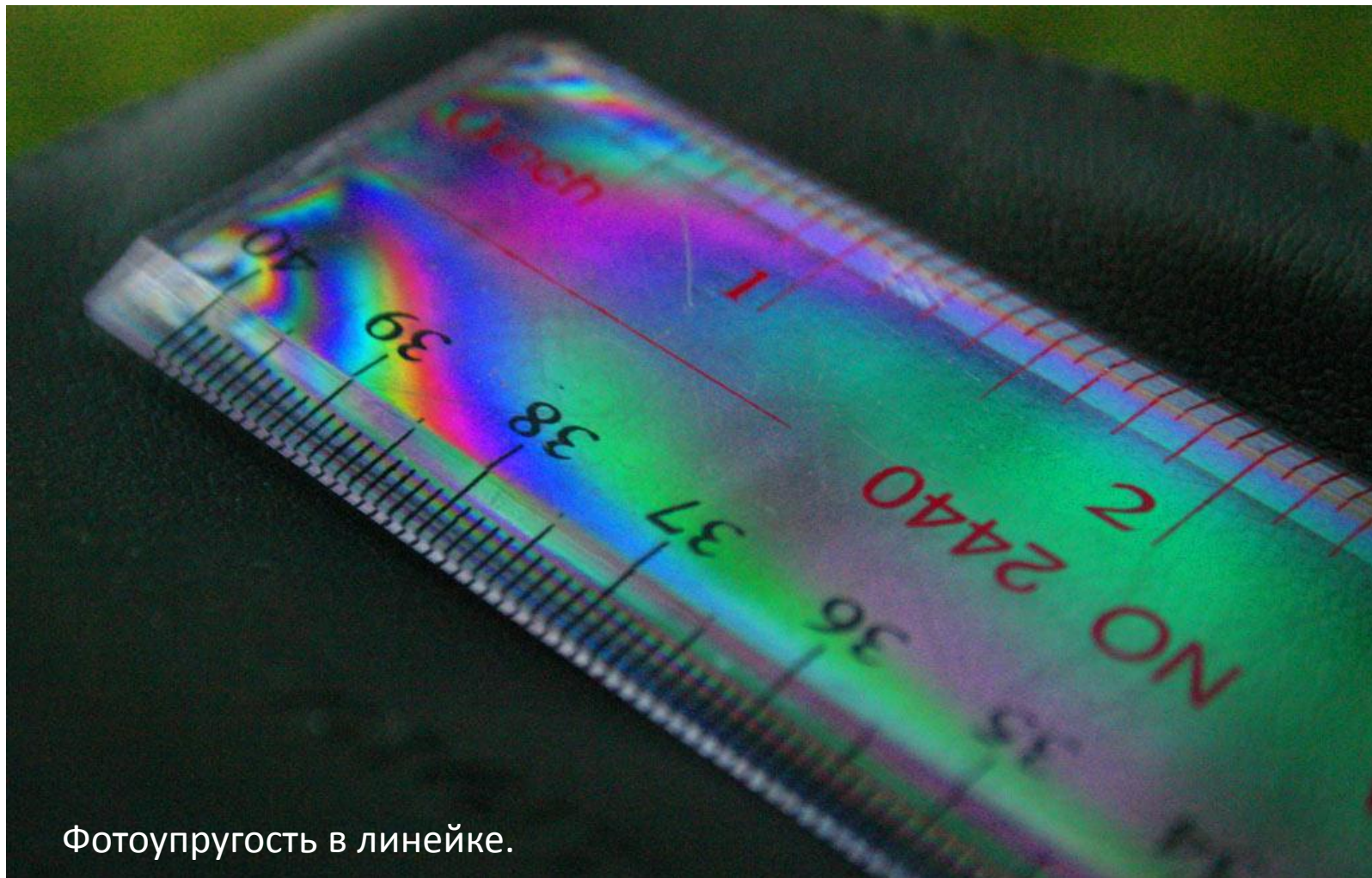


3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

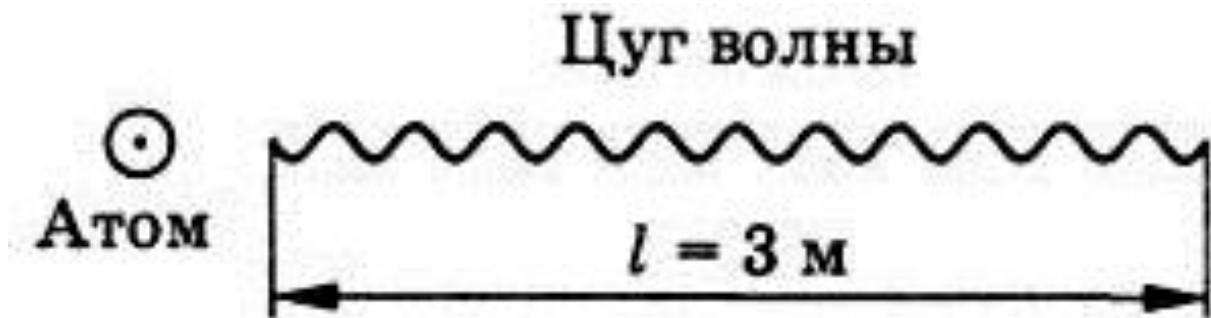


Фотоупругость в линейке.

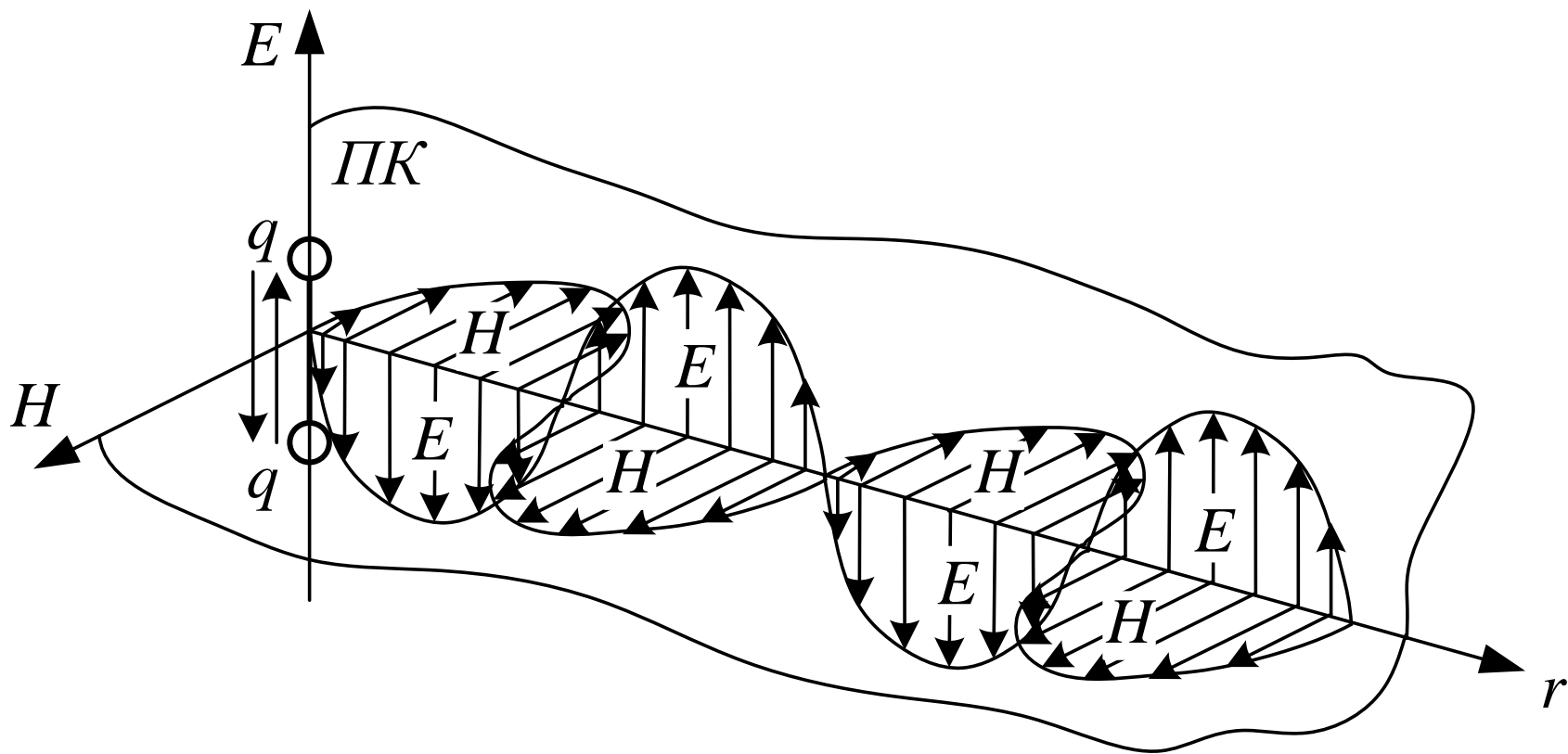
3.1. Естественный, плоско-поляризованный и частично-поляризованный свет.



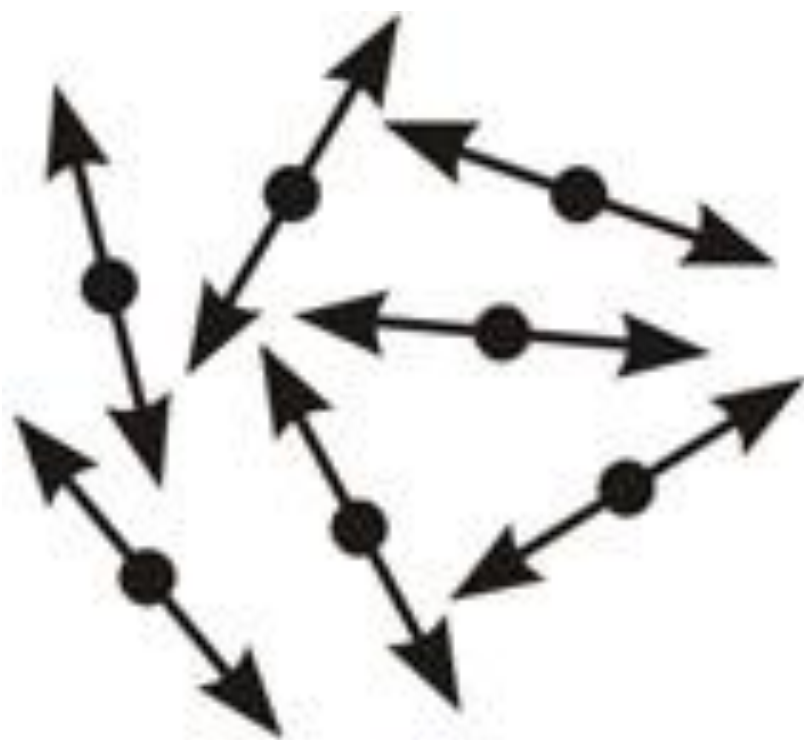
- Свет излучается атомами и молекулами разогретых тел и газов. Атом за время $\tau \sim 10^{-8}$ с переходит из возбуждённого состояния в основное, испуская цуг («обрывок», «звено») ЭМВ.



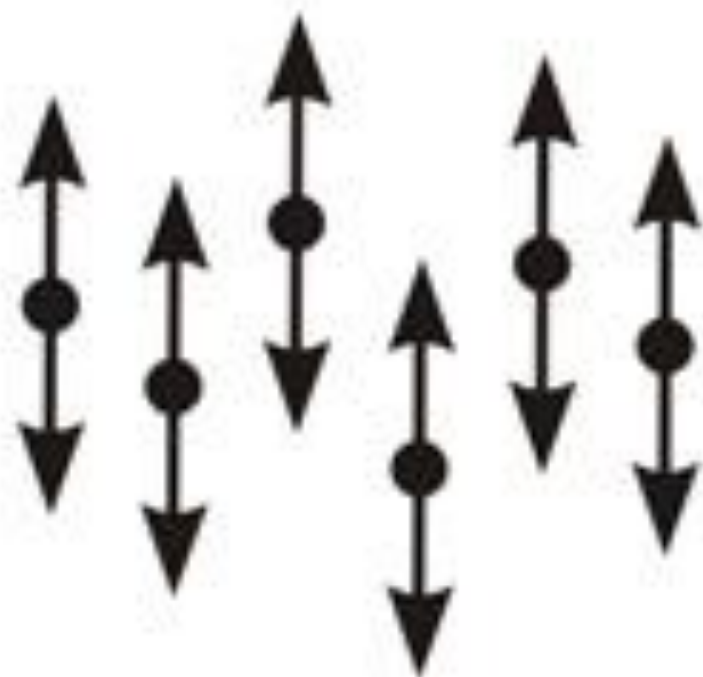
$$l = \tau \cdot c \approx 10^{-8} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 3 \text{ м}$$



- В пределах цуга колебания светового вектора происходят в одной плоскости. Для разных цугов – в разных.
- *Естественный (неполяризованный) свет (ЕС)* – наложение бесконечного числа цугов, поэтому вектор \vec{E} колеблется во всевозможных плоскостях в ЕС.

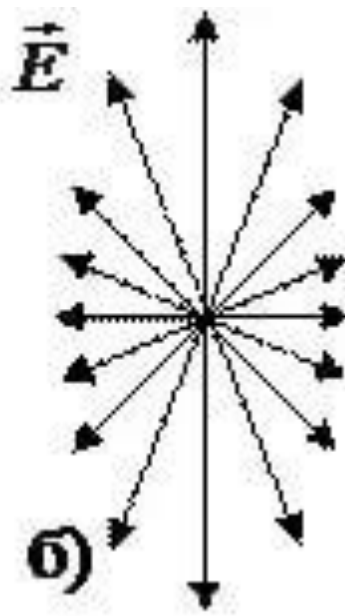
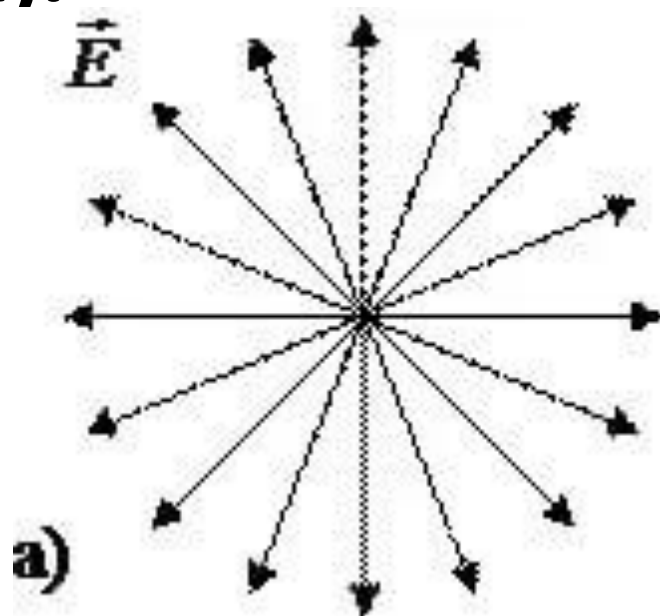


Неполяризованный
свет

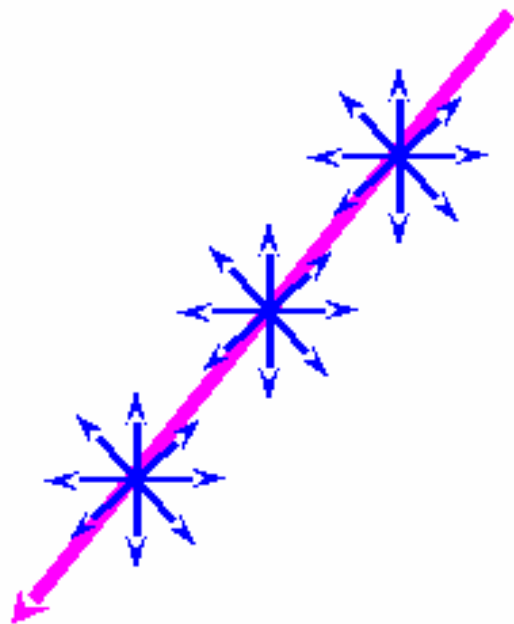


Поляризованный
свет

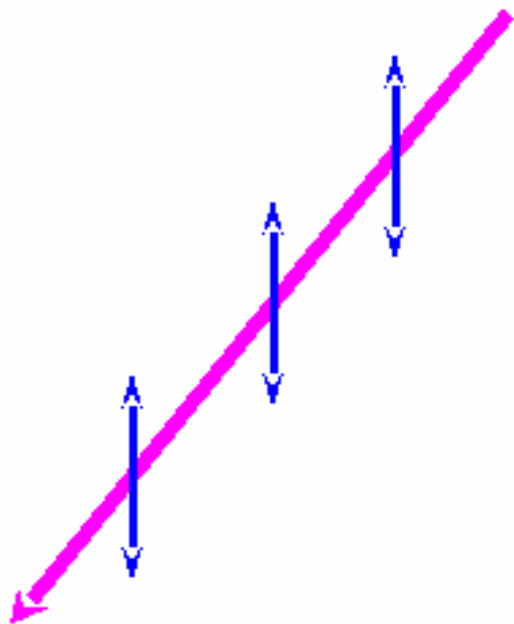
- **Плоско-поляризованный свет (ПС)** – такой, в котором световой вектор колеблется в одной плоскости.
- Это **плоскость поляризации света (ПП)**.



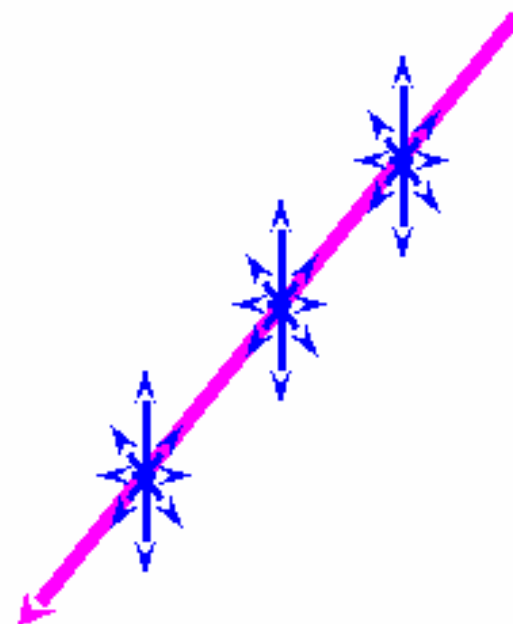
Естественный Частично поляризованный Поляризованный



Естественный

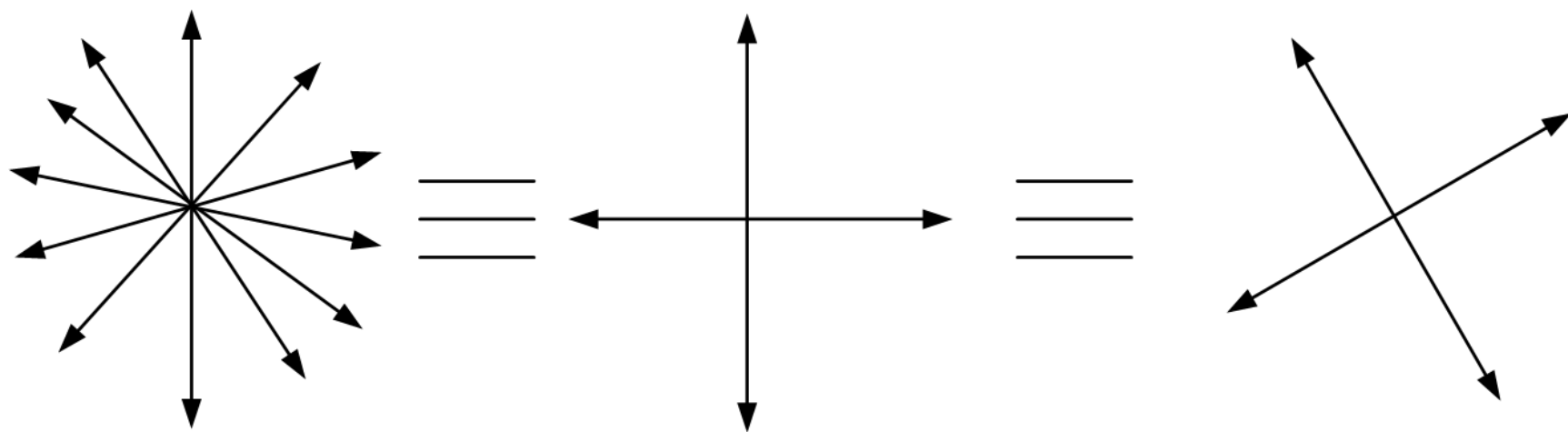


Поляризованный



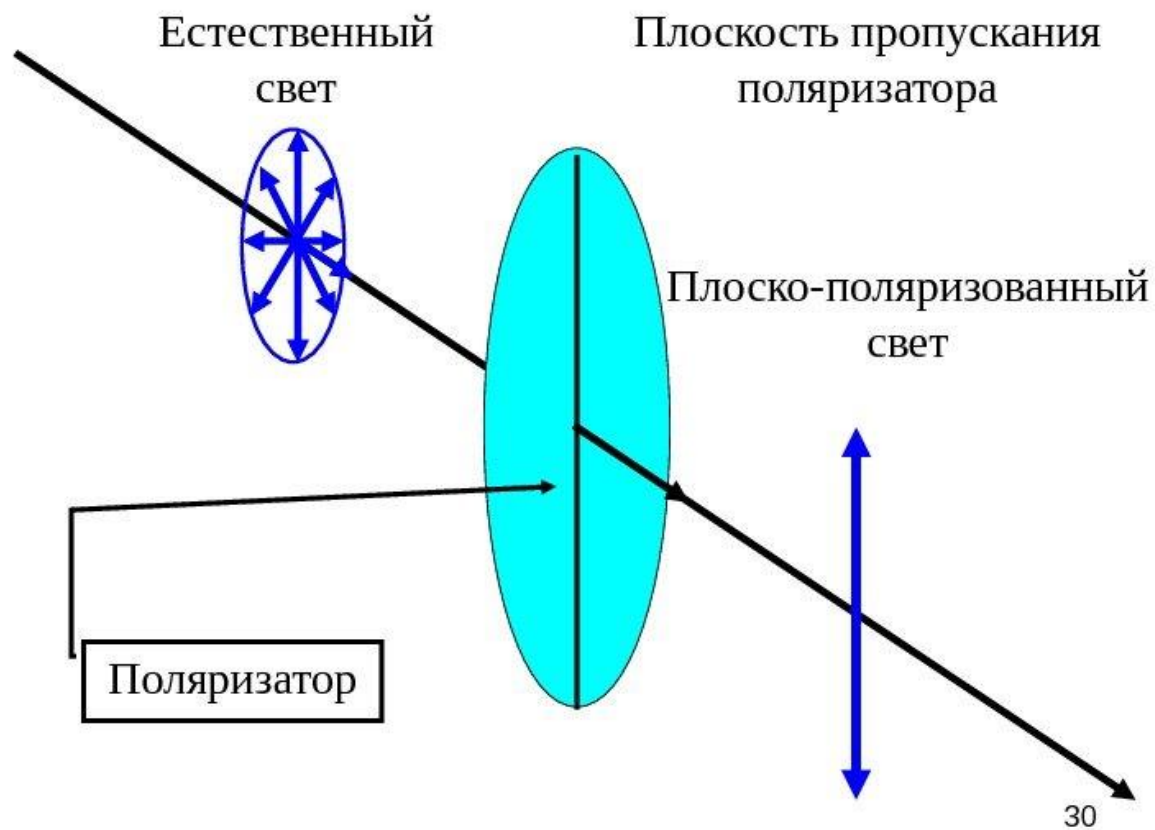
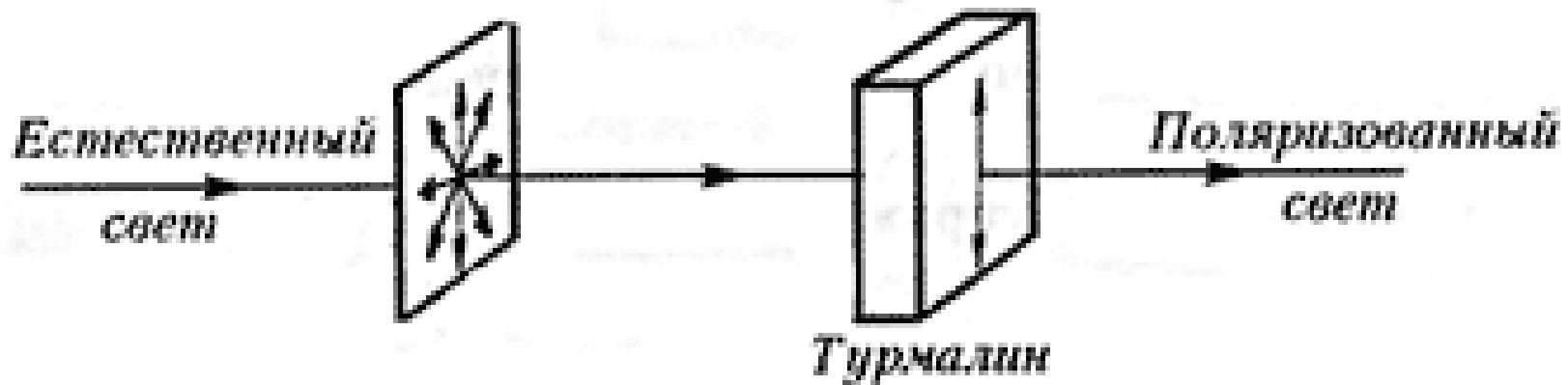
Частично поляризованный

- **Естественный свет можно представить как суперпозицию двух некогерентных ЭМВ, колебания в которых осуществляются во взаимно перпендикулярных направлениях.**
- **Повёрнута эта «крестовина» может быть как угодно, результат сложения не изменится.**



An equation showing the decomposition of a 12-ray star into two 6-ray stars. On the left is a 12-ray star with arrows pointing outwards from a central point, labeled $I_{\text{ect.}}$. This is shown to be equal (indicated by a double equals sign) to the sum of two 6-ray stars. The first 6-ray star has arrows pointing up, down, left, and right, labeled $\frac{1}{2}I_{\text{ect.}}$. The second 6-ray star has arrows pointing towards the corners, labeled $\frac{1}{2}I_{\text{ect.}}$.

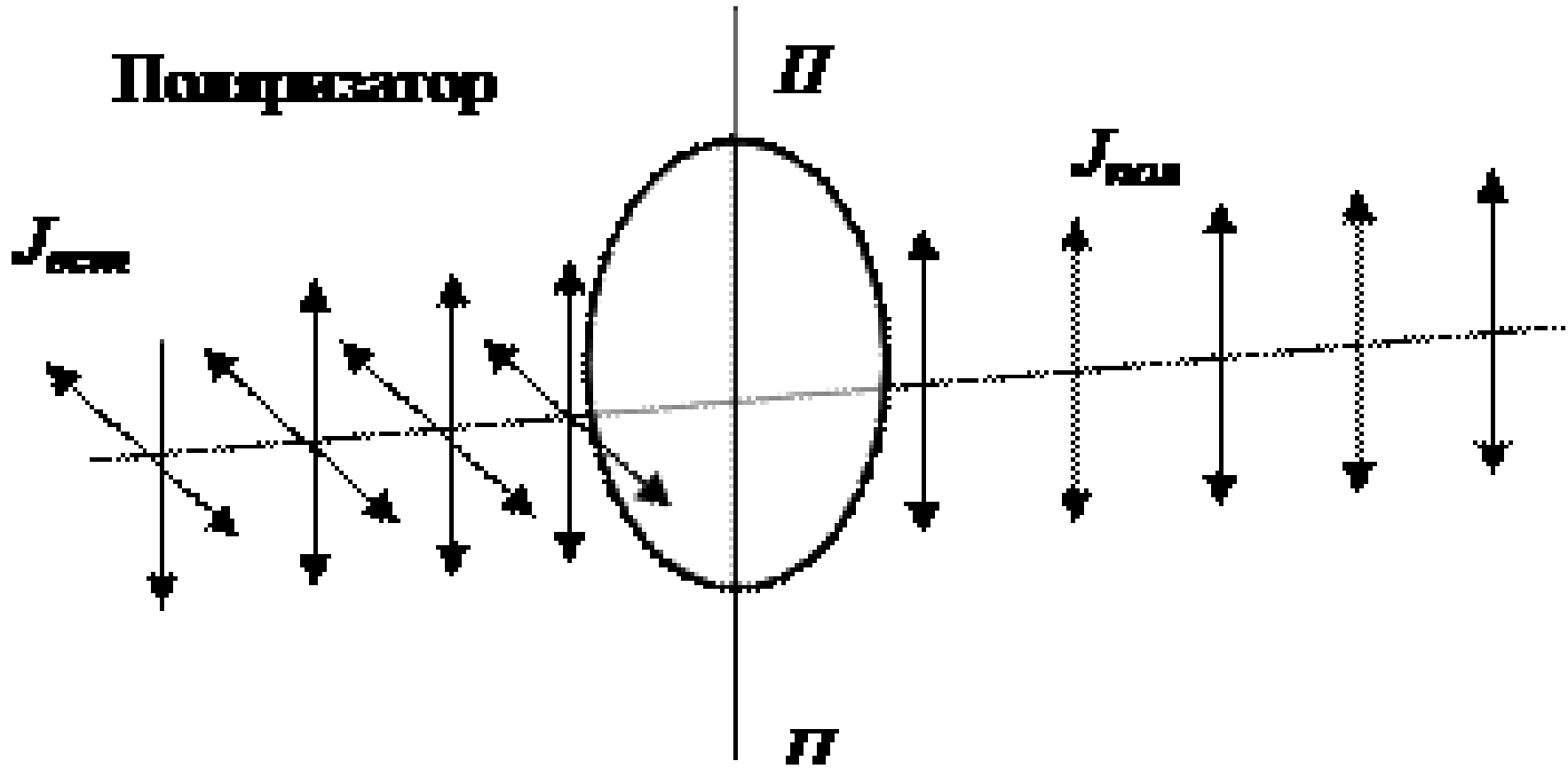
- ***Поляризатор*** – устройство, после прохождения которого ***естественный свет становится поляризованным.***
- ***Плоскость пропускания поляризатора (ППП) (плоскость поляризации)*** – плоскость, в которой колеблется \vec{E} ПС после поляризатора. Колебания в ППП поляризатор пропускает без потерь.

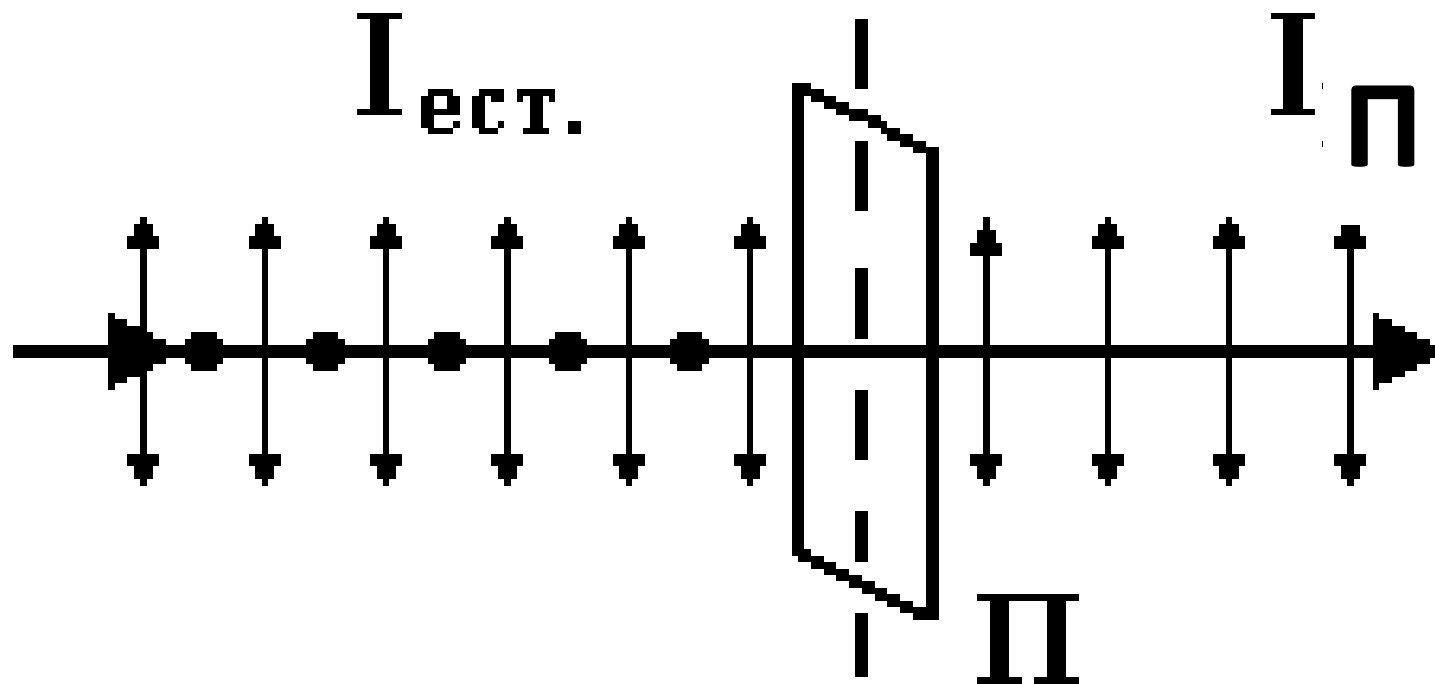


- Поляризатор не пропускает колебания, перпендикулярные своей плоскости пропускания.
- Поэтому *при падении естественного света на поляризатор, интенсивность ПС на выходе будет в 2 раза ниже:*

$$I_{\text{П}} = \frac{1}{2} I_{\text{Е}}$$

Полиграфатор





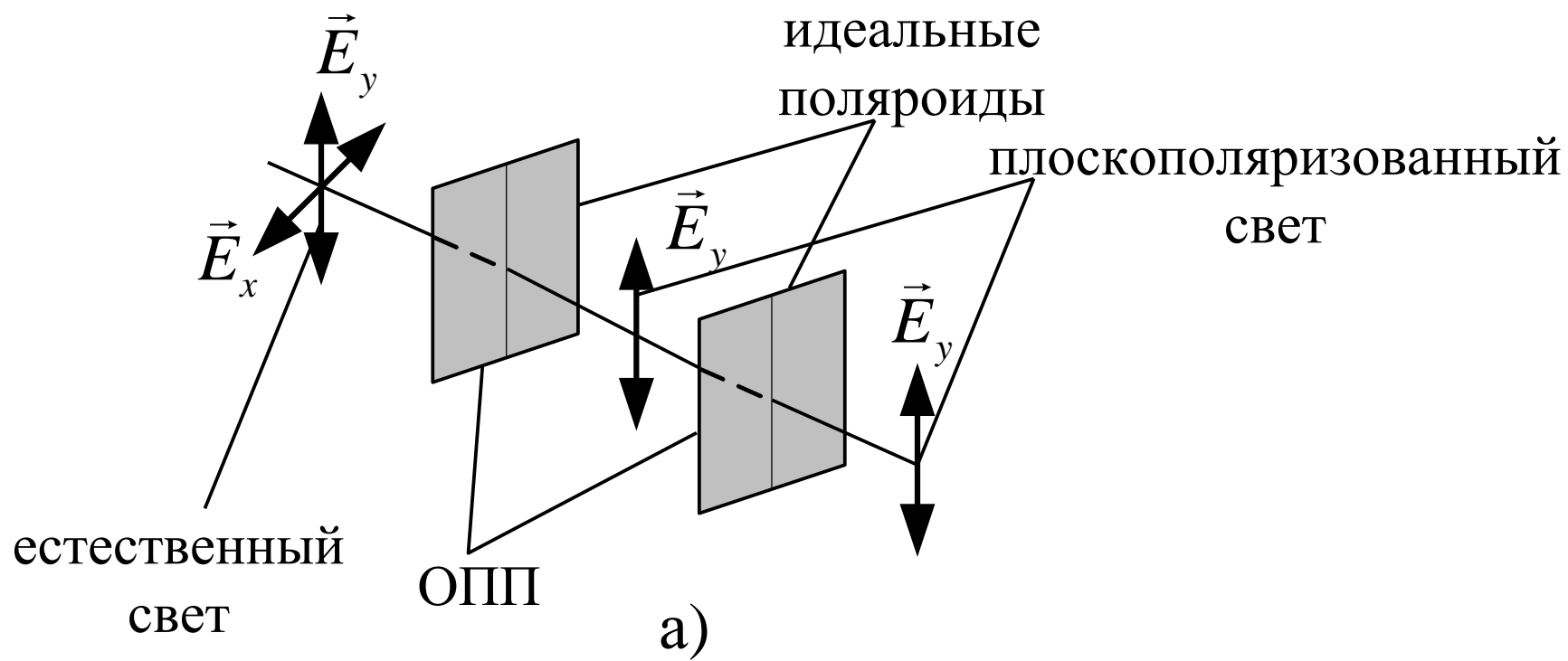
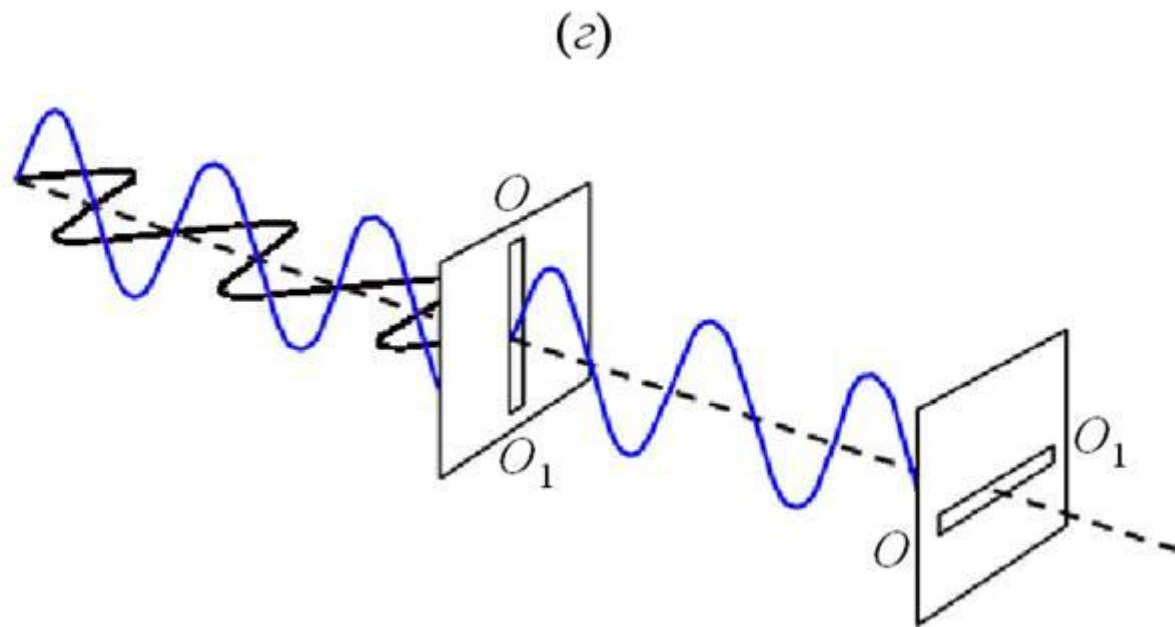
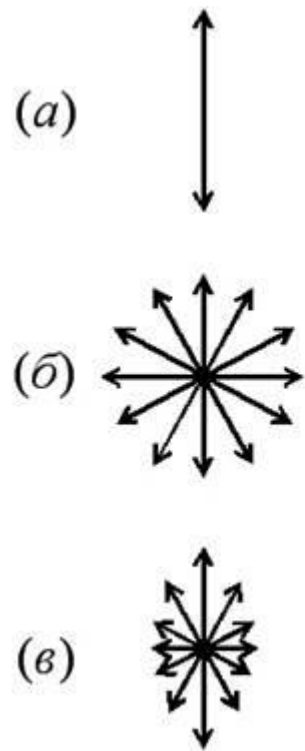


Рис. 4.6

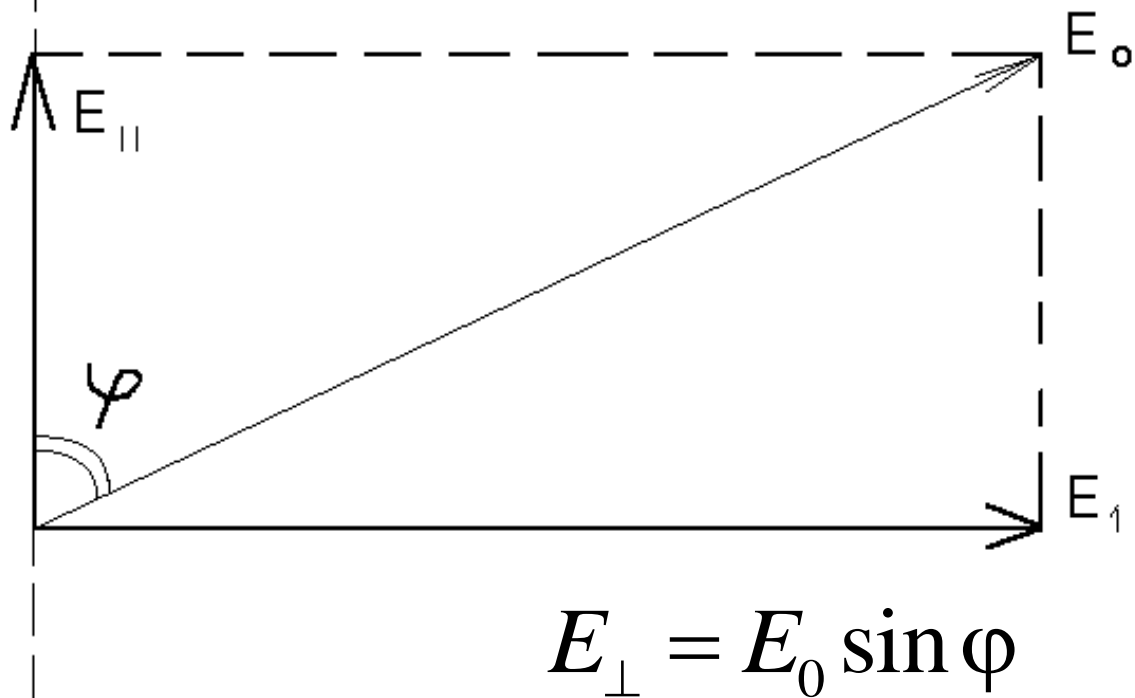


- **При падении поляризованного света на поляризатор интенсивность прошедшего света (тоже поляризованного, но уже в плоскости данного поляризатора) определяется законом Малюса:**

$$I_{\Pi} = I_0 \cos^2 \varphi$$

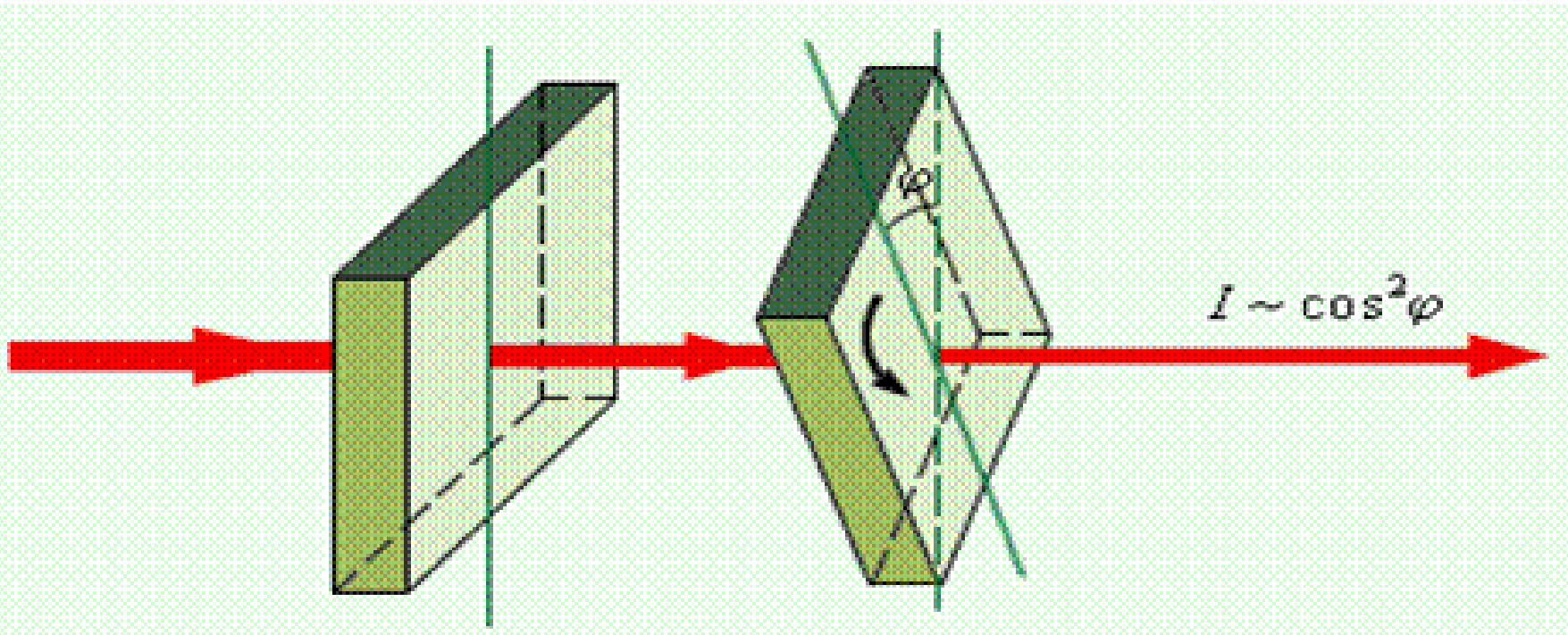
$$E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi$$

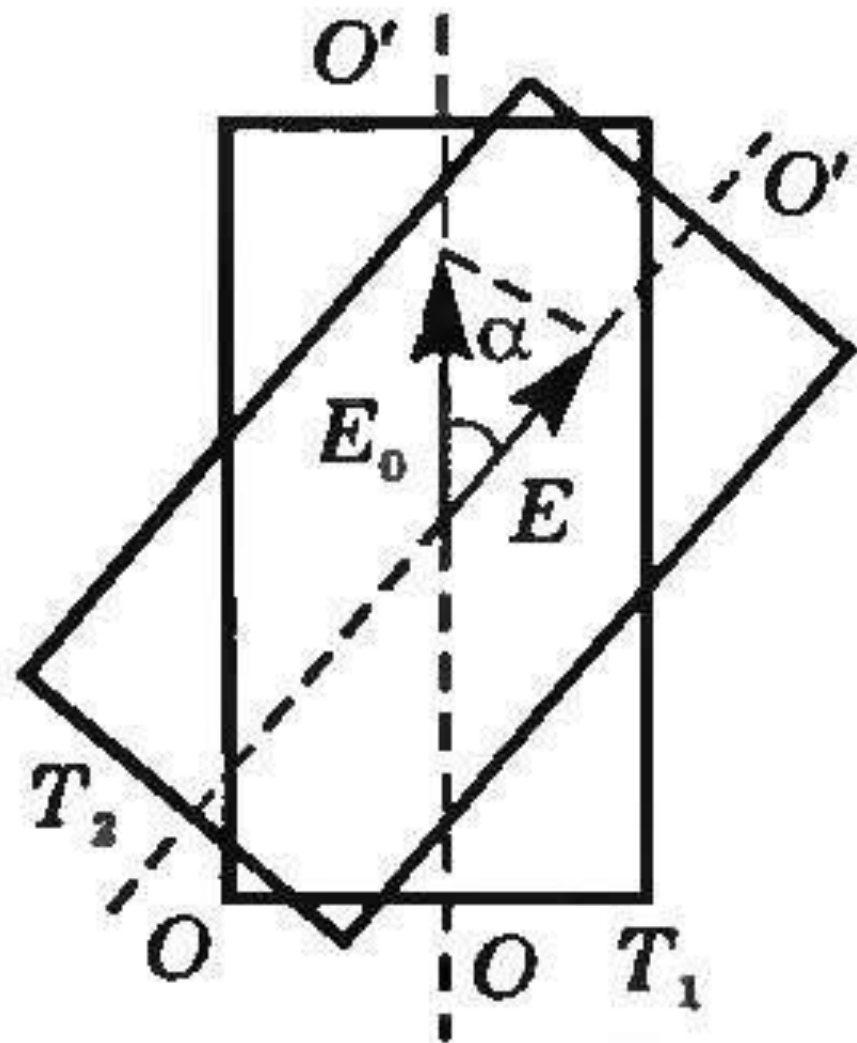
← плоскость поляризатора (ППП)

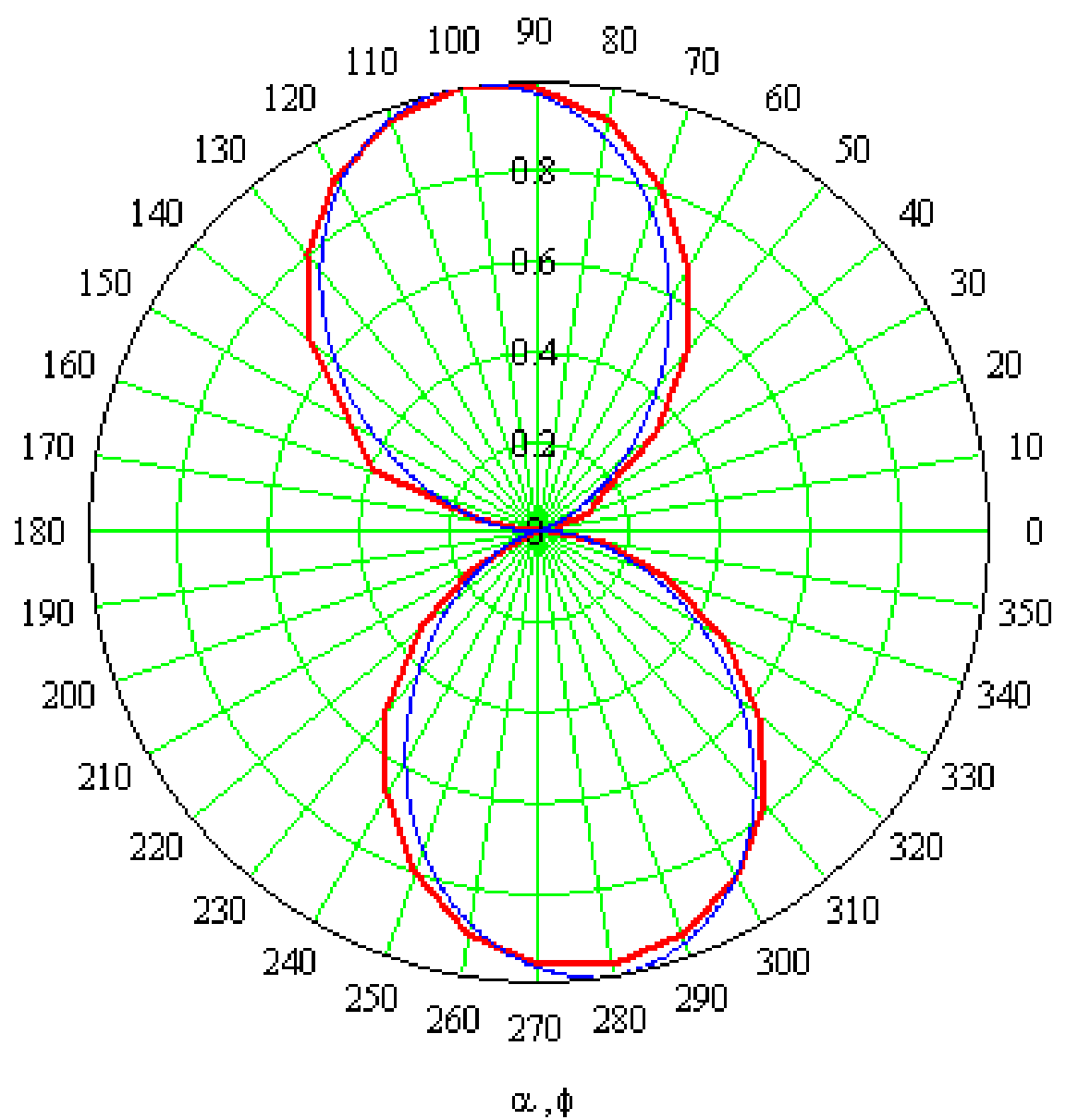


$$E_{\perp} = E_0 \sin \varphi$$

$$I_{\parallel} = kE_{\parallel}^2 = kE_0^2 \cos^2 \varphi = I_0 \cos^2 \varphi$$

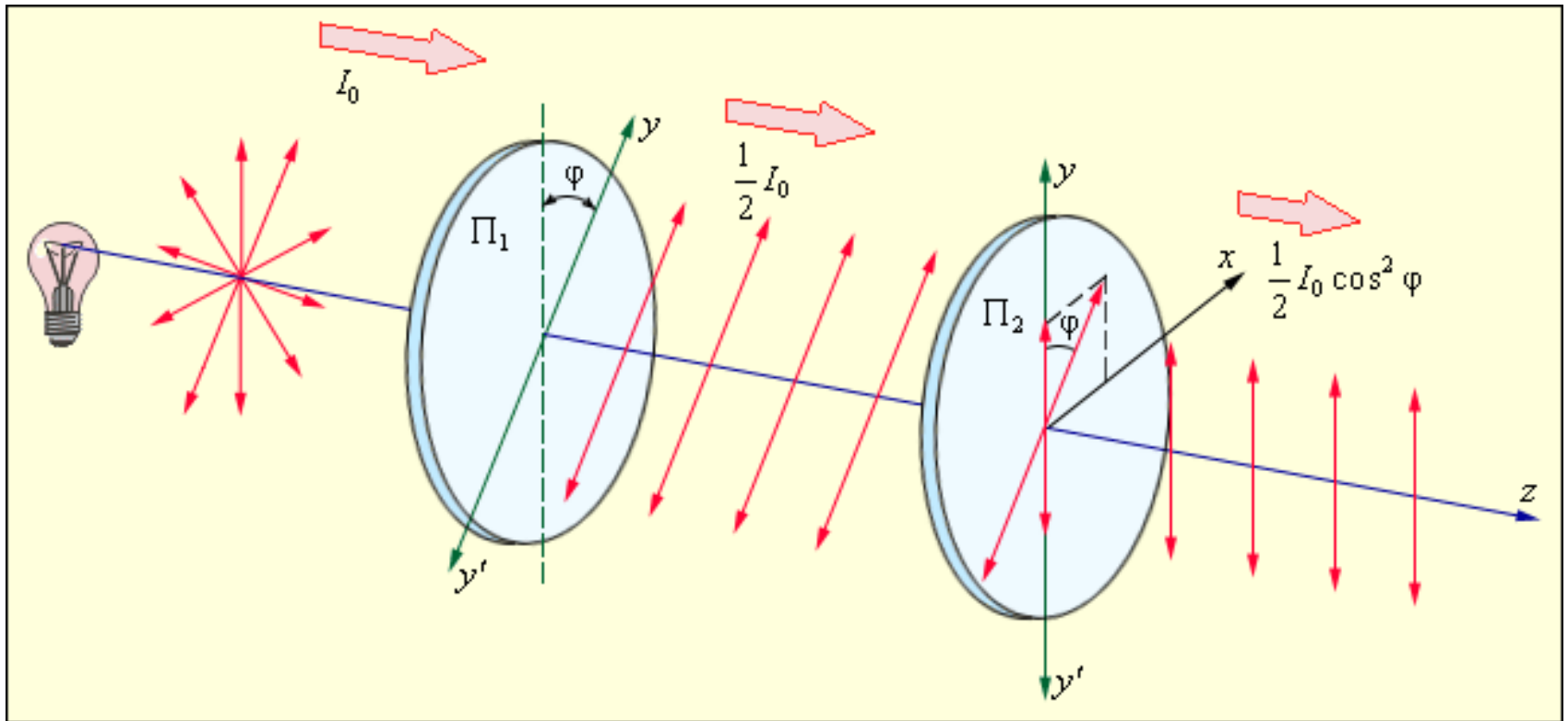






Пример 3.1.

Естественный свет интенсивностью I_0 падает на систему двух идеальных поляризаторов. Плоскость пропускания второго повернута относительно ППП 1-го поляризатора на угол φ . Определить интенсивность света на выходе из этой системы.



На входе в систему интенсивность света:

$$I_0 = I_e$$

После 1-го поляризатора: $I_1 = I_{\Pi} = \frac{I_0}{2}$,

после 2-го поляризатора (анализатора):

$$I_2 = [\text{закон Малюса}] = I_1 \cdot \cos^2 \varphi = \frac{I_0}{2} \cdot \cos^2 \varphi$$

Пример 3.2

- Как изменится решение в предыдущем примере, если каждый из поляроидов дополнительно поглощает и отражает 5% интенсивности света?

Коэффициент потерь света в поляроиде:

$$k = 0,05$$

Коэффициент пропускания света поляроидом:

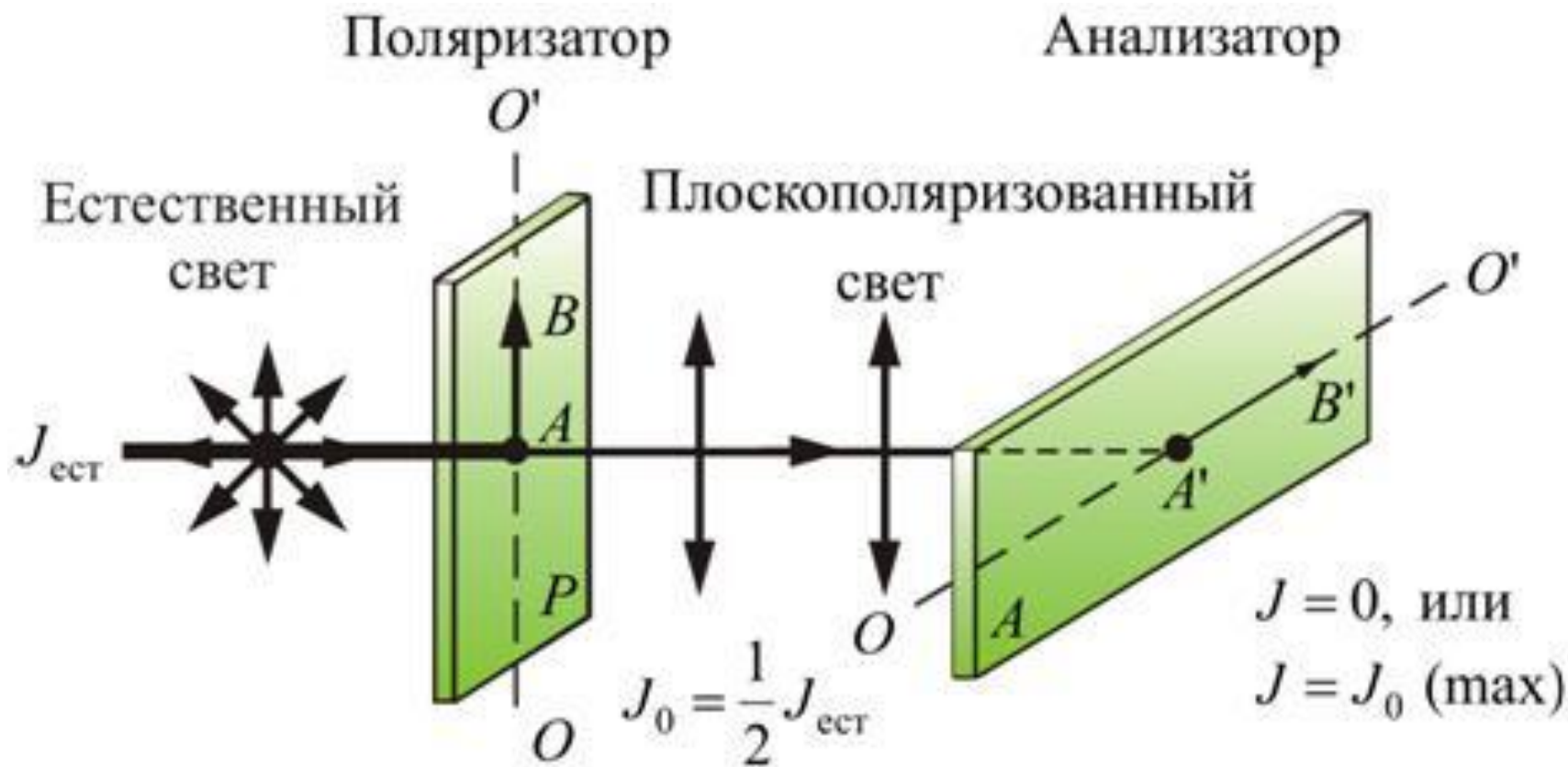
$$1 - k = 0,95 \text{ (т.е. 95\%)} \Rightarrow$$

$$I_1 = \frac{I_0}{2}(1 - k),$$

$$I_2 = I_1(1 - k)\cos^2 \varphi = \frac{I_0}{2}(1 - k)^2 \cos^2 \varphi$$

- **Поляризатор, при помощи которого исследуют свет на поляризованность, называют *анализатором*.**
- **Обычно это второй поляризатор в оптической схеме.**

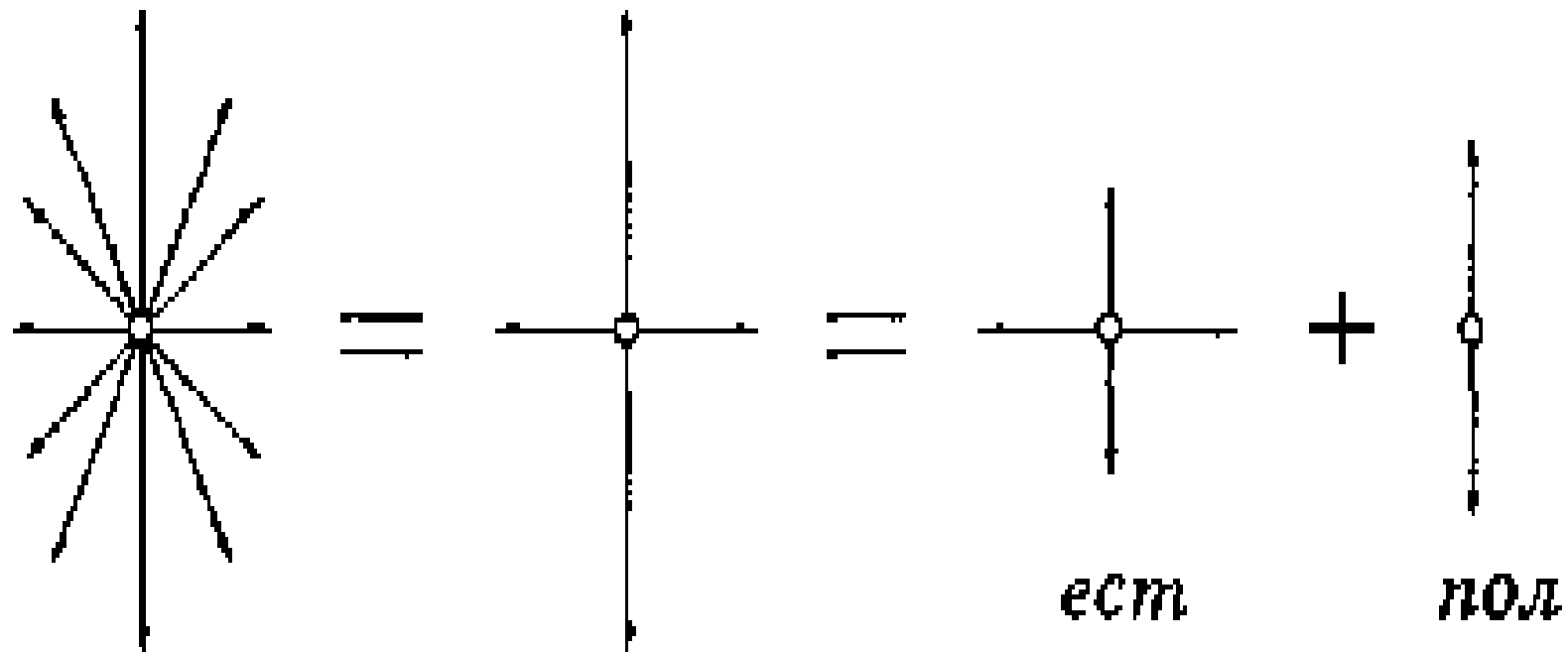
- Система из двух скрещенных поляризаторов ($\varphi = \pi/2$) свет не пропускает.

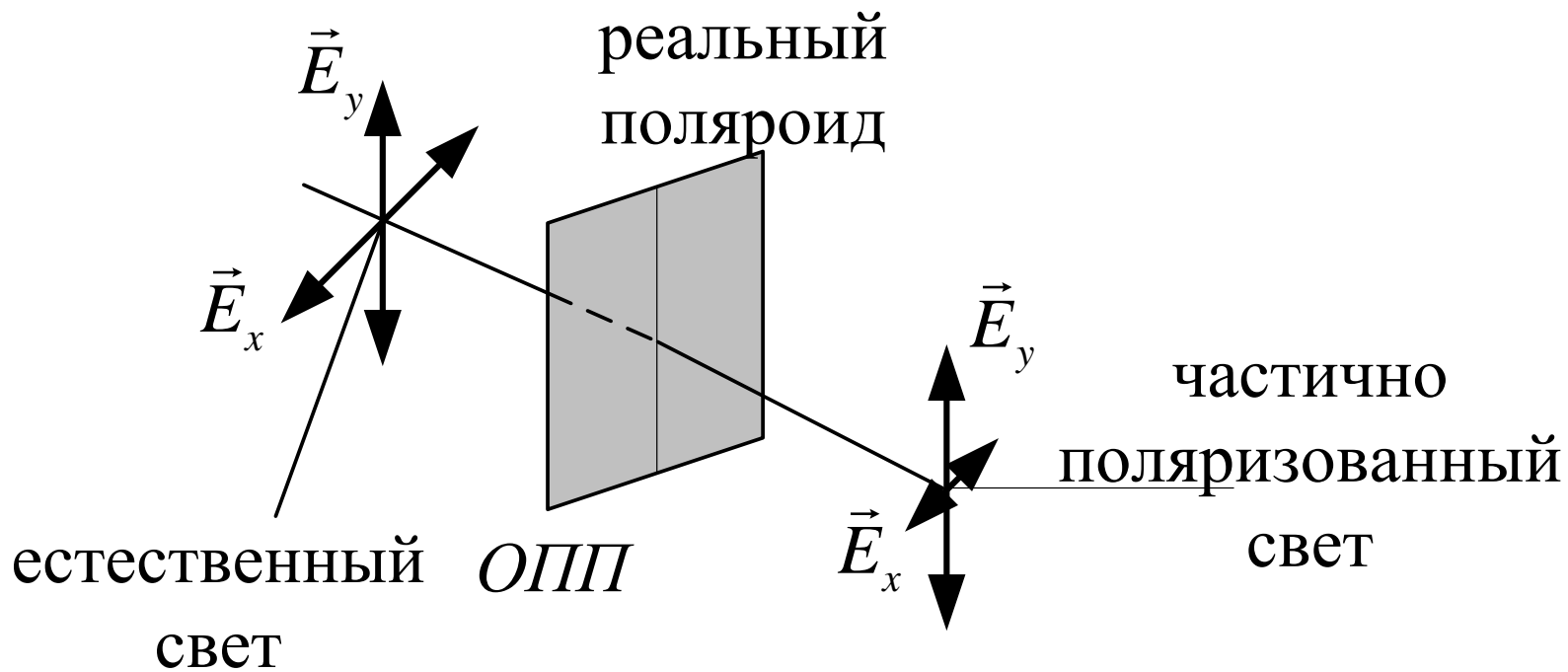




- ***Частично-поляризованный свет (ЧПС)***
– смесь естественного и плоско-поляризованного света.
- **Его интенсивность:**

$$I_{\text{ЧПС}} = I_e + I_{\text{П}}$$





б)

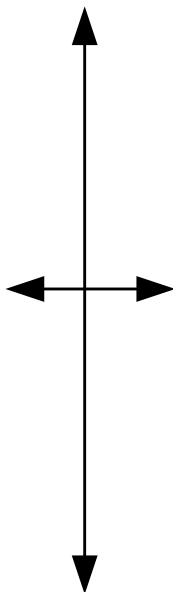
Рис. 4.6

- При пропускании ЧПС сквозь анализатор, интенсивность поляризованного света на выходе будет изменяться в зависимости от угла поворота между плоскостью поляризации поляризованной компоненты ЧПС и плоскостью пропускания анализатора.

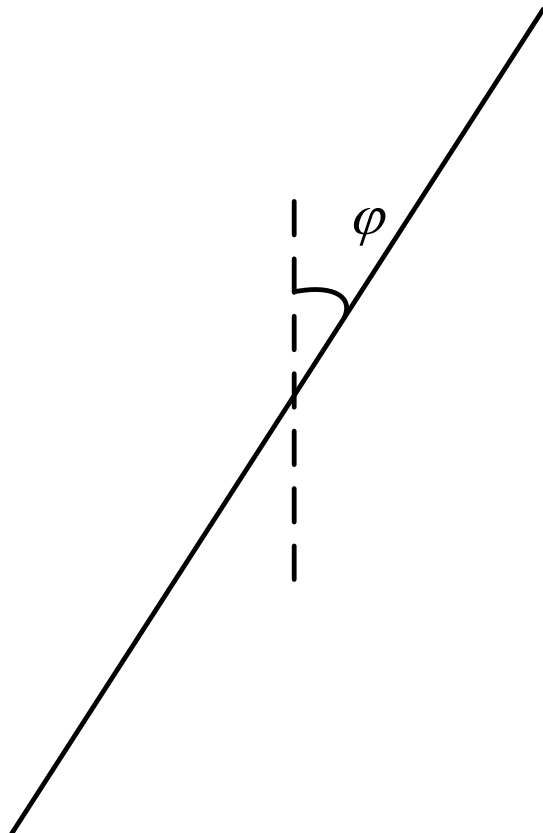
$$I = \frac{1}{2} I_e + I_{\text{П}} \cdot \cos^2 \varphi$$

(от ЕС сквозь поляризатор всегда проходит половина интенсивности, от поляризованного – по закону Малюса)

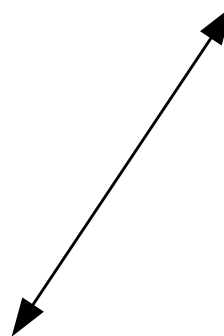
ЧПС

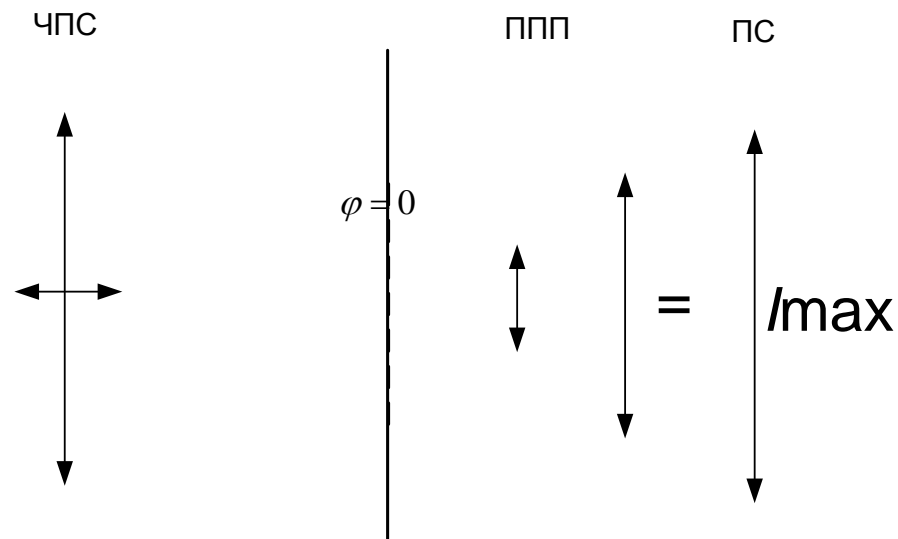


ППП



ПС





В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ПОВОРОТА ИНТЕНСИВНОСТЬ
ПРОШЕДШЕГО СВЕТА:

$$I = \frac{1}{2} I_e + I_{\Pi} \cdot \cos^2 \varphi = \begin{cases} \frac{1}{2} I_e + I_{\Pi} = I_{\max}, & \text{при } \varphi = 0 \\ \frac{1}{2} I_e = I_{\min}, & \text{при } \varphi = \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

- **Степень поляризации частично-поляризованного света:**

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

$$P = \frac{\frac{1}{2}I_e + I_{\Pi} - \frac{1}{2}I_e}{\frac{1}{2}I_e + I_{\Pi} + \frac{1}{2}I_e} = \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{ЧПС}}}$$

- Для плоско-поляризованного света $P_{\Pi}=1$ (т.к. $I_{\max}=I_{\Pi}$, $I_{\min}=0$) .
- Для естественного $P_e=0$ (т.к. $I_{\max}=I_{\min}=1/2I_e$)

Пример 3.3

- **Определить степень поляризации частично-поляризованного света, если интенсивность его естественной компоненты в три раза ниже интенсивности поляризованной компоненты.**

$$I_e = \frac{1}{3} I_{\Pi} \text{ (по условию)} \Rightarrow$$

$$I_{\min} = \frac{1}{2} I_e = \frac{1}{6} I_{\Pi} \text{ (по определению)}$$

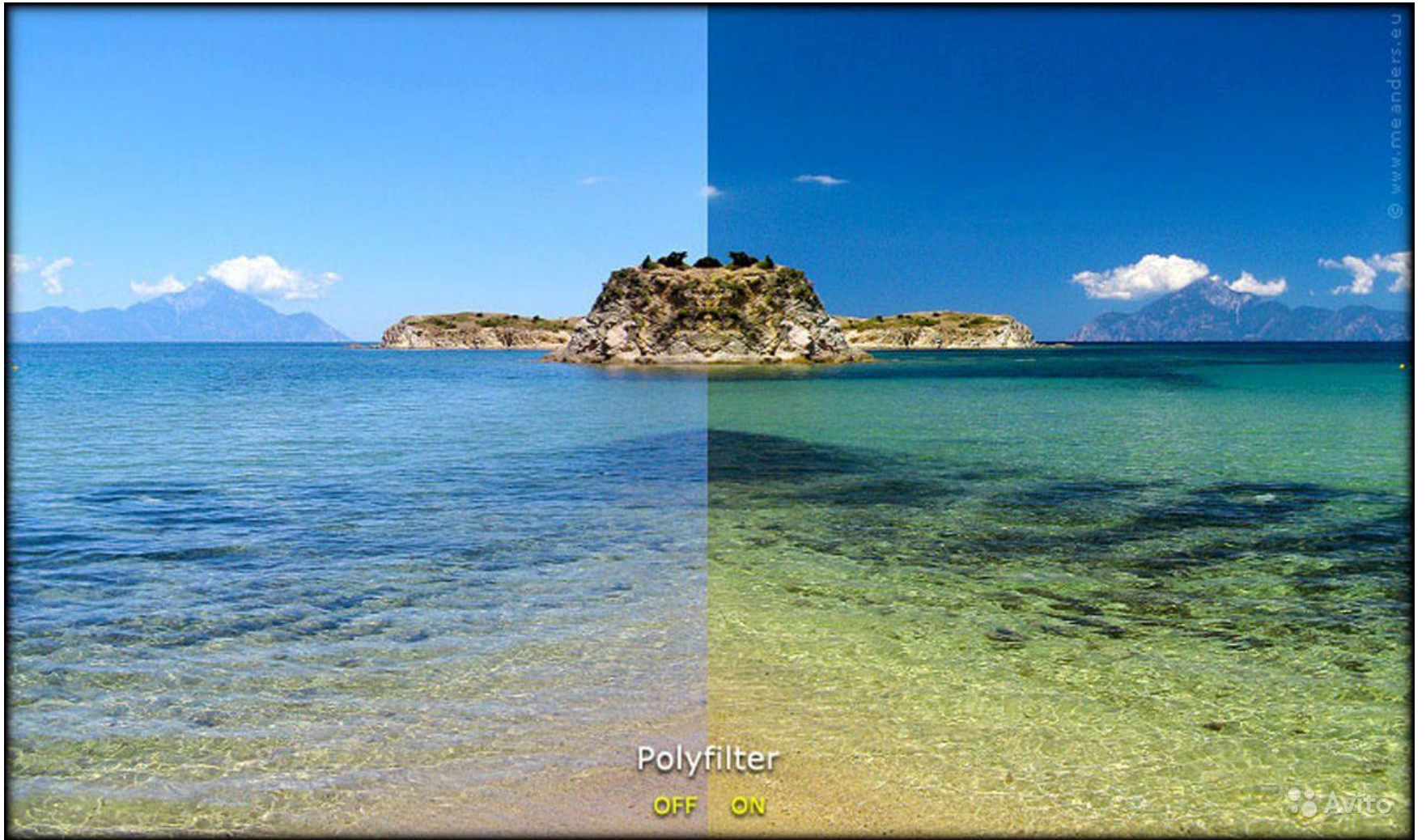
$$I_{\max} = \frac{1}{2} I_e + I_{\Pi} = \frac{1}{6} I_{\Pi} + I_{\Pi} = \frac{7}{6} I_{\Pi} \Rightarrow$$

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\frac{7}{6} I_{\Pi} - \frac{1}{6} I_{\Pi}}{\frac{7}{6} I_{\Pi} + \frac{1}{6} I_{\Pi}} = \frac{6}{8} = 0,75$$

3.2 Получение поляризованного света.

- 1. Отражённый от диэлектриков (стёкло, пластик, поверхность воды, снег, облака) свет становится частично-поляризованным.
- Это явление *Брюстера*.





Polyfilter

OFF ON





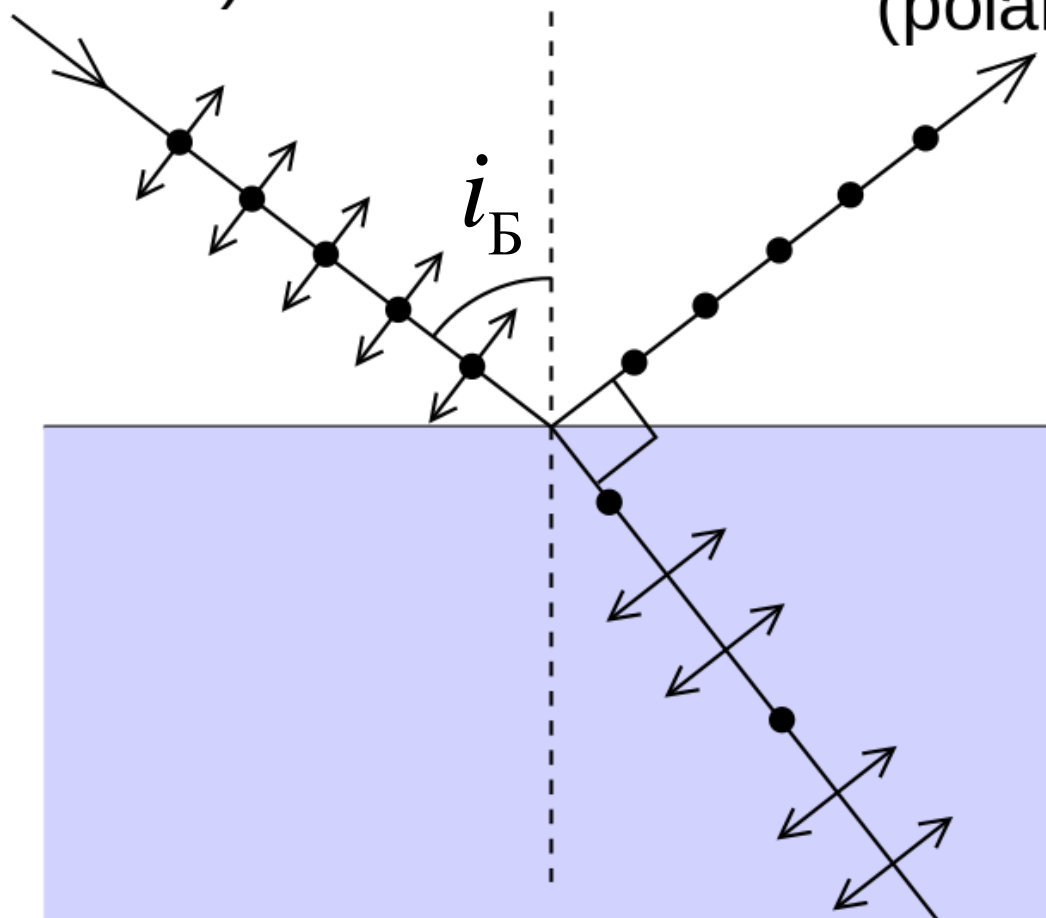
- Существует такой угол падения, при котором *отражённый свет будет полностью поляризован*.
- Это *угол Брюстера*, определяется законом Брюстера:

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

$$i_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Incident ray
(unpolarised)

Reflected ray
(polarised)



Refracted ray
(slightly polarised)

- **Плоскость поляризации отражённого луча перпендикулярна плоскости падения и отражения света.**
- **Если падение происходит под углом Брюстера, то угол между отражённым и преломлённым лучом составляет 90 градусов.**

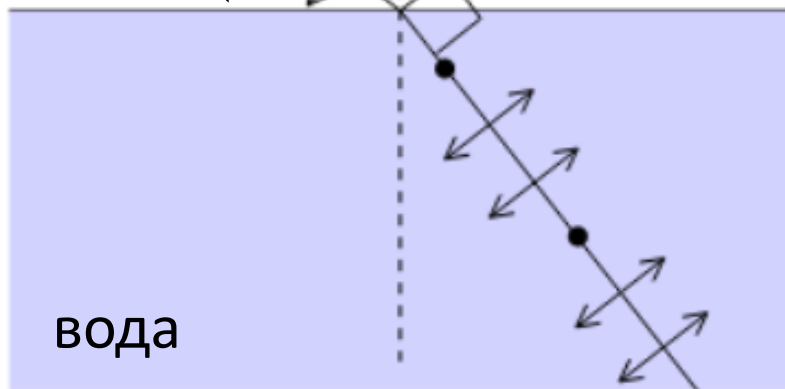
Пример 3.4

- **Определить высоту Солнца над горизонтом, если отражённый от поверхности озера свет является полностью поляризованным.**

Падающий луч
(поляризации нет)

Отраженный луч
(максимально поляризован)

ВОЗДУХ



вода

Угол между отраженным и преломленным лучами – прямой
(следствие из закона Брюстера)

Преломленный луч
(частично поляризован)

Отражённый свет ПП \Rightarrow

падение происходит под углом Брюстера

$$\operatorname{tgi}_B = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

здесь n_1 – пок. прел. воздуха, n_2 – воды

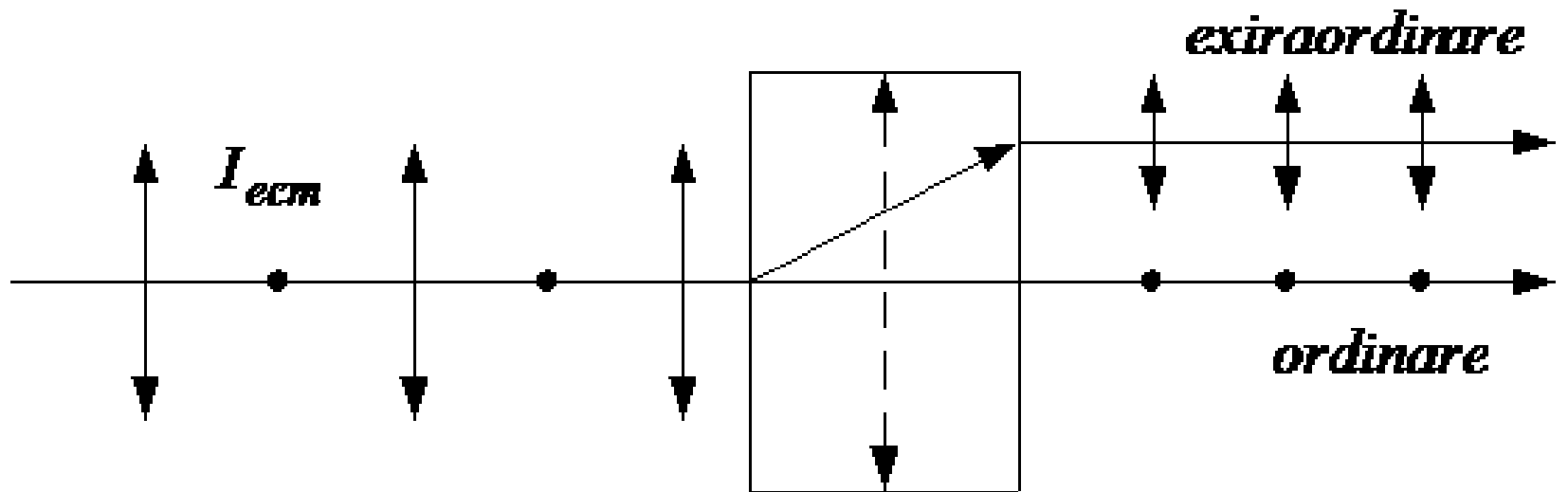
$$i_B = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{1,33}{1} \right\} = 53,1^\circ \Rightarrow$$

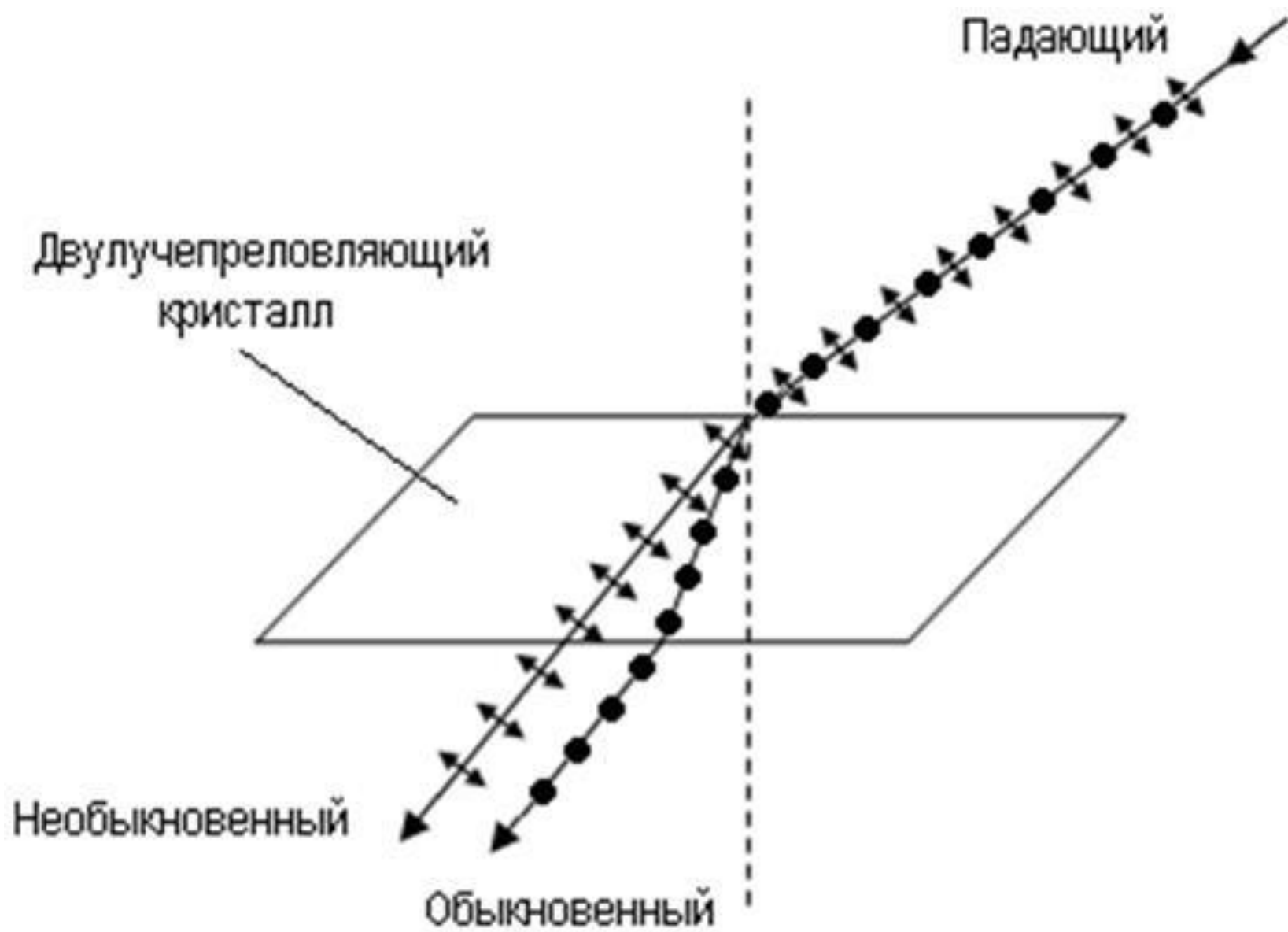
$$\theta = 90 - 53,1 = 36,9^\circ$$

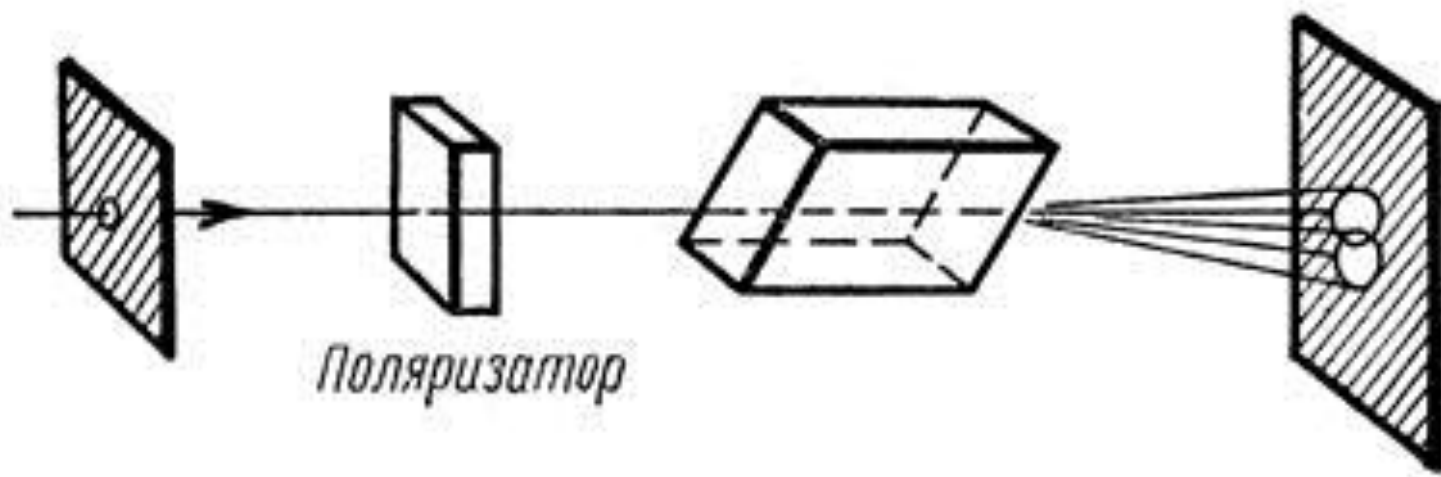
- **Стопа Столетова** – стопка стеклянных пластинок, установленных под углом Брюстера к падающему лучу.
- Зеркала в резонаторе гелий-неонового лазера установлены под углом Брюстера, поэтому лазерный свет – плоско-поляризованный.

2. Двойное лучепреломление.

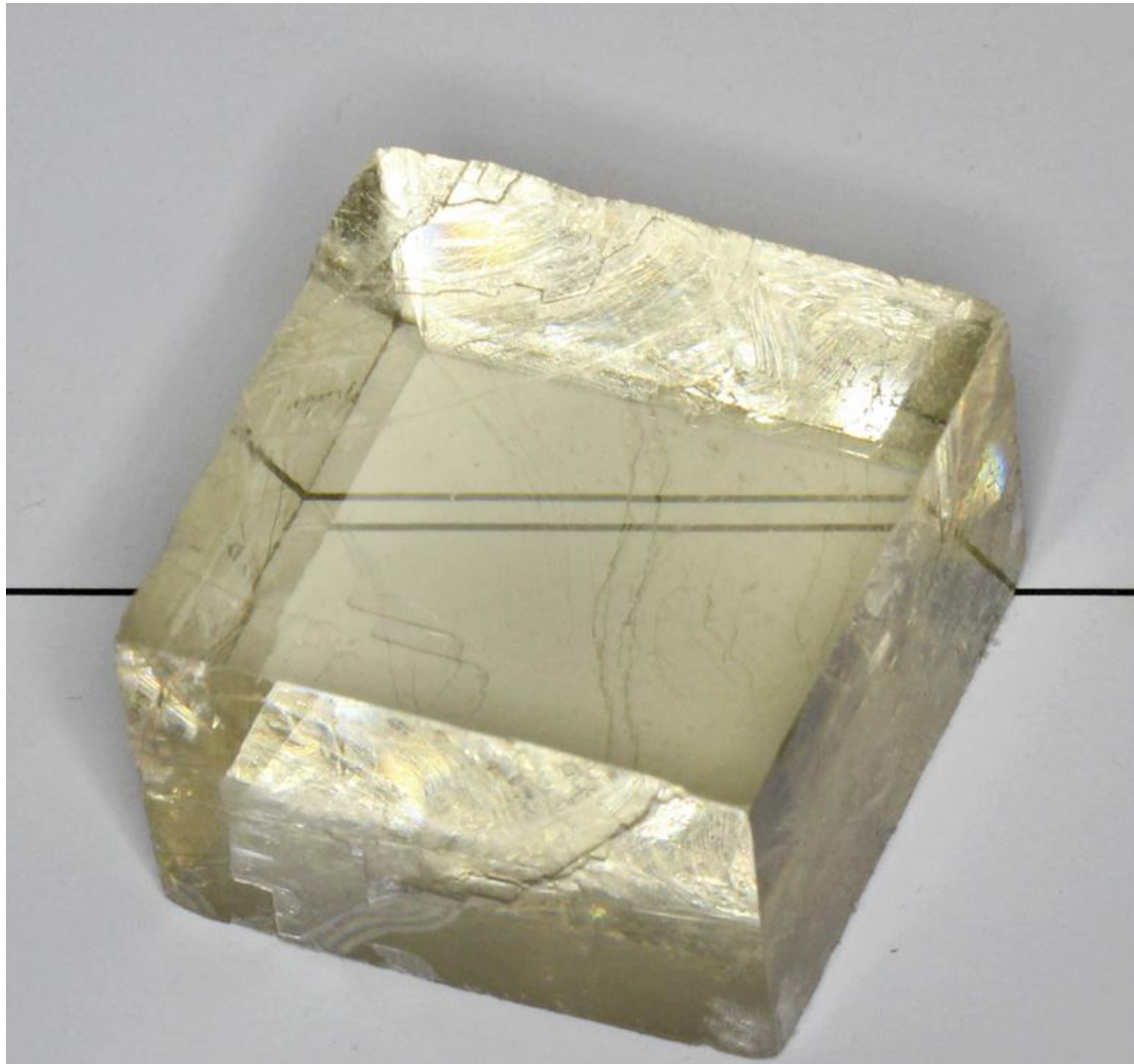
- В некоторых кристаллах (шпат, кварц, турмалин и др.) ест. луч света разделяется внутри на два луча, *ПП во взаимно-перпендикулярных направлениях – это явление ДЛП.*
- Эти лучи распространяются с различными скоростями и в различных направлениях.





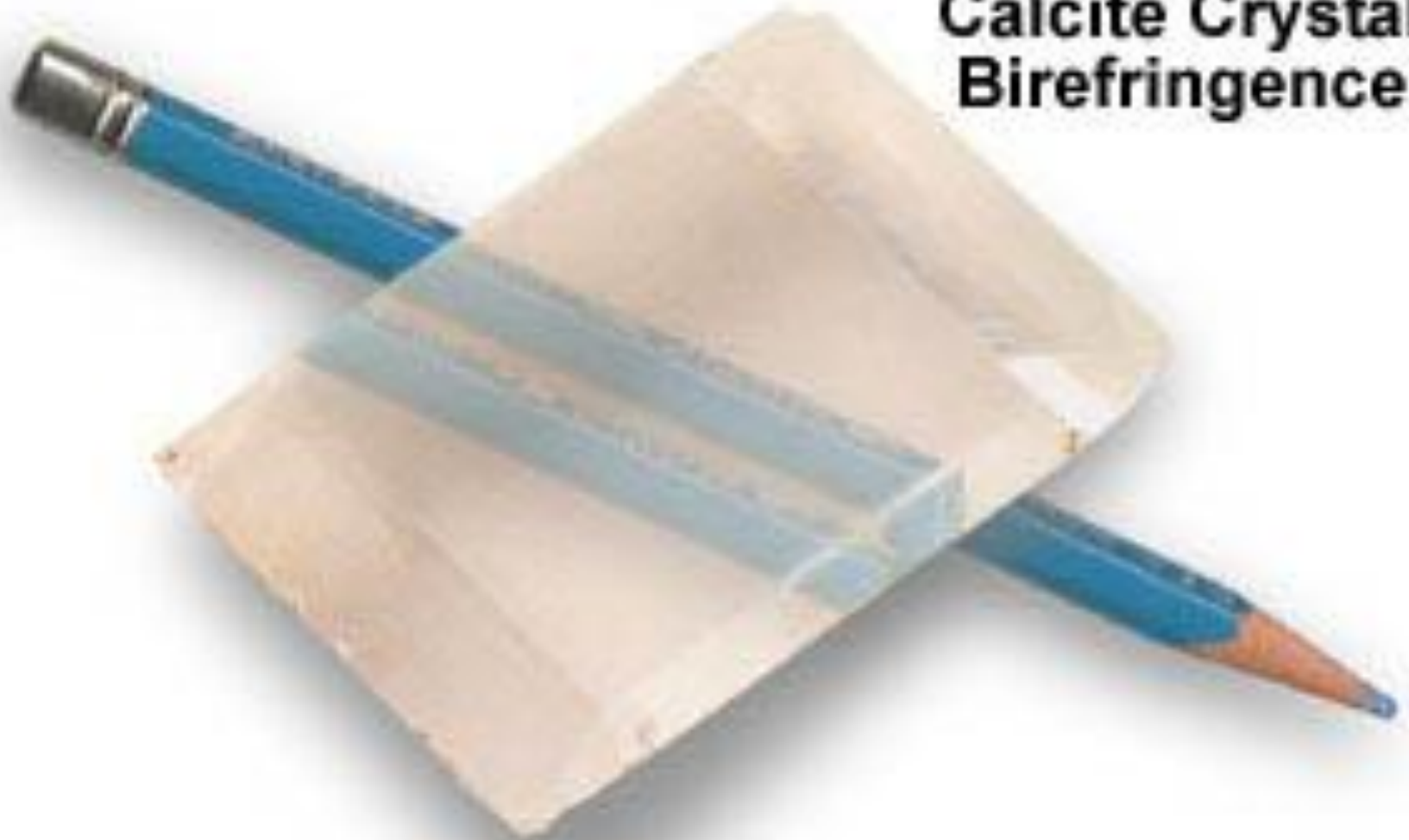






- ДЛП в кристалле исландского шпата (в котором и было открыто Р. Бартолин в 1699).

Calcite Crystal Birefringence



- **Двойное лучепреломление возможно только в *анизотропных* средах – физические свойства которых различны в разных направлениях.**



Ось: X



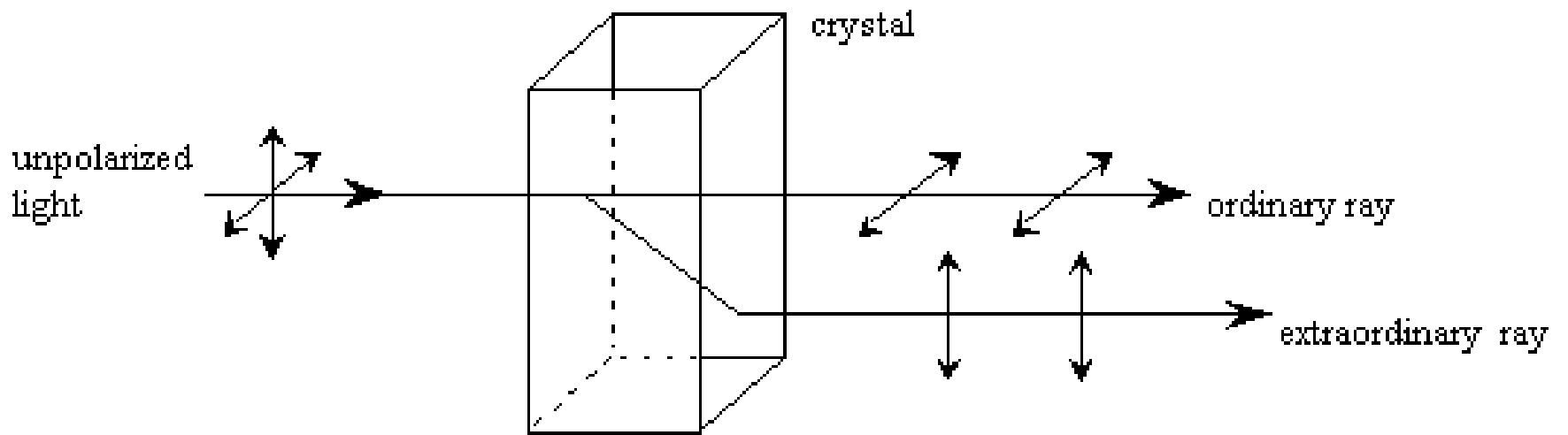
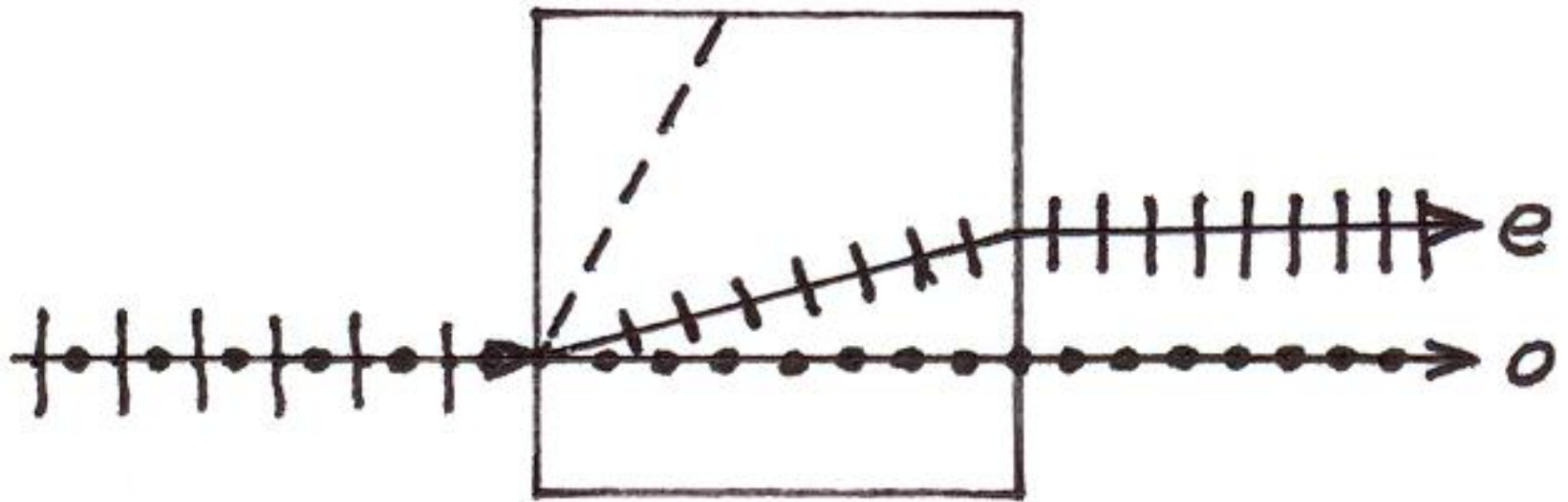
Ось: Y



Ось: Z

- **Направление в кристалле, в котором ДЛП не происходит, называется *оптической осью кристалла*.**
- ***Главное сечение кристалла* – плоскость, проведённая через оптическую ось и луч света.**

- Обыкновенный луч (o – ordinary) – колебания светового вектора в котором происходят перпендикулярно главному сечению.
- Необыкновенный луч (e – extraordinary) – колебания параллельны главному сечению.



- Обыкновенный луч распространяется по всем направлениям кристалла с одинаковой скоростью

$$v_0 = \frac{c}{n_0}$$

- Необыкновенные лучи распространяются по различным направлениям с разными скоростями

$$v_e = \frac{c}{n_e}$$

Положительными называют кристаллы, у которых $n_e > n_o$

отрицательными – кристаллы, у которых $n_e < n_o$

Для кварца $n_e - n_o \approx 0,001$

для исландского шпата $n_e - n_o \approx -0,2$

Пример 3.4

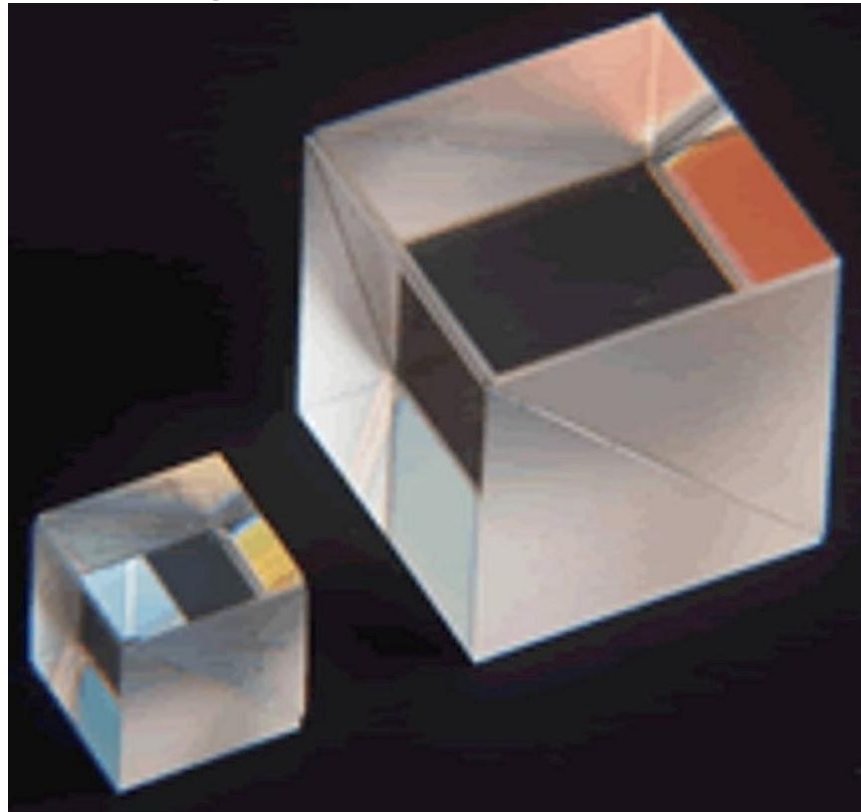
Определить оптическую разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей с длиной волны λ , прошедших расстояние d в кристалле вдоль главной оси.

Какова при этом будет разность фаз этих волн?

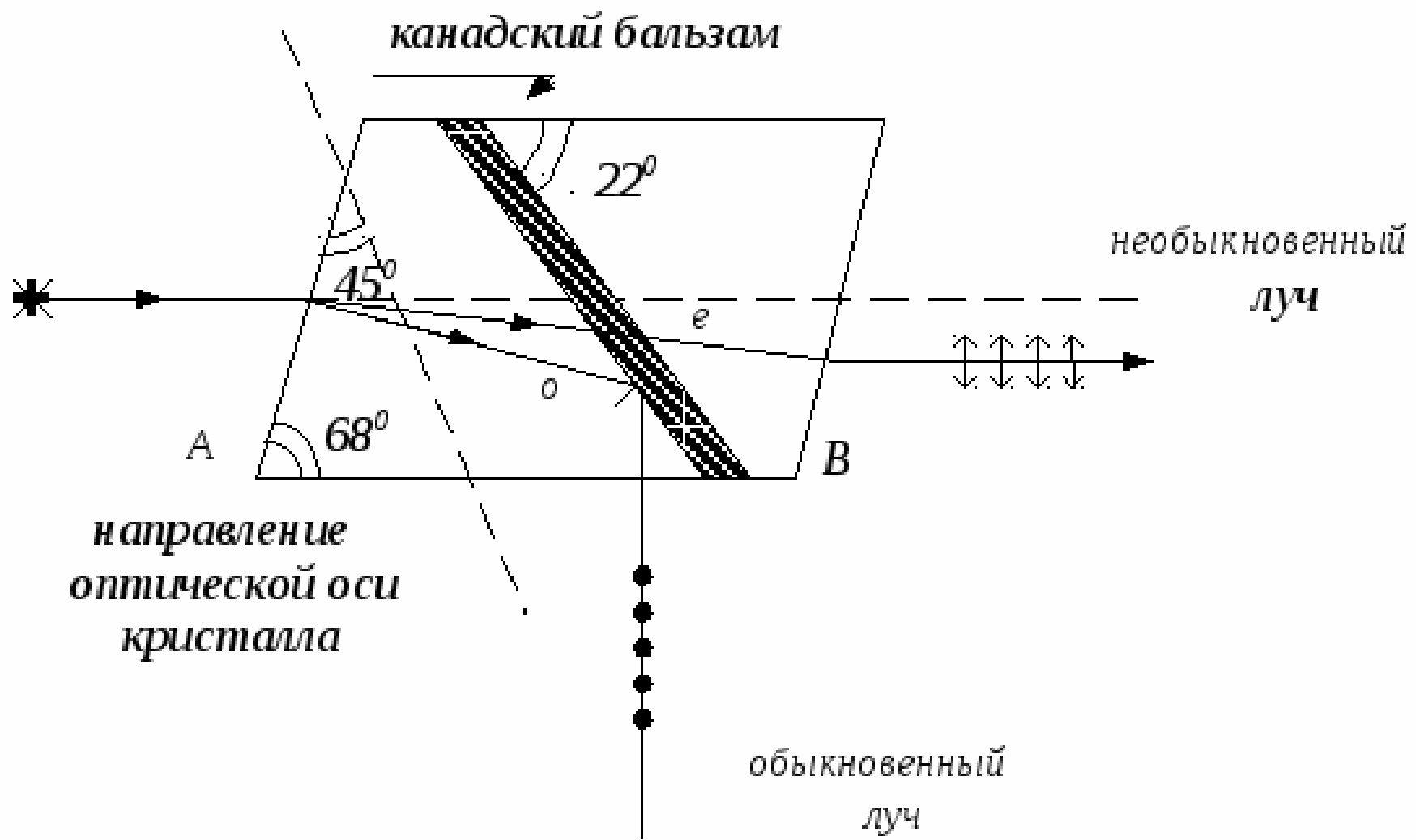
$$\Delta = n_e d - n_o d = d (n_e - n_o)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_e - n_o)$$

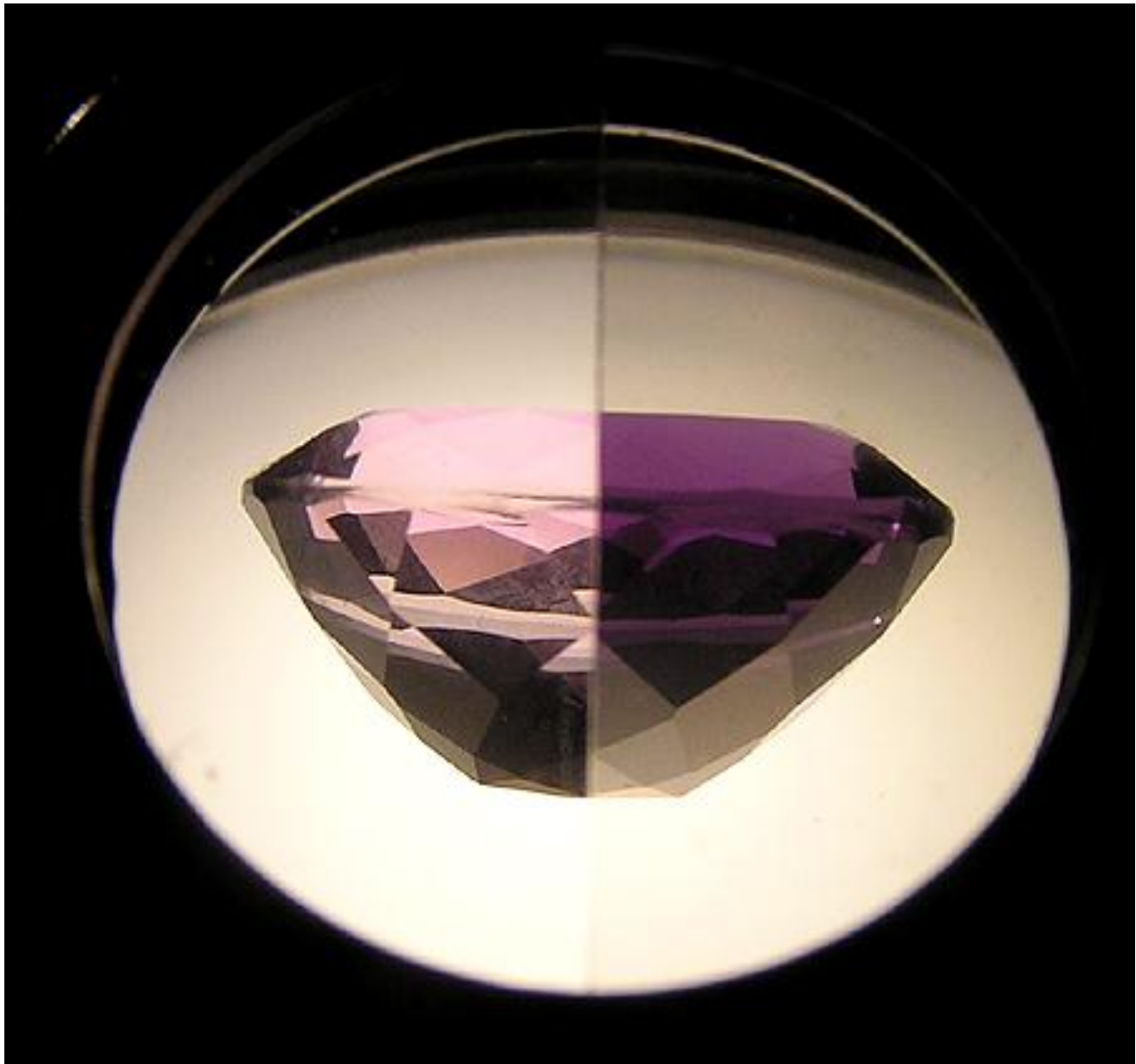
- Явление ДЛП используется при изготовлении поляризационных приспособлений – *поляризационных призм и поляроидов.*



- **Призма Николя** – двойная призма из исландского шпата, склеенная вдоль канадским бальзамом.
- Обыкновенный луч $n_o=1,66$ испытывает полное внутреннее отражение, т.к. канадский бальзам $n=1,55$ для него оптически менее плотный,
- а ПП необыкновенный луч $n_e=1,51$ выходит из призмы практически не преломляясь.

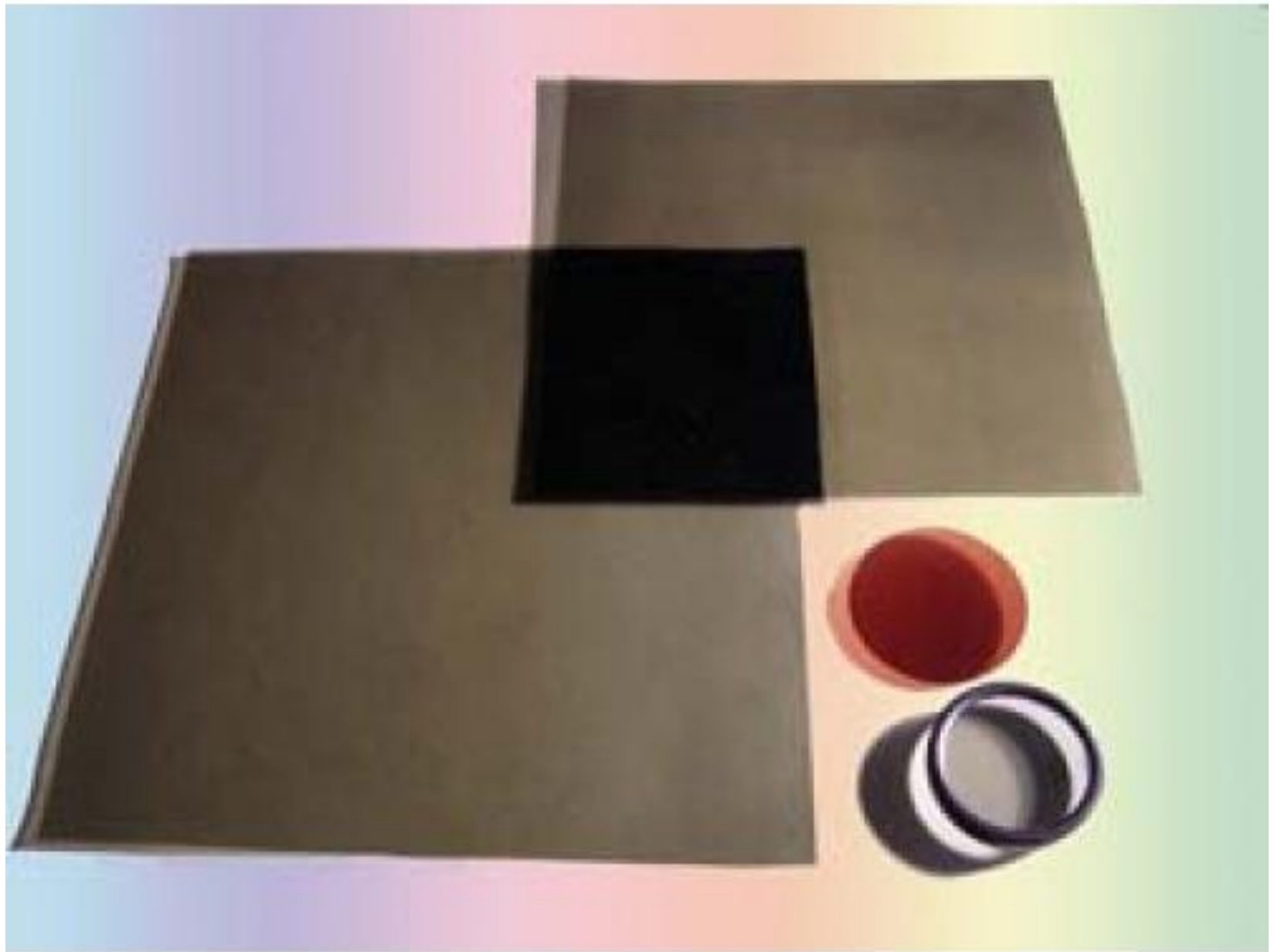


- Обыкновенный и необыкновенный лучи по разному поглощаются в веществе. Такое избирательное поглощение световых потоков называется *дихроизмом*.



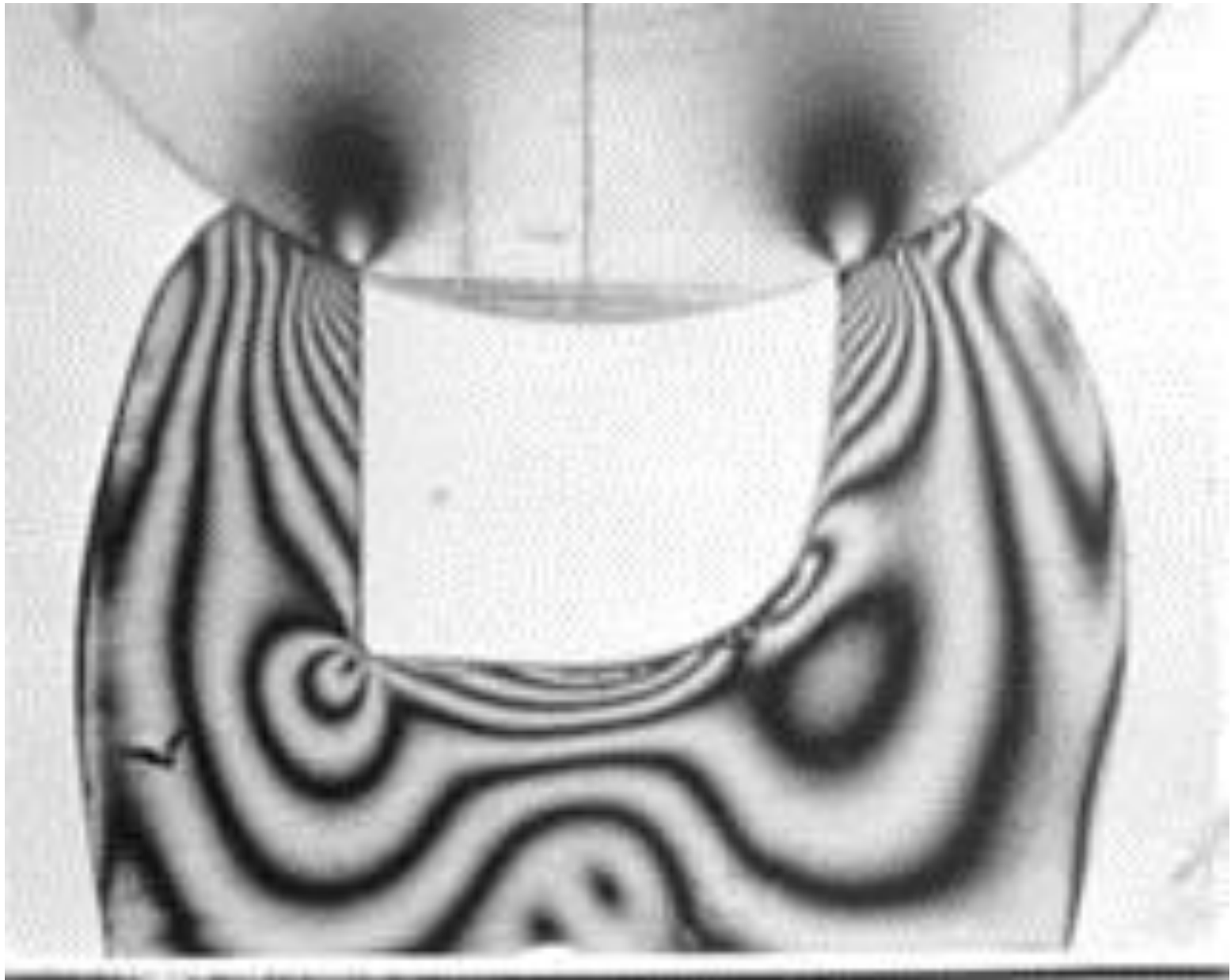


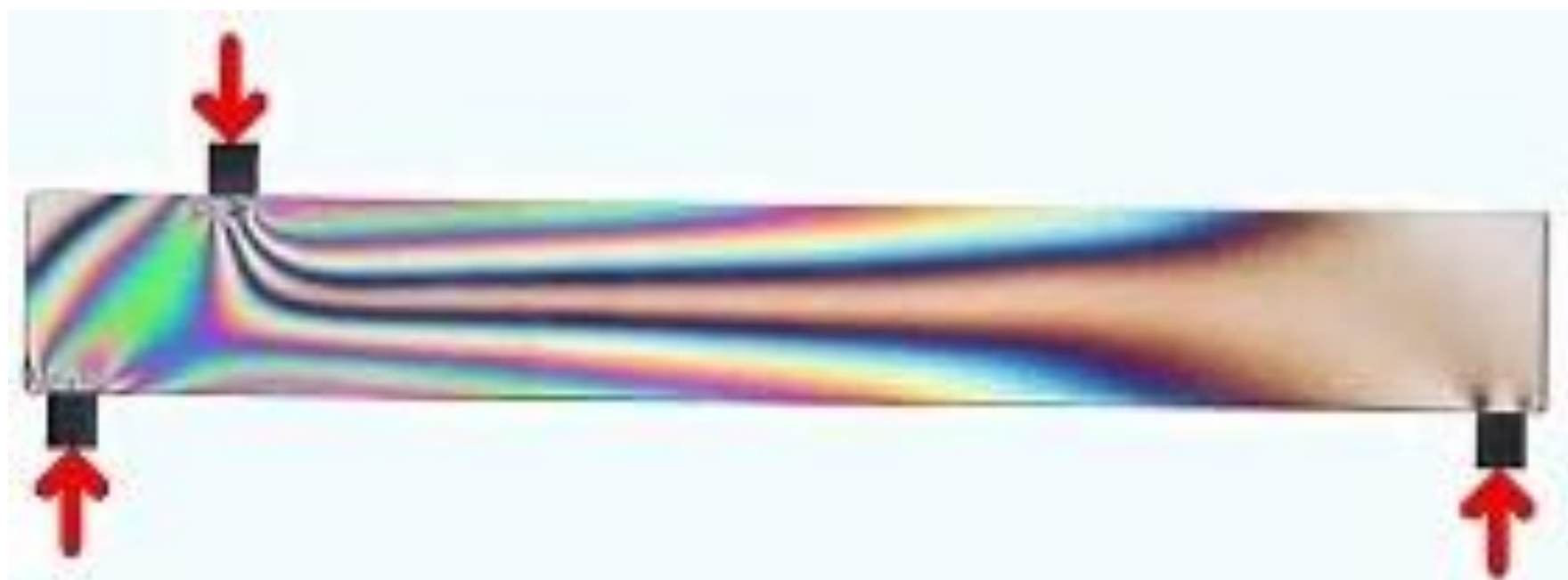
- **Дихроизм** используется при *производстве плоских поляроидов* – тонких **пластиковых пленок**, в которые **вкраплены кристаллики веществ с сильно выраженным дихроизмом (герапатит, турмалин)**. Уже при **толщине 0,1 мм** они полностью поглощают обыкновенные лучи в **видимой области спектра**.

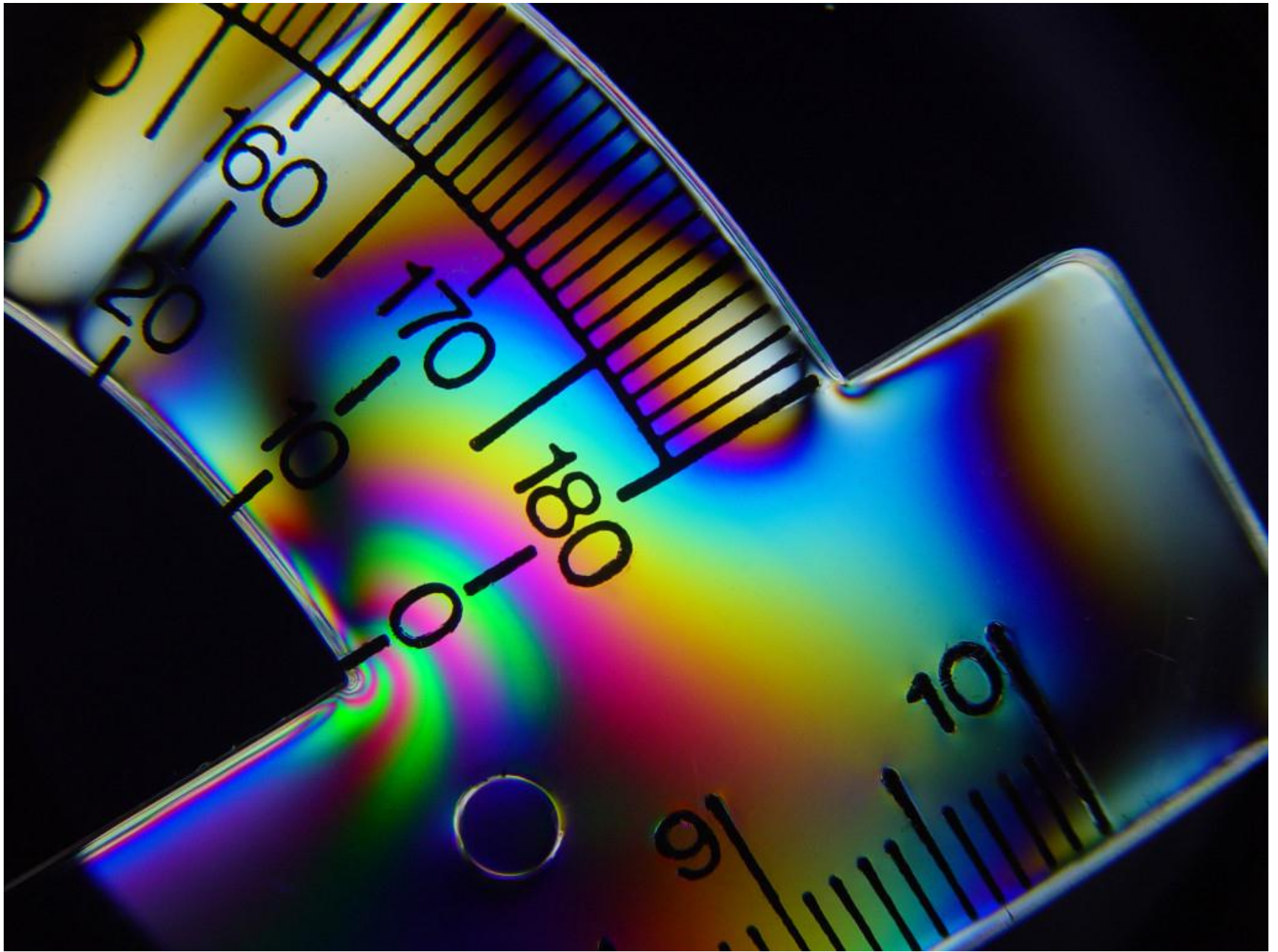


- В оптически изотропных веществах внешним воздействием **возможно индуцировать искусственную оптическую анизотропию.**
- Существует несколько способов:

- а) Деформация приводит к возникновению анизотропии, ДЛП и *фотоупругости* в изотропных веществах, например в полимерах.
- *Фотоупругость* наблюдается визуально в ППС как области с высоким механическим напряжением.







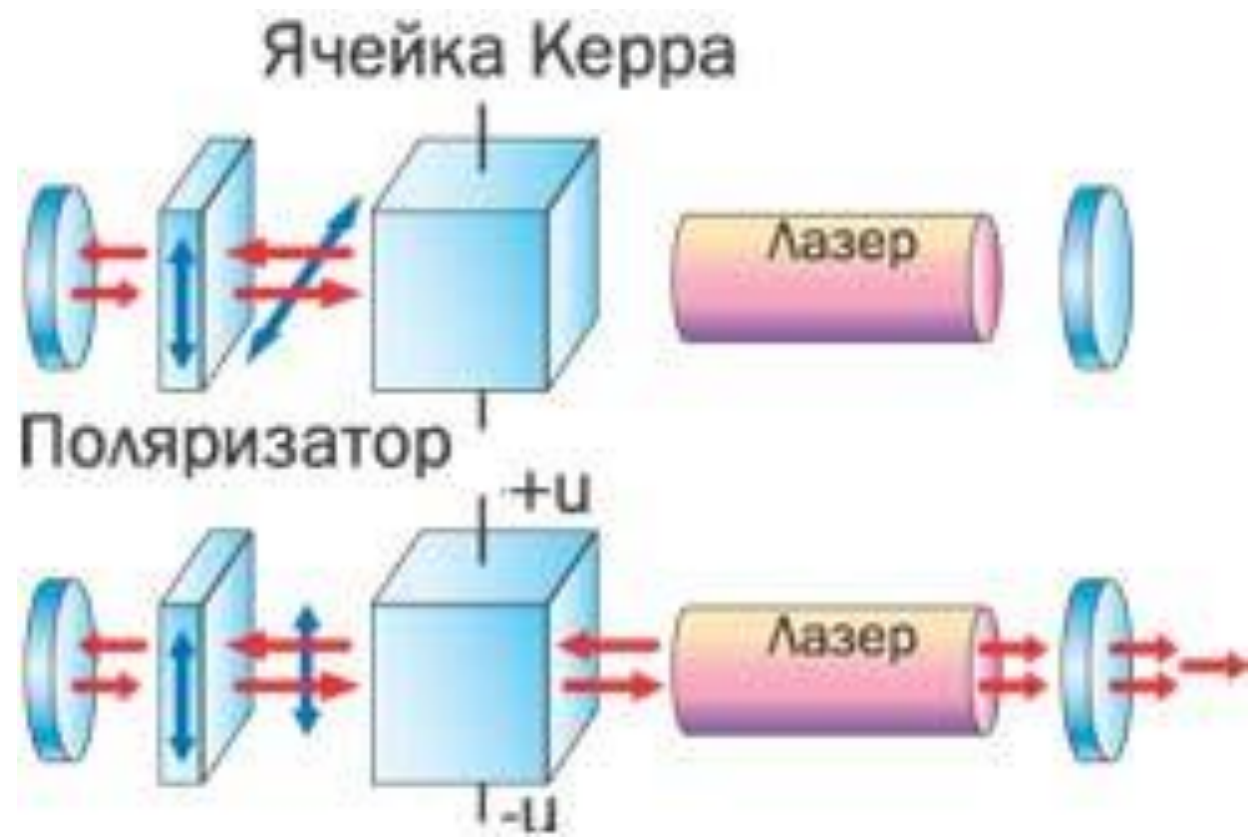
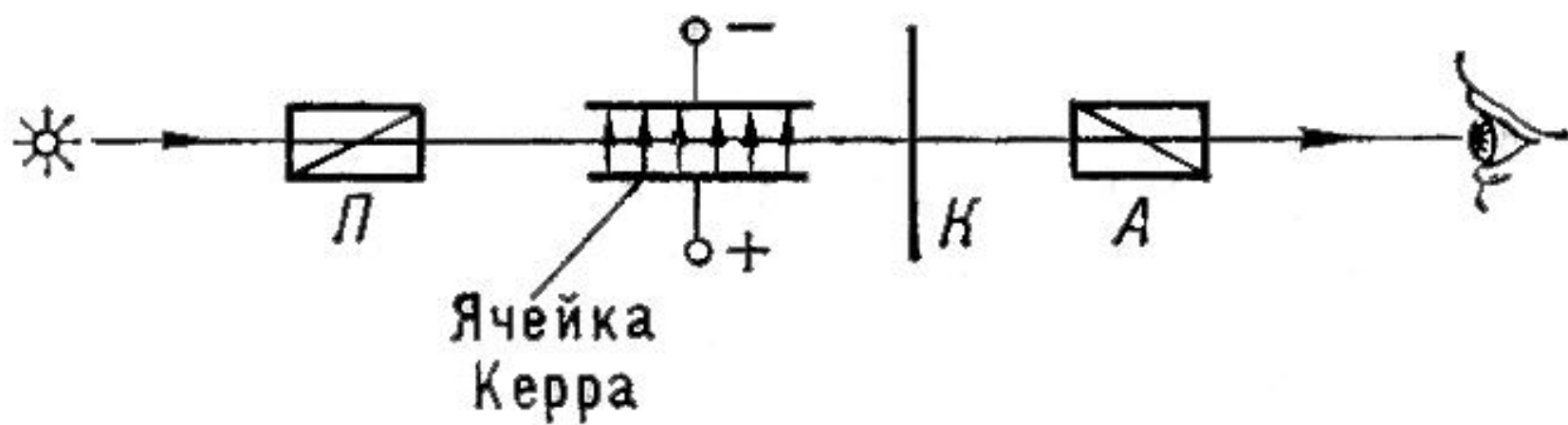
- б) Эффект Керра – оптическая анизотропия веществ *под воздействием электрического поля* – объясняется различной поляризуемостью молекул вещества по разным направлениям.

$$n_e - n_0 = B\lambda_0 E^2$$

E – напряжённость приложенного эл. поля,

λ_0 – длина волны в вакууме,

B – постоянная Керра.



- в) **Эффект Коттона-Муттона – магнитный аналог эффекта Керра – возникновение оптической анизотропии у некоторых изотропных веществ при помещении их в сильное магнитное поле.**

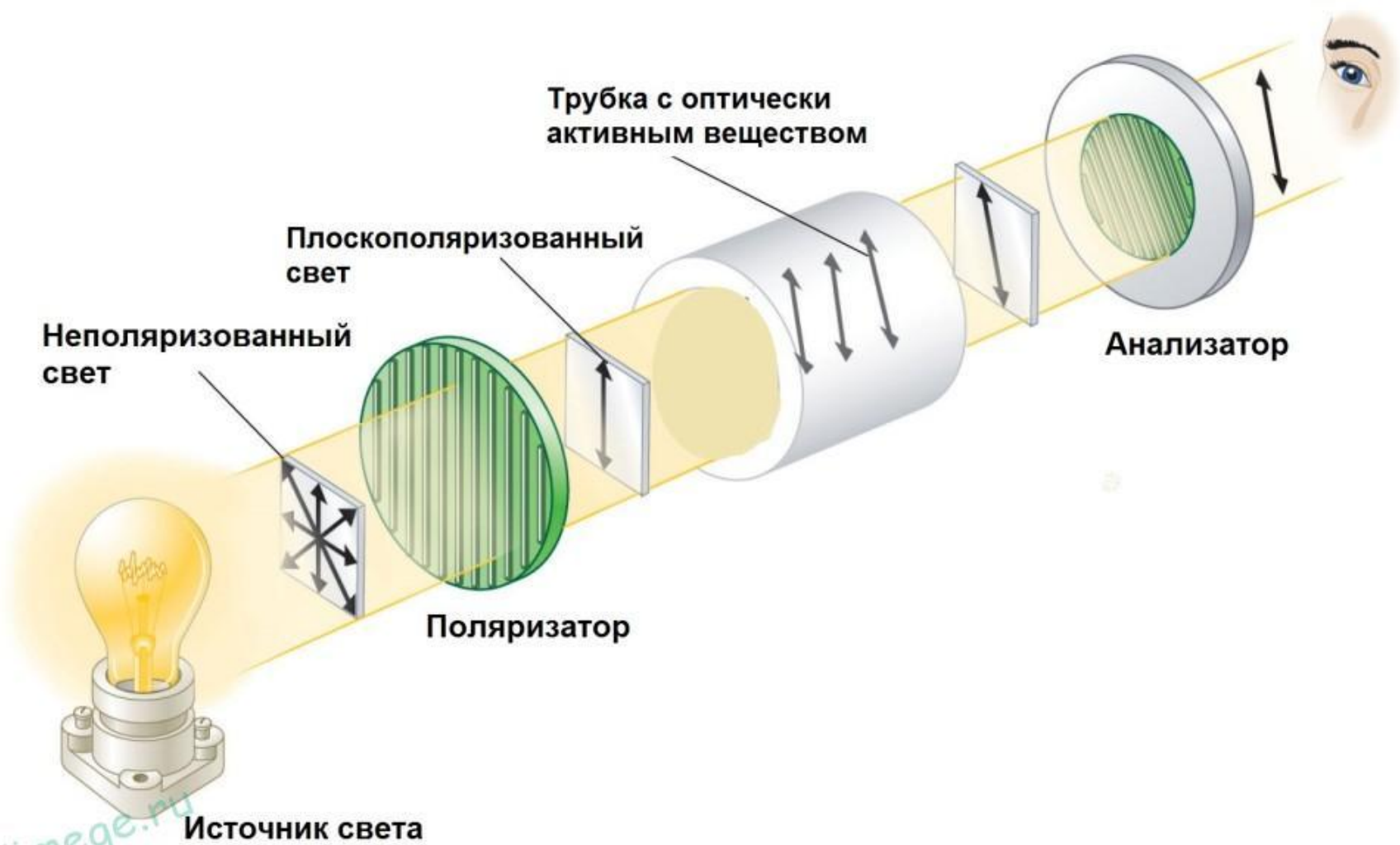
$$n_e - n_0 = C \lambda_0 H^2$$

H – напряжённость приложенного эл. поля,

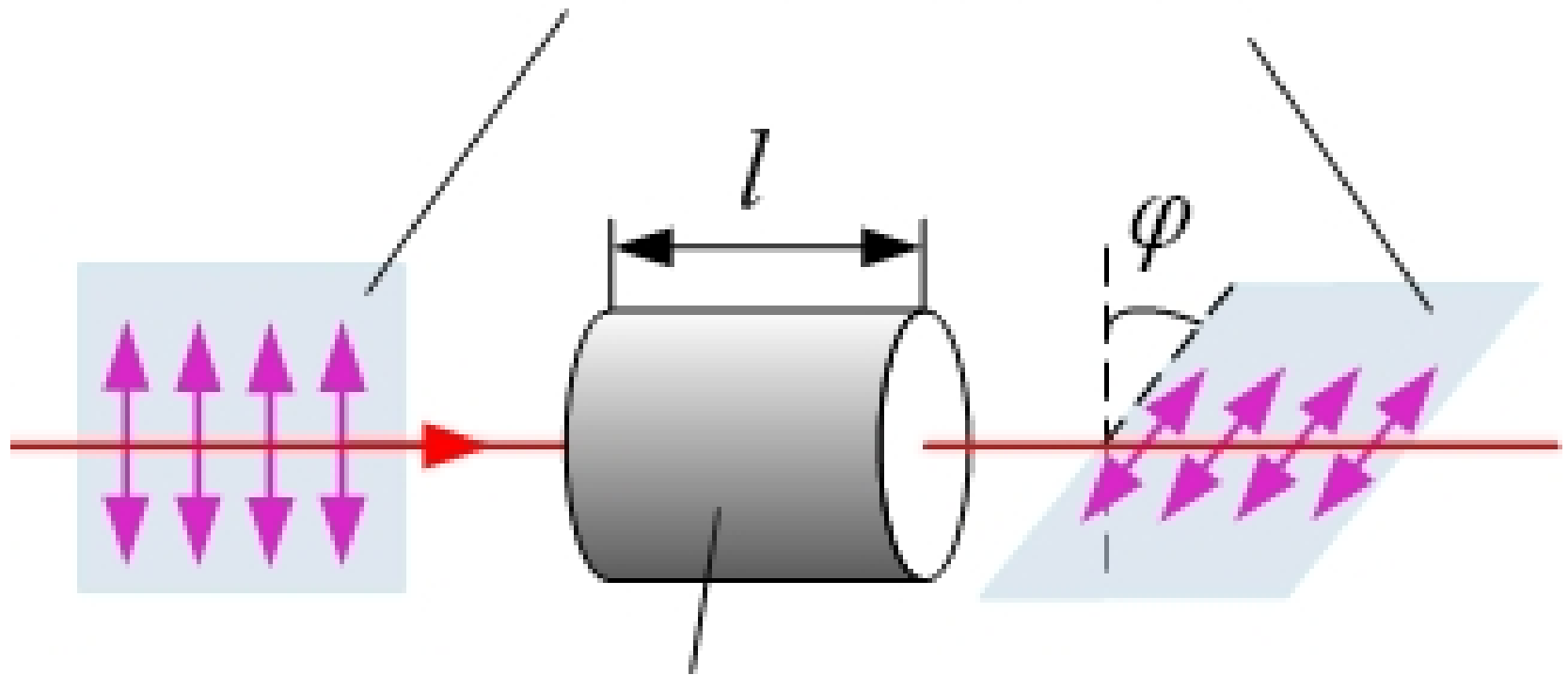
C – константа эффекта.

3. Оптически активные вещества.

- ***Оптическая активность вещества (кварц, сахар, скипидар, винная кислота) проявляется в повороте плоскости колебаний вектора поляризованного света, проходящего через это вещество на угол .***



Плоскости колебаний



Оптически
активное вещество

Связь между углом φ и длиной пути l света в оптически активном веществе:

$$\varphi = \alpha \cdot l$$

константа α – удельное вращение, разная для разных веществ.

Оптическую активность проявляют и *водные растворы* некоторых (органических) веществ, например, сахара и скипидара, для которых

$$\varphi = \alpha^* c l$$

***C* – концентрация в-ва в растворе,**

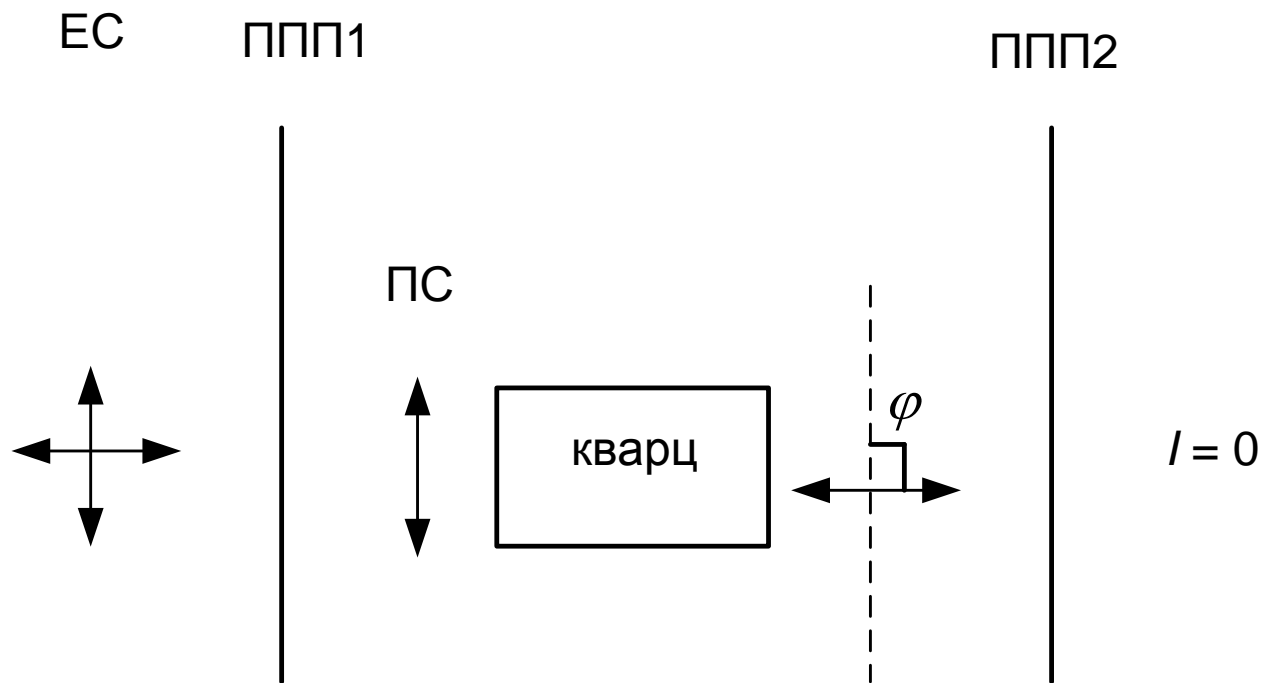
***α** – удельная постоянная вращения.**

Пример 3.5

Пластинка кварца толщиной $d_1 = 1$ мм, поворачивает ПП монохроматического света на угол $\varphi_1 = 20^\circ$.

Определить: 1) какова должна быть толщина d_2 кварцевой пластинки, помещенной между двумя «параллельными» николями» чтобы свет был полностью погашен,

2) какой длины трубку с раствором сахара массовой концентрацией $C = 0,4$ кг/л надо поместить между николями, для получения того же эффекта. Удельное вращение раствора сахара $\alpha^* = 0.665$ град/м кг м⁻³



$$1) \varphi = \alpha \cdot l \equiv \alpha \cdot d,$$

$$\varphi_1 = \alpha \cdot d_1, d_1 = 1 \text{ мм}, (\text{по условию})$$

$$\varphi_1 = 20^\circ = \frac{\pi}{9} (\text{по условию}), \Rightarrow$$

можем определить константу α

$$\alpha = \varphi_1 / d_1;$$

$$\varphi_2 = 90^\circ = \frac{\pi}{2} (\text{т.к. свет не проходит 2-й П})$$

$$\varphi_2 = \alpha \cdot d_2 \Rightarrow$$

$$d_2 = \varphi_2 / \alpha = d_2 = (\varphi_2 / \varphi_1) d_1 = 4,5 \text{ мм}$$

$$2) \varphi = \alpha^* cl$$

раствор должен повернуть ПП

$$\text{на тот же угол } \varphi_2 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow$$

$$l = \varphi_2 / (\alpha^* \cdot C), l = 3.8 \text{ дм.}$$

- **Явление оптической активности может быть использовано для *определения концентрации вещества в водном растворе.***
- **Пример – оптическая глюкометрия, определение уровня глюкозы (сахара) в крови.**

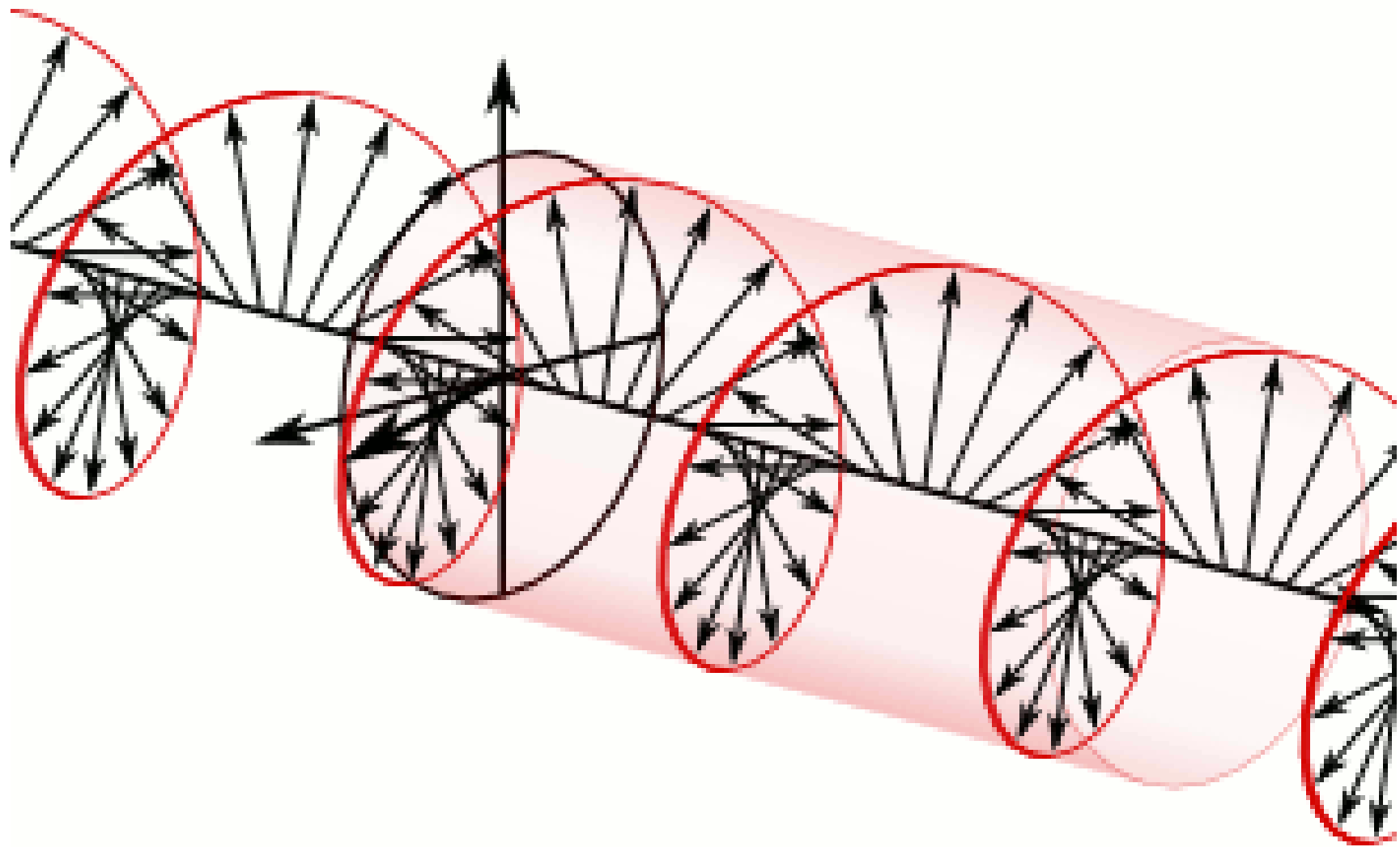
- **Вращение плоскости поляризации возможно и в оптически неактивных веществах, помещенных во внешнее магнитное поле (эффект Фарадея).**
- **Угол поворота плоскости поляризации определяется соотношением**

$$\varphi = VHI$$

V - *постоянная Верде*, зависящая от природы вещества и длины волны.

4. Другие типы поляризации.

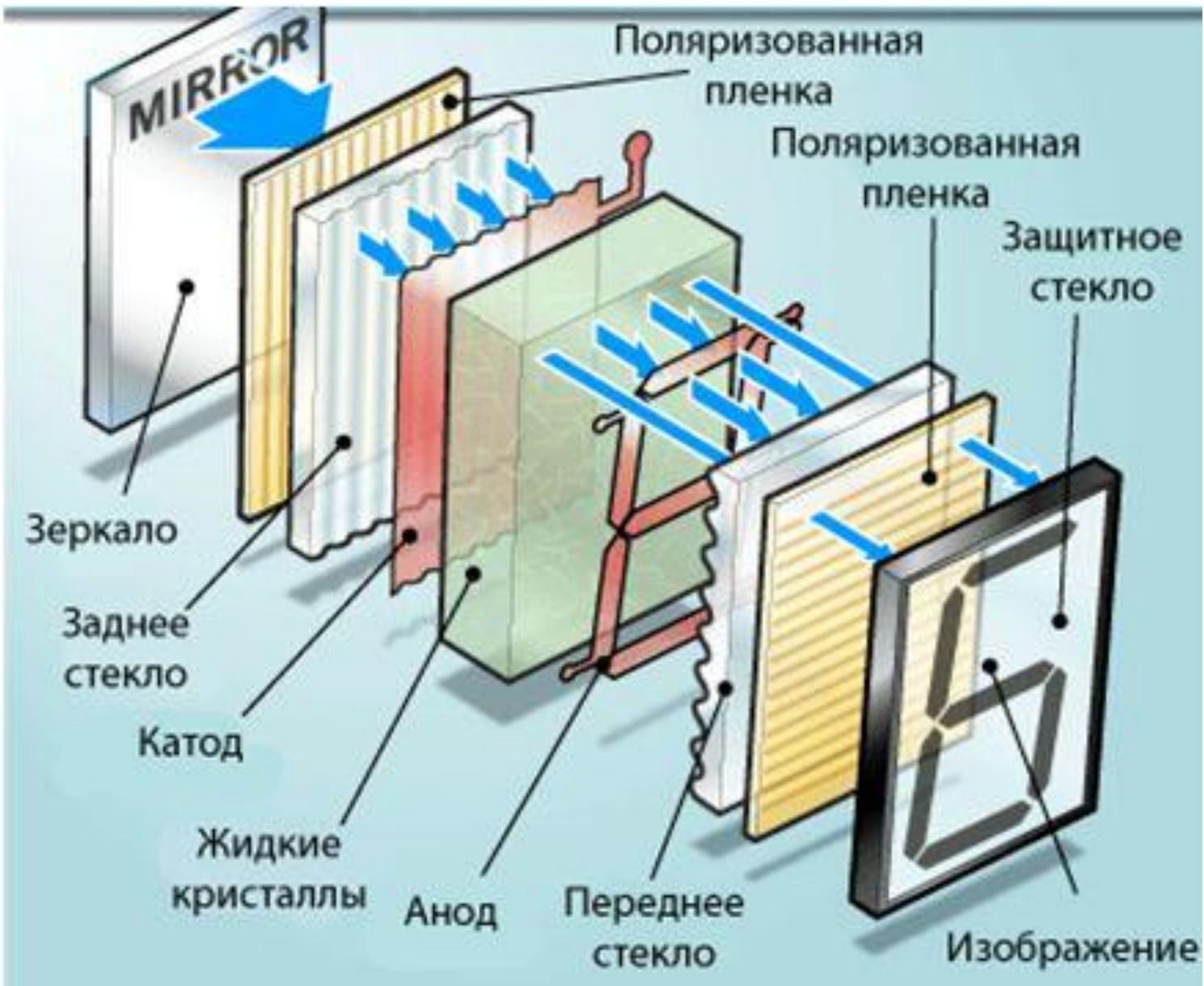
- Кроме плоской поляризации для ЭМВ возможна и *эллиптическая* (сложение когерентных перпендикулярных колебаний разных амплитуд).
- А так же *круговая поляризация* – сложение когерентных перпендикулярных колебаний одинаковых амплитуд.

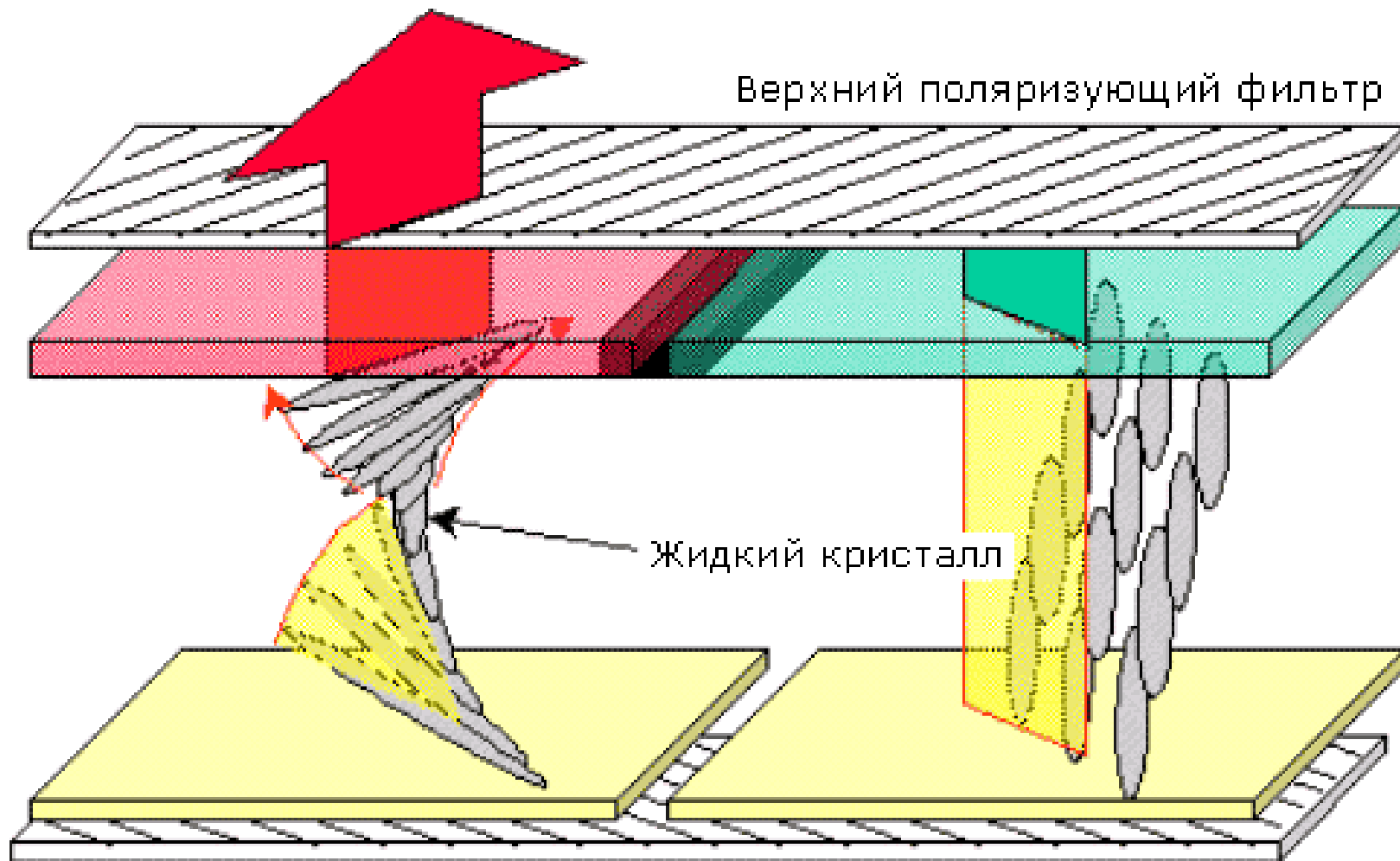


- При такой поляризации световой вектор *описывает вращение вокруг направления распространения света.*



- **Применение поляризации света: LCD и проекционные экраны, поляризационные очки и фильтры (устранение бликов от воды, облаков, мокрого асфальта), 3D кинематограф, фотоупругость для оценки прочности, сахарометрия.**
- **Поляризация ЭМВ широко применяется в радиосвязи.**





Свет проходит
Субпиксель светится

Свет не проходит
Субпиксель погашен



Без очков



В темных поляризационных очках водителя CF



без очков



в очках