

Тема: Волновые свойства света: поляризация

Естественный и поляризованный свет

Поляризацией света называется физическая характеристика оптического излучения, которая описывает поперечную анизотропию световых волн.

Иногда **поляризацией света** называют процесс получения поляризованного света из естественного или частично поляризованного.

Явление поляризации впервые обнаружил Гюйгенс, но объяснить его он не смог. Понятие «поляризация света» ввёл в физику английский учёный И. Ньютон в 1704 г, а первое объяснение поляризации света попытался дать Малюс в своей работе «Теория двойного лучепреломления света в кристаллических веществах», опубликованной в 1810 г.

Современное представление о поляризации света нашло своё объяснение в электромагнитной теории света английского физика Дж. Максвелла. Из этой теории следует, что электромагнитная волна является поперечной (см. рис 1).

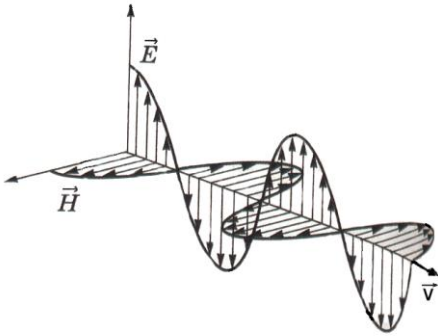


Рис.1 Распределение проекций векторов E и H в электромагнитной волне по направлению её распространения

В электромагнитной волне вектора напряжённости электрического поля \vec{E} и напряжённости магнитного поля \vec{H} колеблются в одинаковых фазах во взаимно перпендикулярных плоскостях и одновременно перпендикулярно вектору скорости \vec{v} распространения волны (перпендикулярно лучу). Поскольку $\vec{E} \perp \vec{H}$, то при рассмотрении поляризации света достаточно исследовать поведение лишь одного из них. Наблюдения показывают, что физиологические, фотохимические, фотоэлектрические и другие свойства света обусловлены колебаниями электрического вектора \vec{E} в световой волне. Поэтому вектор \vec{E} называют обычно **световым вектором** и исследуют только его.

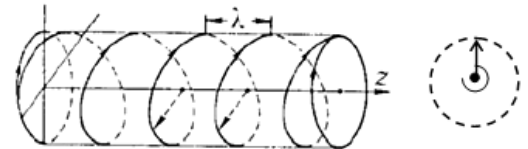
Свет, в котором направления колебаний вектора \vec{E} каким-либо образом упорядочены, называется **поляризованным**.

Если при распространении волны вектор \vec{E} колеблется всё время в какой-либо одной плоскости, свет называют **линейно поляризованным** или **плоскополяризованным**.

Плоскость, проходящая через направление колебаний вектора \vec{E} плоскополяризованного света и направление распространения этой волны, называется **плоскостью поляризации света**.

Если конец вектора \vec{E} при движении волны описывает эллипс, то свет называют **эллиптически поляризованным**.

Если конец вектора \vec{E} при движении волны описывает окружность, то свет называют **циркулярно поляризованным** или **поляризованным по кругу**. (круговую поляризацию обнаружил в 1815 г. Био).



Квант света, испускаемый атомом, и который представляет собой ограниченный в пространстве цуг электромагнитного поля, всегда линейно поляризован. В реальных источниках света одновременно излучают множество атомов, причём каждый атом излучает квант света с произвольной ориентацией вектора \vec{E} . Поэтому в результирующей световой волне направление колебаний вектора \vec{E} в каждый момент времени непредсказуем и все направления перпендикулярные распространению световой волны оказываются равновероятными. Такой свет называется **естественным** или **неполяризованным**.

Таким образом, естественный или неполяризованный свет можно рассматривать как наложение многих электромагнитных волн, распространяющихся в одном и том же направлении, но со всевозможными ориентациями плоскостей колебаний вектора \vec{E} . Для неполяризованного света нельзя указать плоскость преимущественного расположения вектора напряжённости электрического поля \vec{E} . Все ориентации этого вектора равновероятны.

Чаще всего имеется какое-либо преимущественное направление колебаний вектора \vec{E} . В этом случае говорят, что свет является **частично поляризованным** в плоскости, проходящей через это направление.

Для получения и анализа поляризованного света применяют специальные приборы: поляризаторы и анализаторы.

Поляризатором называется устройство для получения поляризованного света.

Человеческий глаз не отличает естественный свет от поляризованного, поэтому для анализа поляризации света используют устройство, называемое **анализатором**.

Поляризатором и анализатором может служить один и тот же прибор в зависимости от того, для каких целей его используют: для получения поляризованного света или для его анализа.

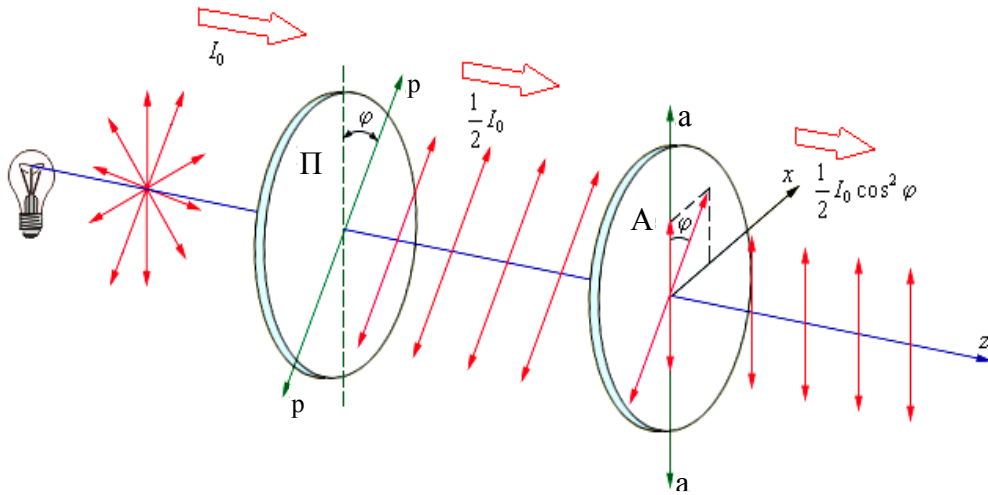


Рис. 2 Схема работы поляризатора и анализатора

На рис.2 поляризатор Π преобразует падающий на него естественный свет интенсивностью I_0 в плоскополяризованный, интенсивность которого при прохождении через поляризатор уменьшается в два раза, то есть, $I_p = \frac{1}{2} I_0$, а затем этот свет проходит через анализатор A , который, в свою очередь ослабляет свет ещё в $\cos^2 \varphi$, где φ - это угол между главными плоскостями поляризатора $p - p$ и анализатора $a - a$.

Главной плоскостью поляризатора (плоскостью пропускания поляризатора) называется плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} , прошедшего через поляризатор линейно поляризованного света (аналогичное определение для главной плоскости анализатора).

Если на анализатор падает линейно поляризованный свет интенсивностью I_p , то интенсивность света, вышедшего из анализатора I_a , можно определить по **закону Малюса**:

Интенсивность света, прошедшего через анализатор I_a , равна интенсивности линейно поляризованного света, падающего на анализатор I_p , умноженной на квадрат косинуса угла φ между плоскостью поляризации падающего на анализатор света и плоскостью пропускания анализатора

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi$$

Степенью поляризации света называют величину равную

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

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

- для естественного света $I_{max} = I_{min}$ и, следовательно, $P = 0$,
- для линейно поляризованного света $I_{min} = 0$ и, следовательно, $P = 1$,
- для частично поляризованного света $I_{max} \neq I_{min}$ и, следовательно, $0 < P < 1$.

Способы получения линейно поляризованного света

Для получения полностью или частично поляризованного света обычно используют одно из трёх физических явлений:

- поляризация при отражении и преломлении света на границе раздела двух диэлектриков,
- явление двойного лучепреломления,
- линейный дихроизм.

Поляризация при отражении и преломлении света на границе раздела двух диэлектриков

При падении на границу двух диэлектриков (например, воздух и стекло) естественного света, отражённый и преломлённый лучи оказываются частично поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях, причём, в отражённом луче вектор \vec{E} совершает колебания преимущественно в плоскости перпендикулярной плоскости падения света, а в преломлённом луче, преимущественно в плоскости падения.

Плоскостью падения света называется плоскость, проходящая через падающий луч и перпендикуляр, восстановленный в точку падения.

Степень поляризации этих лучей зависит от угла падения α света на диэлектрик. Она сначала монотонно возрастает с увеличением угла падения α (см. случай а) на рис. 3), достигает максимального значения при угле α_{Br} , называемом **углом Брюстера** (см. случай б) на рис. 3), а затем монотонно убывает.

При падении естественного света под углом Брюстера α_{Br} преломлённый луч достигает максимальной степени поляризации и оказывается перпендикулярным к отражённому лучу (см. рис. 3 случай б)).

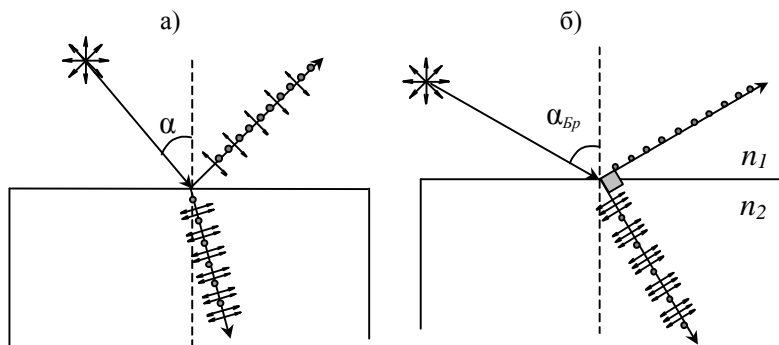


Рис. 3 Отражение света от границы двух диэлектриков

Угол Брюстера α_{Br} , при котором наблюдается линейная поляризация отражённого от границы раздела двух диэлектриков света, определяется по **закону Брюстера** (1815 г.): $tg \alpha_{Br} = n_{21}$,

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель

преломления двух сред, а n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй среды соответственно.

Явление двойного лучепреломления

Двойным лучепреломлением называется явление раздвоения падающего на анизотропную среду (например, прозрачный кристалл) светового луча, обусловленное зависимостью скорости распространения света в среде (т.е. показателя преломления среды) от направления колебания вектора \vec{E} в световой волне.

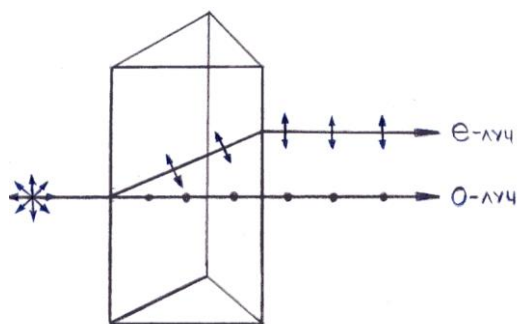


Рис. 4 Явление двойного лучепреломления

Явление двойного лучепреломления впервые обнаружено и описано профессором Копенгагенского университета Э. Бартолином в 1669 в кристалле *исландского шпата*, а в 1815 г. Био обнаружил, что явлениями двойного лучепреломления обладают так же кристаллы *турмалина*.

У кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением, существует одно (*одноосные кристаллы*) или два (*двуосные кристаллы*) направления, в которых раздвоения луча не происходит. Это направление называется *оптической осью кристалла*.

При падении неполяризованной световой волны на одноосный кристалл она расщепляется на два луча со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. Один из лучей имеет плоскость поляризации перпендикулярную главному сечению кристалла и подчиняется законам геометрической оптики. Этот луч называют *обыкновенным* и

обозначают *O – лучом*, а другой луч имеет плоскость поляризации параллельную главному сечению и не подчиняется законам геометрической оптики, поэтому этот луч называют *необыкновенным* и обозначают *e – лучом*.

Таким образом, при выходе из кристалла оба луча оказываются линейно поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях (см. рис. 4).

Главным сечением кристалла называется плоскость, проходящая через направление падающего светового луча и оптическую ось кристалла (она же является плоскостью поляризации необыкновенного луча).

Скорость распространения *O* - луча а, следовательно, и его показатель преломления n_o не зависят от направления распространения этого луча в кристалле, т.е. $n_o = const$, а скорость *e* - луча и, следовательно, n_e зависят от его направления распространения, т.е. $n_e \neq const$.

При распространении света вдоль оптической оси кристалла $n_o = n_e$, поэтому двойное лучепреломление не наблюдается.

В прозрачных кристаллах интенсивности обыкновенного и необыкновенного лучей практически одинаковы, если падающий свет был естественным, однако, если на кристалл падает линейно поляризованный свет, то интенсивности обыкновенного и необыкновенного лучей в этом случае будут различны.

В двуосных кристаллах оба луча, появляющиеся при явлении двойного лучепреломления ведут себя, как необыкновенные.

Двойное лучепреломление объясняется особенностями распространения электромагнитных волн в анизотропных средах. Электрическое поле световой волны E , проникая в вещество, вызывает вынужденные колебания электронов в атомах и молекулах среды. Колеблющиеся электроны, в свою очередь, являются источником вторичного излучения света. Таким образом, прохождение световой волны через вещество является результатом последовательного переизлучения света электронами. В анизотропном веществе колебания электронов легче возбуждаются в некоторых определённых направлениях. Поэтому волны с различной плоскостью поляризации распространяются в анизотропном веществе с разными скоростями.

Линейный дихроизм

Линейным дихроизмом называется явление, при котором среды, обладающие двойным лучепреломлением, неодинаково поглощают лучи с разными плоскостями поляризации.

Например, пластинка из кристалла *турмалина* толщиной в 1 мм пропускает свет только одного направления колебаний вектора \vec{E} и полностью поглощает свет всех других направлений. Поэтому такие пластинки раньше использовали в качестве поляризаторов.

Искусственная оптическая анизотропия. Вращение плоскости поляризации

Явление двойного лучепреломления иногда удаётся получить у веществ, которые в обычном состоянии такими свойствами не обладают, например:

- при одностороннем сжатии или растяжении стеклянной пластинки возникает двойное лучепреломление. При этом

$$n_o - n_e = k_1 \sigma,$$

где $\sigma = F / S$ - механическое напряжение, k_1 - постоянная, зависящая от свойств вещества.

Таким образом, оптически изотропное вещество под влиянием механической деформации становится анизотропным (*явление фотоупругости*).

- Керр обнаружил, что жидкий или твердый изотропный диэлектрик, помещенный в однородное электрическое поле с напряженностью E , становится оптически анизотропным (*эффект Керра*). При этом

$$n_o - n_e = k_2 E^2 \quad \text{где } k_2 -$$

постоянная, зависящая от свойств вещества.

- Фарадей обнаружил вращение плоскости поляризации в постоянном магнитном поле с напряженностью H , когда свет распространяется вдоль магнитного поля (*эффект Фарадея*). При этом

$$\varphi = V H l,$$

где V - постоянная Верде, зависящая от свойств вещества, l - геометрическая длина пути света в веществе.

Оптически активные вещества

Некоторые вещества (например, кварц, водный раствор сахара, скипидар) обладают способностью вращать плоскость поляризации при прохождении через них линейно поляризованного света. Такие вещества называют *оптически активными*.

Опыт показывает, что:

1) для оптически активных кристаллов $\varphi = \alpha l$,

где φ - угол поворота плоскости поляризации света в радианах.

α - постоянное вращение

l - проделанный светом путь в оптически активном веществе

2) для оптически активных жидкостей (чистых жидкостей) $\varphi = [\alpha] \rho l$

где $[\alpha]$ - удельная постоянная вращения

ρ - плотность жидкости

l - путь, пройденный светом в оптически активной жидкости

3) для оптически активных растворов $\varphi = [\alpha] c l$

где $[\alpha]$ - удельная постоянная вращения

c - массовая концентрация раствора вещества

Оптическая активность является *особым видом двойного лучепреломления*.

В оптически активных веществах происходит расщепление падающего луча на два, один с правой, а другой с левой круговой поляризацией одинаковой амплитуды, но с разными скоростями распространения в оптически активном веществе. Это связано с несимметричным строением молекул оптически активного вещества.

Применение поляризованного света

- сахариметры (для определения концентрации сахара в растворе),
- поляризационные фильтры в фотографии и кино,
- поляризационные солнцезащитные очки,
- используют в геологии для обнаружения сопутствующих минералов.