



**ДИСПЕРСИЯ И
ПОЛЯРИЗАЦИЯ
ТЕМА № 25
ФИЗИКА**

Явление дисперсии света

- *Дисперсией света называется зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (длины волны λ) света или зависимость фазовой скорости v световых волн от его частоты ν . Дисперсия света представляется в виде зависимости*

$$n = f(\lambda).$$

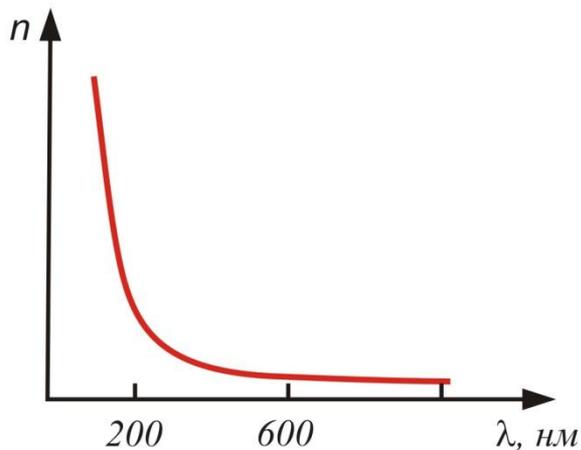
- Следствием дисперсии является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму. Первые экспериментальные наблюдения дисперсии света принадлежат И. Ньютону.
- Угол у вершины призмы A называется преломляющим. Можно показать, что угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше угол A и коэффициент преломления:

$$\phi = A(n - 1).$$

Различия в дифракционном и призматическом спектрах.

- 1. Дифракционная решетка разлагает падающий свет по длинам волн, поэтому по измеренным положениям соответствующих максимумов можно вычислить длину волны. Разложение света в спектр в призме происходит по значениям показателя преломления, поэтому для определения длины волны света надо знать зависимость $n = f(\lambda)$.
- 2. Составные цвета в дифракционном и призматическом спектрах располагаются различно. ***В дифракционной решетке синус угла отклонения пропорционален длине волны,*** поэтому ***красные лучи***, имеющие большую длину волны, чем фиолетовые, ***отклоняются дифракционной решеткой сильнее.***
- Призма же разлагает лучи в спектр по значениям ***показателя преломления***, который ***для всех прозрачных веществ с увеличением длины волны уменьшается.*** Поэтому ***красные лучи отклоняются призмой слабее, чем фиолетовые.***

- Величина $D = dn/d\lambda$, называемая **дисперсией вещества**, показывает, насколько быстро изменяется показатель преломления с длиной волны.
- **Показатель преломления для прозрачных веществ с уменьшением длины волны увеличивается**; следовательно, величина $dn/d\lambda$ по модулю также увеличивается с уменьшением λ . **Такая дисперсия называется нормальной.**



- Ход кривой $n(\lambda)$ - **кривой дисперсии** - вблизи линий и полос поглощения иной: n уменьшается с уменьшением λ . Такой ход зависимости n от λ называется **аномальной дисперсией**.

Электронная теория дисперсии света

- Из макроскопической электромагнитной теории Максвелла следует, что абсолютный показатель преломления среды

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu},$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды, μ - магнитная проницаемость. В оптической области спектра для всех веществ $\mu \approx 1$, поэтому

$$n = \sqrt{\varepsilon}.$$

- Выявляются некоторые противоречия с опытом: величина n , являясь переменной, остается в то же время равной определенной постоянной. Кроме того, *значения n , получаемые из этого выражения, не согласуются с опытными значениями.* Трудности объяснения дисперсии света с точки зрения электромагнитной теории Максвелла устраняются электронной теорией Лоренца.

- *В теории Лоренца дисперсия света рассматривается как результат взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами, входящими в состав вещества и совершающими вынужденные колебания в переменном электромагнитном поле волны.*

- Диэлектрическая проницаемость вещества равна

$$\varepsilon = 1 + \chi = 1 + P/(\varepsilon_0 E),$$

где χ - диэлектрическая восприимчивость среды, ε_0 - электрическая постоянная, P - мгновенное значение поляризованности. Следовательно,

$$n^2 = 1 + P/(\varepsilon_0 E),$$

т.е. зависит от P . В данном случае *основное значение имеет электронная поляризация*, т.е. вынужденные колебания электронов под действием электрической составляющей поля волны, так как *для поляризации молекул частота колебаний в световой волне слишком высока* ($\nu \approx 10^{15}$ Гц).

- В первом приближении можно считать, что вынужденные колебания совершают только внешние, наиболее слабо связанные с ядром электроны - *оптические электроны*.
- Наведенный дипольный момент электрона, совершающего вынужденные колебания, равен $p = e \cdot x$, где e - заряд электрона, x - смещение электрона под действием электрического поля световой волны. Если концентрация атомов в диэлектрике равна n_0 , то *мгновенное значение поляризованности*

$$P = n_0 p = n_0 e \cdot x.$$

- Отсюда

$$n^2 = 1 + n_0 e \cdot x / (\epsilon_0 E).$$

- Следовательно, *задача сводится к определению смещения x электрона под действием внешнего поля E* . Поле световой волны будем считать функцией частоты ω , т. е. изменяющимся по гармоническому закону: $E = E_0 \cos \omega t$.

- Уравнение вынужденных колебаний электрона для простейшего случая (без учета силы сопротивления, обуславливающей поглощение энергии падающей волны) имеет вид

$$m\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F}{m} \cos \omega t = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t, \quad (*)$$

где $F_0 = eE_0$ - амплитудное значение силы, действующей на электрон со стороны поля волны, ω_0 - собственная частота колебаний электрона, m - масса электрона.

- Решив уравнение (*), найдем $\varepsilon = n^2$ в зависимости от констант атома (e, m, ω_0) и частоты ω внешнего поля, т.е. решим задачу дисперсии.

- *Решение уравнения (*) имеет вид*

$$x = A \cdot \cos \omega t,$$

где

$$A = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

- Таким образом, абсолютный показатель преломления среды

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

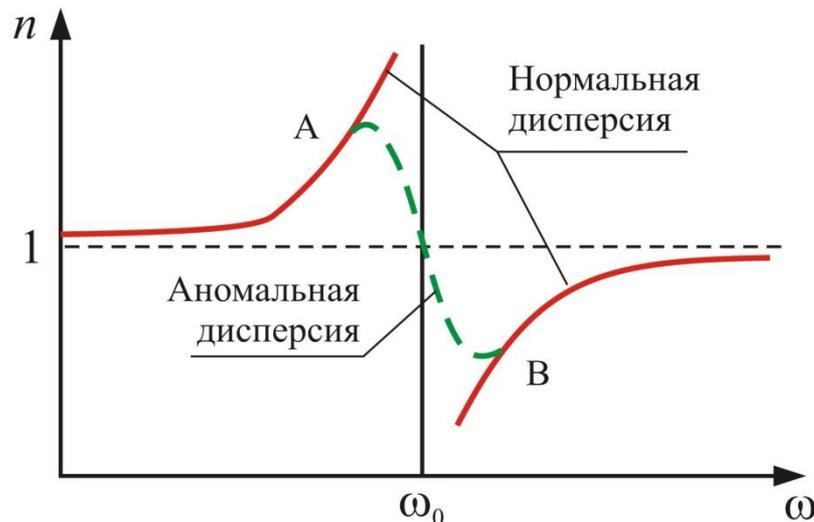
- Если в веществе имеются различные заряды e_i , совершающие вынужденные колебания с различными собственными частотами ω_{0i} , то

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\varepsilon_0} \sum_i \frac{e_i^2 / m_i}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)},$$

где m_i - масса i -го заряда.

- Итак, **показатель преломления n зависит от частоты ω внешнего поля**, т. е. полученные зависимости действительно подтверждают явление дисперсии света.
- В области от 0 до ω_0 показатель преломления n больше единицы и возрастает с увеличением ω (нормальная дисперсия).

- При $\omega = \omega_0$ $n = \pm\infty$; в области от ω_0 до ∞ n меньше единицы и возрастает до 1 (нормальная дисперсия).



- Такое поведение n вблизи ω_0 - результат допущения об отсутствии сил сопротивления при колебаниях электронов. Если принять в расчет и это обстоятельство, то график функции $n(\omega)$ вблизи ω_0 будет иметь вид штриховой линии AB . Область AB - область аномальной дисперсии (n убывает при возрастании ω), остальные участки зависимости n от ω описывают нормальную дисперсию (n возрастает с возрастанием ω).

Поглощение (абсорбция) света

- *Поглощением (абсорбцией) света называется явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе вследствие преобразования энергии волны в другие виды энергии.*

- Поглощение света в веществе описывается *законом Бугера:*

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где I_0 и I - интенсивности плоской монохроматической световой волны на входе и выходе слоя поглощающего вещества толщиной x ,

α - *коэффициент поглощения*, зависящий от длины волны света, химической природы и состояния вещества и не зависящий от интенсивности света.

- При $x = 1/\alpha$ интенсивность света I по сравнению с I_0 уменьшается в e раз.

- Коэффициент поглощения зависит от длины волны λ (или частоты ω) и для различных веществ различен.
- Так, у *одноатомных газов и паров металлов* коэффициент поглощения близок к нулю и лишь для очень узких спектральных областей (примерно $10^{-12} \dots 10^{-11}$ м) наблюдаются резкие максимумы (так называемый *линейчатый спектр поглощения*). Эти линии соответствуют частотам собственных колебаний электронов в атомах.
- *Спектр поглощения молекул*, определяемый колебаниями атомов в молекулах, характеризуется *полосами поглощения* (примерно $10^{-10} \dots 10^{-7}$ м).
- Коэффициент поглощения для *диэлектриков* невелик (примерно $10^{-3} \dots 10^{-5}$ см⁻¹), однако у них наблюдается *сплошной спектр поглощения*. Это связано с тем, что в диэлектриках нет свободных электронов.

- *Коэффициент поглощения для металлов имеет большие значения* (примерно $10^3 \dots 10^5 \text{ см}^{-1}$) и поэтому *металлы являются непрозрачными для света.*
- В металлах из-за наличия свободных электронов, движущихся под действием электрического поля световой волны, возникают быстропеременные токи, сопровождающиеся выделением джоулевой теплоты. Поэтому энергия световой волны быстро уменьшается, превращаясь во внутреннюю энергию металла.
- *Чем выше проводимость металла, тем сильнее в нем поглощение света.*
- *Зависимостью коэффициента поглощения от длины волны объясняется окрашенность поглощающих тел.*
- Например, стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи и сильно поглощающее зеленые и синие, *при освещении белым светом будет казаться красным.*

Эффект Доплера

- Эффект Доплера наблюдается при движении относительно друг друга источника и приемника электромагнитных волн. *Частота световых волн, воспринимаемых приемником, определяется только относительной скоростью источника и приемника.* Закономерности эффекта Доплера для электромагнитных волн устанавливаются на основе специальной теории относительности.
- Теория относительности приводит к следующей формуле, описывающей *эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме:*

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}{1 + (v / c) \cos \theta} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \theta},$$

где ν - скорость источника света относительно приемника, c - скорость света в вакууме, $\beta = v/c$, θ - угол между вектором скорости v и направлением наблюдения, измеряемый в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

- При $\theta = 0$ наблюдают продольный эффект Доплера:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - v/c}}{\sqrt{1 + v/c}} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta}}{\sqrt{1 + \beta}}.$$

- При малых скоростях сближения или расхождения

$$\nu = \nu_0(1 - v/c) = \nu_0(1 - \beta).$$

- При удалении источника и приемника друг от друга (**при их положительной относительной скорости**) наблюдается сдвиг в более длинноволновую область ($\nu < \nu_0, \lambda > \lambda_0$) - так называемое **красное смещение**. При сближении же источника и приемника (**при их отрицательной относительной скорости**) наблюдается сдвиг в более коротковолновую область ($\nu > \nu_0, \lambda < \lambda_0$) - так называемое **фиолетовое смещение**.
- Если $\theta = \pi/2$ наблюдают поперечный эффект Доплера:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - (v^2 / c^2)} = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}.$$

Поляризация света

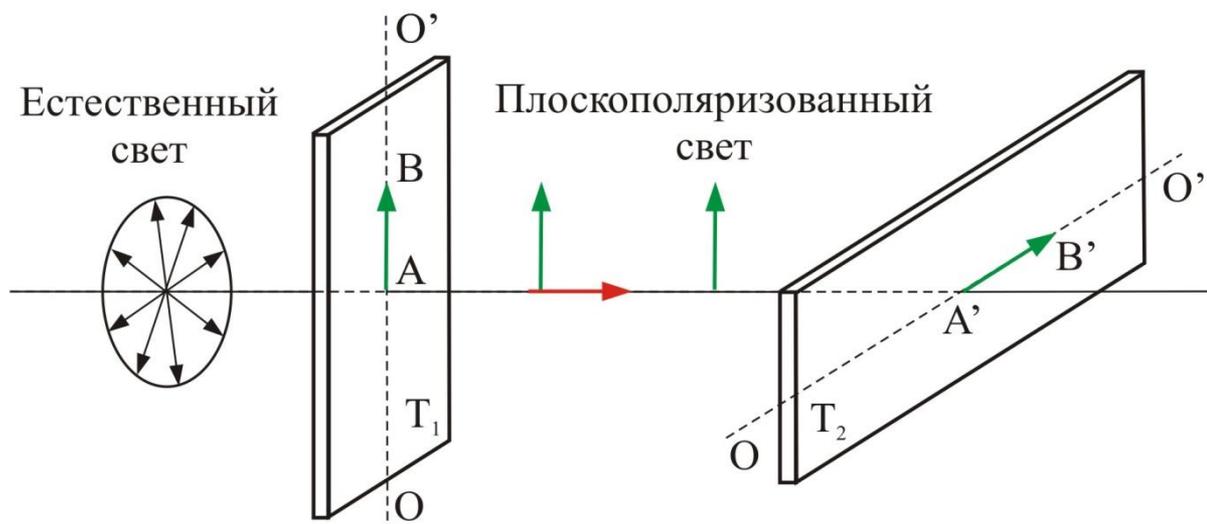
- Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряженностей электрического E и магнитного H полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости v распространения волны (перпендикулярно лучу). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно *светового вектора* - вектора напряженности 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).
- Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется *поляризованным*.

- Свет, в котором вектор E (и, следовательно, H) 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**. Плоскополяризованный свет является предельным случаем **эллиптически поляризованного света** - света, для которого вектор E (вектор H) изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной лучу.
- **Степенью поляризации** называется величина

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

где I_{max} и I_{min} - соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

- *Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный*, используя так называемые *поляризаторы*, пропускающие колебания только определенного направления (например, пропускающие колебания, параллельные главной плоскости поляризатора, и полностью задерживающие колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора E , например кристаллы (следует отметить турмалин).



- Пластика T_1 , преобразующая естественный свет в плоскополяризованный, является *поляризатором*. Пластика T_2 , служащая для анализа степени поляризации света, называется *анализатором*.
- Обе пластики совершенно одинаковы (их можно поменять местами).
- Если пропустить естественный свет через два поляризатора, главные плоскости которых образуют угол α , то из первого выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого $I_0 = 1/2 I_{\text{ест}}$, из второго выйдет свет интенсивностью $I = I_0 \cos^2 \alpha$. Следовательно, интенсивность света, прошедшего через два поляризатора,

$$I = 1/2 I_{\text{ест}} \cos^2 \alpha,$$

откуда $I_{\text{max}} = 1/2 I_{\text{ест}}$ (поляризаторы параллельны) и $I_{\text{min}} = 0$ (поляризаторы скрещены).

Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков

- Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Было установлено, что *отраженный и преломленный лучи частично поляризованы*: при поворачивании анализатора вокруг лучей интенсивность света периодически усиливается и ослабевает (полного гашения не наблюдается!), при этом в *отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения, а в преломленном - колебания, параллельные плоскости падения.*
- *Степень поляризации* (степень выделения световых волн с определенной ориентацией электрического (и магнитного) вектора) *зависит от угла падения лучей и показателя преломления.*

- Шотландский физик Д. Брюстер установил закон, согласно которому *при угле падения i_B* (угол Брюстера), определяемого соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}$$

отраженный луч является плоскополяризованным

(n_{21} - показатель преломления второй среды относительно первой). *Преломленный же луч при угле падения i_B поляризуется максимально, но не полностью.*

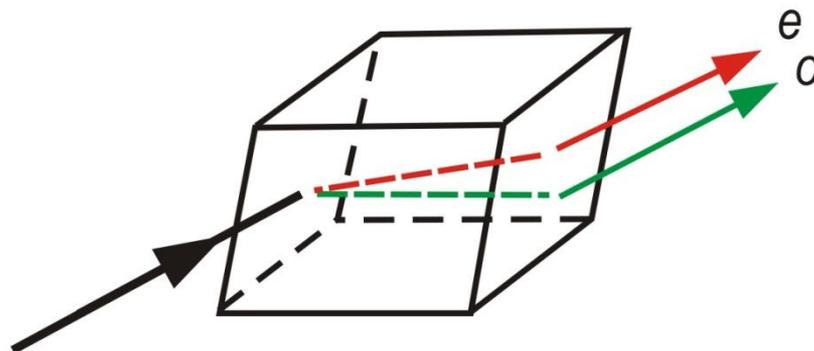
- Если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи *взаимно перпендикулярны*

$$i'_B + i_{\text{преломл.}} = \pi/2.$$

- Степень поляризации преломленного света может быть значительно повышена многократным преломлением (несколько стеклянных пластинок с воздушными зазорами) при условии падения света каждый раз на границу раздела под углом Брюстера.

Двойное лучепреломление

- Все прозрачные кристаллы (кроме кристаллов кубической системы, которые оптически изотропны) обладают способностью *двойного лучепреломления*, т. е. раздваивания каждого падающего на них светового пучка. Это явление, впервые обнаруженное датским ученым Э. Бартолином для исландского шпата, объясняется особенностями распространения света в анизотропных средах и непосредственно вытекает из уравнений Максвелла.
- Если на толстый кристалл исландского шпата направить узкий пучок света, то *из кристалла выйдут два пространственно разделенных луча, параллельные друг другу*. Даже в том случае, когда первичный пучок падает на кристалл нормально, преломленный пучок разделяется на два, причем один из них является продолжением первичного, а второй отклоняется. Второй из этих лучей получил название *необыкновенного* (e), а первый - *обыкновенного* (o).



В кристалле исландского шпата имеется единственное направление, вдоль которого двойное лучепреломление не наблюдается. Направление в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления, называется *оптической осью кристалла*. В данном случае речь идет именно о *направлении*, а не о прямой линии, проходящей через какую-то точку кристалла. *Любая прямая, проходящая параллельно данному направлению, является оптической осью кристалла*. Кристаллы в зависимости от типа их симметрии бывают одноосные и двуосные, т.е. имеют одну или две оптические оси (к первым и относится исландский шпат).

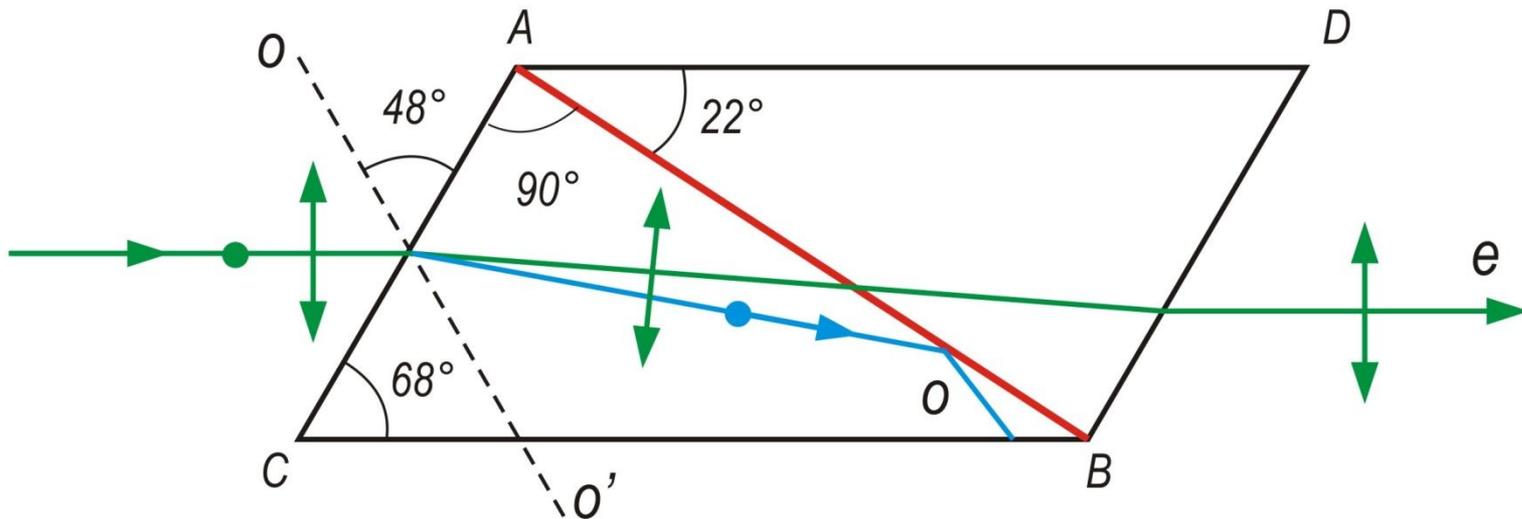
- Исследования показывают, что вышедшие из кристалла лучи *плоскополяризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях*. Плоскость, проходящая через направление луча света и оптическую ось кристалла, называется *главной плоскостью* (или *главным сечением* кристалла). Колебания светового вектора (вектора напряженности E электрического поля) в обыкновенном луче происходят перпендикулярно главной плоскости, в необыкновенном - в главной плоскости.
- Неодинаковое преломление обыкновенного и необыкновенного лучей указывает на различие для них показателей преломления. *При любом направлении обыкновенного луча колебания светового вектора перпендикулярны оптической оси кристалла*, поэтому обыкновенный луч распространяется по всем направлениям с одинаковой скоростью и, следовательно, показатель преломления n_o для него есть величина постоянная.

- *Для необыкновенного же луча* угол между направлением колебаний светового вектора и оптической осью отличен от прямого и зависит от направления луча, поэтому *необыкновенные лучи распространяются по различным направлениям с разными скоростями.*
- *Показатель преломления n_e необыкновенного луча является переменной величиной, зависящей от направления луча.*
- Таким образом, обыкновенный луч подчиняется закону преломления (отсюда и название «обыкновенный»), а для необыкновенного луча этот закон не выполняется.
- После выхода из кристалла, если не принимать во внимание поляризацию во взаимно перпендикулярных плоскостях, эти два луча ничем друг от друга не отличаются.

Поляризационные призмы и поляроиды

- В основе работы поляризационных приспособлений, служащих для получения поляризованного света, лежит явление двойного лучепреломления. Наиболее часто для этого применяются *призмы* и *поляроиды*. Призмы делятся на два класса:
 - 1) призмы, дающие только плоскополяризованный луч (*поляризационные призмы*);
 - 2) призмы, дающие два поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях луча (*двойко-преломляющие призмы*).
- Поляризационные призмы построены по принципу полного отражения одного из лучей (например, обыкновенного) от границы раздела, в то время как другой луч с другим показателем преломления проходит через эту границу. Типичным представителем поляризационных призм является *призма Николя*, называемая часто *ником*.

- Призма Николя представляет собой двойную призму из исландского шпата, склеенную вдоль линии AB канадским бальзамом с $n = 1,55$. Оптическая ось OO' призмы составляет с входной гранью угол 48° . На передней грани призмы естественный луч, параллельный ребру CB , раздваивается на два луча: обыкновенный ($n_o = 1,66$) и необыкновенный ($n_e = 1,51$).



- При соответствующем подборе угла падения, равного или большего предельного, *обыкновенный луч* испытывает полное отражение (канадский бальзам для него является оптически менее плотной средой), а затем *поглощается зачерненной боковой поверхностью СВ. Необыкновенный луч выходит из кристалла параллельно падающему лучу, незначительно смещенному относительно него (ввиду преломления на наклонных гранях AC и BD).*
- *Двоякопреломляющие призмы* используют различие в показателях преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, чтобы развести их возможно дальше друг от друга.
- Примером двоякопреломляющих призм могут служить призмы из исландского шпата и стекла, призмы, составленные *из двух призм из исландского шпата со взаимно перпендикулярными оптическими осями.*

Искусственная оптическая анизотропия

- Двойное лучепреломление имеет место в естественных анизотропных средах. Существуют, однако, различные способы получения *искусственной оптической анизотропии*, т. е. *сообщения оптической анизотропии естественно изотропным веществам*.
- Оптически изотропные вещества становятся оптически анизотропными под действием: 1) одностороннего сжатия или растяжения (кристаллы кубической системы, стекла и др.); 2) электрического поля (*эффект Керра*; жидкости, аморфные тела, газы); 3) магнитного поля (жидкости, стекла, коллоиды). В перечисленных случаях *вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлением деформации, электрического или магнитного полей* соответственно указанным выше воздействиям.

- Мерой возникающей оптической анизотропии служит разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном оптической оси: $n_0 - n_e = k_1 \sigma$ (в случае деформации);
 $n_0 - n_e = k_2 E^2$ (в случае электрического поля);
 $n_0 - n_e = k_3 H^2$ (в случае магнитного поля),

где k_1, k_2, k_3 - постоянные, характеризующие вещество, σ - нормальное напряжение, E и H - соответственно напряженность электрического и магнитного полей.

- **Эффект Керра** - оптическая анизотропия веществ под действием электрического поля - объясняется **различной поляризуемостью молекул жидкости по разным направлениям**. Это явление практически безынерционно, т. е. время перехода вещества из изотропного состояния в анизотропное составляет приблизительно 10^{-10} с.

- Поэтому ячейка Керра служит идеальным световым затвором и применяется в быстропротекающих процессах (звукозапись, воспроизводство звука, скоростная фото- и киносъемка, изучение скорости распространения света и т. д.), в оптической локации, в оптической телефонии и т. д.
- Некоторые вещества (например, из твердых тел - кварц, сахар, киноварь, из жидкостей - водный раствор сахара, винная кислота, скипидар), называемые *оптически активными, обладают способностью вращать плоскость поляризации.*
- Угол поворота плоскости поляризации для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\phi = \alpha d,$$

для оптически активных растворов

$$\phi = \alpha C d,$$

где d - расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе,

α - так называемое *удельное вращение*, численно равное 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^3 .

- Удельное вращение зависит от природы вещества, температуры и длины волны света.
- Оптическая активность обуславливается как строением молекул вещества (их асимметрией), так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке.
- Явление вращения плоскости поляризации используется для точного определения концентрации растворов оптически активных веществ.

Вопросы, выносимые на семинар:

1. Явление дисперсии света.
2. Электронная теория дисперсии света.
3. Поглощение (абсорбция) света.
4. Эффект Доплера.
5. Поляризация света.
6. Поляризация света на границе двух диэлектриков.
Двойное лучепреломление.
7. Поляризационные призмы и поляроиды.
8. Искусственная оптическая анизотропия.