

**Конспект лекций по курсу общей физики. Часть III**  
**“Оптика. Квантовые представления о свете.**  
**Атомная физика и физика ядра”**  
**Лекция № 4**

### 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

#### 3.1. Естественный и поляризованный свет

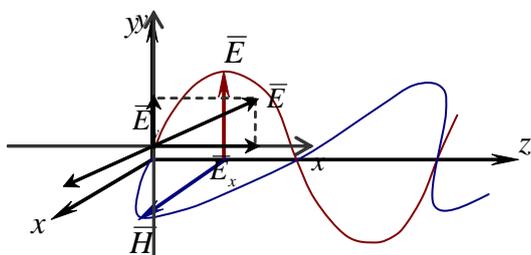


Рис.3

Рис.1

Из электромагнитной теории света вытекает непосредственно, что световые волны поперечны. *Электромагнитная волна, у которой направления колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  упорядочены каким-либо образом (рис.1), называется поляризованной волной.*

Если колебания вектора  $\vec{E}$  (как и  $\vec{B}$ ) происходят только в одной проходящей через луч плоскости, волна называется *плоскополяризованной или линейнополяризованной*. Вектор  $\vec{E}$  называется *световым вектором*, т.к. только он оказывает оптическое, фотоэлектрическое и другие действия электромагнитной волны.

*Плоскость, в которой колеблется световой вектор в плоскополяризованной волне, называется плоскостью колебаний. По историческим причинам плоскость, перпендикулярная к плоскости колебаний, названа плоскостью поляризации.*

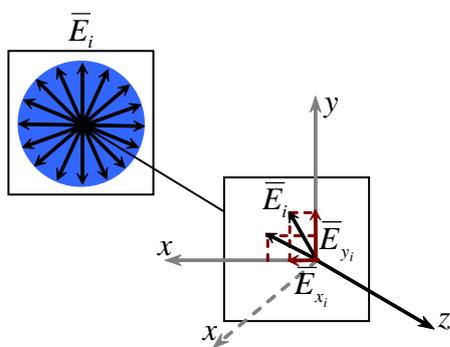


Рис.2

Излучение светящегося тела, состоящего из множества атомов, представляет собой набор излучений отдельных атомов. Атомы излучают одновременно и независимо друг от друга, что приводит к беспорядочному изменению фазы волны, поэтому свет некогерентен. *Световая волна, у которой направление векторов электрического вектора хаотически меняется, так что для него равновероятны все направления колебаний в плоскости, перпендикулярной лучу (рис.2), называется естественным (неполяризованным) светом.*

Любое колебание можно представить в виде компонент  $\vec{E}_{x_i}$  и  $\vec{E}_{y_i}$ . Для естественного света суммы компонент

$$\vec{E}_x = \sum_i \vec{E}_{x_i}, \quad \vec{E}_y = \sum_i \vec{E}_{y_i} \quad (1)$$

равны,  $\vec{E}_x = \vec{E}_y$ . В соответствии с этим естественный свет можно представить как результат наложения двух когерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность.

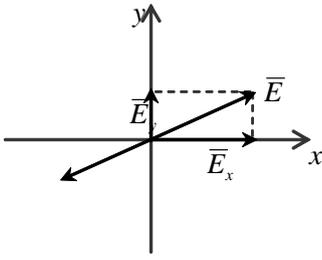


Рис.3

Следовательно, результатом наложения двух *когерентных* волн  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$ , отличающихся по фазе на  $\pi$ , или совпадающих по фазе, является плоскополяризованная волна с фиксированным направлением колебаний (рис.3).

Кроме плоскополяризованного света известно существование *света, поляризованного по эллипсу, света, поляризованного по кругу*.

Упорядоченность колебаний светового вектора заключается и в том, что

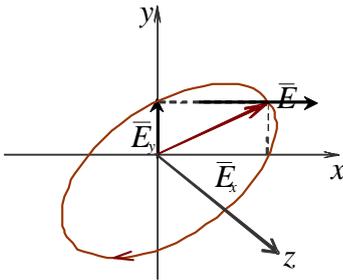


Рис.4

вектор  $\vec{E}$  поворачивается вокруг луча, одновременно изменяясь по величине. Волна эллиптически поляризована, если конец вектора  $\vec{E}$  описывает эллипс. Волна поляризована по кругу, если конец вектора  $\vec{E}$  описывает окружность. В зависимости от направления вращения вектора  $\vec{E}$  различают правую (рис.4) и левую поляризацию.

Интерпретация этих примеров наглядна в теории колебаний: сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний *одинаковой* частоты дает движение по эллипсу, по окружности, по прямой, что зависит от разности фаз колебаний.

Таким образом две взаимно перпендикулярные *когерентные* волны при наложении ответственны за любой тип поляризации.

Таким образом две взаимно перпендикулярные *когерентные* волны при наложении ответственны за любой тип поляризации.

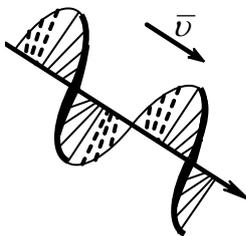


Рис.5

Следует заметить, что вращение вектора  $\vec{E}$  вдоль луча образует спираль векторов, которая равномерно перемещается параллельно лучу со скоростью электромагнитной волны (рис.5).

Волна, в которой колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, называется *частично поляризованной*. Ее можно представить как наложение естественного и плоскополяризованного света.

### 3.2. Прохождение света через турмалин.

#### Закон Малюса (1810г.)

Для анализа характера световых колебаний используются приборы, называемые *поляризаторами*, частным примером служат кристаллы турмалина. Вырезанные из них пластинки, параллельные оптической оси  $OO'$  кристалла и плоскости поляризатора, которая параллельна оси, обладают способностью пропускать колебания, параллельные плоскости и задерживать колебания, перпендикулярные плоскости. Таким образом из естественного света получается плоскополяризованный.

В естественном свете интенсивности волн  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_y$  равны, поляризатор  $\Pi$  пропускает только волну с (рис.6) амплитудой  $A_{\parallel}$ , поэтому интенсивность плоскополяризованного света  $J_0$  и интенсивность естественного света  $J_{ест}$  связаны соотношением

$$J_0 = \frac{1}{2} J_{ест} \quad (2)$$

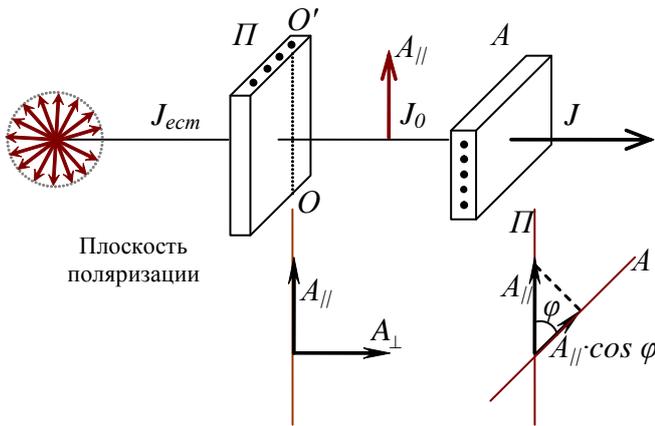


Рис.6

Второй поляризатор анализирует плоскополяризованный свет и называется **анализатором** ( $A$ ). Амплитуда света, прошедшего через анализатор зависит от угла  $\varphi$  между осями поляризатора и анализатора,  $A = A_{||} \cdot \cos \varphi$ . Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды  $J = A_{||}^2 \cdot \cos^2 \varphi$  ( $J_0 \approx A_{||}^2$ ). Окончательно свет, прошедший через поляризатор и анализатор, имеет интенсивность

$$J = \frac{1}{2} J_{ест} \cdot \cos^2 \varphi \quad (3)$$

Это соотношение называется **законом Малюса**.

При параллельных поляризаторах  $\varphi = 0$ , наблюдается максимальная интенсивность  $J = \frac{1}{2} J_{ест}$ . Скрещенные поляризаторы,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , свет не пропускают.

Отсюда следует, за один полный поворот анализатора интенсивность дважды достигает максимума  $J_{max}$  и дважды достигает минимума  $J_{min}$ .

Для описания изменения поляризации света пользуются **степенью поляризации**

$$P = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max} + J_{min}} \quad (4)$$

Степень поляризации естественного света  $P = 0$ , т.к.  $J_{max} = J_{min}$ , у плоскополяризованного света  $P = 1$ , т.к.  $J_{min} = 0$ .

### 3.3. Поляризация при отражении и преломлении. Закон Брюстера (1815г.)

Когда световая волна проходит через границу раздела двух сред, то свет

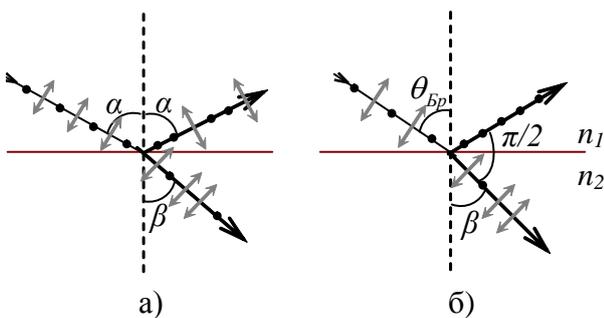


Рис.7

частично отражается, частично преломляется. Лучи отраженный и преломленный лежат в плоскости падения (плоскость, проведенная через падающий луч и нормаль к поверхности), оба луча частично поляризованы. В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рис.7а эти колебания обозначены точками и называются скольз-

щими). В преломленном луче – колебания, параллельные плоскости падения (колебания обозначены стрелками и называются бьющими). Падающий луч естественного света представлен как наложение двух плоскополяризованных некогерентных волн, вектора  $\vec{E}$  в которых лежат во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Экспериментом установлено, что у волны, электрический вектор которой лежит в плоскости падения, при угле  $\theta_B$  отраженная волна полностью отсутствует (рис. 7б). в отраженной волне имеется лишь компонента напряженности электрического поля, перпендикулярная плоскости падения, т.е. отраженный свет полностью поляризован.

Это явление открыто Д. Брюстером, называется **явлением Брюстера**, а угол  $\theta_B$  – углом Брюстера.

По **закону Брюстера свет полностью поляризован при угле падения  $\theta_B$ , удовлетворяющем условию:**

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления, граничащих среду.

Следует заметить, что **преломленный луч остается частично поляризованным, в нем преобладают компоненты напряженности электрического поля, лежащие в плоскости падения. При естественном падающем луче преломленный луч никогда не будет полностью поляризован. Степень его поляризации максимальна при угле падения Брюстера.**

При выполнении закона Брюстера

$$\frac{\sin \theta_B}{\cos \theta_B} = \frac{n_2}{n_1},$$

по закону преломления света

$$\frac{\sin \theta_B}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6)$$

следовательно

$$\cos \theta_B = \sin \beta \quad (7)$$

и

$$\theta_B + \beta = \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Таким образом **при падении света на границу двух прозрачных веществ под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.**

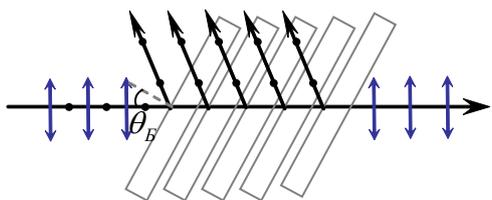


Рис. 8

Преломленный луч может быть полностью поляризован при условии многократного отражения от ряда параллельных пластинок, ориентированных под углом Брюстера к падающему лучу (рис. 8). Эта система называется **стопой Столетова**.

### 3.4. Поляризация при двойном лучепреломлении. Анизотропные среды

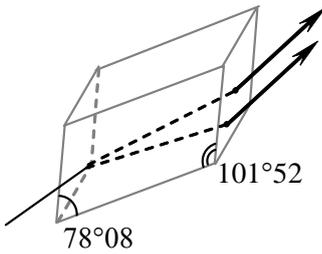


Рис.9

Рассмотрим еще один факт из области поляризационных явлений. Прохождение света через все прозрачные кристаллы (за исключением кристаллов кубической системы) связано с рядом своеобразных явлений. В 1669г. Эразм Бартолинус наблюдал, что при прохождении через исландский штап световой луч разбивается на два. Это явление называется **двойным лучепреломлением** (рис.9). Исландский шпат представляет собой разновидность углекислого кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), встречается в

естественном состоянии в виде довольно больших и оптически чистых образцов, обладают чрезвычайно ярко выраженным явлением двойного лучепреломления.

Даже в том случае, когда первичный пучок нормален к грани кристалла (рис.10), т.е. угол падения равен нулю, преломленный пучок делится на два.

По закону преломления света луч в кристалле должен идти в прежнем направлении, если луч отклонился, то для него не выполняется этот закон. Это дало повод первый луч назвать **обыкновенным (o)**, а второй – **необыкновенным (e)**.

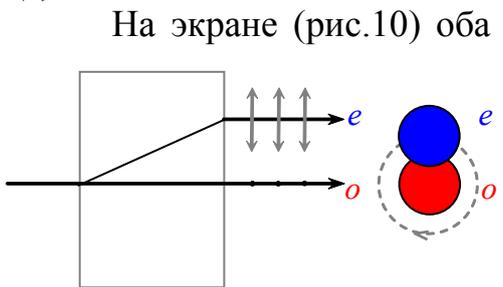


Рис.10

На экране (рис.10) оба луча дадут светлые кружки, при поворачивании кристалла вокруг оси, совпадающей с падающим лучом, кружок **o** остается на месте, он неподвижен, а кружок **e** перемещается по кругу. Яркость обоих пучков одинакова. Т.о. необыкновенный луч не лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к преломляющей поверхности, это тоже отступление от законов геометрической оптики.

Кроме твердых кристаллов, двойное лучепреломление наблюдается у жидких кристаллов, у аморфных тел при деформации, у жидкости в электрическом поле.

Такие кристаллы, как исландский шпат, кварц и др. называются **одноосными**, у них имеется лишь одно направление, вдоль которого лучи обыкновенный и необыкновенный распространяются **с одной скоростью не разделяясь**. Это направление есть **оптическая ось кристалла**. Соответственно у **двуосных** кристаллов таких направлений два.

В некоторых кристаллах поглощение обыкновенного и необыкновенного лучей различно, это явление **дихроизма**. В кристалле турмалина толщиной в **1мм** обыкновенный луч поглощается полностью. В кристалле сульфата йодистого хинина достаточно пути в **0,1мм**. Это обстоятельство используется для изготовления **поляроидных пленок**: в целлулоидную пленку введено большое количество одинаково ориентированных кристалликов.

Двойное лучепреломление характерно для *анизотропных сред*. *Оптической анизотропией называется зависимость оптических свойств среды от направления. Она обусловлена зависимостью диэлектрических и магнитных свойств среды от направления.*

В изотропных средах оптические свойства не зависят от направления.

Оба луча, обыкновенный и необыкновенный поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. *Плоскость, содержащая оптическую ось и данный луч, называется главным сечением или главной плоскостью кристалла, соответствующей этому лучу.* Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна к главному сечению. В необыкновенном луче колебания светового вектора совершаются в плоскости главного сечения.

### 3.5. Сущность двойного лучепреломления. Волновые поверхности в одноосных кристаллах

*Полная анизотропия среды складывается из анизотропии свойств отдельных атомов и из анизотропии их упорядочения в пространстве.*

Закономерности распространения света в любой среде (изотропной или анизотропной) определяются интерференцией первичной волны и вторичных волн, излучаемых молекулами.

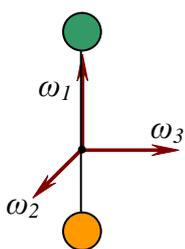


Рис.11

Анизотропная среда состоит из вытянутых несферических молекул (рис.11), каждая молекула есть осциллятор, имеющий собственные частоты колебаний  $\omega_1$ , и  $\omega_2 = \omega_3$ . Такая анизотропия осцилляторов обусловлена сильным взаимодействием со стороны кристаллической решетки.

В кристаллах диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  среды зависит от направления, показатель преломления среды  $n = \sqrt{\epsilon}$  и скорость световой волны  $v = c/n$ , следовательно, так же зависят от направления. Если рассматривать среду как однородную и оптически неактивную, то зависимость диэлектрической проницаемости от направления поддается графической интерпретации.

Выделим в кристалле плоскость главного сечения и рассмотрим лучи, исходящие из точки  $O$  в различных направлениях (лучи 1, 2 и 3). На рис.12 оптические оси обозначены пунктирными линиями, плоскостью главного сечения является плоскость рисунка.

*Обыкновенный луч поляризован в плоскости главного сечения*, а т.к. плоскость колебаний электрического вектора перпендикулярна плоскости главного сечения, лучи 1,2 и 3 (рис.12а) отмечены точками. Осцилляторы (рис.11) совершают вынужденные колебания одного направления, совпадающего с направлением собственных колебаний  $\omega_2$ . Следовательно, лучи 1,2,3, колебания в которых происходят в направлении, перпендикулярном плоскости главного сечения, распространяются с одинаковой скоростью  $v_0$ . Геометрическое место точек в пространстве, до которых лучи доходят за время  $\Delta t$  есть сфера. Делаем заключения: *волновой поверхностью обыкновенного луча является сфера, та-*

кая же, как в изотропной среде, поэтому обыкновенные лучи подчиняются закону преломления.

**Необыкновенный луч поляризован в плоскости, перпендикулярной к плоскости главного сечения** (рис.12б), колебания электрического вектора лежат в плоскости главного сечения. Луч 1 распространяется со скоростью  $v_o$ , т.к. вынужденные колебания осциллятора зависят от собственной частоты  $\omega_3 = \omega_2$ . Луч 3 распространяется со скоростью  $v_e \neq v_o$ , т.к. вынужденные колебания осциллятора зависят от собственной частоты  $\omega_1 \neq \omega_2$ . Луч 3 распространяется с промежуточной скоростью,  $v'_e \neq v_o$  и  $v'_e \neq v_e$ . **Волновой поверхностью необыкновенного луча является эллипсоид вращения, т.к. скорость распространения луча зависит от направления. Вдоль оптической оси обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются с одинаковыми скоростями. Для необыкновенных лучей не выполняется закон преломления света.**

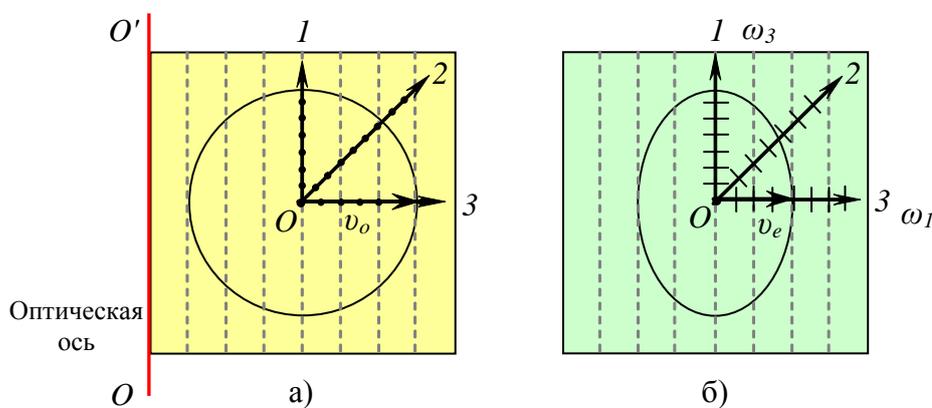


Рис.12

Различают **положительные** (рис.13а) и **отрицательные** кристаллы (рис.13б). У положительных кристаллов  $v_o > v_e$  и  $n_o < n_e$ . У отрицательных кристаллов  $v_e > v_o$  и  $n_e < n_o$ .

Волновые поверхности можно считать **оптическими индикаторами среды. Несферичность необыкновенной волны является причиной двойного лучепреломления.**

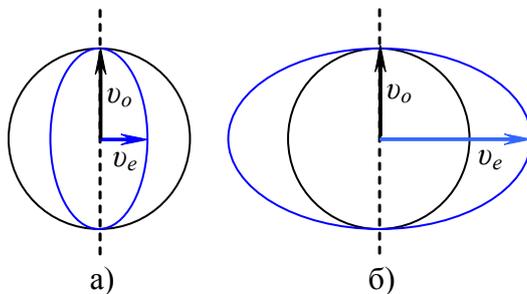


Рис.13