

3.7. Вращение плоскости поляризации

3.7.1. Естественная оптическая активность.

При пропускании линейно поляризованного света через плоско параллельный слой некоторых веществ плоскость поляризации света оказывается повернутой относительно своего исходного положения. Это явление называется *вращением плоскости поляризации* или *оптической активностью*. Различают *естественную оптическую активность*, когда поворот плоскости поляризации происходит при прохождении в среде в отсутствие внешних полей, и *искусственную оптическую активность*, когда поворот плоскости поляризации происходит во внешнем магнитном поле.

В 1811 г. Д. Араго наблюдал поворот плоскости поляризации при пропускании света через пластинки кварца. Свет был поляризован линейно, а пластинки кварца вырезаны перпендикулярно к оптической оси.

Экспериментально Ж. Био установил, что угол поворота плоскости поляризации зависит от длины d пути в кристаллической пластинке и от длины волны света λ :

$$\varphi = \alpha d, \quad (3.7.1)$$

где коэффициент пропорциональности α называется *вращательной способностью*. Вращательная способность зависит от длины волны λ . Так для кристаллов кварца имеем $\alpha = 15^\circ/\text{мм}$ – для красной волны, $\alpha = 27^\circ/\text{мм}$ – для зеленого света, $\alpha = 51^\circ/\text{мм}$ – для фиолетового света.

Сейчас известно очень много кристаллических и аморфных веществ, которые вращают плоскость поляризации. Эти вещества содержат оптически активные молекулы. Имяются *право и левовращающие вещества* (направление вращения обычно рассматривают по отношению к наблюдателю, к которому приближается свет).

Наблюдение происходит по следующей схеме: свет пропускается через два скрещенных николя и вещество, помещенное между ними (см рис. 7.1).

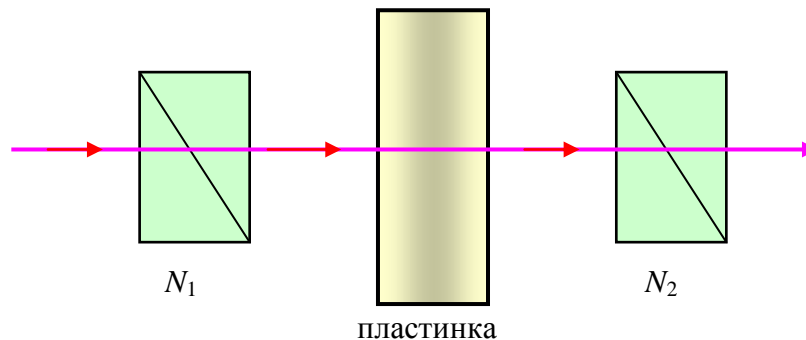


Рис. 7.1.

Френель доказал экспериментально, что при вступлении в оптически активную среду луч света испытывает *двойное круговое лучепреломление*: лучи, *поляризованные по правому и левому кругу, идут внутри оптически активной среды с различными скоростями*. Если падающий свет был поляризован линейно, то при выходе из такой среды эти волны складываются вновь в линейно поляризованную волну, но с повернутой плоскостью поляризации.

Пусть свет распространяется вдоль оси z . Тогда линейно поляризованный свет можно разбить на две компоненты по осям x и y :

$$E_x = A \cos \chi \cos(\omega t - kz), \quad E_y = A \sin \chi \cos(\omega t - kz) \quad (3.7.2)$$

Угол χ – угол между направлением вектора напряженности электрического поля и осью x . Этот угол зависит от z , поэтому можно записать:

$$\chi = -\alpha z \quad (3.7.3)$$

Если $\alpha > 0$, то поворот плоскости поляризации происходит по часовой стрелке, а если $\alpha < 0$, то поворот плоскости поляризации – против часовой стрелки. Разложим произведения в (3.7.2) в суммы с помощью тригонометрических формул:

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{A}{2} \cos(\omega t - kz + \alpha z) + \frac{A}{2} \cos(\omega t - kz - \alpha z) \\
 E_y &= \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - kz + \alpha z + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - kz - \alpha z - \frac{\pi}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.7.4}$$

Таким образом, суммарную волну можно представить в виде суммы двух волн: правой \vec{E}^r и левой \vec{E}^l циркулярно-поляризованных волн:

$$\vec{E} = \vec{E}^r + \vec{E}^l \tag{3.7.5}$$

Компоненты этих волн равны:

$$\begin{cases} E_x^r = \frac{A}{2} \cos(\omega t - k^r z) \\ E_y^r = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - k^r z + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}
 \quad
 \begin{cases} E_x^l = \frac{A}{2} \cos(\omega t - k^l z) \\ E_y^l = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - k^l z - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}
 \tag{3.7.6}$$

Здесь эффективные волновые числа равны:

$$k^r = k - \alpha, \quad k^l = k + \alpha \tag{3.7.7}$$

Скорости этих циркулярно-поляризованных волн определяются соответственно:

$$v^r = \frac{\omega}{k - \alpha}, \quad v^l = \frac{\omega}{k + \alpha} \tag{3.7.8}$$

Отсюда получаем разность показателей преломления

$$n^l - n^r = \frac{2c}{\omega} \alpha, \quad \alpha = \frac{\omega}{2c} (n^l - n^r) \tag{3.7.9}$$

Плоскость поляризации вращается в ту же сторону, что и электрический вектор поляризованной по кругу волны с меньшим показателем преломления, т.е. с большей фазовой скоростью. Например, если $n^l - n^r > 0$ и $\alpha > 0$ – вращение происходит вправо, т.е. по часовой стрелке.

Поляризованные по кругу волны с различным направлением вращения вектора \vec{E} могут отличаться не только скоростями распространения, но и коэффициентами поглощения. При этом если падающий свет был поляризован линейно, то на выходе амплитуды лево и право циркулярно-поляризованных волн будут различны и выходящий свет будет поляризован эллиптически. Это явление называется *круговым дихроизмом*.

3.7.2. Искусственная оптическая активность.

Оптически неактивные вещества в магнитном поле становятся оптически активными и вращают плоскость поляризации света, распространяющегося вдоль силовых линий магнитного поля. Это явление суть *эффекта Фарадея* (1846 г.). Наблюдение производится по схеме, изображенной на рисунке 7.2, где П – поляризатор, а А – анализатор.

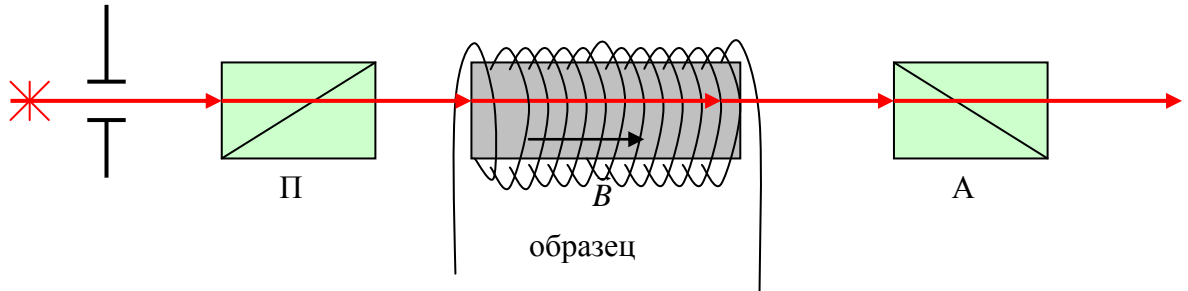


Рис. 7.2.

Угол поворота определяется соотношением:

$$\varphi = VBl \tag{3.7.10}$$

где B – индукция магнитного поля, l – путь, пройденный светом в магнитном поле. V – *постоянная Верде* или *магнитная вращательная способность*, которая зависит от рода вещества, длины волны, физического состояния вещества. В отличие от естественной оптической активности, где вращение плоскости

поляризации зависит от направления распространения света, в эффекте Фарадея поворот плоскости поляризации не зависит от направления распространения света, а зависит только от направления магнитного поля \vec{B} .

Физическая причина поворота плоскости поляризации состоит в следующем. В магнитном поле электронные орбиты прецессируют с частотой ларморовской прецессии Ω . Эта частота складывается и вычитается из частоты распространяемого света ω . Таким образом, циркулярно поляризованный свет имеет две частоты (левый или правый зависит от направления магнитного поля):

$$\begin{aligned}\omega_+ &= \omega_0 + \Omega \\ \omega_- &= \omega_0 - \Omega\end{aligned}\quad (3.7.11)$$

В силу дисперсии скорости этих волн различны, что приводит к возникновению сдвига фаз между право и лево циркулярно поляризованным светом, и при сложении этих волн после прохождения образца получаем линейно поляризованный свет с повернутой плоскостью поляризации. Угол поворота плоскости поляризации определяется из формулы аналогичной (3.6.9):

$$\varphi = \frac{\omega l}{2c}(n_- - n_+) = \frac{\pi l}{\lambda}(n_- - n_+) \quad (3.7.12)$$

где через n_- и n_+ обозначены показатели преломления для волн с собственными частотами ω_- и ω_+ . Заметим, что эффект Фарадея тесно связан с эффектом Зеемана – расщеплением уровней энергии атома в магнитном поле.

*Примечание 1. Доменик Франсуа Араго, французский ученый, 1786–1853;
Жан Батист Био, французский физик, 1774–1862;
Мишель Эмиль Верде, французский физик, 1824–1866*

Литература

Сивухин, Оптика §§94,95
Матвеев Оптика §§44,45