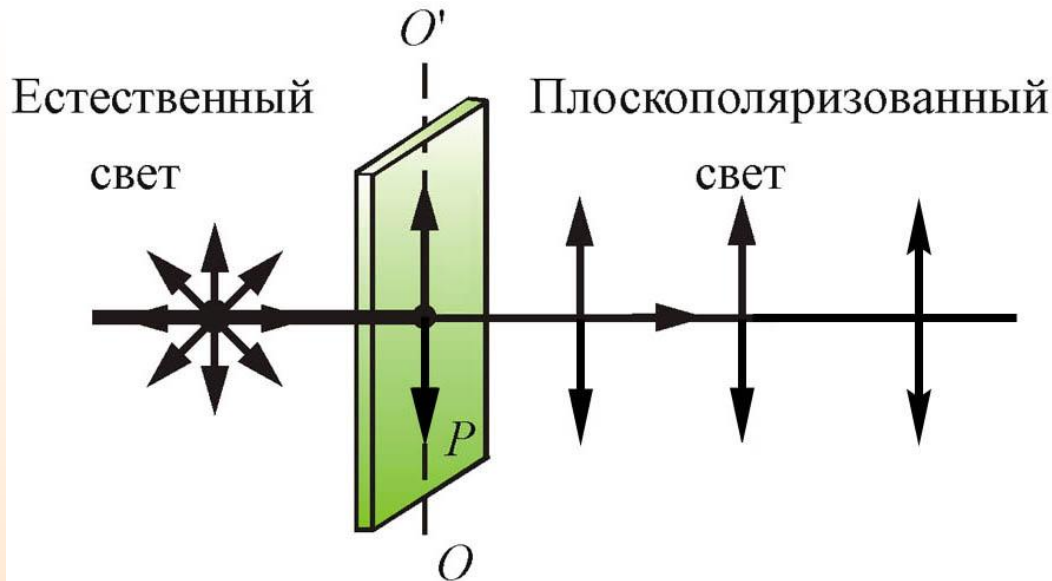




Линейно поляризованный свет:

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

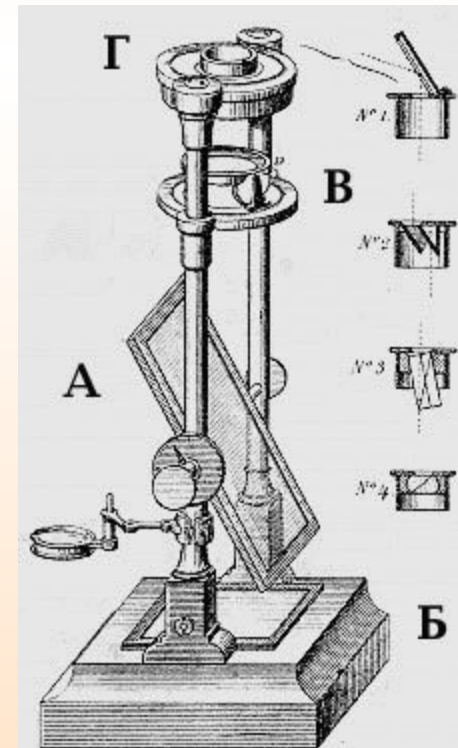
- свободно пропускают колебания, параллельные *плоскости поляризатора*,
- полностью или частично задерживают колебания перпендикулярные к его плоскости.

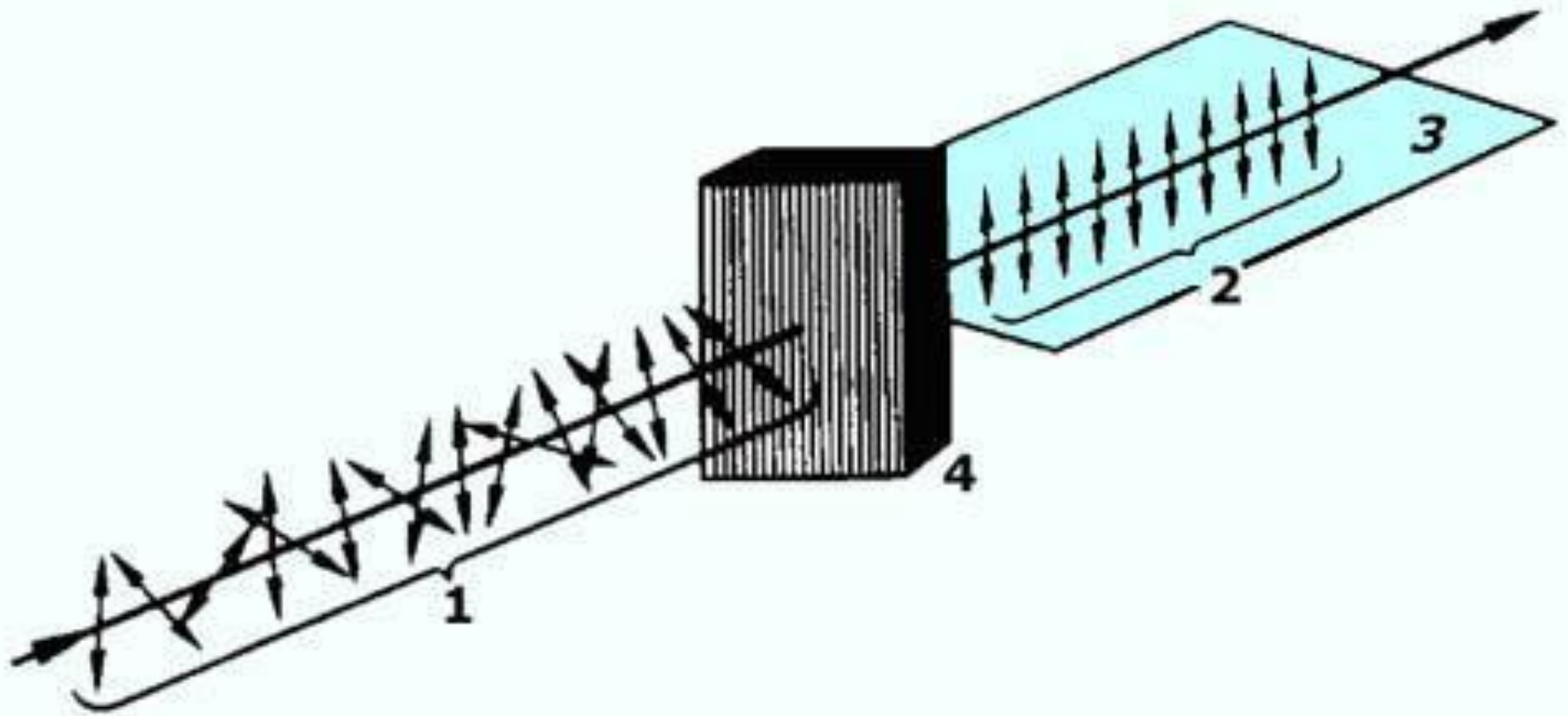


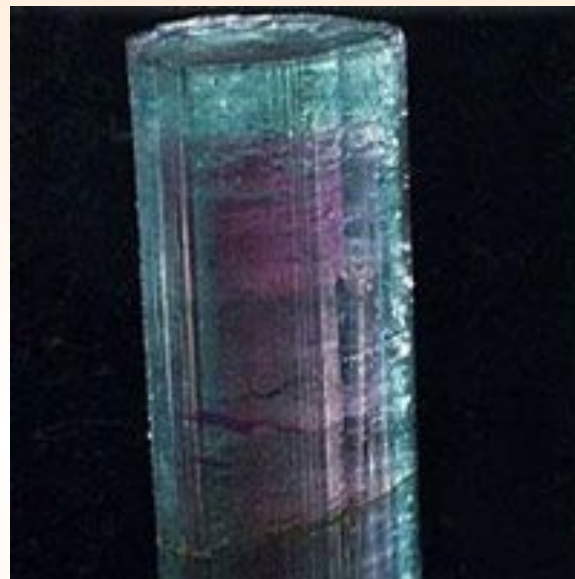
После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO' .

Линейные поляризаторы:

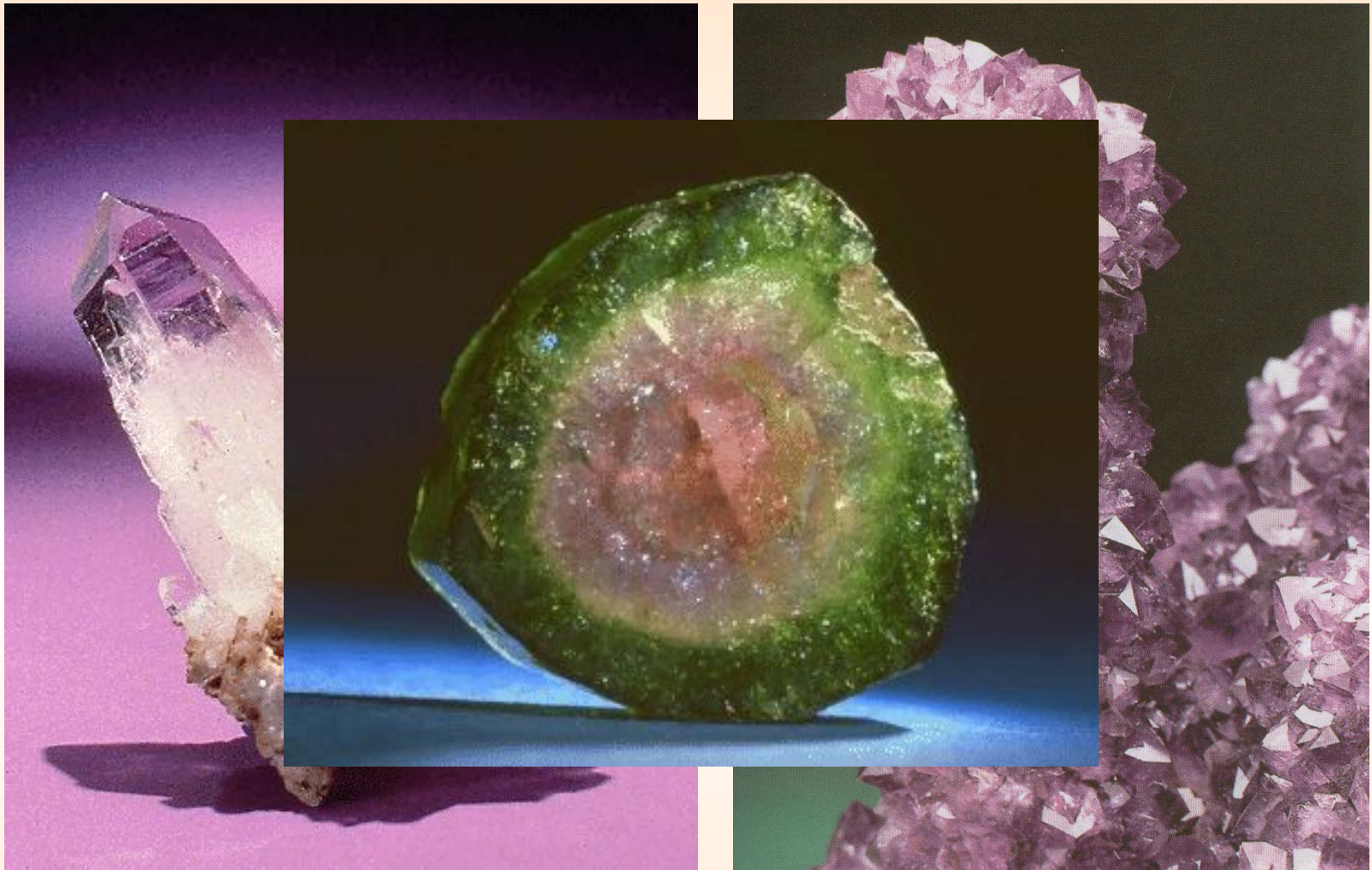
- **оптически анизотропные кристаллы** (турмалин), вырезанные параллельно его оптической оси;
- **поляроиды** — целлулоидные плёнки, в которые введено большое количество одинаково ориентированных с помощью растяжения или сдвиговой деформации кристалликов.
- **оптические стопы изотропных пластинок**,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

МЕСТО

НАПРАВЛЕНИЕ

СКОРОСТЬ

ЗНАКИ

СВЕТОФОРЫ

ОПАСНОСТИ

ОБЗОР БЕЗ ПОМЕХ,
ОПТИМИЗИРОВАННАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ
СВЕТА, ОТСУТВИЕ СЛЕПЯЩИХ БЛИКОВ

ОТРАЖЕНИЯ НА ВЕТРОВИМ СТЕКЛЕ

СЛЕПЯЩИЕ БЛИКИ

СИТУАЦИИ НА ДОРОГЕ

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.

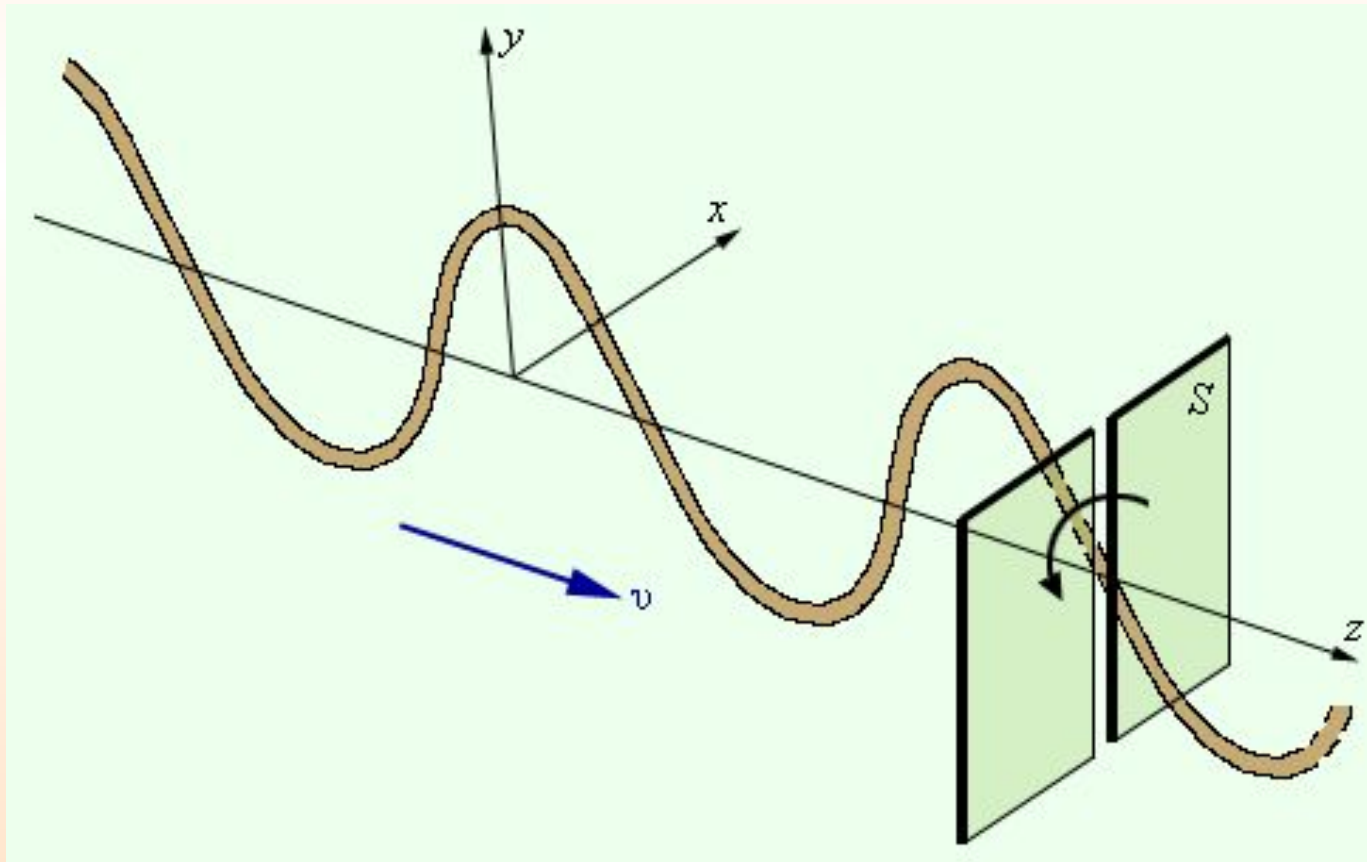
Устройства позволяющие получать линейно поляризованный свет, называют *поляризаторами*.

Для анализа поляризации света, используют *анализаторы*.

Главная плоскость поляризатора (анализатора¹⁶).

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).



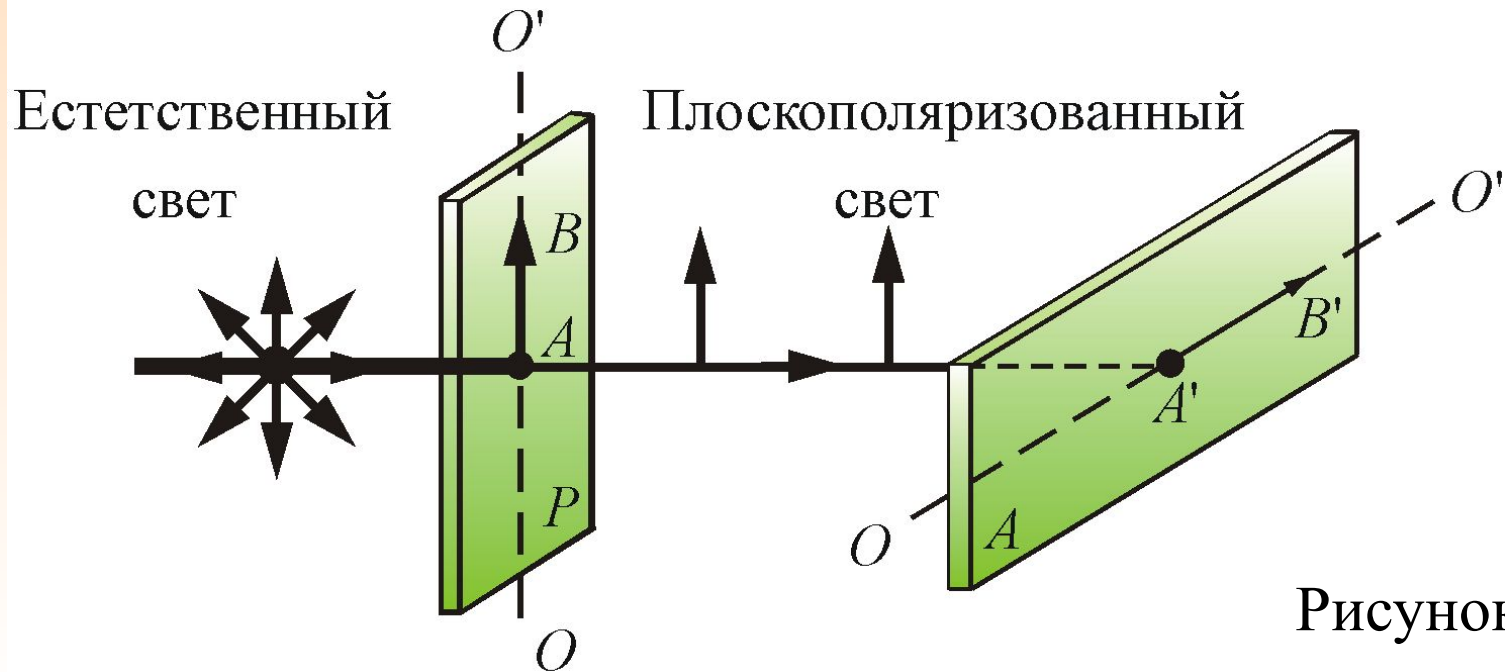


Рисунок 10.5

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.

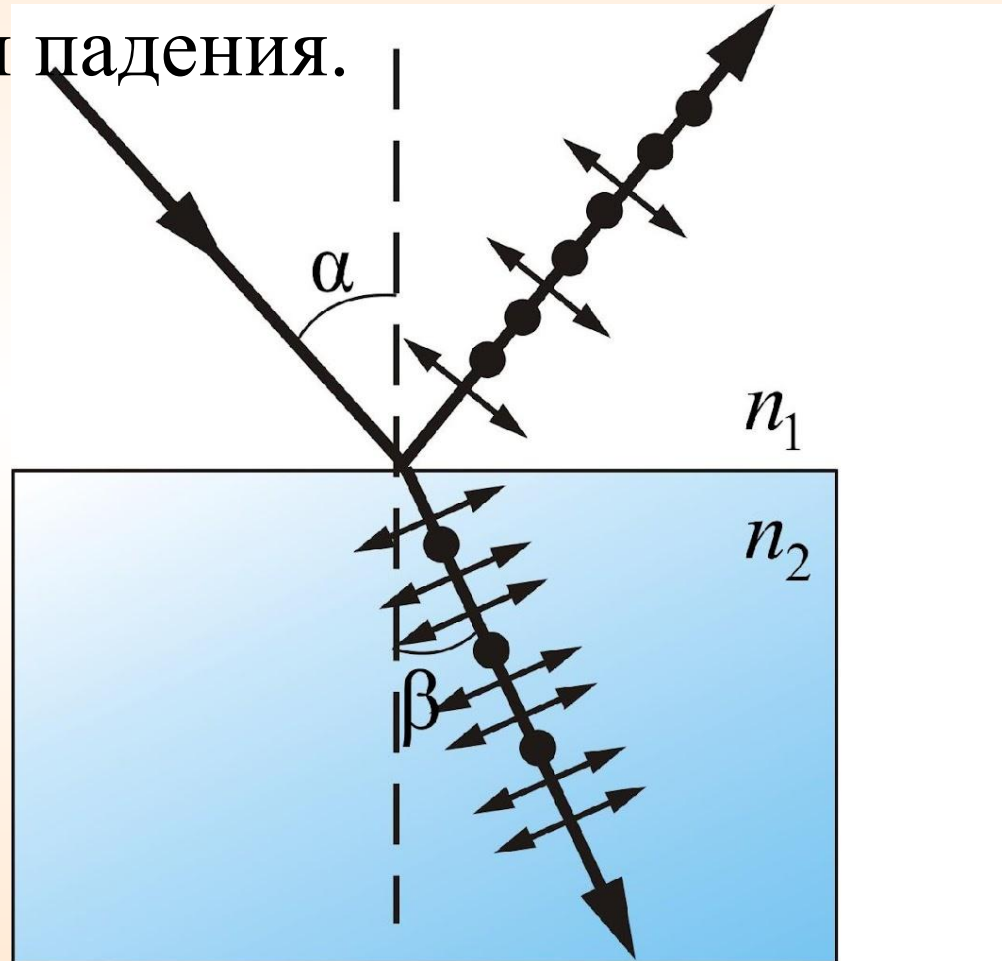
10.2. Поляризация при отражении и преломлении

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*.

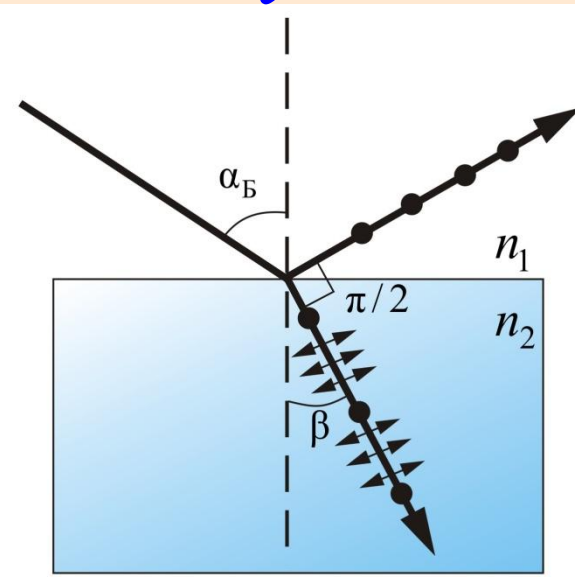
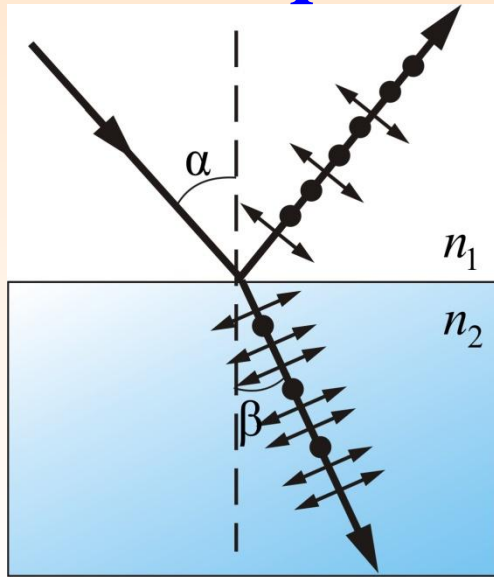
В отраженном луче преобладают колебания, *перпендикулярные* плоскости падения, а в преломленном луче — колебания *параллельные* плоскости падения

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 $\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$

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* :

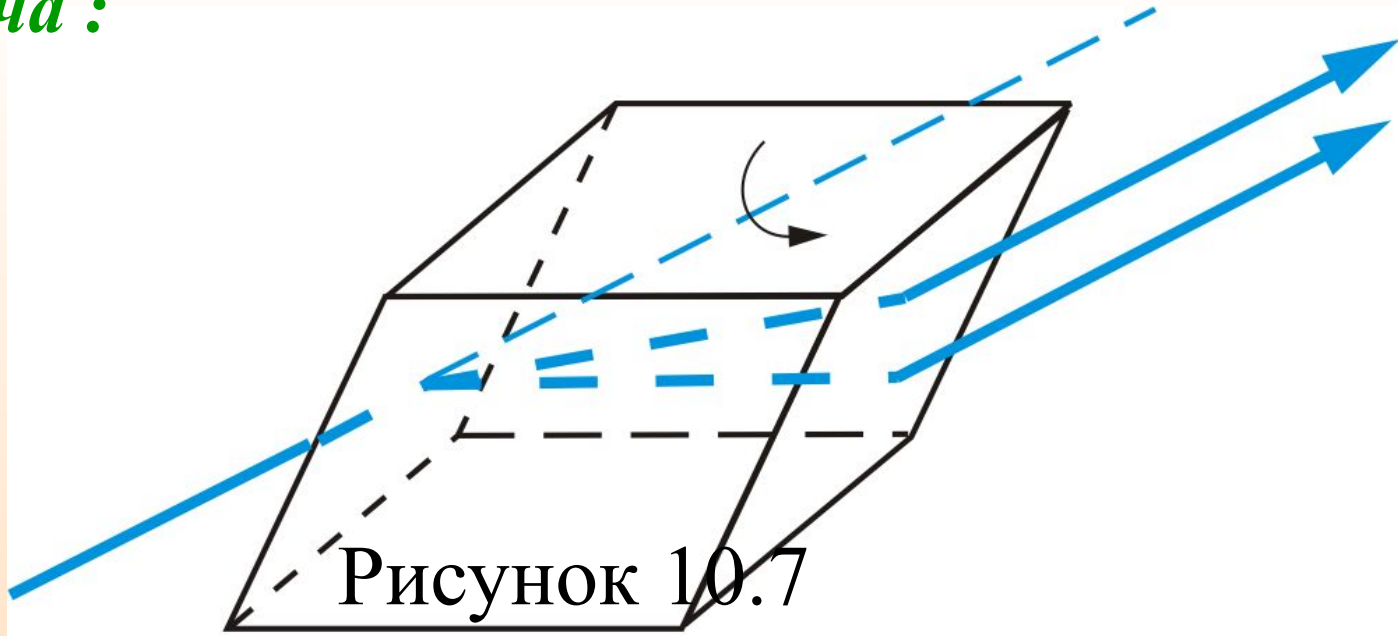


Рисунок 10.7

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.

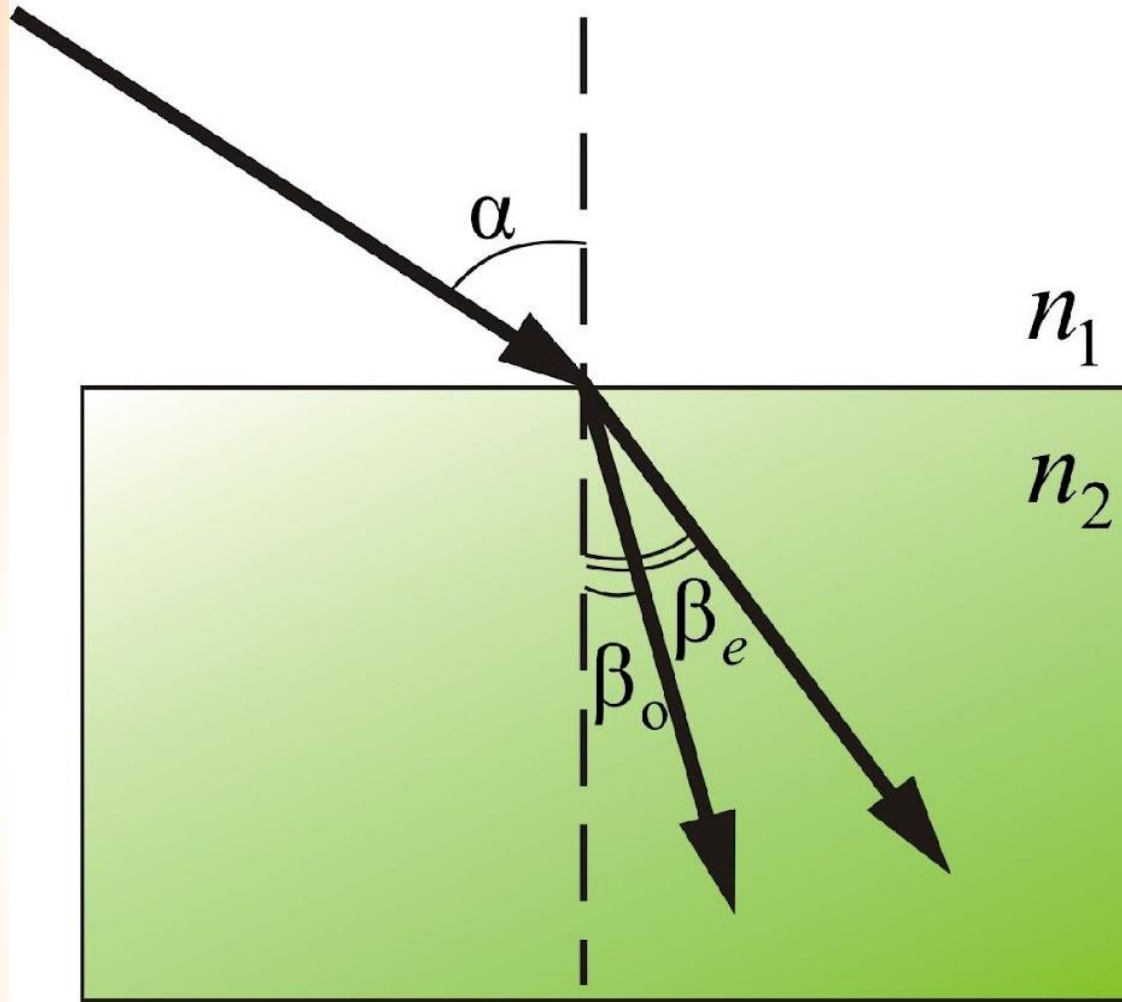
Расщепление луча света, проходящего через *исландский шпат*, связано с ***анизотропией кристалла***.

У анизотропных кристаллов имеется оптическая ось.

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

Одноосные кристаллы (исландский шпат, турмалин)

Кристаллы двухосные (гипс, слюда).



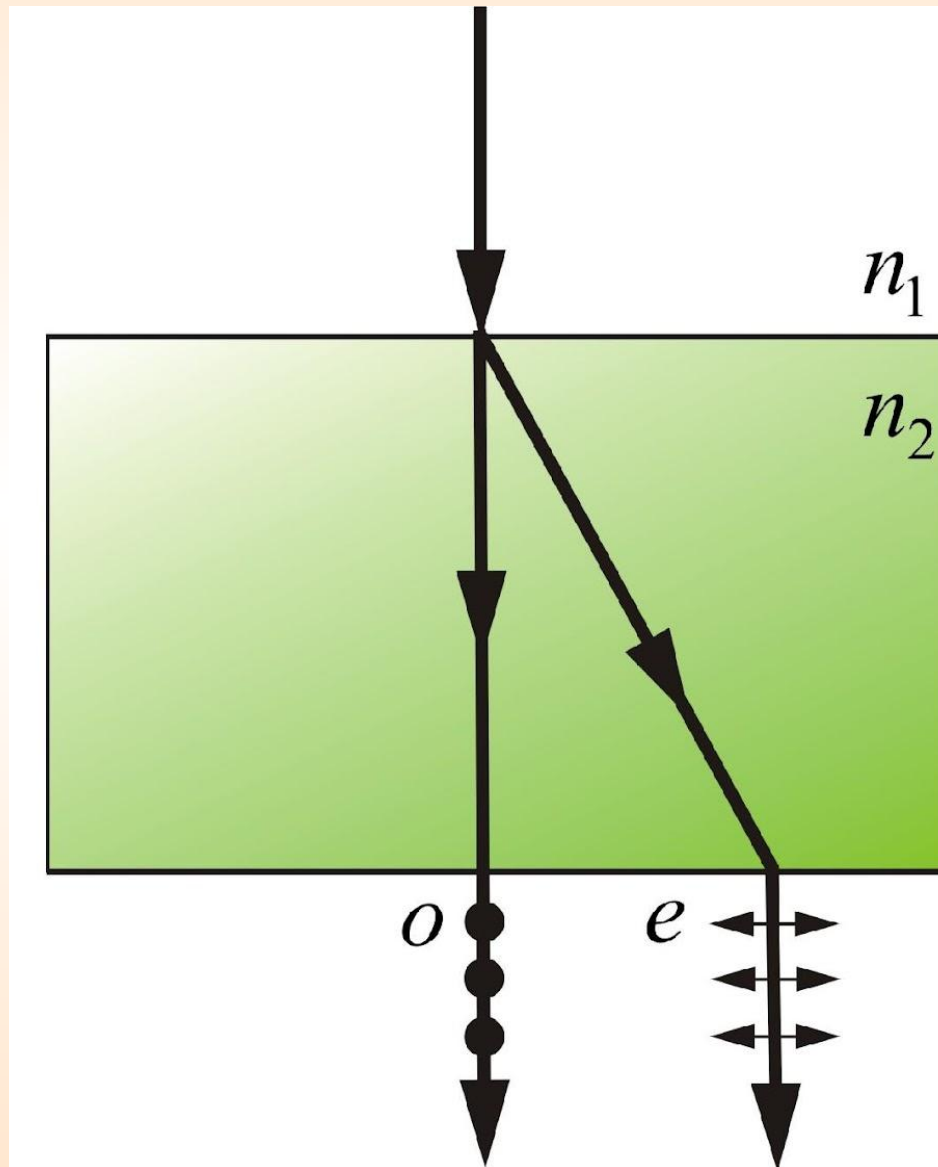
Закон преломления Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Подчиняется луч **обыкновенный o**

Не подчиняется – **необыкновенный луч e.**

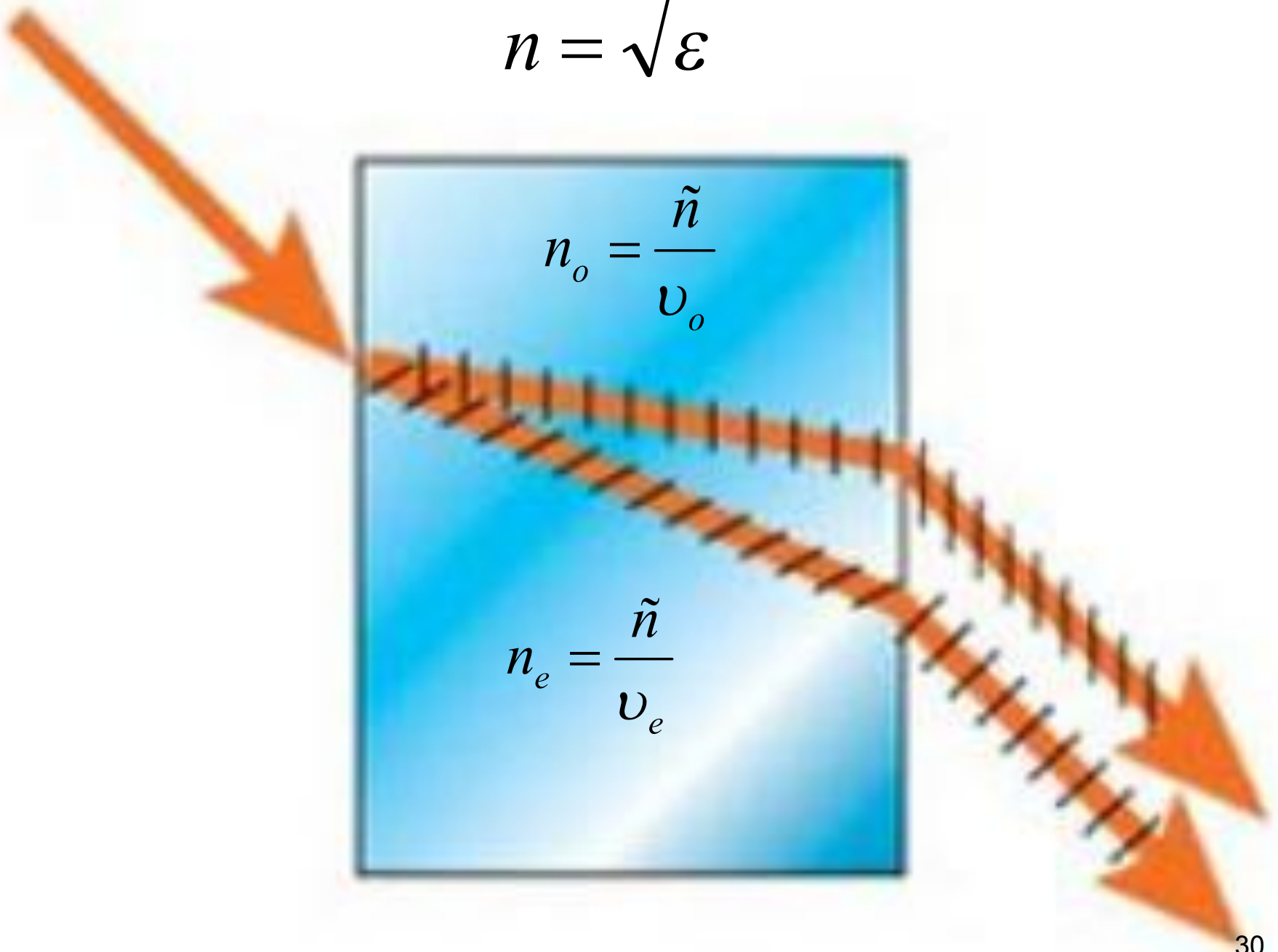
Явление двойного лучепреломления используется для получения поляризованного света:



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

$$n_o = \frac{\tilde{n}}{v_o}$$

$$n_e = \frac{\tilde{n}}{v_e}$$

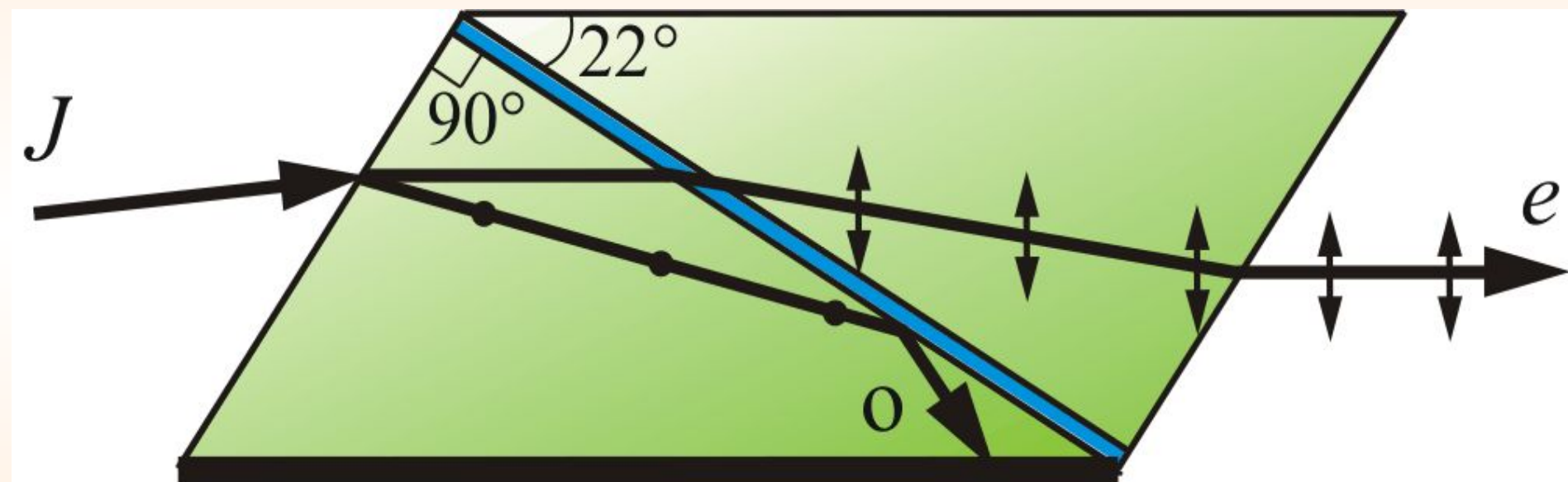


Дихроизм – один из лучей поглощается сильнее другого

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.

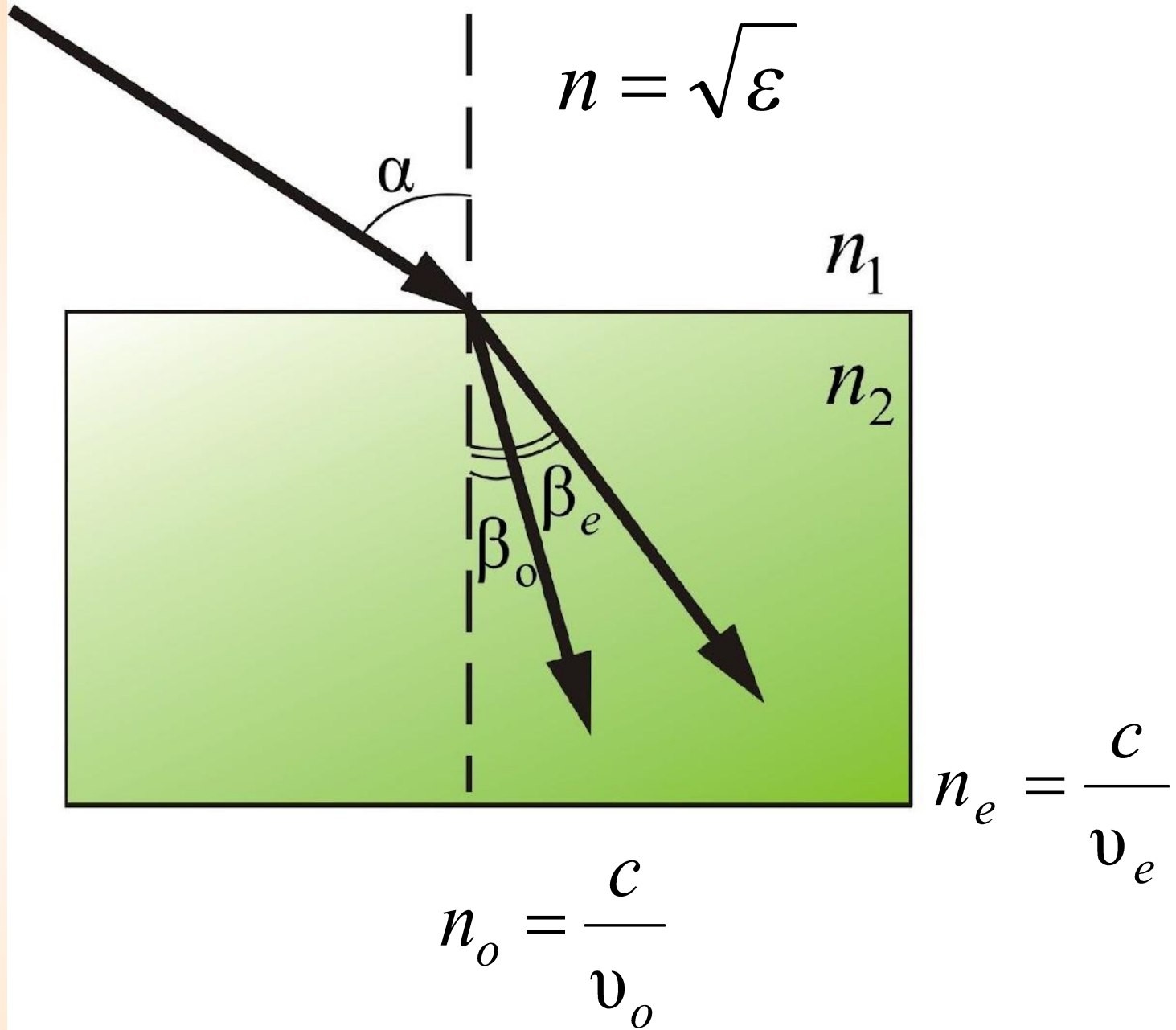
В качестве поляроида используется *призма Николя (николь)*. Это призма из *исландского шпата*, разрезанная по диагонали и склеенная *канадским бальзамом*



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

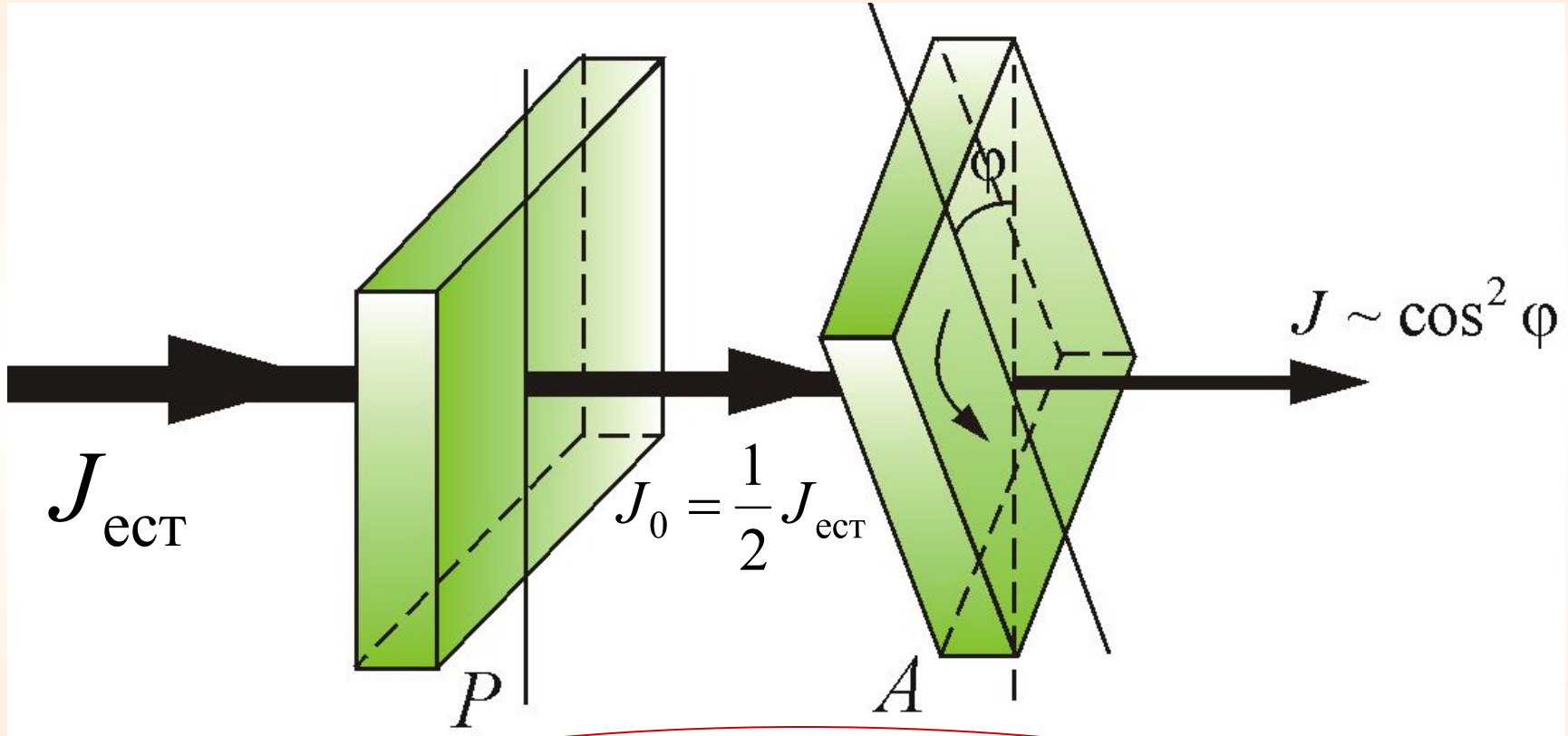
$$n_o = \frac{\tilde{n}}{v_o}$$

и показатель преломления

$$\text{необыкновенного луча } n_e = \frac{\tilde{n}}{v_e}$$

10.4. Закон Малюса

В 1809 г. французский инженер Э. Малюс



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

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

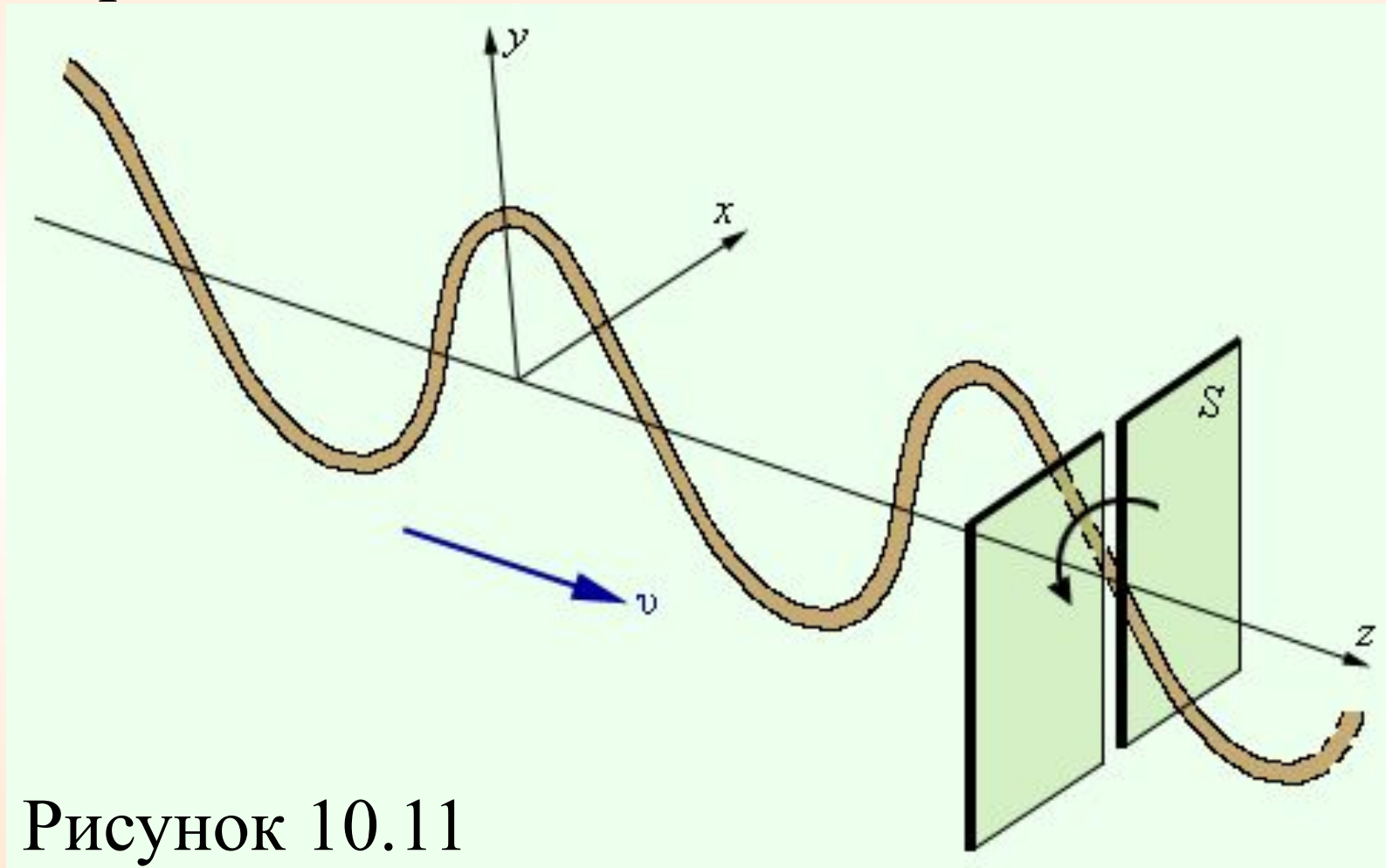


Рисунок 10.11

поворот щели S вызовет затухание волны

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

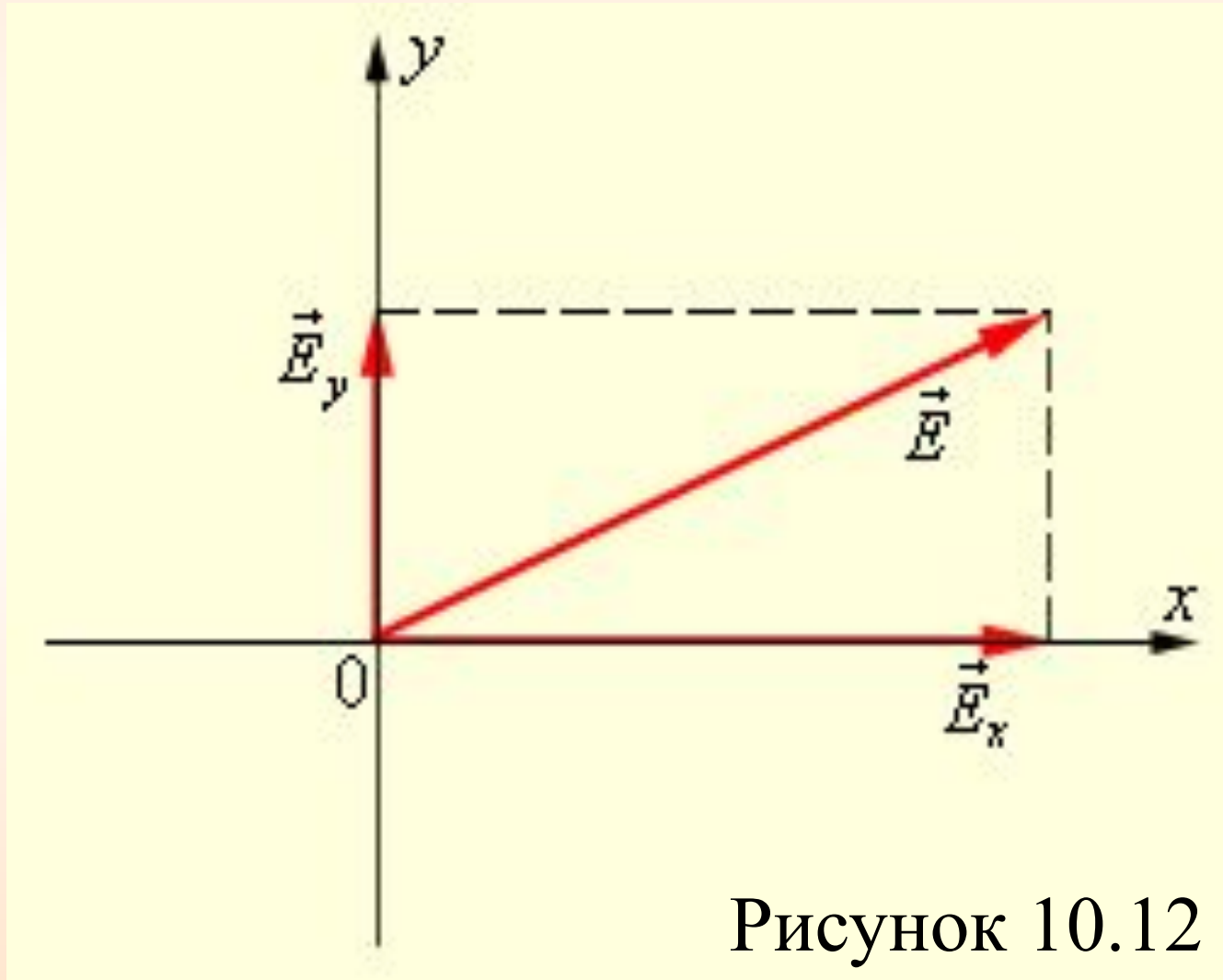


Рисунок 10.12

Световую волну с амплитудой E_0 разложим на две составляющие.

$$E_x = E_0 \cos \phi \qquad E_y = E_0 \sin \phi$$

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

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

Закон Малюса

$$J = J_0 \cos^2 \phi \qquad (10.4.1)$$

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

Интенсивность естественного света,
уменьшается в два раза.

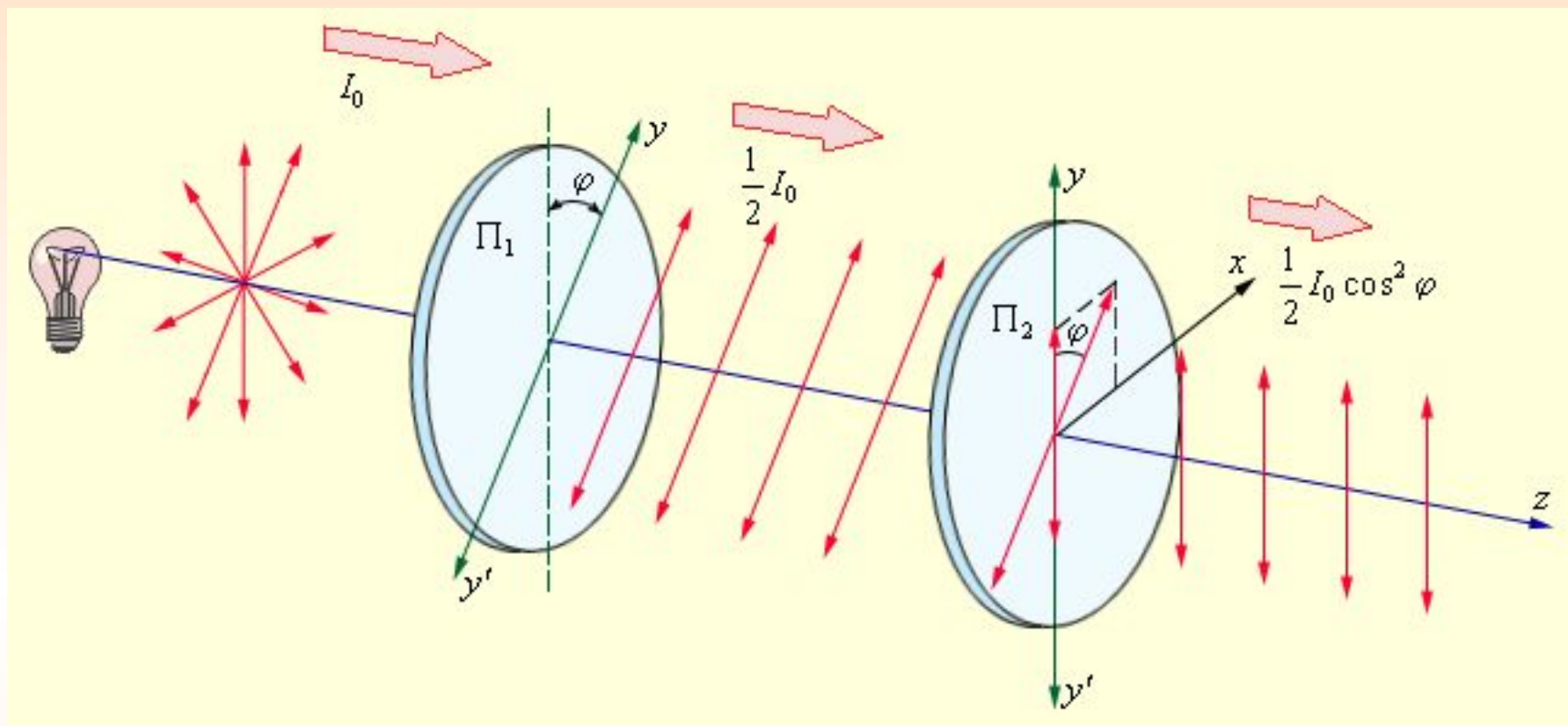


Рис. 11. Прохождение естественного света через два идеальных поляроида. yy' – разрешенные направления поляроидов

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

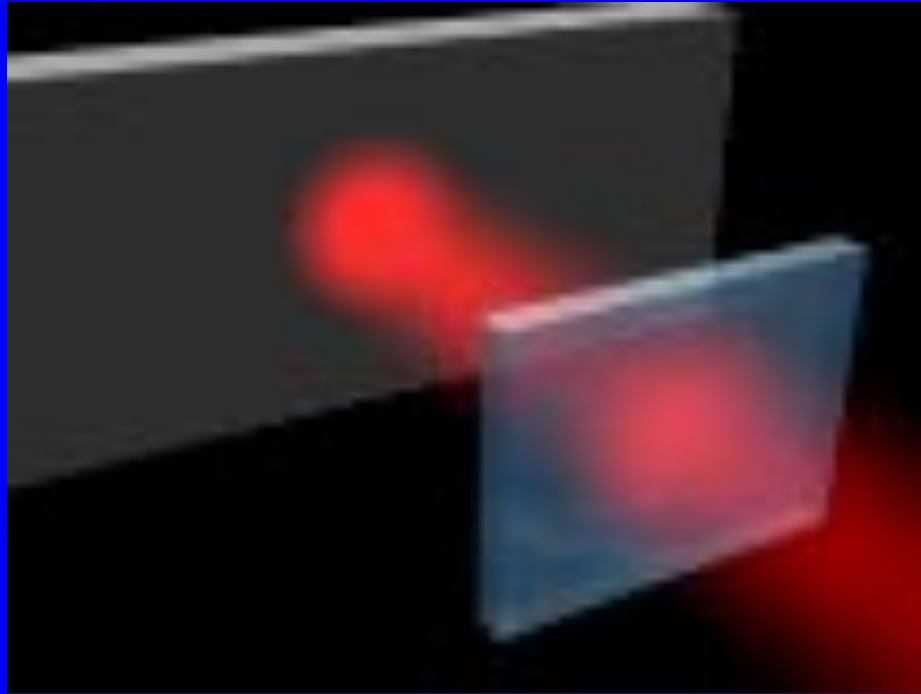
Второй поляризатор пропустит свет

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

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

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

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



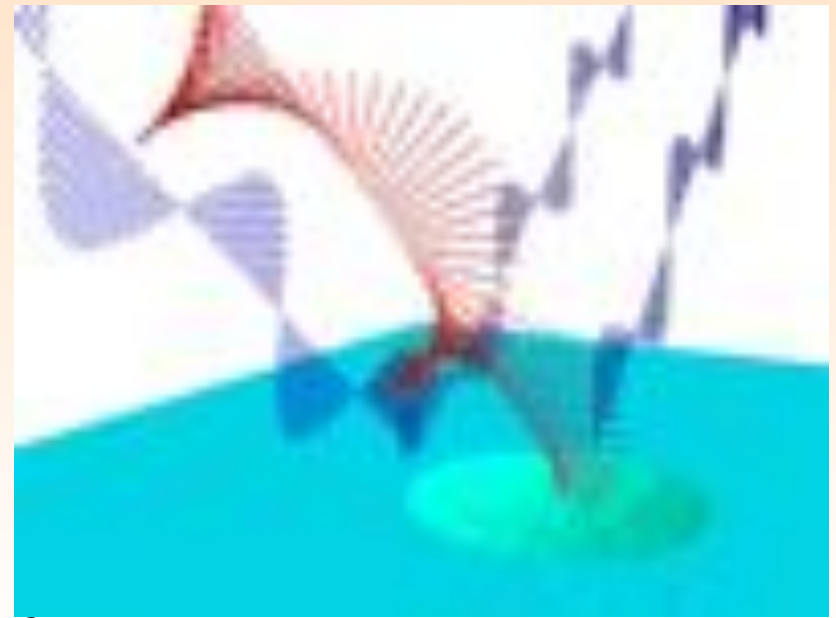
Прохождение линейно поляризованного света He-Ne лазера через вращающийся поляроид:

- 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.

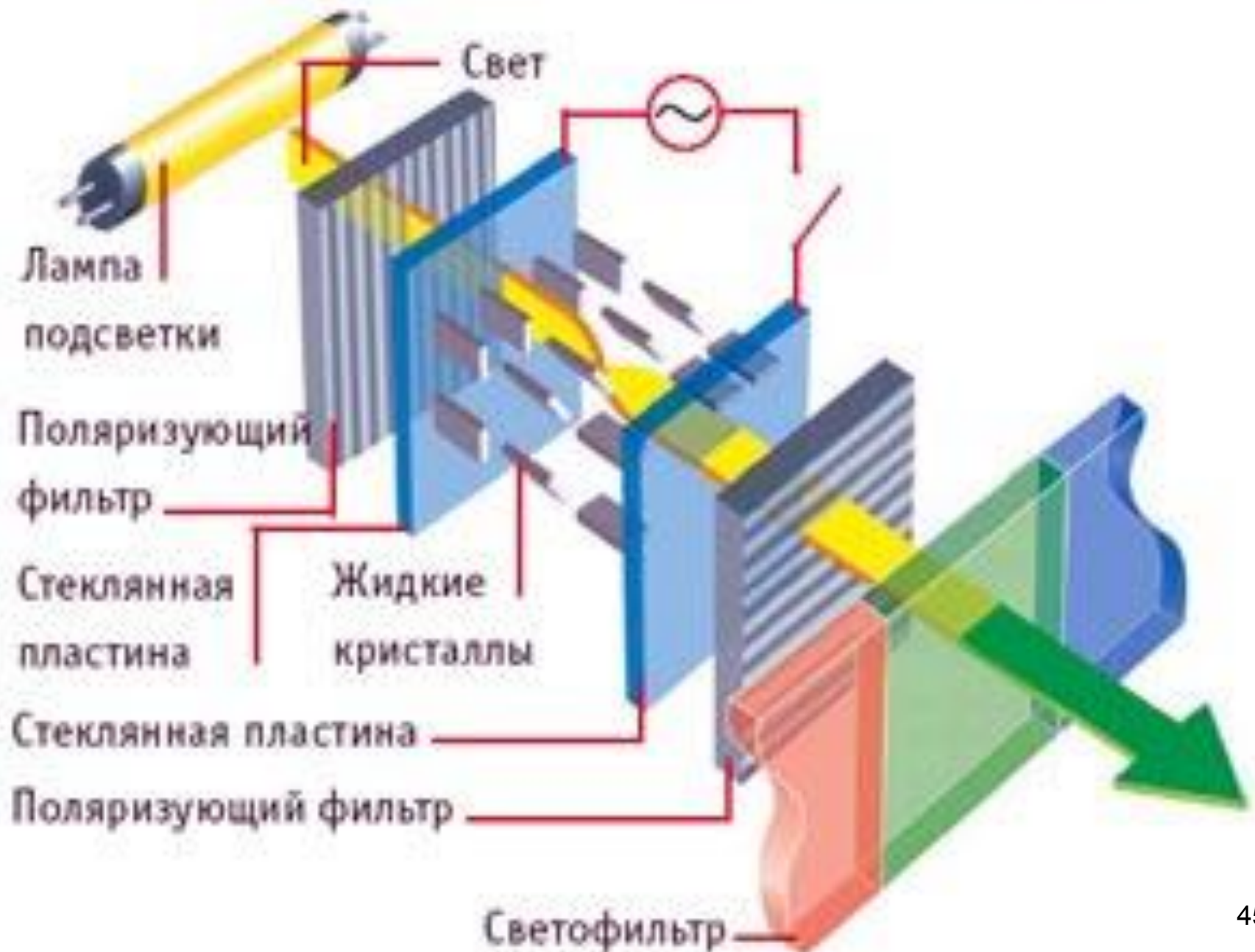
Объектив собирает свет, отражённый от образца и через анализатор (отмечено зелёным) подаёт этот свет на фотоприёмную матрицу.

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.

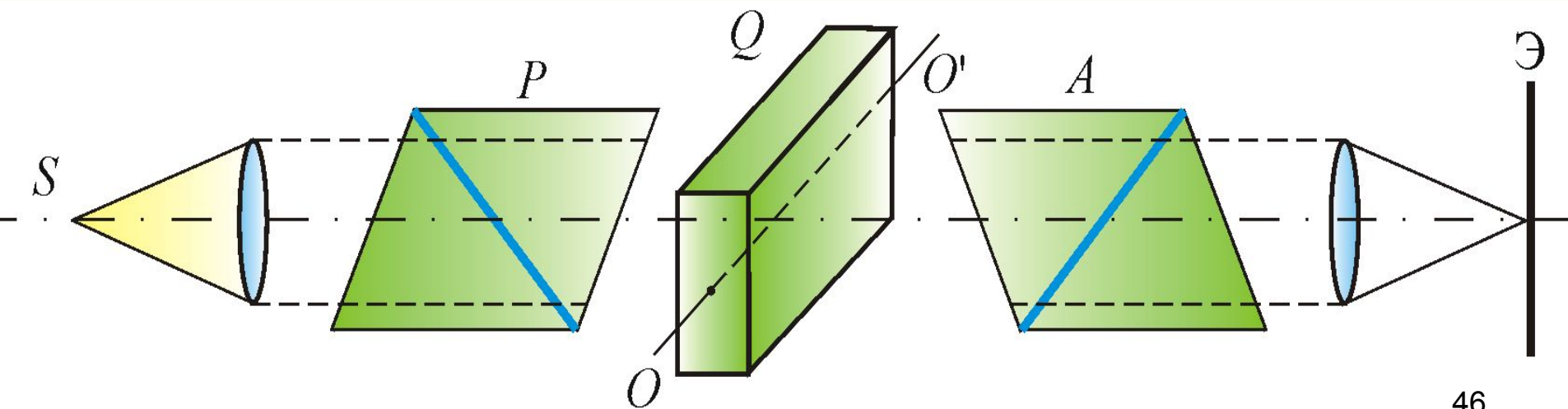
Жидкокристаллический дисплей



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 - непереманный 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, 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 :

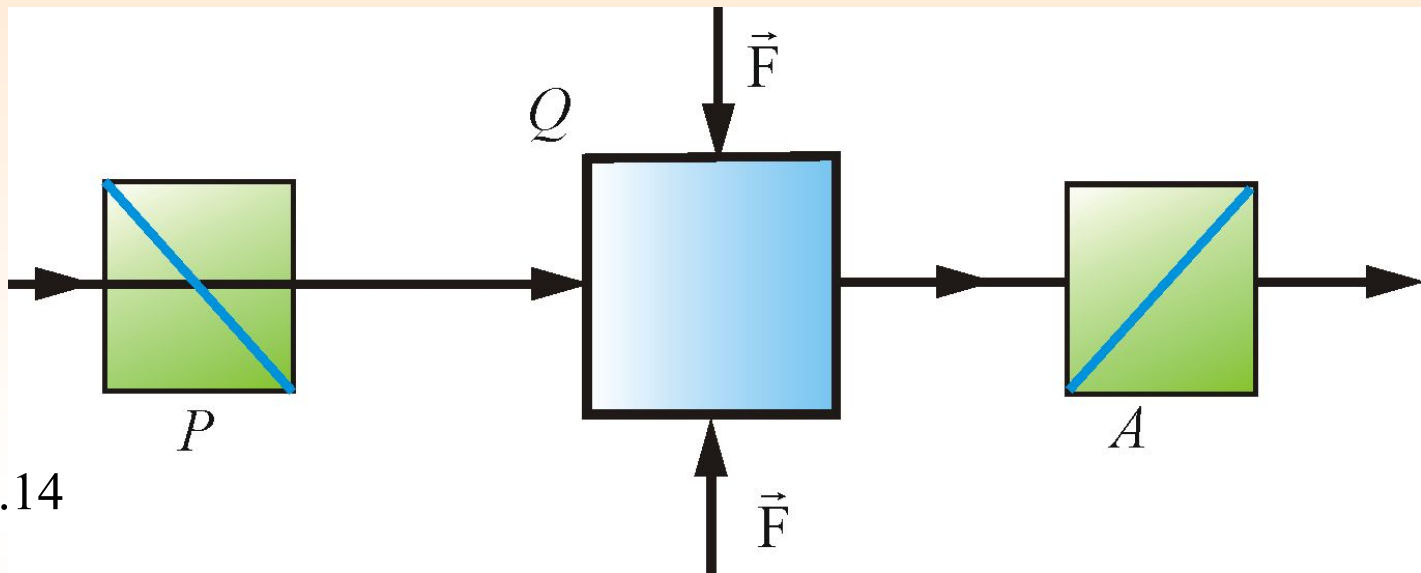


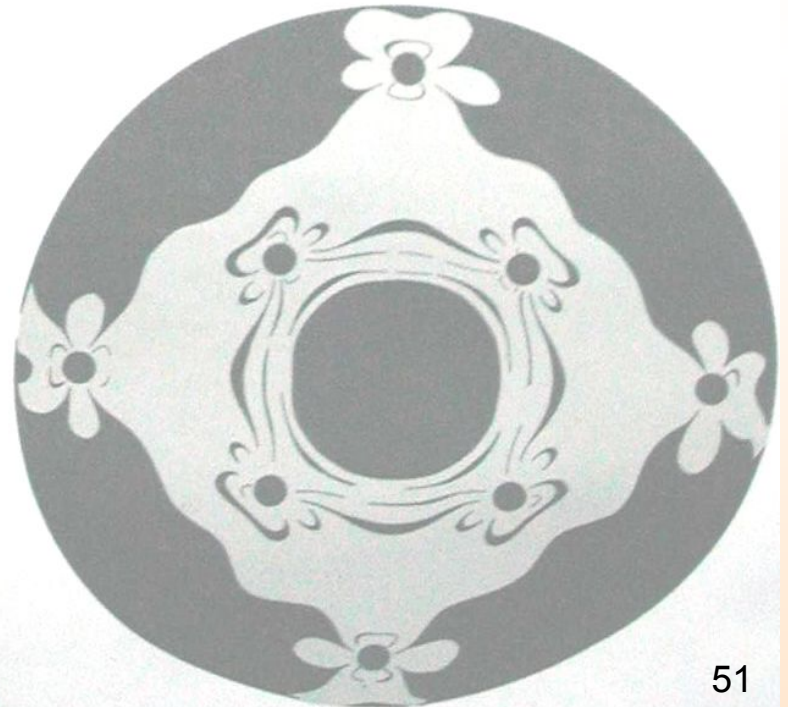
Рисунок 10.14

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.

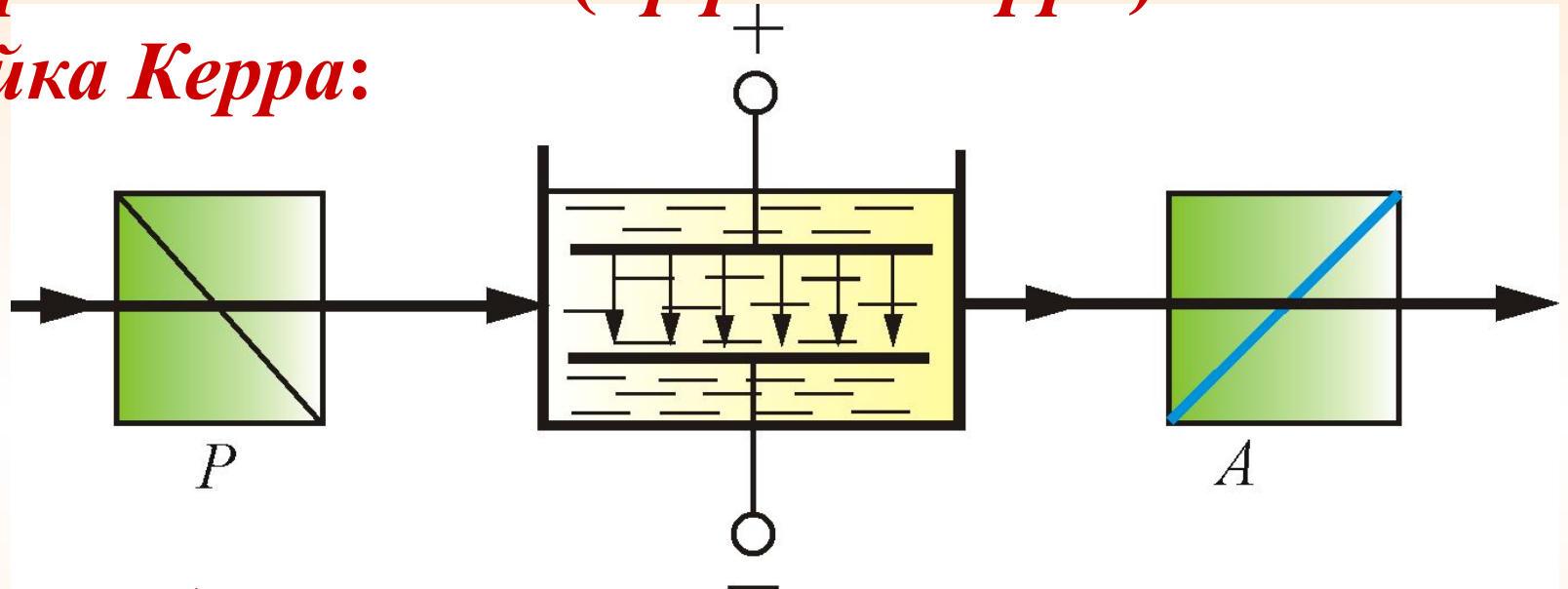
По распределению цветных полос можно судить о распределении напряжений в стеклянной пластинке.

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!

