Лекция 25. Поляризация света.

Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса. Закон Брюстера. Распространение электромагнитных волн в одноосных кристаллах. Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении. Поляризационные призмы и поляроиды.

Световые волны – это электромагнитные волны, поэтому они поперечные. В естественном свете все направления колебаний вектора $\vec{E}$ (относительно луча) являются равновероятными, т.к. волна естественного света – это результат суперпозиции волн от большого количества излучающая атомов.

Поляризованный свет – это свет, в котором направление колебаний вектора напряжённости электрического поля каким-то образом упорядочено. Если вектор $\vec{E}$ колеблется в одной плоскости, содержащей луч, то говорят, что свет является *плоско* (или *линейно*) поляризованным.

Если вектор $\vec{E}$ вращается вокруг луча, то говорят об *эллиптической* поляризации. (*Круговая* поляризация – это частный случай эллиптической поляризации.)

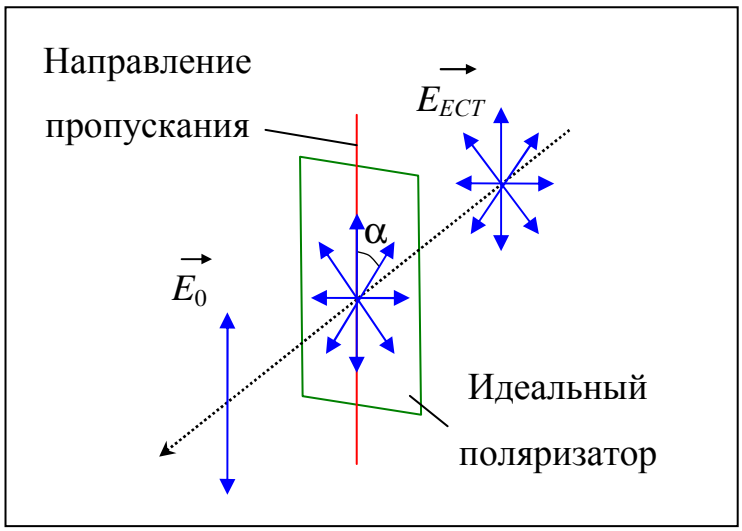
Введём декартову систему координат так, чтобы ось Z была направлена вдоль луча. Тогда световая волна распространяется вдоль оси Z, поэтому вектор напряженности лежит в плоскости XY, т.е. $\vec{E} = (E_X, E_Y, 0)$. Раскладывая $\vec{E} = \vec{E}_X + \vec{E}_Y$, где $\vec{E}_X = \left(E_{0X}\, sin(\omega t - kz + \alpha_X), 0, 0\right)$, $\vec{E}_Y = \left(0, E_{0Y}\, sin(\omega t - kz + \alpha_Y), 0\right)$ получаем, что конец вектора $\vec{E}$ совершает одновременно два взаимно перпендикулярных колебаний. Т.е. он описывает траекторию – фигуру Лиссажу. В зависимости от разности начальных фаз $\Delta\alpha = \alpha_Y - \alpha_X$ траекторией будет либо отрезок прямой – линейная поляризация, либо – эллипс (эллиптическая поляризация).

Поляризатор – это оптический прибор, приводящий к поляризации света. После прохождения через *идеальный поляризатор* получается линейно поляризованный свет, в котором отсутствуют колебания в определённом направлении. После прохождения через *несовершенный поляризатор* получается частично поляри-

enlib.ru

зованный свет – свет, у которого интенсивность в определённом направлении преобладает над интенсивностью в другом направлении.

Степень поляризации света $P = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}}$. Для линейно поляризованного света P=1. Для естественного света P=0. Для частично поляризованного $0 < P < 1$. *Замечание*. Степень поляризованности не применима к свету с эллиптической поляризацией.



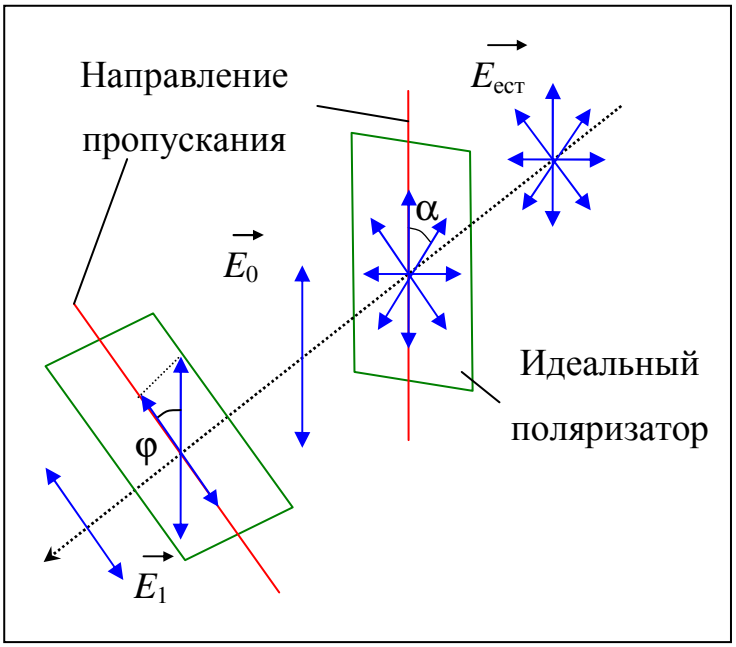
Рассмотрим идеальный поляризатор, через который проходит естественный свет.

Вещество поляризатора анизотропное по своим свойствам – его свойства в окрестности любой точки зависят от направления. Существует такое *направление пропускания*, что волна, в которой вектор $\vec{E}_{\parallel}$ параллелен этому направлению проходит беспрепятственно, а с перпендикулярным вектором $\vec{E}_{\perp}$ - нет. Но $E_{\parallel} = E\cos\alpha$, поэтому для интенсивности $I_{\parallel} \sim E_{\parallel}^2 = E^2\cos^2\alpha \sim I\cos^2\alpha$. В естественном свете все направления колебаний равноправны, поэтому углу $d\alpha$ соответствует интенсивность $I = \frac{I_{ECT}}{2\pi}d\alpha$. Тогда для интенсивности прошедшего света

$$I_0 = \sum_{\alpha} I_{\alpha\parallel} = \int_0^{2\pi} \frac{I_{ECT}}{2\pi}\cos^2\alpha d\alpha = I_{ECT}\int_0^{2\pi}\frac{\cos^2\alpha}{2\pi}d\alpha = \frac{I_{ECT}}{2}.$$

Т.е. через идеальный поляризатор проходит только половина от интенсивности естественного света.

enlib.ru



Теперь рассмотрим два идеальных поляризатора у которых направления пропускания расположены под углом φ друг к другу.

Так как после первого поляризатора свет выходит линейно-поляризованным, то в предыдущем рассуждении всё повториться, за исключением усреднения по углу φ (т.к. этот угол зафиксирован). После первого поляризатора выходит свет с интенсивностью $I_0 = \frac{I_{ECT}}{2}$, после второго $I_1 = I_0 \cos^2 \varphi$, поэтому

$$I_1 = \frac{I_{ECT}}{2} \cos^2 \varphi .$$

Это выражение носит название закона Малю'са.

В частности, система из двух идеальных поляризаторов может не пропускать свет полностью. Второй поляризатор таким образом позволяет определить поляризованный свет. Поэтому в такой оптической системе второй поляризатор принято называть *анализатором*.

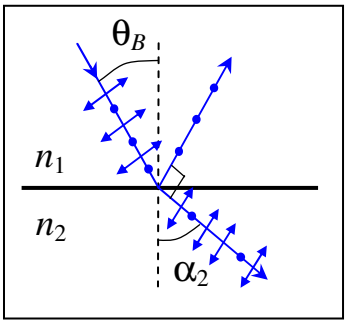
Однако если между поляризатором и анализатором, направления пропускания которых взаимно перпендикулярны, вставить третий идеальный поляризатор, направление пропускания которого не параллельно ни одному из направлений первых двух, то свет будет проходить через такую систему.

Замечание. Если свет поляризован по кругу, то интенсивность света не будет меняться при повороте поляризатора.

Для интенсивности частично поляризованного света можно записать выражение

$$I = I_{MIN} + \left(I_{MAX} - I_{MIN}\right) \cos^2 \varphi$$

enlib.ru



При падении естественного света на границу раздела прозрачных диэлектриков под углом Брюстера $tg\theta_B = \frac{n_2}{n_1}$ отраженная волна света будет линейно поляризованной, т.к. вектор $\vec{E}$ колеблется в плоскости, параллельной границе раздела. Прошедшая волна является частично поляризованной. При этом прошедший луч и преломлённый луч направлены перпендикулярны друг к другу.

Следовательно, если на границу прозрачных диэлектриков падает под углом Брюстера $tg\theta_B = \frac{n_2}{n_1}$ волна, поляризованная в плоскости падения, то отражённой волны *не будет*.

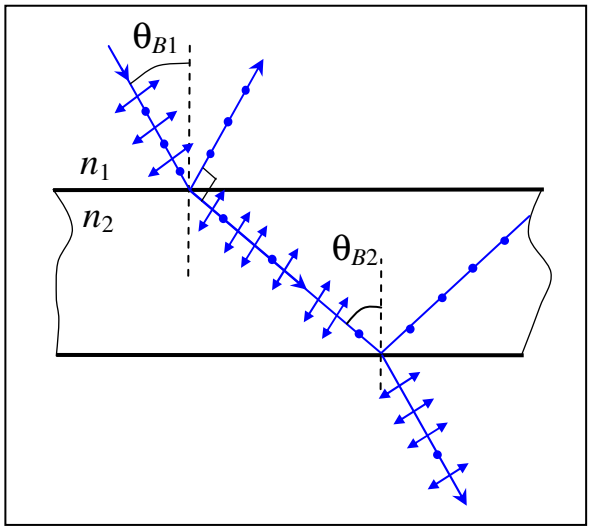
Замечание. В случае, когда волна падает под углом Брюстера, угол преломления тоже является углом Брюстера, но для лучей, идущих в обратном направлении - из 2й среды в 1ю. Действительно, т.к. $\alpha_2 = \pi - \frac{\pi}{2} - \theta_B = \frac{\pi}{2} - \theta_B$, то

$$tg\alpha_2 = tg\left(\frac{\pi}{2} - \theta_B\right) = \frac{sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_B\right)}{cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_B\right)} = \frac{cos\,\theta_B}{sin\,\theta_B} = \frac{1}{tg\theta_B} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Пример. Для границы воздух-стекло $tg\theta_{B1} = \frac{n_2}{n_1} \approx 1{,}5$, откуда $\theta_{B1} \approx 56{,}31^0$ для направления света из воздуха в стекло и $tg\theta_{B2} = \frac{n_1}{n_2} \approx 0{,}67$, откуда $\theta_{B2} \approx 33{,}82^0$ для обратного направления.

Стопа Столетова. Рассмотрим падение естественного света на стеклянную плоско пластинку под углом Брюстера $tg\theta_{B1} = \frac{n_2}{n_1}$. Тогда отражённый луч будет линейно-поляризован. Прошедший луч будет частично поляризован. Но нижнюю границу он падает тоже под углом Брюстера $tg\theta_{B2} = \frac{n_1}{n_2}$, поэтому отражённый луч также будет линейно-поляризован, а степень поляризации прошедшего луча увеличится. Если затем прошедший луч направить на такую же плоскопараллельную

enlib.ru



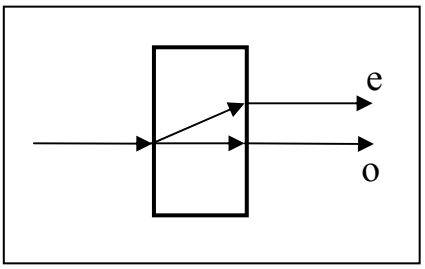
пластинку, то опять получим отражённые линейно-поляризованные лучи и на выходе из неё луч прошедший луч с большей степенью поляризации. Если пренебречь поглощением света в пластинках, то в идеальном случае большого числа пластин можно получить линейно-поляризованный отраженный и прошедший свет, интенсивности которых будут одинаковыми и равными половине интенсивности падающего света. Реальная конструкция содержит 8-10 пластин и носит название *стопа Столетова*.

Двойное лучепреломление.

Если естественный свет проходит через прозрачные кристаллы, решётка которых не является кубической, то наблюдается явление, заключающееся в том, что падающий луч внутри кристалла разделяется на два луча, распространяющихся в разных направлениях с разными скоростями. Это явление носит название двойного лучепреломления.

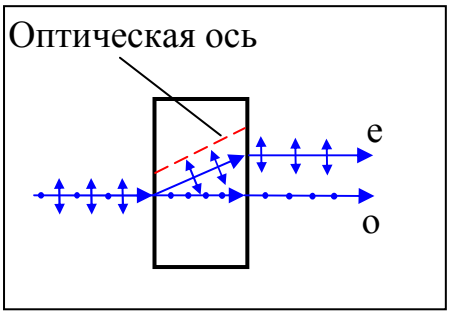
Кристаллы, в которых наблюдается двойное лучепреломление подразделяются на одноосные и двуосные.

Типичные одноосные кристаллы – исландский шпат, кварц, турмалин.
В таких кристаллах один из преломлённых лучей подчиняется обычным законам преломления, поэтому его называют *обыкновенным* лучом и обозначают «о» (о - *ordinary*), а второй не подчиняется законам преломления, поэтому его называют *необыкновенным* лучом и обозначают «е» (е - *extraordinary*). Даже при нормальном падении света необыкновенный луч может отклоняться от нормали. При этом необыкновенный луч не лежит в плоскости, содержащей падающий луч и нормаль к поверхности.



Но у одноосных кристаллов существует такое направление, что лучи распространяющиеся вдоль него не разделяются. Это направление называется

enlib.ru



главной оптической осью кристалла. *Любая* плоскость, параллельная оптической оси называется главной *оптической плоскостью* (главным сечением). Если рассмотреть прошедшие лучи, то окажется, что необыкновенный луч линейно поляризован так, что вектор $\vec{E}_e$ колеблется в главной плоскости содержащей необыкновенный луч, а у обыкновенного луча – в перпендикулярном направлении к главной плоскости, содержащей обыкновенный луч.

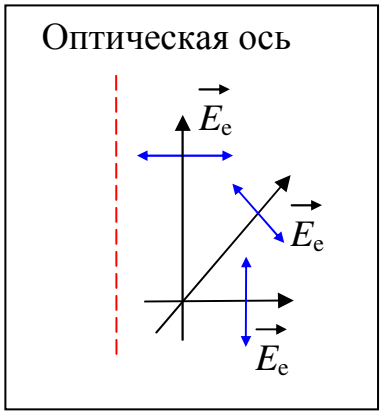
Двойное лучепреломление в кристалле исландского шпата (кальцита). Изображение цифры «1» снято сквозь кристалл в Минералогическом музее ОИГГиМ СО РАН.

У двуосных кристаллов существуют две оптические оси. Оба луча ведут себя как необыкновенные. Типичные представители – слюда, гипс.

Для изготовления поляризаторов используются вещества, у которых ярко выражено явление *дихроизма* – поглощения одного из лучей. Например, в турмалине обыкновенный луч практически полностью поглощается уже при толщине в 1 мм.

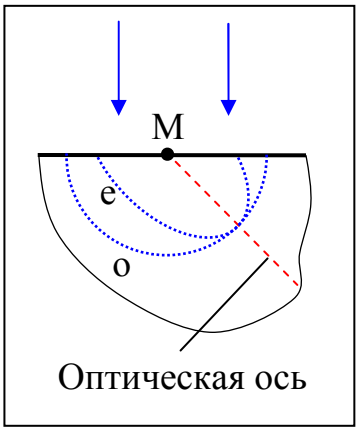
Двойное лучепреломление объясняется анизотропией диэлектрических свойств – величина относительной диэлектрической проницаемости зависит от

enlib.ru



направления внутри кристалла относительно оптической оси. У обыкновенного луча направление $\vec{E}_o$ всегда перпендикулярно главной плоскости содержащей этот луч, т.е. всегда перпендикулярно оптической оси, поэтому величина ε_o не меняется. У обыкновенного луча вектор $\vec{E}_e$ лежит в главной плоскости, содержащей этот луч, поэтому может быть как параллельным оптической, так и перпендикулярным ему. Следовательно, величина ε_e не постоянная.

Так как в оптически прозрачной среде $\mu \approx 1$ и поэтому $n \approx \sqrt{\varepsilon}$, то показатели преломления и фазовые скорости обыкновенного и необыкновенного лучей будут разными в направлении перпендикулярном оптической оси. Следовательно, фазовая скорость лучей будет одинаковой вдоль оптической оси и разной в перпендикулярном направлении. Кристаллы принято делить на положительные – это когда $n_o < n_e$, и отрицательные – в этом случае $n_o > n_e$.



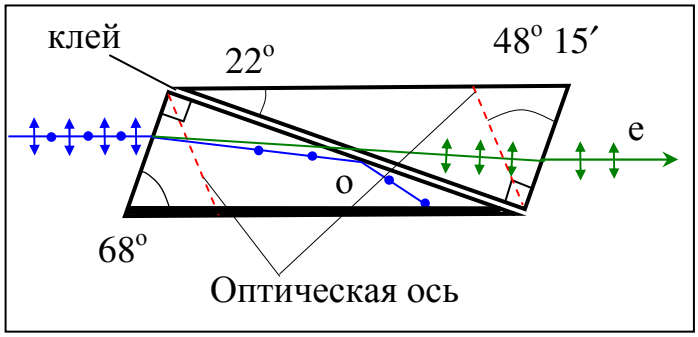
Рассмотрим, например, положительный кристалл. Внутри кристалла фазовая скорость обыкновенного луча больше фазовой скорости необыкновенного луча в направлении перпендикулярном оптической оси. Пусть оптическая ось наклонена к поверхности кристалла. Распространение волны можно описать по принципу Гюйгенса. Тогда обыкновенная и необыкновенная волны, испущенные одновременно точкой М на поверхности, будут двигаться одинаково вдоль оси. Но в перпендикулярном направлении необыкновенная волна будет отставать.

Пример. Призма Николя (николь) - поляризационное устройство, в основе принципа действия которого лежат эффекты двойного лучепреломления и полного внутреннего отражения. Устройство изобрёл Уильям Николь в 1820 г.

Призма Николя представляет собой две одинаковые треугольные призмы из исландского шпата, склеенные тонким слоем канадского бальзама. Призмы вытачиваются так, чтобы торец был скошен под углом 68° относительно направления

enlib.ru

проходящего света, а склеиваемые стороны составляли прямой угол с торцами. При этом оптические оси кристаллов параллельны друг другу и образуют угол $48^{o}15'$ с торцами призм. Призмы склеены между собой специальным клеем - канадским бальзамом, показатель преломления которого по величине находится между показателями преломления обыкновенного и необыкновенного лучей (Призма не может применяться для поляризации ультрафиолета, так как канадский бальзам поглощает ультрафиолет.)



Свет с произвольной поляризацией, проходя через торец призмы испытывает двойное лучепреломление, расщепляясь на два луча - обыкновенный, имеющий горизонтальную плоскость поляризации и необыкновенный, с вертикальной плоскостью поляризации. После чего обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение о плоскость склеивания и поглощается зачернённой нижней гранью. Необыкновенный луч беспрепятственно выходит через противоположный торец призмы.

Поляроид (поляризационный светофильтр) - один из основных типов оптических линейных поляризаторов; представляет собой тонкую поляризационную плёнку, заклеенную для защиты от механических повреждений и действия влаги между двумя прозрачными пластинками (плёнками).

Рассмотрим нормальное падение света на тонкую пластинку, вырезанную из одноосного кристалла, в котором оптическая ось направлена параллельно её грани. Т.е. свет падает перпендикулярно к её оптической оси. В этом случае не будет пространственного разделения на лучи «о» и «е». Но т.к. фазовые скорости зависят от направления поляризации волны, то на выходе из пластинки толщиной d у этих лучей появится оптическая разность хода $\Delta L = |n_o - n_e| d$, следовательно, появится разность фаз $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}|n_o - n_e| d$.

enlib.ru

В волне, вышедшей из пластинки $\vec{E} = \vec{E}_X + \vec{E}_Y$, где $\vec{E}_X = \left(E_{0X}\, sin\left(\omega t - kz + \alpha_X\right), 0, 0\right)$, $\vec{E}_Y = \left(0, E_{0Y}\, sin\left(\omega t - kz + \alpha_Y\right), 0\right)$ и $\Delta\alpha = \alpha_Y - \alpha_X = \frac{2\pi}{\lambda}\left|n_o - n_e\right| d$.

получаем, что конец вектора $\vec{E}$ фигуру Лиссажу. Вид этой фигуры зависит (для данного вещества) от толщины пластинки.

Если $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\left|n_o - n_e\right| d = \frac{\pi}{2} + \pi m$ то фигура будет эллипсом, откуда для толщины пластинки $\left|n_o - n_e\right| d = \frac{\lambda}{4} + \frac{m\lambda}{2} = \left(2m+1\right)\frac{\lambda}{4}$. Такой случай принято называть «пластинка в четверть волны». Волна, проходящая через пластинку в четверть волны, поляризована эллиптически.

Если $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\left|n_o - n_e\right| d = \pi m$ то фигура Лиссажу – отрезок прямой. В этом случае $\left|n_o - n_e\right| d = \frac{m\lambda}{2}$ - и получается «пластинка в полволны». Волна, соответственно, будет линейно-поляризована.

Предположим, что на пластинку падает линейно-поляризованная волна. Тогда пластинка в четверть «превратит» её в эллиптически поляризованную. А пластинка в полволны оставит линейную поляризацию, но при чётных *m* плоскость поляризации не изменится, а при нёчетных *m* повернётся на π/2.

Возможно также применение подобных пластинок для определения эллиптически поляризованного света – так называемых компенсаторов. Если на пути эллиптически поляризованного света поместить пластинку в «четверть волны», то он превратится в линейно-поляризованный. Линейно-поляризованный свет можно определить с помощью обычного поляризатора.

Естественное вращение. Некоторые вещества, называемые *оптически активными*, обладают способностью вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через них линейно поляризованного света. К числу таких веществ принадлежат кристаллические тела (например, кварц, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (водные растворы сахара, винной кислоты и др.).

enlib.ru

Помимо кристаллов двойное лучепреломление наблюдается в *искусственно анизотропных средах* (в стеклах, жидкостях и др.), помещенных в электрическое поле (*эффект Керра*), в магнитном поле (*эффект Фарадея)* (*эффект Коттона — Мутона*), под действием механических напряжений (*Фотоупругость*) и т. п. Во всех этих случаях среда становится оптически анизотропной, причём оптическая ось параллельна направлению электрического поля, магнитного поля и т. п.

Эффект Керра, или квадратичный электрооптический эффект - явление изменения значения показателя преломления оптического материала пропорционально второй степени напряженности приложенного электрического поля. (В сильных полях наблюдаются небольшие отклонения от закона Керра.)
Эффект Керра был открыт в 1875 году шотландским физиком *Джоном Керром*. Под воздействием внешнего постоянного или переменного электрического поля в среде может наблюдаться двойное лучепреломление, вследствие изменения поляризации вещества.

Эффект Поккельса (электрооптический эффект Поккельса) - это явление возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля. Он отличается от эффекта Керра тем, что линеен по полю, в то время как эффект Керра квадратичен. Эффект Поккельса может наблюдаться только в кристаллах, не обладающих центром симметрии: в силу линейности при изменении направления поля эффект должен менять знак, что невозможно в центрально-симметричных телах. Эффект хорошо заметен на кристаллах ниобата лития или арсенида галлия.

Эффект Фарадея (продольный электрооптический эффект Фарадея) - магнитооптический эффект, который заключается в том, что при распространении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света. Эффект был обнаружен *М. Фарадеем* в 1845 году. Эффект Фарадея тесно связан с эффектом Зеемана, заключающимся в расщеплении уровней энергии атомов в магнитном поле. При этом переходы между расщеплёнными уровнями происходят с испусканием фотонов правой и левой поляризации, что приводит к различ-

enlib.ru

ным показателям преломления и коэффициентам поглощения для волн различной поляризации. Строгое описание эффекта Фарадея проводится в рамках квантовой механики.

Эффект Коттона - Мутона (или *эффект Фохта*) - явление возникновения под действием магнитного поля в оптически изотропных средах двойного лучепреломления. При распространении света поперек вектора индукции магнитного поля поляризация остается линейной, то есть наблюдается обычное двойное лучепреломление, в отличие от эффекта Фарадея: при распространении света вдоль магнитного поля возникают две волны, поляризованные по кругу и имеющие разные показатели преломления, то есть наблюдается двойное круговое лучепреломление.

Исследования эффекта Коттона - Мутона позволяют получить информацию о структуре молекул, образовании межмолекулярных агрегатов и подвижности молекул.

Фотоупругость, (фотоэластический эффект, пьезооптический эффект) - возникновение оптической анизотропии в первоначально изотропных твёрдых телах (в том числе полимерах) под действием механических напряжений. Открыта Т.И. Зеебеком (1813) и Д. Брюстером (1816). Фотоупругость является следствием зависимости диэлектрической проницаемости вещества от деформации и проявляется в виде двойного лучепреломления и дихроизма, возникающих под действием механических нагрузок. При одноосном растяжении или сжатии изотропное тело приобретает свойства оптически одноосного кристалла с оптической осью, параллельной оси растяжения или сжатия. При более сложных деформациях, например при двустороннем растяжении, образец становится оптически двухосным.

Фотоупругость используется при исследовании напряжений в механических конструкциях, расчёт которых слишком сложен. Исследование двойного лучепреломления под действием нагрузок в выполненной из прозрачного материала модели (обычно уменьшенной) изучаемой конструкции позволяет установить характер и распределение в ней напряжений.

enlib.ru

Замечание. ЖК-монитор состоит из огромного числа маленьких пикселей.

Каждый такой пиксель состоит из триады раскрашенных жидко-кристаллических ячеек (красной, зелёной и синей). С двух сторон от жидкокристаллической панели приклеиваются линейные поляризаторы. Сзади располагается подсветка (сами ЖК-ячейки не светятся). Проходя через первую поляризационную плёнку, свет поляризуется. Напряжение на жидко-кристаллической ячейке заставляет сворачиваться её в спираль, при этом происходит изменение направления поляризации поляризованного света. После прохождения поляризованного света через вторую поляризованную плёнку происходит снижение интенсивности. Управляя напряжением на ячейке меняют угол «сворачивания» плоскости поляризации света. Таким способом управляют интенсивностью свечения отдельной ячейки. Три ячейки смешиванием образуют цвет пикселя, а весь монитор - полное изображение. Таким образом, на выходе любого цветного ЖК-монитора мы получаем поляризованный свет.

Эллипсометрия.

Эллипсометрия - совокупность методов изучения поверхностей жидких и твёрдых тел по состоянию поляризации светового пучка, отражённого этой поверхностью и преломлённого на ней. Падающий на поверхность плоско поляризованный свет приобретает при отражении и преломлении эллиптическую поляризацию вследствие наличия тонкого переходного слоя на границе раздела сред. Зависимость между оптическими постоянными слоя и параметрами эллиптически поляризованного света устанавливается на основании формул Френеля. На принципах эллипсометрии построены методы чувствительных бесконтактных исследований поверхности жидкости или твёрдых веществ, процессов адсорбции, коррозии и др. В качестве источника света в эллипсометрии используется монохроматическое излучение зелёной линии ртути, а в последнее время – лазерное излучение, что даёт возможность исследовать микроскопические неоднородности на поверхности изучаемого объекта.

enlib.ru