

Работа 8. ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

- Цель работы:*
1. Изучение явлений естественного и магнитного вращения плоскости поляризации.
 2. Определение постоянных вращения: удельной постоянной вращения сахара и постоянной Верде этилового спирта.

Следствием теории Максвелла является поперечность электромагнитных волн (ЭМВ): векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно волновому вектору \vec{k} (направлению волны). Поперечность ЭМВ лишает волну осевой симметрии относительно направления ее распространения из-за наличия выделенных направлений (векторы \vec{E} и \vec{H}) в плоскости, перпендикулярной направлению волнового вектора \vec{k} (поперечная анизотропия). Т. е. свойства ЭМВ зависят от ориентировки векторов \vec{E} и \vec{H} , характеризуемой понятием поляризации. Для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение одного из указанных векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора – вектора напряженности \vec{E} электрического поля, направление которого при действии света на вещество в нерелятивистском приближении определяет направление силы, действующей на заряженные частицы (например, электроны в атомах вещества) в поле световой волны.

Если проекция траектории конца вектора \vec{E} на плоскость, перпендикулярную лучу, представляет собой отрезок прямой линии, то свет называют *линейно поляризованным* или *плоскополяризованным*. Плоскость, проходящая через направление колебаний электрического вектора линейно поляризованной световой волны и направление распространения этой волны, называется *плоскостью поляризации*.

1. ЕСТЕСТВЕННОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

1.1. Вращение плоскости поляризации кристаллическими и некристаллическими телами

В некоторых случаях распространение линейно поляризованного света в веществе сопровождается поворотом направления поляризации вокруг оси пучка. Это явление называют *естественным вращением плоскости поляризации* или *естественной оптической активностью*. Вещества, обладающие свойством вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через них плоскополяризованного света, называют *оптически активными*.

Естественная активность была открыта французским физиком Д.Ф. Араго в 1811 г. для кристаллов кварца. В 1815 г. французский ученый Ж.Б. Био открыл оптическую активность чистых жидкостей (скипидара), а затем растворов и паров многих, главным образом органических веществ. Теперь известно много естественно активных веществ, хотя у большинства из них это явление выражено очень слабо.

К числу оптически активных веществ принадлежат двойко преломляющие кристаллы (кварц, исландский шпат $CaCO_3$, киноварь HgS и др.), причем сильнее всего они вращают плоскость поляризации, когда свет распространяется вдоль оптической оси кристалла. Кристалл в этом случае ведет себя как изотропное тело. Обычного (линейного) двойного лучепреломления с пространственным разделением двух лучей не происходит.

Оптически активными являются и некоторые оптически изотропные кристаллы кубической симметрии (например, хлорат натрия $NaClO_3$, бромат натрия $NaBrO_3$ и др.), для которых величина вращения не зависит от ориентации кристалла.

Наряду с названными кристаллами оптически активными являются многие твердые кристаллические органические вещества (сахар, камфора, кокаин и др.), смеси ряда органических веществ (нефть, патока и др.), некоторые чистые жидкости (скипидар, никотин и др.), а также растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (камфоры в бензоле, водные растворы сахара, винной кислоты, глюкозы и др.) и их расплавы и пары.

В оптически активных *кристаллах и чистых жидкостях* угол поворота φ плоскости поляризации пропорционален толщине d проходящего светом слоя оптически активного вещества:

$$\varphi = \alpha \cdot d . \quad (1)$$

Коэффициент α , численно равный углу поворота плоскости поляризации света слоем вещества единичной толщины, является мерой оптической активности вещества и называется *постоянной вращения (вращательной способностью)*. Он зависит от природы вещества, длины волны света (вращательная дисперсия) и температуры и не зависит от интенсивности света. Био определил, что вращение α увеличивается с уменьшением длины волны света, причем приближенно $\alpha \sim \frac{1}{\lambda^2}$. В области прозрачности и малого поглощения с опытом хо-

рошо согласуется формула Друде: $\alpha = \sum_i \frac{b_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$, где b_i – некоторые постоянные, характеризующие вещество, λ_i – длины волн, соответствующие собственным частотам рассматриваемого вещества (длины волн полос поглощения вещества).

Для оптически активных *растворов* согласно *закону Био* (1831г.):

$$\varphi = [\alpha] \cdot C \cdot d, \quad (2)$$

где d – расстояние, пройденное светом в растворе оптически активного вещества; C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе (кг/л, г/см³); $[\alpha]$ – удельная постоянная вращения вещества (удельная оптическая активность). Определяется природой вещества, сильно зависит от длины волны света (в грубом приближении

вдали от полос поглощения $[\alpha] = \frac{b_1}{\lambda^2} + \frac{b_2}{\lambda^4}$) и слабо зависит от

температуры (для большинства веществ при повышении T на 1° $[\alpha]$ уменьшается на ~0,1 %), не зависит или может незначительно довольно сложным образом зависеть от природы растворителя. Для данного растворителя (например, для слабых водных растворов веществ с плотностью $\rho \approx 1$ кг/л) $[\alpha]$ растворенного вещества выражается в радианах на метр (в СИ) или в градусах на метр (концентрация в этом случае равна массовой доле C оптически активного вещества в рас-

творе: $C = \frac{m_s}{V_{p-ra}} = \frac{m_s}{m_{p-ra}} \cdot \rho_{p-ra} = C' \cdot \rho_{p-ra} \approx C'$).

Закон Био фактически выражает пропорциональность угла поворота φ числу молекул оптически активного вещества на пути светового луча. Следовательно, вращение плоскости поляризации в аморфных веществах, жидкостях и парах является молекулярным свойством.

Все кристаллические вещества, оптически активные в аморфном состоянии (расплавленные или растворенные), обладают таким же свойством и в кристаллическом состоянии (*оптически активные вещества 1-го типа*). При этом в отличие от аморфных тел постоянные вращения кристалла и его раствора (расплава) могут сильно отличаться. К таким веществам относится большое количество органических соединений (ряд кислот и эфиров, сахара, сульфиды, селениды и др.), многие соединения металлов, металлоорганические соединения, а также некоторые жидкие кристаллы.

Однако вещества, оптически активные в кристаллическом состоянии, не всегда активны в жидком (например, расплавленные кварц, киноварь и др.) (*оптически активные вещества 2-го типа*). Следовательно, оптическая активность может быть обусловлена как молекулами вещества, так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке.

Оптически активные вещества в зависимости от направления вращения плоскости поляризации разделяют на право- и левовращающие. Если смотреть навстречу распространяющемуся световому лучу, то в *правовращающих* веществах плоскость поляризации будет поворачиваться по часовой стрелке (положительное вращение, $\alpha > 0$), в *левовращающих* – против часовой стрелки (отрицательное вращение, $\alpha < 0$).

Свойство естественно активной среды быть право- или левовращающей не зависит от того, в каком направлении распространяется свет, т. к. в среде направление вращения плоскости поляризации относительно самого луча не зависит от направления его распространения (подобно тому, как свойство винтовой спирали быть правой или левой не зависит от того, с какой стороны на нее смотреть). Относительно же фиксированной оси в пространстве вращения происходят в обратные стороны, если лучи распространяются навстречу друг другу (гиротропия). Поэтому при прохождении луча через активную среду, отражении от зеркала и вторичном прохождении через ту же среду назад, положение плоскости поляризации восстанавливается.

Установлено (Л. Пастером в 1848 г. на примере солей виннокаменной кислоты), что если вещество вращает плоскость поляризации, то оно всегда имеет две модификации: правовращающую и левовращающую. Для правых и левых модификаций активных кристаллов постоянная вращения α имеет противоположные по знаку и (при одинаковых внешних условиях) одинаковые по абсолютной величине значения:

$$|\alpha_n| = |\alpha_l|.$$

1.2. Феноменологическая теория вращения плоскости поляризации

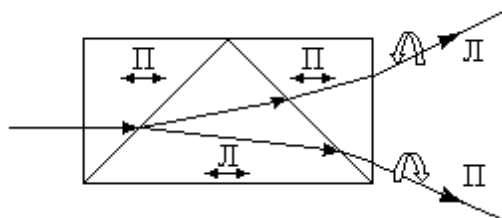
Световая волна называется поляризованной по кругу (*циркулярно поляризованной*), если ее вектор напряженности электрического поля \vec{E} изменяется с течением времени так, что проекция траектории конца вектора \vec{E} на плоскость, перпендикулярную лучу, представляет собой окружность. Если электрический вектор \vec{E} при наблюдении навстречу световому лучу совершает вращение по часовой стрелке, циркуляцию

принято называть *правой*; при вращении против часовой стрелки говорят о круговой поляризации *по левому кругу*.

Любая линейно поляризованная волна может рассматриваться как суперпозиция двух циркулярно поляризованных волн с правым и левым направлениями вращения электрического вектора, с одинаковыми частотами и амплитудами, распространяющихся в том же направлении, что и линейно поляризованная волна.

Впервые вращение плоскости поляризации было объяснено французским физиком О.Ж. Френелем (1817 г.), показавшим, что это явление сводится к особому типу двойного лучепреломления (круговому). Френель предположил, что при этом две монохроматические волны, которые могут распространяться в оптически активной среде с определенными, но различными фазовыми скоростями ($v_n \neq v_l$) поляризованы не линейно, как при обычном (линейном) двойном лучепреломлении, а по кругу: одна по правому (v_n), другая по левому (v_l).

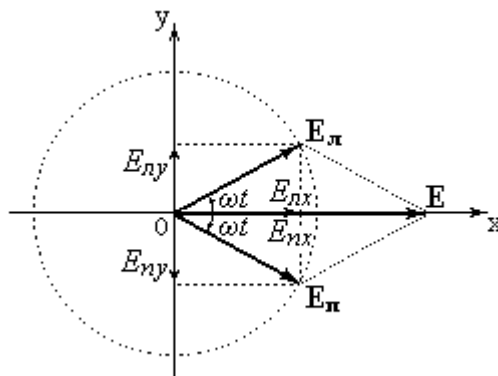
Гипотезу о возможности существования в активной среде этих циркулярно поляризованных волн, распространяющихся с различными скоростями, Френель теоретически доказать не мог, т.к. для этого необходимо было бы располагать полной системой уравнений волновой теории света в оптически активных средах. Но Френель подтвердил ее экспериментально, изготовив сложную призму (рис. 1), состоящую из трех призм: двух торцовых из правовращающего кварца (П) и средней с тупым преломляющим углом ($\sim 152^\circ$) из левовращающего кварца (Л). Оптические оси всех призм параллельны основанию. Если предположить, что в правовращающем кварце $v_n > v_l$ ($n_n < n_l$), а в левовращающем – наоборот, то луч правой круговой поляризации при преломлении на внутренних гранях отклоняется в сторону основания средней призмы, а левой – в сторону вершины. Состояние круговой поляризации выходящих пучков (угол расхождения между которыми $\sim 4'$) непосредственно проверяется с помощью пластинки $\lambda/4$ и анализатора. Результаты эксперимента полностью подтвердили предположения Френеля.



Р и с. 1

Пусть на оптически активное вещество вдоль оси OZ падает линейно поляризованная волна (рис. 2):

$$\vec{E} = 2\vec{E}_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{z}{v} \right) \right].$$



Р и с. 2

Две циркулярно поляризованные волны (по левому и правому кругу), суперпозицией которых является падающая волна, для $z=0$ в проекциях на оси OX и OY представляются:

$$\begin{aligned} \vec{E}_л: \quad E_{лx} &= E_0 \cos \omega t, & \vec{E}_п: \quad E_{пx} &= E_0 \cos \omega t, \\ E_{лы} &= E_0 \sin \omega t, & E_{пы} &= -E_0 \sin \omega t. \end{aligned}$$

Т. е. исходная линейно поляризованная волна в точке $z=0$ имеет проекции вектора напряженности:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{лx} + E_{пx} = 2E_0 \cos \omega t, \\ E_y &= E_{лы} + E_{пы} = 0. \end{aligned}$$

В этом случае линия колебаний вектора \vec{E} ($\vec{E} = \vec{E}_л + \vec{E}_п$) совпадает с осью OX и образует равные углы с векторами $\vec{E}_л$ и $\vec{E}_п$. Если бы между колебаниями имелся сдвиг фаз, то линия колебаний суммарной напряженности образовала бы с осью OX угол, определяемый сдвигом фаз слагаемых волн.

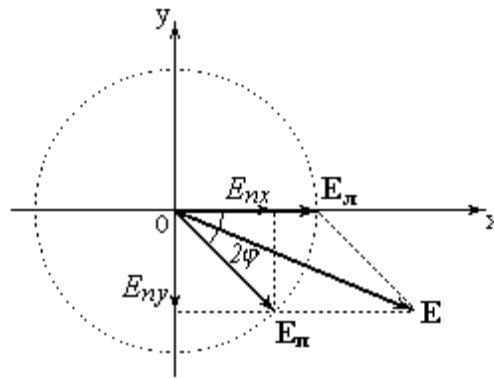
Обозначая скорости циркулярно поляризованных волн с векторами $\vec{E}_л$ и $\vec{E}_п$, соответственно $v_л$ и $v_п$, а коэффициенты преломления $n_л$ и $n_п$, можно для выходящих из оптически активной среды циркулярно поляризованных волн записать:

$$\begin{aligned} \vec{E}_л: \quad E_{лx} &= E_0 \cos(\omega t - kn_л d), & \vec{E}_п: \quad E_{пx} &= E_0 \cos(\omega t - kn_п d), \\ E_{лы} &= E_0 \sin(\omega t - kn_л d), & E_{пы} &= -E_0 \sin(\omega t - kn_п d), \end{aligned}$$

где d – расстояние, пройденное волной во вращающей плоскости поляризации среде, $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0}$ – волновое число, λ_0 – длина волны в вакууме.

На выходе из оптически активной среды обе циркулярно поляризованные волны складываются снова в линейно поляризованную волну с плоскостью поляризации, относительно которой вектора \vec{E}_l и \vec{E}_n будут расположены симметрично, занимающей, однако, иное положение, чем $y=0$ (рис. 3). Найдем положение векторов \vec{E}_l и \vec{E}_n в некоторый момент времени, например $t_1 = \frac{d}{v_l} = \frac{k \cdot n_l \cdot d}{\omega}$. Тогда

$$\begin{aligned} \vec{E}_l: \quad E_{lx} &= E_0, \\ E_{ly} &= 0; \\ \vec{E}_n: \quad E_{nx} &= E_0 \cos[kd(n_l - n_n)], \\ E_{ny} &= -E_0 \sin[kd(n_l - n_n)]. \end{aligned}$$



Р и с. 3

Линия, относительно которой векторы \vec{E}_l и \vec{E}_n расположены симметрично, является биссектрисой угла между этими векторами, обозначенного 2φ и равного $kd(n_l - n_n)$. Следовательно, плоскость поляризации после прохождения волной слоя активной среды толщиной d поворачивается на угол:

$$\varphi = \frac{k(n_l - n_n)d}{2} = \frac{\pi \cdot d(n_l - n_n)}{\lambda_0}. \quad (3)$$

Таким образом, получаем, что для правовращающих веществ $v_l < v_n$ ($n_l > n_n$) (рассмотренный случай), а для левовращающих $v_l > v_n$ ($n_l < n_n$), что и подтверждается описанным ранее экспериментом Френеля. Т.е. плоскость поляризации в активной среде вращается в ту же сторону, что и электрический вектор поляризованной по кругу волны с большей фазовой скоростью (с меньшим показателем преломления).

Сравнивая выражения (3) и (1), (2), получаем для постоянной и удельной постоянной вращения:

$$\alpha = \frac{\pi(n_l - n_n)}{\lambda_0}, \quad [\alpha] = \frac{\pi(n_l - n_n)}{\lambda_0 C}.$$

Теория Френеля свела задачу о вращении плоскости поляризации к задаче объяснения кругового двойного лучепреломления, т. е. к более общей проблеме зависимости показателя преломления от характера поляризации света. Но причину различия в скоростях распространения лучей, поляризованных по правому и левому кругу, в оптически активных средах она не выяснила.

1.3. Молекулярная теория вращения плоскости поляризации.

Типы оптической активности веществ

Исследования оптической активности показали, что для ее объяснения необходимо рассмотреть задачу взаимодействия поля световой волны с молекулами (ионами) вещества, принимая во внимание их структуру и конечные размеры и учитывая изменение поля волны на расстояниях порядка размеров R молекул (ионов) вещества.

Вследствие конечности размеров молекул, индуцированный неоднородным полем волны дипольный момент молекулы определяется значением напряженности поля \vec{E} не в одной точке \vec{r} , а и в соседних точках области с размерами, сопоставимыми с протяженностью молекулы. Аналогичное заключение, очевидно, относится и к связи между поляризованностью среды $\vec{P}(\vec{r})$ (макроскопический параметр среды) в каждой точке и $\vec{E}(\vec{r})$, а также между вектором индукции $\vec{D}(\vec{r})$ и $\vec{E}(\vec{r})$. Другими словами, связь между указанными величинами носит нелокальный характер, т. е. имеет место нелокальность отклика среды на внешнее воздействие.

Размеры области влияния составляют в оптическом диапазоне длин волн обычно величину порядка постоянной кристаллической решетки ($\sim 10^{-9}$ м), размеров молекул (для диэлектрических сред), межмолекулярных расстояний, длины свободного пробега электронов и т.д. Характерный масштаб неоднородности поля – это длина волны λ . Отношение $\frac{R}{\lambda}$ имеет порядок $\sim 10^{-3}$, т. е. неоднородность поля в пределах молекулы очень мала. При описании многих оптических явлений таким изменением поля можно пренебречь, т. к. его учет привел бы лишь к малым поправкам, не внося ничего существенно нового в рассмотренные явления. Тем не менее, нелокальность связи между $\vec{D}(\vec{r})$ и $\vec{E}(\vec{r})$ обуславливает и ряд новых оптических явлений, называемых эффектами *пространственной дисперсии*, простейшим и наиболее сильным из

которых и является вращение плоскости поляризации. Его величина (различие n_l и n_n) как раз и определяется параметром $\frac{R}{\lambda} \sim 10^{-3} \ll 1$, остальные эффекты пространственной дисперсии слабее, т.к. определяются значением $\left(\frac{R}{\lambda}\right)^2$.

Для учета нелокальности связи $\vec{D}(\vec{r})$ и $\vec{E}(\vec{r})$ достаточно представить \vec{E} в соседних точках в виде разложения в ряд Тейлора по смещениям относительно рассматриваемой точки $\vec{r}(x_k, x_e, x_m)$:

$$E_i(\vec{r} + \Delta\vec{r}) = E_i(\vec{r}) + \sum_k \Delta x_k \left(\frac{\partial E_i}{\partial x_k} \right)_{\vec{r}} + \frac{1}{2} \sum_{k,l} \Delta x_k \cdot \Delta x_l \left(\frac{\partial^2 E_i}{\partial x_k \partial x_l} \right)_{\vec{r}} + \dots$$

Так как $\frac{\partial E_i}{\partial x_k} \sim \frac{E}{\lambda}$, $\Delta x \sim R$, то второй член разложения пропорционален

$$\left(\frac{R}{\lambda}\right)E, \text{ следующий } \sim \left(\frac{R}{\lambda}\right)^2 E \text{ и т. д.}$$

В рамках феноменологической теории такому разложению \vec{E} по степеням $\left(\frac{R}{\lambda}\right)$ соответствует материальное уравнение, в котором вектор индукции \vec{D} зависит не только от вектора \vec{E} , но и от его пространственных производных:

$$D_i(\vec{r}) = \varepsilon(\omega)E_i(\vec{r}) + \sum_{k,l} \gamma_{ikl}(\omega) \frac{\partial E_k}{\partial x_l} + \sum_{k,l,m} c_{iklm}(\omega) \frac{\partial^2 E_k}{\partial x_l \partial x_m} + \dots, \quad (4)$$

где $\varepsilon(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость среды, $\gamma_{ikl}(\omega)$ и $c_{iklm}(\omega)$ – тензоры 3-го и 4-го рангов, не зависящие в однородной среде от координат.

В случае плоской монохроматической волны

$$D_i(\vec{r}) = \sum_k \varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k}) \cdot E_k(\vec{r}, t),$$

где тензор диэлектрической проницаемости среды

$$\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k}) = \varepsilon_{ik}(\omega) + i \sum_l \gamma_{ikl}(\omega) k_l - \sum_{l,m} c_{iklm}(\omega) k_l k_m. \quad (5)$$

Нелокальность связи электрической индукции $\vec{D}(\vec{r})$ и напряженности поля $\vec{E}(\vec{r})$ проявляется в зависимости $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$ от волнового вектора \vec{k} , (т. е. и длины волны) (*пространственная дисперсия*). С первым членом выражения (5) связаны частотная дисперсия и обычное (линейное) двойное лучепреломление ($\frac{n_o}{n_e} \sim 0,1$). Второй же член приводит к различию фазовых скоростей (показателей преломления n_n и n_l) для волн правой и левой круговых поляризации, т. е. к естественной оптической активности – вращению плоскости поляризации и зависимости ее угла поворота от λ .

Для изотропной среды (жидкость, раствор, расплав) материальное уравнение (4) можно записать в виде:

$$\vec{D} = \varepsilon(\omega)\vec{E} - i\gamma(\omega)\vec{k} \times \vec{E},$$

где $\gamma(\omega)$ – скаляр.

В этом случае из уравнений Максвелла для плоской монохроматической волны, распространяющейся вдоль оси OZ , в проекциях на оси OX и OY получим:

$$(c^2 k^2 - \varepsilon \omega^2) E_x - i \gamma \omega^2 k E_y = 0,$$

$$i \gamma \omega^2 k E_x + (c^2 k^2 - \varepsilon \omega^2) E_y = 0.$$

Ненулевое решение этой однородной системы уравнений для E_x и E_y существует, когда ее определитель равен нулю. Тогда

$$c^2 k^2 - \varepsilon(\omega) \omega^2 = \pm \gamma \omega^2 k^2.$$

Отсюда в первом приближении: $k_{\pm} = k_0 \pm \frac{\gamma \omega^2}{2c^2}$, соответственно

$$n_l - n_n = n_- - n_+ = -\frac{\gamma \omega}{c}.$$

Таким образом, задача молекулярной (микроскопической) теории оптической активности состоит в расчете величины γ , фактически определяющей угол поворота плоскости поляризации (и нахождении ее частотной зависимости), для той или иной модели гиротропной среды.

Для возникновения же оптической активности необходимо:

1) заметное изменение фазы световой волны на характеристическом расстоянии R межмолекулярного взаимодействия, создающего пространственную дисперсию;

2) наличие в рассматриваемой среде определенной дисимметрии – прежде всего отсутствие центра симметрии (в этом случае тензор $\gamma_{ikl}(\omega)$ отличен от нуля).

Если молекулы среды не имеют ни центра, ни плоскостей симметрии (т. е. хиральные молекулы), они сами являются оптически активными. Оптическая активность вещества, обусловленная асимметричным строением составляющих его молекул, называется *молекулярной оптической активностью*.

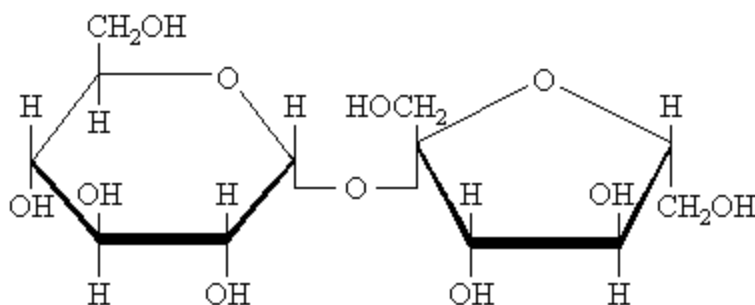
Молекулярная оптическая активность проявляется во всех агрегатных состояниях и растворах (примеры: сахара, камфора, винная кислота).

Установленный экспериментально факт существования активных веществ одного химического состава в двух модификациях, правовращающей и левовращающей, привел Л. Пастера к мысли, что в рамках молекулярных представлений оптически активные тела должны быть дисимметричны. В случае молекулярной оптической активности дисимметричной и является внутренняя структура самих молекул.

Дисимметрия (*хиральность*) – отсутствие (асимметрия) или наличие особой, достаточно низкой симметрии, допускающей существование энантиомеров. Молекулы – энантиомеры (*оптические изомеры*) – представляют собой две зеркально равные друг другу по строению (полученные зеркальным отражением) модификации молекулы, условно называемые “правой” (D) и “левой” (L). Хиральная молекула никакими пространственными движениями (перемещениями и поворотами) не может быть совмещена со своим зеркальным отражением.

Оптические изомеры возникают в том случае, когда молекула содержит атом, являющийся хиральным, т. е. молекула должна иметь асимметричный центр (*хирофор*), например, в органических молекулах – асимметричный тетраэдрический атом углерода C , образующий направленные валентные связи, заместители которого могут быть расположены двумя зеркально-симметричными способами. В простейших молекулах (например, метан CH_4 или четыреххлористый углерод CCl_4) атом углерода находится в центре правильного тетраэдра, образованного другими атомами, и молекула симметрична. Если же вершины тетраэдра заняты разными атомами или атомными группами (радикалами), молекула имеет хиральный центр (пример: фторхлор-

бромметан, аспаргиновая кислота). В молекуле (например, молекуле сахарозы $C_{12}H_{22}O_{11}$ (рис. 4)) может быть несколько хирофоров. Тогда сказывается еще и их взаимное влияние.



Р и с. 4

В других оптически активных веществах оптическая изомерия (хиральность) молекул связана не с наличием асимметричного центра, а со спиральным расположением атомов или их групп. Часто встречается в биологических системах. Примером также является гексагелицен, молекула которого состоит из цепочки бензольных колец, расположенных по спирали.

Хотя химические и физические свойства чистых оптических изомеров абсолютно одинаковы (за исключением того, что они по-разному взаимодействуют с другими хиральными молекулами и вращают плоскость поляризации в разные стороны), они различимы. Особенно важна роль оптических изомеров в биосфере. Оказывается, наиболее важные для живых систем вещества оптически активны и образованы хиральными молекулами. При этом правые и левые формы биологических молекул и объектов встречаются в живой природе с различной вероятностью. Например, биологически необходимы только *L*-аминокислоты (19 из 20 жизненно важных аминокислот оптически активны), ибо именно они встраиваются в молекулы белков и гормонов и “правильно” взаимодействуют с другими макромолекулами и их агрегатами (с цепными молекулами ДНК, РНК и др.). Подобным образом используются в природе *D*-сахара и т.д. Оптической активностью обладают и сами белки, нуклеиновые кислоты ДНК и РНК, хлорофилл, гемоглобин и т.д. Совершенно различны усвояемость, физиологическое и биологическое действие оптических изомеров. Например, *L*-сахара, синтезированные искусственным путем из *D*-аминокислот белки, не усваиваются организмом; бактерии подвергают брожению лишь один из изомеров, не затрагивая другой; *L*-фенилоланин вызывает психические заболевания в отличие от

безвредного *D*; левый никотин в несколько раз ядовитее правого никотина.

В неживой природе количество правых и левых форм молекул в среднем обычно одинаково.

Правые и левые оптические изомеры одной молекулы, иногда, соединяясь друг с другом, образуют довольно прочные соединения – *рацематы*, – не являющиеся оптически активными (и имеющие, обычно, отличные от чистого изомера физические свойства).

Оптическая активность вещества определяется суммой вкладов отдельных молекул, которая зависит от их расположения и ориентации. Оптически активная среда обычно анизотропна. При беспорядочном (хаотическом) расположении молекул (газ, пар, жидкость или раствор) среда является изотропной и все направления в ней совершенно эквивалентны. Только тогда, когда в такой среде преобладают молекулы одной из изомерных модификаций, она не обладает центром симметрии и вращает плоскость поляризации ($\chi(\omega) \neq 0$). Взятые же в равных количествах их смеси, как и рацематы, оптической активностью не обладают, т. е. вещество, состоящее из оптически активных молекул, может и не вращать плоскость поляризации.

Величина молекулярной оптической активности вещества значительно возрастает при упорядоченном расположении (ориентации) хиральных молекул. От характера ориентации молекул зависит, например, оптическая активность жидких кристаллов, стекол, полимеров, а также примером могут быть кристаллы сахара, винной кислоты, бензола.

Молекулярная оптическая активность может также возникать (индуцироваться) и в симметричных молекулах, которые находятся в асимметричном поле хиральных молекул (например, растворителя).

Второй тип оптической активности вещества – *структурная (кристаллическая) оптическая активность*. Кристаллическая оптическая активность проявляется только в кристаллической фазе вещества (кварц, киноварь, теллур). Она обусловлена не асимметрией молекул, а асимметричным строением (хиральной структурой) самого кристалла, асимметрией поля сил, связывающих частицы в кристаллической решетке (даже при одинаковости самих частиц). Например, в атомном кристалле теллура атомы металла расположены по спирали.

Структурной оптической активностью могут обладать как кристаллы, состоящие из частиц, в свободном состоянии оптически неактивных, так и кристаллы, состоящие из хиральных частиц (молекул, атомов).

Довольно часто в кристаллах происходит деформация их структурных элементов (молекул, атомных и ионных группировок) внутренним полем кристалла, благодаря чему они также становятся хиральными. Примером могут служить молекулярные кристаллы (кристаллы, подобно жидкостям, состоящие из молекул), такие, как трифенилен, молекула которого высокосимметрична, а при кристаллизации она деформируется, становится асимметричной и оптически активной. В последнем случае, как и в кристалле, состоящем из хиральных частиц, могут существовать одновременно оба вида оптической активности (кристаллы винной кислоты, бензила, комплексы никеля).

Кристаллы веществ с кристаллической оптической активностью (подобно хиральным молекулам) всегда существуют в двух зеркально-изомерных (анантиоморфных) формах – правой и левой (классический пример – кварц). При этом обе формы обладают оптической активностью. Их называют *оптическими антиподами*. Антиподы имеют одинаковую химическую формулу и одинаковый тип химических связей, полное зеркальное подобие атомно-кристаллического строения и внешней формы кристаллов. Отличаются только направлением вращения плоскости поляризации. Для существования антиподов необходимо отсутствие у кристалла не только центра симметрии, но и плоскости симметрии.

2. МАГНИТНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

От естественной (спонтанной) оптической активности отличают искусственную, или наведенную (*индуцированную*), оптическую активность, возникающую в среде в результате определенных внешних воздействий. Особое важное место среди них занимает магнитное поле. Оптически неактивные вещества под действием внешнего магнитного поля приобретают способность вращать плоскость поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося вдоль направления поля, т.е. вещества становятся оптически активными.

Этот эффект впервые был обнаружен в 1845 г. М. Фарадеем (*эффект Фарадея*) и явился первым доказательством прямой связи оптических и электромагнитных процессов.

Опыты Фарадея, а затем более точные и полные исследования французского математика М. Верде показали, что для изотропных немагнитных веществ (пира- и диамагнетиков) в области не очень сильных полей угол поворота плоскости поляризации (фарадеевского вращения) φ пропорционален длине пути d линейно поляризованного

монохроматического света в веществе и индукции B внешнего продольного постоянного магнитного поля (закон Верде)

$$\varphi = V \cdot d \cdot B. \quad (6)$$

Коэффициент V называется *постоянной Верде* или *удельным магнитным вращением* (*магнитной вращательной способностью*). Удельное магнитное вращение аналогично вращению в оптически активных веществах зависит от свойств вещества и его физического состояния (в частности, плотности), длины волны излучения, слабо от его температуры T . Зависимость постоянной Верде от длины волны также выражается *законом Био*: $V = \frac{b_1}{\lambda^2} + \frac{b_2}{\lambda^4}$, где b_1 и b_2 слабо зависят от температуры.

Значения постоянной Верде обычно невелики: для большинства твердых и жидких тел $V \sim 0,01 \div 0,02$ угл. мин./($\text{Гс} \cdot \text{см}$), еще меньшее вращение обнаруживают газы. Сравнительно большие значения V имеет сероуглерод CS_2 , некоторые сорта стекла (например, тяжелый флинт): $V \sim 0,04 \div 0,09$ угл. мин./($\text{Гс} \cdot \text{см}$).

В случае прозрачных тел на оптических частотах $\mu \approx 1$, следовательно, $B = \mu_0 H$ и $\varphi \sim H$.

Магнитным вращением обладают все тела, хотя обычно в слабой степени. Требуются сильные поля, чтобы эффект был значительным. Велики значения угла вращения для ферромагнитных металлов ($\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co}$). Однако это происходит не за счет больших значений V . Для ферромагнитных материалов зависимость эффекта Фарадея от величины поля усложняется вследствие наличия в них исходной спонтанной намагниченности, связанной с определенным кристаллографическим направлением. Угол поворота φ с возрастанием B в сильных магнитных полях растет очень медленно, приближаясь асимптотически к предельному значению. Для ферромагнетиков $\varphi = K \cdot d \cdot M$, где M – намагниченность магнетика, K – постоянная Кундта (при этом предполагается, что свет распространяется вдоль направления намагниченности). В средах, обладающих спонтанным магнитным моментом, магнитное вращение плоскости поляризации может наблюдаться даже при отсутствии внешнего поля.

Оптически активные вещества под действием магнитного поля приобретают дополнительную способность вращать плоскость поляризации, которая складывается с их естественной способностью.

В анизотропных кристаллических средах, при распространении света в направлении, не совпадающем с оптической осью кристалла,

на индуцированную магнитным полем оптическую активность накладывается (обычно превосходящее) линейное двойное лучепреломление, сильно искажающее и подавляющее эффект Фарадея.

Знак направления вращения определяется по отношению к направлению магнитного поля. *Положительным* ($\varphi > 0$) считается вращение плоскости поляризации по часовой стрелке при распространении света вдоль магнитного поля, т. е. вращение происходит в ту же сторону, куда течет ток по виткам обмотки электромагнита, создающего магнитное поле. Большинство веществ характеризуется положительным вращением. В области нормальной дисперсии правовращающими ($V > 0$), как правило, являются диамагнитные вещества (единственное исключение – хлористый титан $TiCl_4$), левовращающими ($V < 0$) – парамагнитные (например, парамагнитные соли железа (хлорное железо $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) и редких земель, $K_2Cr_2O_7$, $KCrO_4$ и др.). Во втором случае температурная зависимость V в области не слишком низких температур сильнее и сложнее ($V \sim T^{-1}$).

Направление поворота относительно фиксированной оси в пространстве в одном и том же веществе в отличие от естественного вращения не зависит от направления распространения луча (по полю или против поля \vec{B}), а определяется только направлением поля. Это объясняется тем, что при естественном вращении причиной его является действие на среду поля световой волны, в случае магнитного вращения – действие внешнего магнитного поля (во много раз большего действия магнитного поля волны). Поэтому многократное прохождение света через среду (например, за счет многократных отражений на посеребренных поверхностях образца), помещенную в магнитное поле, приводит к возрастанию угла поворота плоскости поляризации в соответствующее число раз.

Феноменологическое объяснение эффекта Фарадея заключается в том, что в общем случае намагниченное вещество нельзя охарактеризовать одним показателем преломления n . Под действием магнитного поля оптические свойства вещества изменяются, и показатели преломления (n_n и n_l) для циркулярно право- и левополяризованного света становятся различными. В области не очень сильных магнитных полей разность ($n_n - n_l$) линейно зависит от напряженности магнитного поля и угол фарадеевского вращения описывается соотношениями (3) и (6).

Явление магнитного вращения плоскости поляризации, как и подавляющее большинство других магнитооптических явлений, связано с расщеплением уровней энергии атомов и молекул (снятием вырож-

дения) во внешнем магнитном поле. Непосредственно это расщепление проявляется в эффекте Зеемана (1896). Другие магнитооптические эффекты по существу являются его следствием.

С точки зрения классической электронной теории причиной расщепления спектральных линий во внешнем магнитном поле является изменение собственных частот колебаний электронов в плоскости, перпендикулярной полю. Эти колебания можно разложить на движения по правому и левому кругу. При включении магнитного поля под действием силы Лоренца частоты вращения электронов по правому и левому кругу смещаются в различные стороны относительно первоначального значения собственной частоты вращения. В результате при наблюдении вдоль поля каждая спектральная линия расщепляется на две линии, симметрично расположенные по обе стороны от первоначальной. Одна из них будет линией для волны с правой круговой поляризацией, другая – для волны с левой круговой поляризацией. Расщепление спектральных линий влечет за собой соответствующее расщепление дисперсионных кривых, характеризующих зависимость показателя преломления среды от длины волны излучения. В результате n_n и n_l становятся различными, что и приводит к вращению плоскости поляризации.

Вблизи собственных частот (линий поглощения) эффект вращения особенно велик. При этом внутри полосы поглощения знак вращения отрицателен. Но даже очень далеко от резонансных частот явление легко наблюдается благодаря чрезвычайно высокой чувствительности метода вращения плоскости поляризации.

Важно отметить, что в эффекте Фарадея магнитное поле влияет на состояние поляризации света лишь косвенно, изменяя оптические характеристики среды, в которой распространяется свет. В вакууме магнитное поле никакого влияния на свет не оказывает.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Угол поворота плоскости поляризации φ может быть значительным даже при очень малом различии n_n и n_l , если $d \gg \lambda$, как это обычно и бывает. Наряду с этим существующие современные приборы для измерения углов вращения плоскости поляризации в оптической области спектра – поляриметры и спектрополяриметры (для измерения дисперсии оптической активности) – обладают чувствительностью $\sim 10^{-6} - 10^{-7}$ градусов. Это позволяет детектировать чрезвычайно малые

различия показателей преломления среды для двух циркулярных поляризаций ($\sim 10^{-12}$). Таким образом, методы, основанные на измерении естественной или индуцированной оптической активности, характеризуются очень высокой чувствительностью (в $\sim 10^4$ раз чувствительнее самых точных интерферометрических методов) и информативностью и позволяют выявлять и исследовать тончайшие физические эффекты, приводящие к циркулярной анизотропии среды.

Оптическая активность и дисперсионные эффекты вращения плоскости поляризации широко используются в атомной физике, молекулярной физике и химии, оптике, биологии, химической физике и биофизике и др. для исследования особенностей строения вещества, пространственной структуры молекул, полимеров и биополимеров, кристаллов (в том числе жидких), симметрии кристаллов, структуры примесных центров, природы заместителей в молекулах как органических, так и комплексных неорганических соединений, симметрии ближайшего окружения молекул в жидкостях, внутри- и межмолекулярных взаимодействий.

Эффекты магнитного вращения плоскости поляризации используются также в физических исследованиях структуры (в том числе энергетической структуры электронных состояний) и магнитных свойств атомных и конденсированных сред и т. д.

Наряду с применением явления вращения плоскости поляризации в научных исследованиях, оно широко используется в технике, особенно лазерной, промышленности (например, химической, химико-фармацевтической, пищевой, нефтяной), медицине, фармакологии и т. д. Естественная оптическая активность – наиболее удобный способ идентификации изомеров. В геологии оптически активные вещества позволяют определить минералы, компоненты нефтей.

Малая инерционность эффекта Фарадея (время установления $< 10^{-9}$ с) и возможность увеличения угла поворота при многократном прохождении через среду позволяет применить его для модуляции света, создания целого ряда оптических приборов: оптических затворов, вентилях, квантовых гироскопов и др. Были найдены и синтезированы новые вещества с большим значением постоянной Верде.

Явление вращения плоскости поляризации и, в частности, формула (2), лежит в основе точного и быстрого метода определения концентрации оптически активного вещества в растворе (например, сахара в водном растворе или биологических объектах (кровь, моча)). Применяемые для этого приборы называются поляриметрами или са-

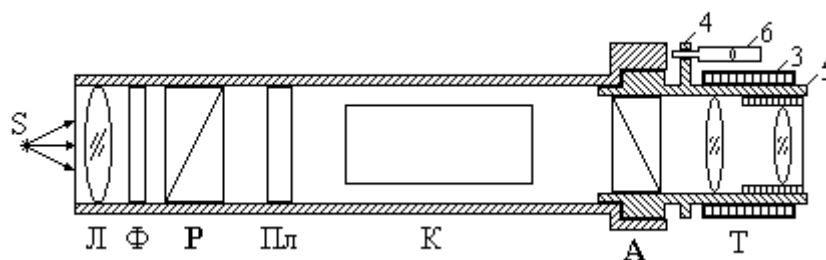
хариметрами. По измеряемому с их помощью углу поворота плоскости поляризации φ и известным значениям длины кюветы d и удельной постоянной вращения $[\alpha]$ растворенного вещества (для данного растворителя, длины волны и температуры) определяется концентрация раствора C .

4. ПОЛУТЕНЕВОЙ ПОЛЯРИМЕТР

В простейшем поляриметре между двумя скрещенными поляроидами помещается оптически активное вещество. Вследствие того, что после прохождения кюветы плоскость поляризации света повернется, в монохроматическом свете поле зрения просветляется. Чтобы снова получить темноту (т. к. свет остается линейно поляризованным), анализатор нужно повернуть на некоторый угол φ (и являющийся углом поворота плоскости поляризации), определяемый выражением (1) или (2).

Однако измерение угла φ таким методом является недостаточно точным, т. к. человеческий глаз малочувствителен к небольшим изменениям абсолютной величины яркости равномерно освещенного или затемненного поля. Для увеличения точности измерений используют *полутеневые поляриметры*, в которых определение угла вращения φ проводят путем уравнивания яркостей смежных частей поля зрения, окрашенных в один и тот же цвет. К малейшему различию этих яркостей глаз очень чувствителен.

Схема полутеневого поляриметра приведена на рис. 5.

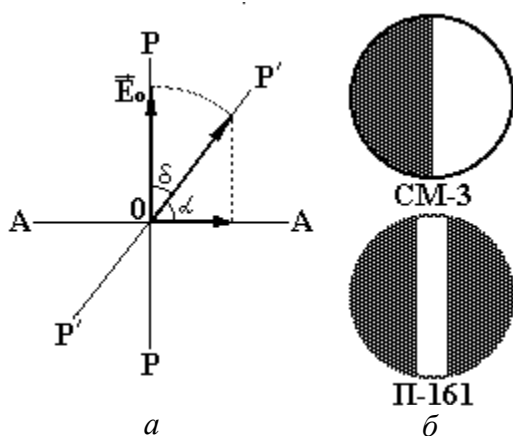


Р и с. 5

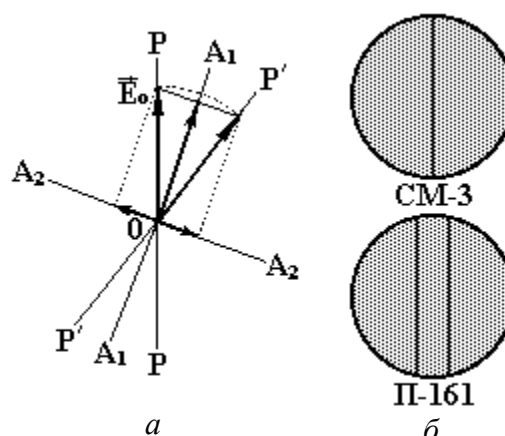
Конденсор (линза L) создает параллельный пучок света от источника S (например, натриевой лампы), который проходит через светофильтр Φ (в нашем случае оранжевый), поляризатор P , хроматическую фазовую (кварцевую) пластинку $Пл$, занимающую только часть поля зрения, кювету с веществом K , анализатор A , наблюдательную трубку T и попадает в глаз наблюдателя. Светофильтр Φ необходим для монохроматизации излучения источника, так как угол поворота

плоскости поляризации зависит от длины волны света. После прохождения поляризатора P световой поток станет линейно поляризованным. На рис. 6, *a*; 7, *a* направление плоскости поляризации света, прошедшего через поляризатор и имеющего амплитуду E_0 , обозначено через PP (направление распространения света перпендикулярно плоскости рисунка).

Разделение поля зрения в наблюдательной трубке на части (рис. 6, *б*; 7, *б*) обусловлено введением в оптическую систему поляриметра хроматической фазовой пластинки $Пл$. В поляриметре $СМ-3$ (при исследовании естественного вращения) она занимает боковую половину поля зрения, в поляриметре $П-161$ (магнитное вращение) – среднюю часть поля зрения. Таким образом, часть светового потока после прохождения поляризатора пройдет далее через кварцевую пластинку вдоль ее оптической оси. Пластинка повернет плоскость поляризации этой части светового потока на небольшой угол δ . Положение плоскости поляризации части потока после пластинки обозначим через $P'P'$. Таким образом, после пластинки световой поток будет неоднородным в том смысле, что его разные части будут поляризованы в разных плоскостях. Поэтому поле зрения окажется разделенным на две части, освещенности которых зависят от положения поляризатора и анализатора.



Р и с. 6



Р и с. 7

Рассмотрим сначала случай, когда в кювете нет оптически активного вещества. Пусть поляризатор P и анализатор A скрещены, т. е. плоскость AA пропускания анализатора перпендикулярна плоскости PP пропускания поляризатора (рис. 6, *a*). Анализатор не пропустит свет, прошедший только через поляризатор – соответствующий участок поля зрения будет затемнен (рис. 6, *б*). У света, прошедшего дополни-

тельно кварцевую пластинку, линейная поляризация и амплитуда сохраняются, но плоскость поляризации поворачивается, поэтому он частично пропускается анализатором – соответствующая часть поля зрения будет более светлой. Ее яркость (интенсивность света), по закону Малюса, определяется квадратом проекции вектора амплитуды E_0 на направление AA или $I = I_0 \cos^2 \alpha$, где α – угол между плоскостями $P'P'$ и AA . Поворачивая анализатор, т. е. изменяя положение плоскости AA , можно уравнивать яркости полей сравнения (рис. 7, б). Как видно из рис. 7, а, равенство яркостей будет иметь место при двух положениях плоскости пропускания анализатора: A_1A_1 , A_2A_2 (параллельном или перпендикулярном биссектрисе угла POP'). Положение A_2A_2 фиксируется более точно, так как в этом случае и яркость поля зрения меньше, и, главное, при малых значениях δ (в поляриметре СМ-3 $\delta \sim 7^\circ$) даже незначительные повороты анализатора вызывают резкое нарушение равенства яркостей полей сравнения.

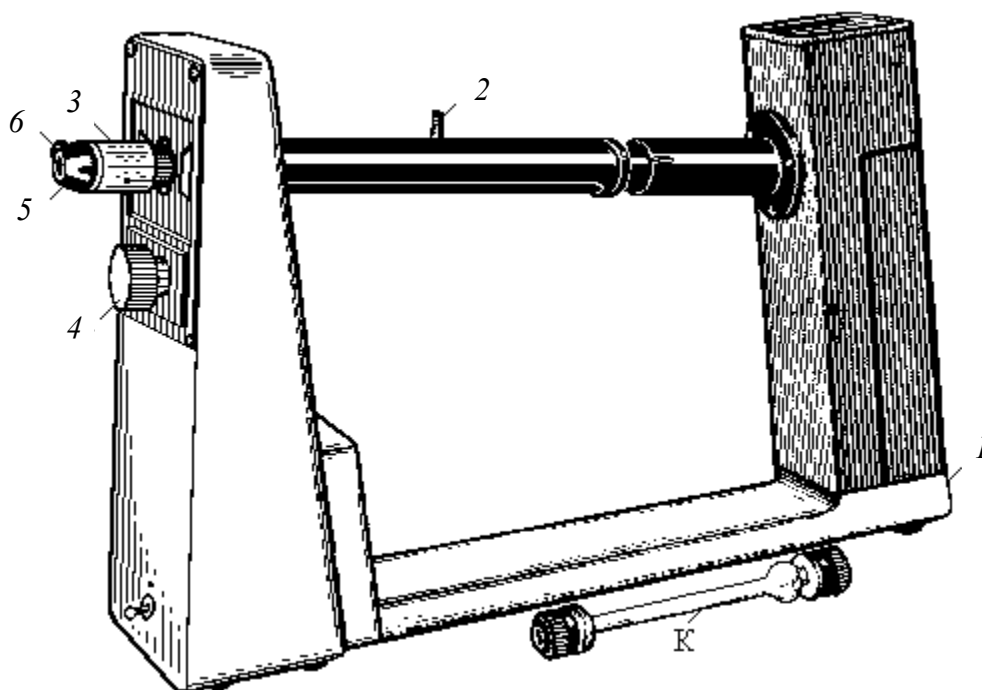
Если теперь между поляризатором и анализатором поместить кювету с оптически активным веществом (или кювету с оптически неактивным веществом в одновременно созданном продольном магнитном поле), то равенство яркостей полей сравнения нарушается, поскольку плоскости поляризации PP и $P'P'$ световых потоков повернутся на угол φ . Восстановления равенства яркостей полей сравнения добиваются поворотом анализатора на тот же угол φ , который и является искомым углом поворота плоскости поляризации.

Методика измерений

Для изучения естественного (в оптически активных веществах) вращения плоскости поляризации в данной работе используется полутеневой круговой поляриметр СМ-3, общий вид которого представлен на рис. 8.

Внимание!!! Поляриметр является точным измерительным прибором, обращаться с ним нужно осторожно и бережно. Нельзя прилагать большие усилия при перемещении подвижных частей прибора!

Поляриметр включают в сеть с помощью тумблера 1, расположенного в нижней части задней стенки осветительного кожуха. Измерения следует начинать через 10 мин. после включения лампы. Повернув крышку 2, вынимают из поляриметра кювету K и закрывают крышку 2 опять.



Р и с. 8

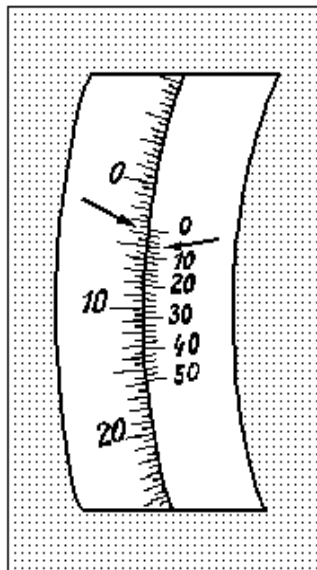
Внимание!!! Нельзя при проведении измерений оставлять кювету на столе! Ее нужно класть либо в кюветное отделение поляриметра, либо в ванночку для растворов.

Вращением втулки 3 наблюдательной трубки T , приводящим к продольному (к себе или назад) перемещению окуляра, устанавливают резкое изображение линий раздела полей сравнения. Вращая рифленую головку 4, связанную с анализатором и лимбом, находят такое положение анализатора A_2A_2 , при котором в поле зрения все части освещены одинаково (рис. 7). Измерения проводят только при чувствительном положении анализатора, которое, как уже отмечалось, характеризуется тем, что поля сравнения уравниваются при меньших яркостях и незначительное вращение анализатора вызывает резкое нарушение равенства яркостей полей сравнения. Отсчет β_0 (нулевой отсчет) производят через находящуюся на оправе окуляра 5 (наглазнике) лупу 6 по шкале лимба с помощью кругового нониуса с точностью до $0,02^\circ$. Порядок снятия отсчета указан ниже. Затем проделывают эти же операции, поместив кювету с чистым растворителем (дистиллированная вода), и убеждаются в том, что угол β_0 не изменился.

Перед началом измерений кювету K (рис. 8) необходимо промыть. Раскручивать надо только один ее конец возле выпуклости. Наполнять кювету раствором нужно до тех пор, пока на ее верхнем кон-

це не появится выпуклый мениск. Этот мениск сдвигается в сторону покровным стеклом, на покровное стекло кладется резиновая прокладка, прижимается втулкой и (легко!) затягивается гайкой. После наполнения кюветы покровные стекла с наружной стороны протираются мягкой салфеткой. Чтобы оставшийся пузырек воздуха не препятствовал распространению света и не мешал измерению, он наклонном заводится в утолщение кюветы. Кювета устанавливается в кюветное отделение поляриметра до соответствующего упора утолщением к окуляру так, чтобы середина кюветы располагалась в середине кюветного отделения. На трубке кюветы нанесена ее фактическая длина между торцами.

Для исследования естественного вращения плоскости поляризации используются прозрачные однородные растворы различной концентрации сахара в воде. Измерения проводят в том же порядке, что и с дистиллированной водой, предварительно наполнив кювету раствором соответствующей концентрации. Опять вращением втулки 3 устанавливают окуляр по глазу на резкость, плавным и медленным поворотом анализатора (головки 4) выравнивают яркость полей сравнения (рис. 7). По шкале лимба производят отсчет положения анализатора β .



Р и с. 9

И нулевой отсчет β_0 , и отсчет угла β снимают следующим образом (рис. 9). Определяют, на сколько делений N_1 повернулась шкала кругового градусного лимба (цена деления $0,5^{\circ}$) по отношению к нулю шкалы нониуса. Затем подсчитывают число делений N_2 от нуля нониуса до того штриха нониуса (цена деления $0,02^{\circ}$, а “10” соответствует $0,10^{\circ}$, “20” соответствует $0,20^{\circ}$ и т.д.), который точно совпадает со штрихом шкалы лимба. К отсчету по шкале лимба прибавляется отсчет по нониусу, т. е.

$$\beta = N_1 \cdot 0,5^{\circ} + N_2 \cdot 0,02^{\circ}.$$

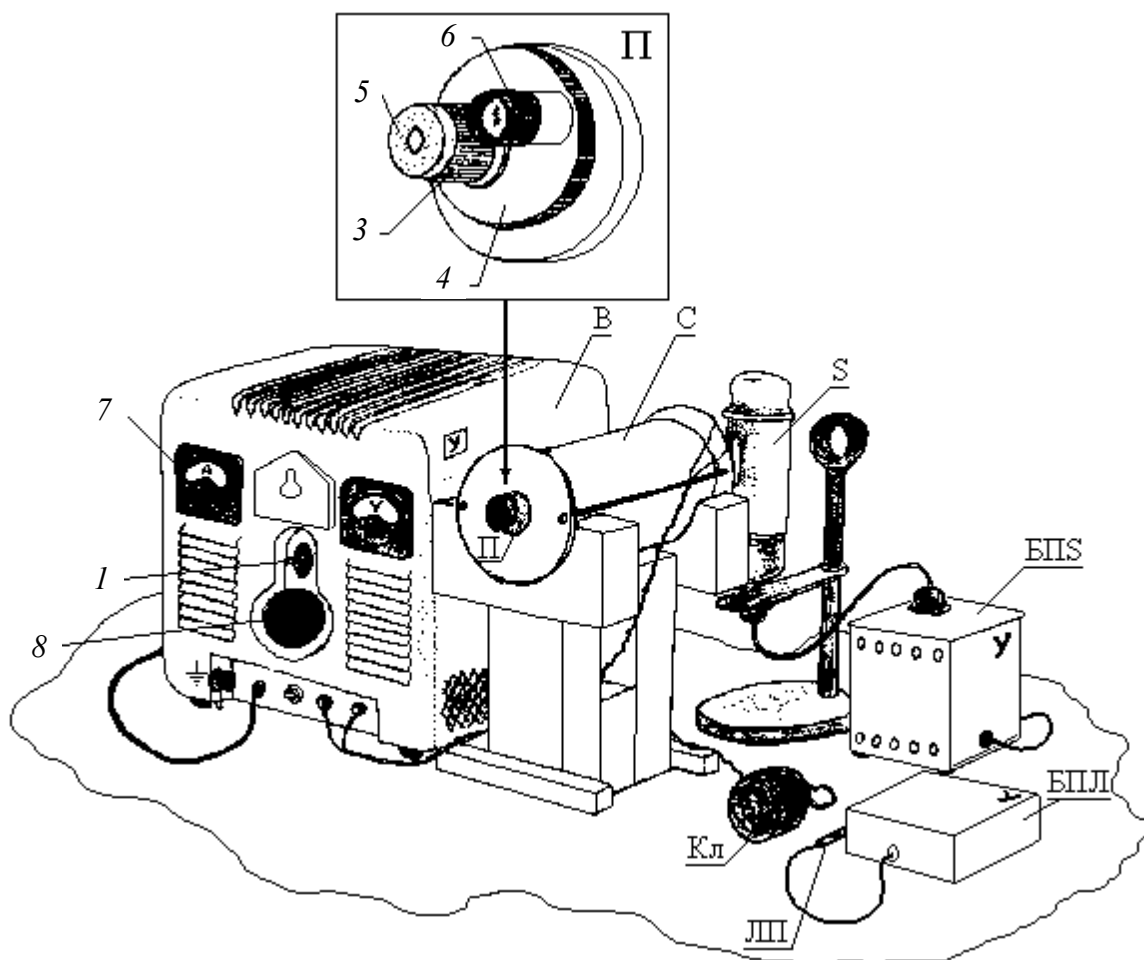
На рис. 9, например, отсчет угла равен

$$\beta = 7 \cdot 0,5^{\circ} + 3 \cdot 0,02^{\circ} = 3,56^{\circ}.$$

Измерения β следует проделывать по 3 раза для каждого раствора и в качестве окончательного значения брать среднее арифметическое. Нужно проверять периодически также и значение β_0 . Очевидно, что угол поворота плоскости поляризации $\varphi = \beta - \beta_0$.

Установка для исследования магнитного вращения плоскости поляризации (рис. 10) представляет собой портативный полутеневой поляриметр П-161 П, на который надет соленоид С. Внутри вдоль оси соленоида расположена кювета К с оптически неактивным веществом. Соленоид питается от выпрямителя В, включаемого в сеть тумблером 1. Сила тока I в соленоиде измеряется вмонтированным в прибор В амперметром 7 и может изменяться с помощью реостата 8, также установленного в выпрямителе В. Ключ Кл позволяет изменять направление тока, а следовательно, и направление магнитного поля в соленоиде.

Внимание!!! Используемый соленоид С обладает значительной индуктивностью. Следовательно, размыкание цепи соленоида в целях изменения направления тока или при окончании работы с ним допускается лишь при минимальном токе ($0 \div 0.1$ А), что предотвращает выгорание контактов ключа Кл, а также пробой междуслойной изоляции обмотки соленоида от возникающей при этом э.д.с. самоиндукции!



Р и с. 10

Установка включает в себя также источник света S (натриевая лампа) с блоком питания $БПС$, лампочку подсвета шкалы $ЛП$ с блоком питания $БПЛ$. Длина L соленоида должна превышать длину d кюветы с исследуемым веществом, чтобы магнитное поле, вызывающее вращение плоскости поляризации, можно было считать однородным.

Индукция магнитного поля B пропорциональна току I в соленоиде и равна

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{L} = \mu_0 \cdot I \cdot n \quad (\text{СИ}), \quad B = \frac{4\pi}{c} \cdot I \cdot n \quad (\text{СГС}),$$

где N – число витков в соленоиде; n – число витков на единицу длины, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$. – магнитная постоянная.

Измерение угла поворота плоскости поляризации в магнитном поле производится так же, как и при естественном вращении, с той лишь разницей, что кювету не вынимают из прибора и исследуемое вещество (например, этиловый спирт или дистиллированную воду) в ней не меняют, а нулевой отсчет находят при отсутствии тока в соленоиде.

При проведении измерений в поляриметре П-161 вместе с головкой анализатора относительно неподвижной градусной шкалы вращаются нониусы, зрительная труба и отсчетная лупа δ . Вращением муфты производится установка лупы на резкое изображение отсчетных шкал. В случае необходимости можно включить подсветку шкал. На градусной шкале влево и вправо от нуля нанесено по 20 делений (цена деления – 1°). Нижняя подвижная шкала является нониусной и имеет по 10 делений слева и справа от нуля (цена деления нониусной шкалы – $0,1^\circ$). Левый или правый нониус используют в зависимости от того, соответственно слева или справа от нуля градусной шкалы находится нуль нониуса.

Точность измерения угла поворота в случае магнитного вращений – $0,1^\circ$.

ЗАДАНИЕ

а) Естественное вращение

1. Определить нулевой отсчет β_0 поляриметра.
2. Измерить угол вращения плоскости поляризации φ для всех имеющихся растворов сахара.
3. Построить график зависимости угла поворота плоскости поляризации от концентрации раствора: $\varphi = f(C)$.
4. С помощью этого графика определить концентрацию C_x неизвестного раствора.

5. По наклону графика найти удельную постоянную вращения сахара, выраженную в градусах на метр, пользуясь формулой: $[\alpha] = \frac{\Delta\varphi}{d \cdot \Delta C}$.

Длина кюветы $d=0,2\text{ м}$ (d может быть указана на установке).

Оценить погрешность измерений.

б) Магнитное вращение

1. Определить нулевой отсчет β_0 поляриметра (при выключенном токе).

2. Измерить величину угла магнитного вращения φ при токах I в соленоиде от 0 до 5 А (через 1 А).

3. Предварительно сбросив ток до $0 \div 0,1\text{ А}$, изменить с помощью ключа направление тока на противоположное и измерить величину угла магнитного вращения φ при токах в соленоиде от 0 до 5 А (через 1 А). Проведя измерения, сбросить ток и выключить источник тока, выключить лампу!

4. Построить график зависимости величины угла поворота плоскости поляризации от величины и направления тока в соленоиде: $\varphi = f(I)$. (Положительным для наблюдателя считать вращение плоскости поляризации по часовой стрелке (при положительном токе в соленоиде) и отрицательным – против часовой стрелки (при отрицательном токе в соленоиде).)

5. По наклону графика найти постоянную Верде V в $\frac{\text{град.}}{\text{Тл} \cdot \text{м}}$ (СИ) и $\frac{\text{угл.мин.}}{\text{Гс} \cdot \text{см}}$ (СГС), пользуясь формулами:

$$V = \frac{\Delta\varphi}{\mu_0 \cdot d \cdot n \cdot \Delta I} \quad (\text{СИ}), \quad V = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4 \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot \Delta I} \quad (\text{СГС}).$$

Параметры установки: $L = 0,1\text{ м}$; $N = 2230$ витков; $d = 0,1\text{ м}$. Параметры L, N, d могут быть указаны на установке.

Оценить погрешность измерений.

В О П Р О С Ы

1. Что такое пространственная дисперсия?
2. Какие вещества называют оптически активными?
3. Каковы основные закономерности естественного вращения плоскости поляризации?
4. Каковы причины естественного вращения плоскости поляризации?
5. При каком условии макроскопическая изотропная среда не имеет центра симметрии?
6. Каковы основные закономерности магнитного вращения плоскости поляризации?
7. Объяснить явление магнитного вращения плоскости поляризации.
8. Как зависит направление поворота плоскости поляризации при естественном и магнитном вращении от направления распространения света?

9. Что произойдет с линейно поляризованным светом при распространении вдоль магнитного поля, если его частота близка к линии поглощения?
10. В чем отличие естественной оптической активности от магнитного вращения плоскости поляризации?
11. Как устроен простейший поляриметр?
12. Объяснить принцип действия полутеневого поляриметра.
13. Используя закон Малюса, объяснить, почему в полутеновом поляриметре положение A_2 равной яркости полей сравнения (рис. 7) фиксируется более точно, чем положение A_1 .
14. Какой разновидности сахар исследуется в работе?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. §§ 163–169, 173.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Оптика. М.: Наука, 1985. §§ 94–96.
3. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. М.: Высшая школа, 1978. §§ 3, 4, 5.
4. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. § 44.
5. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986. §§ 2.8, 2.9.
6. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. В.И. Ивероной. М.: Наука, 1968. Задача 147, 148.
7. Физический практикум / Под ред. Г.С. Кембровского. Мн.: Университетское, 1986. Работа № 48.