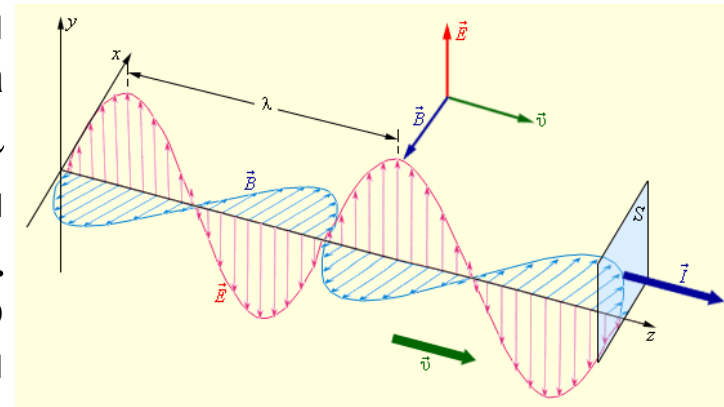


# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

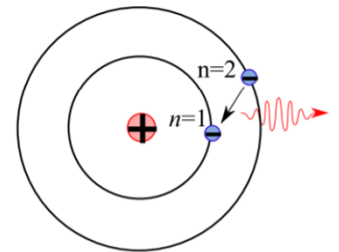
### 1. Естественный и поляризованный свет

Известно, что свет – это электромагнитные волны, причем волны поперечные: бегущая в пространстве со скоростью света  $c$  электромагнитная волна с частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$  ( $\lambda = c/\nu$ ) описывается взаимно перпендикулярными векторами напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$ . Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны направлению распространения (скорости  $\vec{c}$ ) и изменяются во времени синхронно.



Для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора — вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля (это название обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества).

Следует отметить, что естественный свет имеет сложную структуру, являясь результатом наложения электромагнитных волн, случайно испускаемых атомами при переходе их из возбуждённого состояния в основное или менее возбуждённое



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 1. Естественный и поляризованный свет

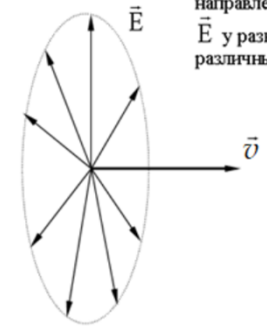
Группа волн, излучаемых за это время, называется *волновым цугом*. В каждом волновом цуге световой вектор колеблется в одной и той же плоскости перпендикулярно направлению распространения

Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $\vec{E}$  (и, следовательно,  $\vec{B}$ ) называется *естественным*.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется *поляризованным*.

Если в результате каких-либо внешних воздействий появляется преимущественное (но не исключительное!) направление колебаний вектора  $\vec{E}$ , то имеем дело с *частично поляризованным* светом.

У естественного света  
направления векторов  
 $\vec{E}$  у разных цугов  
различные.



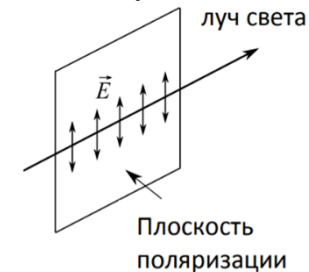
Свет, в котором вектор  $\vec{E}$  колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу, называется *плоскополяризованным (линейно поляризованным)*.

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны, называется *плоскостью поляризации*.

Плоско-  
поляризованный  
свет



Частично  
поляризованный свет



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

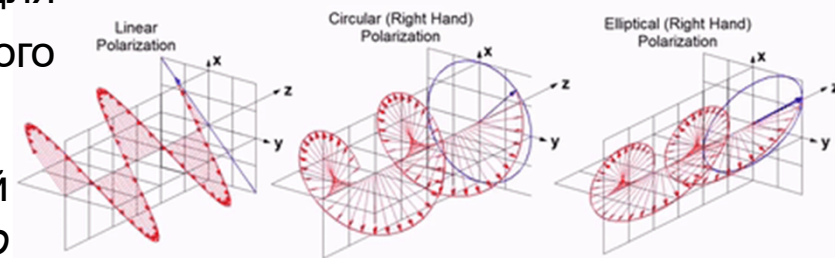
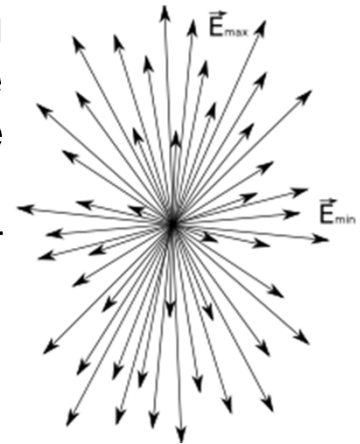
### 1. Естественный и поляризованный свет

Можно создать частично поляризованный свет, в котором не все плоскости колебаний одинаково представлены, а имеется некоторое преимущественное направление колебаний вектора  $E$ . Из рисунка видно, что вертикальные колебания соответствуют максимальной интенсивности  $I_{\max}$  ( $I \sim E^2$ ), горизонтальные – минимальной  $I_{\min}$ . Частично поляризованный свет характеризуют степенью поляризации  $P$ , которую определяют как

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

Для плоскополяризованного света  $P=1$ ; для естественного света  $P=0$ ; для эллиптически поляризованного света понятие «степень поляризации» неприменимо.

В зависимости от вида траектории, описываемой концом вектора амплитуды, различают *плоско-*, *циркулярно* и *эллиптически поляризованные* волны



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

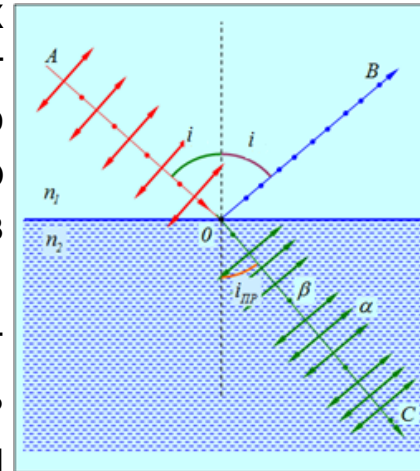
### 2. Поляризация света при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков

Луч естественного света, падающий на границу раздела двух диэлектриков, частично отражается и частично преломляется. Опыт показывает что отражённые лучи и преломленные лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях: в отраженном луче световой вектор колеблется преимущественно перпендикулярно плоскости падения, а в преломленном – преимущественно в плоскости падения.

Падающая первичная волна проникает в диэлектрик  $n_2$  и возбуждает вынужденные колебания связанных зарядов, которые в свою очередь испускают вторичные электромагнитные волны в диэлектрик  $n_1$ . Суперпозиция вторичных волн создаёт отражённую волну.

В диэлектрике  $n_2$  вторичные волны складываются с первичной и образуют преломленную волну.

Из электромагнитной теории известно, что колеблющиеся заряды подобны диполю. Каждое колебание можно представить как суперпозицию колебаний двух диполей, оси которых лежат в плоскости падения ( $\alpha$ ) и перпендикулярно ей ( $\beta$ ).



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

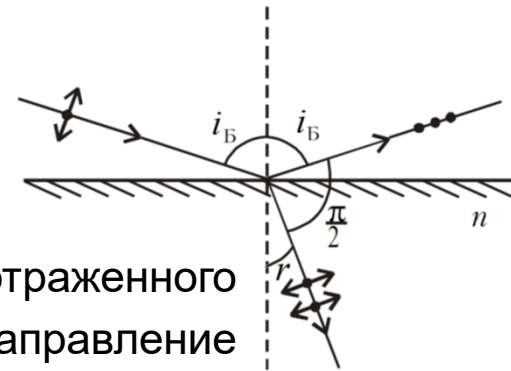
## Поляризация света

### 2. Поляризация света при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков

Излучение диполя происходит в направлении, перпендикулярном его оси. При угле падения  $i$  в направлении отраженного луча излучают как диполи типа  $\alpha$ , так и типа  $\beta$ . Таким образом, в отраженной волне колебания происходят как перпендикулярно плоскости падения, так и в плоскости падения, то есть отраженный свет частично поляризован.

Пусть свет падает под углом, при котором отраженный и преломленный лучи перпендикулярны, то есть:

$$i_B + r = \frac{\pi}{2}.$$



При этом условии, называемом *условием Брюстера*, в направлении отраженного луча распространяются только волны, излучаемые диполями типа  $\beta$ , направление колебаний которых перпендикулярно плоскости падения. Соответствующий угол называется *углом Брюстера*  $i_{Bp}$ .

Из условия Брюстера и закона преломления следует:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i_{Bp}}{\cos i_{Bp}} = \operatorname{tg} i_{Bp} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ или } \operatorname{tg} i_{Bp} = n_{2,1}, \text{ где } n_{2,1} - \text{относительный показатель преломления среды.}$$

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 2. Поляризация света при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков

Выражение  $\operatorname{tg} i_{\text{Бр}} = n_{2,1}$ , это **формула Брюстера**.

Таким образом, если свет падает под углом Брюстера, то отраженный луч полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Это заключение называется **законом Брюстера**.

Интенсивность полностью поляризованного света, полученного при отражении, составляет примерно 8% от интенсивности падающего света. Поэтому такой способ поляризации света практически не используется.

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 3. Поляризация света при двойном лучепреломлении

В прозрачных изотропных средах показатель преломления  $n$  одинаков для всех направлений, а в неизотропных (кристаллических, кроме принадлежащих к кубической системе)  $n$  зависит от направления распространения луча света.

Действительно, из уравнений Максвелла следует:

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{\frac{E_0}{E}} = \sqrt{E_0 (E_0 - E_n)},$$

где  $E_0$  и  $E_n$  – это интенсивности электрического поля луча света в вакууме и, соответственно, электрического поля, созданного колебаниями связанных зарядов.

Напряженность  $E_n$  пропорциональна сумме электрических дипольных моментов молекул, каждый из которых равен произведению модуля зарядов  $q$  на расстояние между ними  $r$ . Если молекула несимметрична, то её дипольный момент зависит от его ориентации относительно вектора напряженности электрического поля. Поэтому показатель преломления кристаллов зависит от направления распространения света. Таким образом, в общем случае для них  $n_x \neq n_y \neq n_z$ .



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

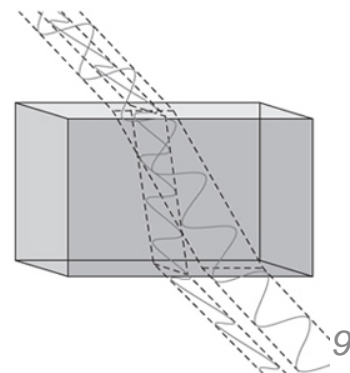
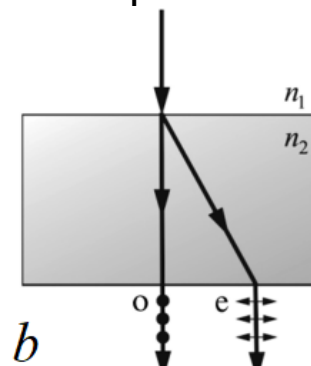
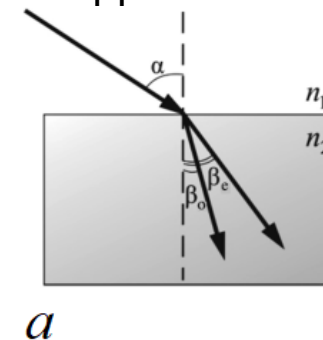
## Поляризация света

### 3. Поляризация света при двойном лучепреломлении

Существуют, однако, кристаллы, например исландский шпат ( $\text{CaCO}_3$ ), или кварц ( $\text{SiO}_2$ ), имеющие одно направление, вдоль которого свет распространяется как в изотропной среде, для него  $n_x = n_y = n_z$ . Это направление называется оптической осью. Для остальных направлений  $n_x = n_y \neq n_z$ . Обозначим:  $n_x = n_y = n_o$ ,  $n_z = n_e$ ,  $n_o \neq n_e$ .

Следовательно, для одного угла падения  $\alpha$  есть два угла преломления  $\beta_o \neq \beta_e$ , что и наблюдается экспериментально. Падающий луч делится на два: *обыкновенный* (o) и *необыкновенный* (e).

Если падающий луч перпендикулярен оптической оси, то обыкновенный луч, согласно законам геометрической оптики, не изменяет направление, а необыкновенный не только изменяет направление своего распространения, но и может не лежать в плоскости падения.





# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

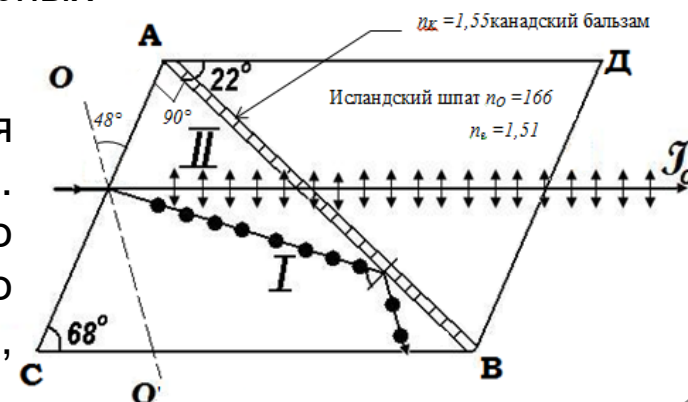
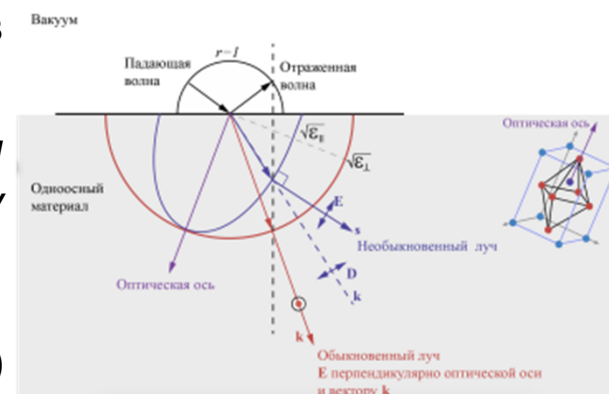
### 3. Поляризация света при двойном лучепреломлении

При вращении кристалла вокруг падающего луча, на экране появляется светлое кольцо, описываемое необыкновенным лучом, в центре которого – светлое пятно, создаваемое обыкновенным лучом.

Явление разделения луча света на обыкновенный и необыкновенный при прохождении через анизотропную среду называется двойным лучепреломлением.

Обыкновенный луч подчиняется законам геометрической оптики, а необыкновенный – не подчиняется. Интенсивность лучей (о) и (е) одинакова, но они поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Явление двойного лучепреломления используется для изготовления поляризаторов, в частности призмы Николя (см. рисунок). Призма состоит из двух частей кристалла исландского шпата, склеенных веществом, показатель преломления которого больше, чем показатель преломления необыкновенного луча ( $n_e$ ), но меньше, чем обыкновенного ( $n_o$ ).



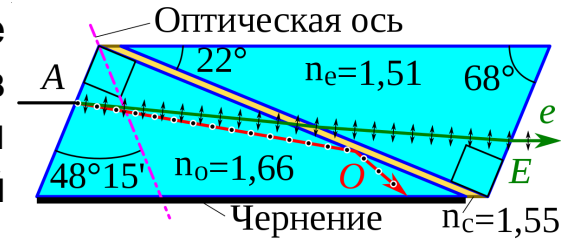
# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 3. Поляризация света при двойном лучепреломлении

В результате, если направить на призму луч под определенным углом, обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение и поглощается зачерненными стенками поляризатора.

Поляризатор можно изготовить, используя *дихроизм* – физическое явление, заключающееся в различном поглощении веществом света в зависимости от ориентации вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны относительно кристаллографических осей кристалла.



Дихроизм наблюдается у многих веществ, включая органические, часто встречается у кристаллов, в том числе двулучепреломляющих. Примером может служить турмалин, сильно поглощающий обыкновенный луч. Вещества, обладающие ярко выраженным дихроизмом, используют для изготовления поляризаторов, именуемых поляроидами. Примером поляроида может служить тонкая пленка целлулоида с вкраплениями кристаллов герпатита.

Достоинство поляроидов – в дешевизне и простоте изготовления. Недостатки: меньшая по сравнению с призмами прозрачность, зависимость степени поляризации от длины волны, боязнь нагрева.

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 4. Анализ поляризации света

В общем случае анализ поляризации света является сложной задачей, поскольку существует много типов поляризации света: естественный (неполяризованный), плоскополяризованный, поляризованный по кругу, эллиптически поляризованный, кроме того, смесь естественного и поляризованного света.

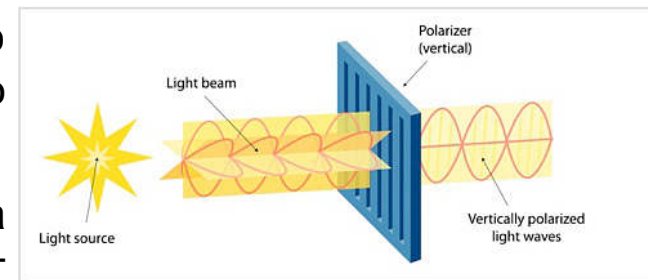
Поэтому полный анализ степени и типа поляризации света может быть выполнен только в научных лабораториях на специальном оборудовании.

Далее мы рассмотрим несколько самых простых случаев.

➤ Пусть свет неизвестного состояния поляризации падает на поляризатор  $P_1$ .

Поляризатором называется прибор, пропускающий световую волну, в которой колебания вектора  $\vec{E}$  параллельны его оптической оси (необыкновенный луч).

Если при вращении поляризатора вокруг падающего луча интенсивность прошедшего света не изменяется, то падающий свет – естественный (неполяризованный).



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 4. Анализ поляризации света

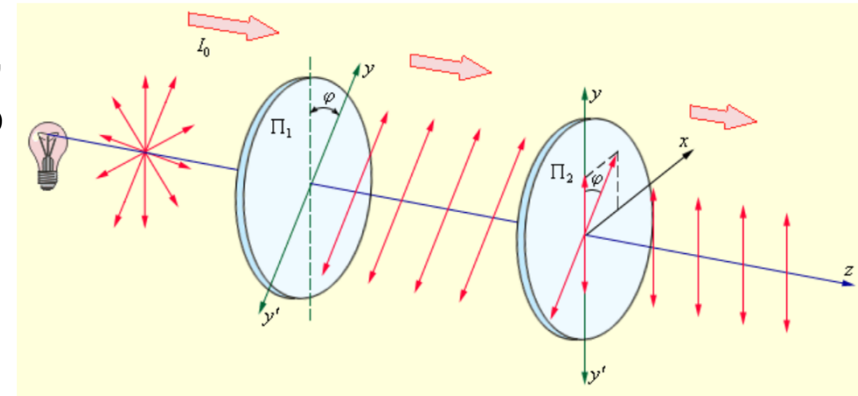
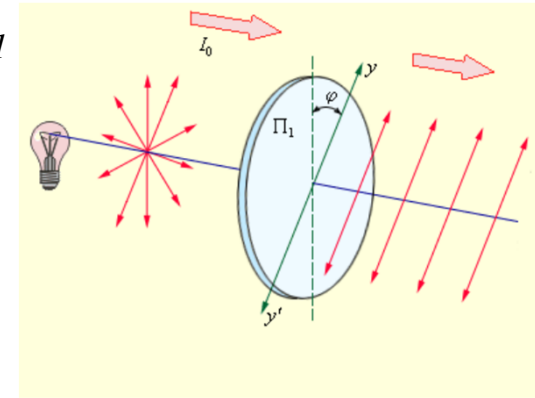
В этом случае независимо от положения оптической оси  $yy_1$  интенсивность света после поляризатора равна:

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

где  $k$  – коэффициент поглощения поляризатора.

➤ На пути луча интенсивности  $I_1$  поместим второй поляризатор  $\Pi_2$ , называемый анализатором.

Оставляя неизменным положение поляризатора  $\Pi_1$ , будем вращать поляризатор  $\Pi_2$  вокруг луча, вышедшего из первого поляризатора.

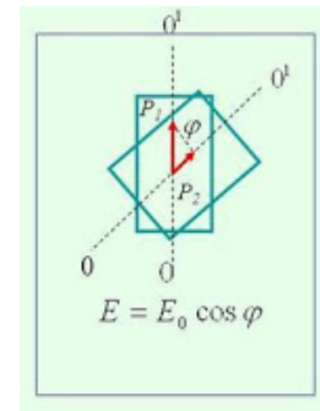


# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 4. Анализ поляризации света

Заметим, что интенсивность  $I_2$  света, прошедшего через  $\Pi_2$ , изменяется от  $I_{min} = 0$ , когда оптические оси  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  взаимно перпендикулярны, до  $I_{max} = I_1$ , когда оси поляризаторов параллельны и вектор  $\vec{E}_1$  не изменяется.



Если угол между  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ :  $0 < \varphi < \pi/2$ , тогда  $E_2 = E_1 \cos \varphi$ . С учётом того, что  $I \sim E^2$ , для интенсивности света  $I_2$ , прошедшего через  $\Pi_2$ , получим:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi. \quad \text{— математическая запись закона Малюса.}$$

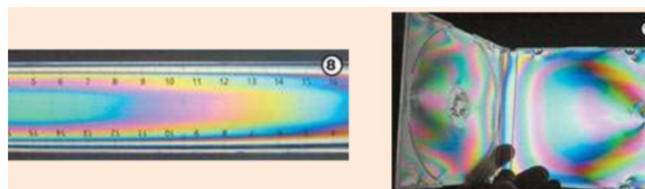


# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

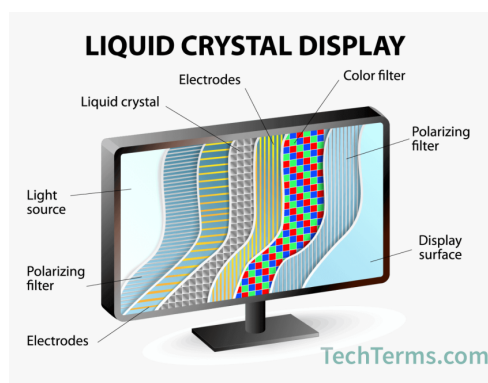
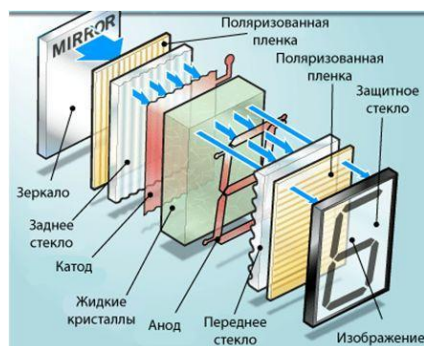
## Поляризация света

### 4. Анализ поляризации света

Поляризованный свет имеет широкое практическое применение (телекоммуникация, промышленность, медицина, фотография, кинематография, лабораторные анализы и др.)



В поляризованном свете изучают распределение механических напряжений в деталях машин и механизмов, строительных конструкциях, ...



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

### 5. Вращение плоскости поляризации

Все вещества в зависимости от их отношения к поляризованному свету разделяются на две группы: а) *оптически неактивные*; б) *оптически активные* – способные вращать плоскость поляризации.

Например, из твердых тел — кварц, сахар, киноварь, из жидкостей — водный раствор сахара, винная кислота, скипидар и др.

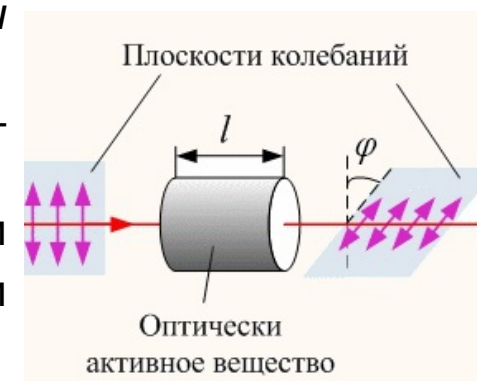
Экспериментально установлено, что угол поворота плоскости поляризации зависит от длины  $d$  пути света в кристаллической пластинке и от длины волны, т. е. имеется вращательная дисперсия:

$$\varphi = \alpha \cdot d$$

где,  $\alpha$  - вращательная способность кристалла. Угол вращения  $\alpha$  — величина отклонения плоскости поляризации от начального положения, выражается в угловых градусах.

Для оптически активных растворов  $\varphi = [\alpha] C d$

где  $[\alpha]$  — так называемое *удельное вращение*, численно равно углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (единичной концентрации — для растворов),  $C$  — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе, кг/м<sup>3</sup>.





# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

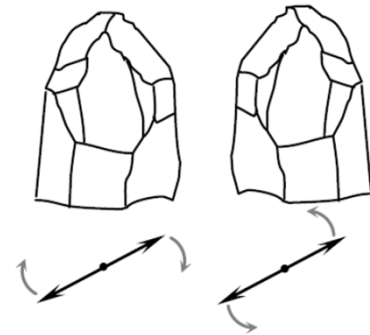
## Поляризация света

### 5. Вращение плоскости поляризации

Удельное вращение зависит от природы вещества, температуры и длины волны света в вакууме.

Опыт показывает, что все вещества, оптически активные в жидком состоянии, обладают таким же свойством и в кристаллическом состоянии. Однако если вещества активны в кристаллическом состоянии, то не всегда активны в жидком (*например*, расплавленный кварц). Следовательно, оптическая активность обуславливается как строением молекул вещества (их асимметрией), так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке.

Оптически активные вещества в зависимости от направления вращения плоскости поляризации разделяются на право- и левовращающие. В первом случае плоскость поляризации, если смотреть навстречу лучу, вращается вправо (по часовой стрелке), во втором — влево (против часовой стрелки).

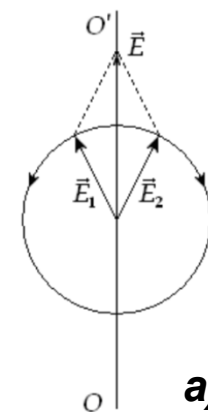


Вращение плоскости поляризации объяснено О. Френелем (1817 г.).

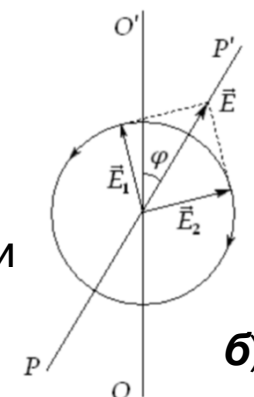
## Поляризация света

### 5. Вращение плоскости поляризации

Для объяснения вращения плоскости поляризации Френель предположил, что в оптически активных веществах световые волны, поляризованные по кругу вправо и влево, распространяются с неодинаковой скоростью. Линейно поляризованный свет можно представить как суперпозицию двух поляризованных по кругу волн, правой и левой, с одинаковыми частотами и амплитудами (см. рисунок **а**).



Если скорости распространения обеих волн неодинаковы, то по мере прохождения света через вещество, один из векторов, например,  $\vec{E}_1$ , будет отставать в своем вращении от вектора  $\vec{E}_2$  (см. рисунок **б**). Результирующий вектор будет поворачиваться в сторону более "быстрого" вектора  $\vec{E}$  и займет положение  $PP'$ . Угол поворота равен  $\varphi$ .



Явление вращения плоскости поляризации и, в частности, формула  $\varphi = [\alpha]Cd$  лежат в основе точного, метода определения концентрации растворов оптически активных веществ, называемого *поляризацией* (*сахариметрией*).

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Поляризация света

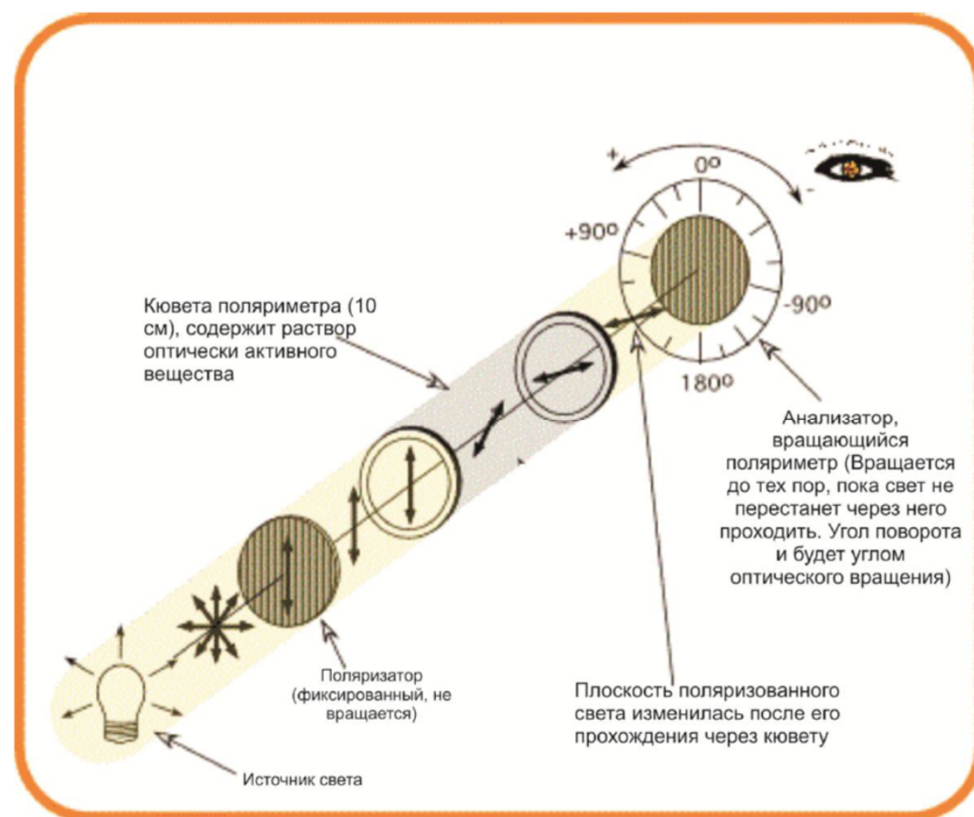
### 5. Вращение плоскости поляризации

Для этого используется установка, показанная на рисунке.

По найденному углу поворота плоскости поляризации  $\varphi$  и известному значению  $[\alpha]$  находится концентрация растворенного вещества.

Впоследствии М. Фарадеем обнаружено вращение плоскости поляризации в оптически неактивных телах, возникающее под действием магнитного поля. Это явление получило название *эффекта Фарадея* (или *магнитного вращения плоскости поляризации*).

Оно имело огромное значение для науки, так как было первым явлением, в котором обнаружилась связь между оптическими и электромагнитными процессами.



## Поляризация света

### 5. Вращение плоскости поляризации