

где  $V$  — разность потенциалов в электростатических единицах:

$$V = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 0,0004}{2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5}} = 4,5 \text{ эл.-стат. ед. потенциала} \approx 1350 \text{ в.}$$

Основным достоинством керровской ячейки является практическая безынерционность установления и исчезновения эффекта порядка  $10^{-9}$  сек. В связи с этим ячейка Керра представляет один из самых быстродействующих световых затворов и применяется при фотографировании быстро протекающих процессов. На применении ячейки Керра была основана первая советская система звукового кино П. Г. Тагера («тагелефон»). Напряжение на ячейке Керра модулировалось со звуковой частотой (т. II, § 95, 1959 г.; в пред. изд. § 101).

### § 39. Вращение плоскости поляризации. Эллиптическая поляризация

Если на поляроид падает плоскополяризованный луч и между главной плоскостью поляроида и плоскостью поляризации луча существует некоторый угол, то плоскость поляризации луча, вышедшего из поляроида, будет повернута на этот же угол. Собственно говоря, как мы уже видели выше, неправильно в данном случае говорить о повороте плоскости поляризации. Сквозь поляроид проходит лишь проекция на данное направление исходного колебания. Чем больше угол, тем меньше амплитуда прошедшего колебания (§ 35).

В так называемых активных веществах дело обстоит совсем иначе. В них действительно происходит поворот плоскости поляризации проходящего луча. Поворот пропорционален толщине проходящего вещества. Вышедший луч имеет *ту же амплитуду, но другую плоскость поляризации*. Схема установки для наблюдения явлений вращения плоскости поляризации аналогична схеме для наблюдения интерференции (рис. 140): между поляроидами  $A$  и  $P$  помещают или кусок активного вещества, или сосуд, наполненный активной жидкостью. Если мы помещаем активное вещество между скрещенными поляроидами, то поле светлеет, и, чтобы опять получить темноту, надо повернуть анализатор (или поляризатор) на некоторый угол. Очевидно, этот угол равен углу поворота плоскости поляризации. Величина и направление поворота зависят от вещества, толщины слоя вещества, а также от длины волны света.

Из твердых веществ к числу сильно вращающих принадлежат сахар и кварц; из жидкостей — винная кислота, моча и сахарный раствор.

Активные вещества делятся на *право- и левовращающие* в зависимости от направления вращения. Например, кварц бывает право- и левовращающим, есть право- и левовращающая винная кислота.

Явление вращения плоскости поляризации тесно связано со структурой вещества. В органических веществах вращение объясняется наличием *асимметричного атома* углерода, т. е. атома углерода, у которого все четыре валентности насыщены различными атомами. Схематически при этом возможны два существенно различных расположения, показанных на рис. 147; здесь зачерненный кружок означает атом углерода, а  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $T$  — атомы различных элементов. Если левая схема соответствует одному направлению вращения, то правая — другому, причем обе схемы, очевидно, изображают одно и то же химическое вещество. Кроме структуры самих молекул играет роль также и их расположение. Особенно отчетливо это видно из того факта, что кусок неактивного вещества, например желатина, при закручивании приобретает активность вдоль оси вращения. Плоскость поляризации вращается при этом в направлении, обратном направлению закручивания.

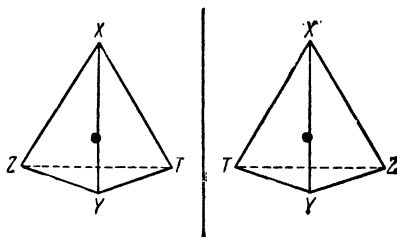


Рис. 147. Асимметрический атом углерода.

Явлением вращения плоскости поляризации пользуются для определения концентрации какого-либо активного вещества в растворе. Поскольку величина угла поворота пропорциональна концентрации активного вещества и толщине слоя, от измеренной величины вращения легко перейти к концентрации. Для этого нужно лишь знать величину удельной вращательной способности, относимой к единице концентрации и единице толщины.

Для обнаружения небольших количеств веществ, например сахара, в растворах необходимо иметь достаточно чувствительный прибор, обнаруживающий весьма небольшой поворот плоскости поляризации. Приведенная выше схема непригодна для этой цели;

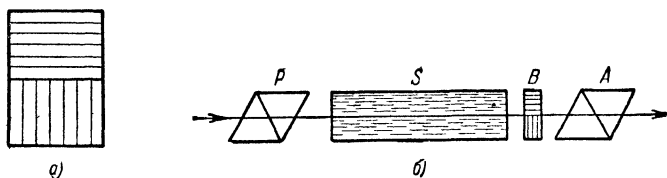


Рис. 148. Бикварц (а). Схема сахариметра (б).

ввиду этого схема *сахариметра* (прибора для определения концентрации сахара) несколько усложнена. Добавляется обычно кроме николей еще так называемый *бикварц*. Бикварц состоит из двух кварцевых пластинок, вырезанных перпендикулярно к оптической оси (рис. 148, а). Одна пластинка правовращающая, другая — лево-

вращающая. Толщина пластинок подобрана так (3,75 мм), что плоскость поляризации желто-зеленых лучей поворачивается на  $90^\circ$ .

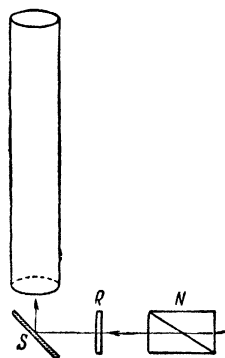


Рис. 149. Схема опыта Умова.

Поэтому при помощи пластинок между параллельными николями желто-зеленые лучи гасятся и проходят лишь красные и фиолетовые лучи. Поле имеет тогда синевато-фиолетовую «чувствительную» окраску и разделено на две части. При малейшем повороте поляризатора или анализатора окраска обеих половинок бикварца резко меняется. Если одна из половинок окрашивается в синий цвет, то другая — в красный или наоборот в зависимости от направления вращения. В сахариметре бикварц *B* помещают между сосудом и анализатором (рис. 148). Установив при пустом сосуде *S* анализатор на чувствительную окраску обоих полей бикварца, наливают жидкость и поворотом анализатора добиваются восстановления

одинаковой окраски обоих полей. Как указывалось, поворот анализатора равен повороту плоскости поляризации. На лимбе анализатора наносятся значения концентрации сахара.

Н. А. Умов использовал явление вращения плоскости поляризации для создания чрезвычайно красивого демонстрационного опыта (опыт Умова). В сборнике, посвященном памяти Умова, А. А. Эйхенвальд следующим образом описывает этот опыт:

«При помощи небольшого зеркала, поставленного на пути горизонтального пучка поляризованного света, мы отклоняем его вертикально вверх так, чтобы он мог пройти по оси этого цилиндрического сосуда (рис. 149).

Сперва мы наполним сосуд водой и сделаем ее мутной прибавкой небольшого количества раствора канифоли в спирту. Тотчас же путь луча обрисовывается во всю высоту сосуда в виде белого столба со слегка размытыми контурами. Только благодаря присутствию мути в воде мы и можем видеть этот путь лучей (*явление Тиндалля*): действительно, ведь луч света идет вертикально вверх, а потому к нам в глаз непосредственно попасть не может; но каждая частичка мути разбрасывает свет во все стороны диффузно и часть этого диффузно отраженного света попадает в наши глаза.

Однако это еще не все: оказывается, что каждая разбрасывающая свет частица поляризует свет (§ 35), и, следовательно, может служить нам анализатором. Положим, что наш горизонтальный луч,



Рис. 150. Винтообразный ход луча в опыте Умова.

идущий из фонаря, имеет колебания по оси фонаря; при этих условиях путь света в воде будет виден, если смотреть справа и слева по оси фонаря, но ни спереди, ни сзади по оси фонаря он виден не будет.

Если повернуть поляризатор на какой-либо угол, то на тот же угол повернется и весь столб с его темными и светлыми сторонами.

Заменим теперь воду раствором сахара, тоже слегка мутным; тогда по мере того, как луч света все глубже и глубже входит в раствор сахара, плоскость его колебаний поворачивается, и если внизу сосуда колебания происходили по оси фонаря, то на некоторой высоте колебания эти будут уже в другом направлении, под углом к оси. Этот поворот колебаний увеличивается по высоте с равномерной постепенностью, и мы видим, что путь луча с его светлыми и темными сторонами как бы закручивается в растворе сахара винтообразно (рис. 150).

Если поместить между поляризатором и раствором сахара кристаллическую пластинку, то все явление расцветается:

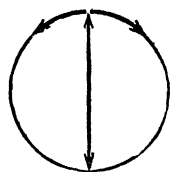


Рис. 151. Разложение прямолинейного колебания на два круговых колебания.

столб света оказывается винтообразно обмотанным разноцветными лентами всевозможных оттенков». Френель разработал феноменологическую теорию естественного вращения плоскости поляризации, рассматривая его как проявление своеобразного двойного лучепреломления. С этой целью Френель разложил плоскополяризованное колебание, входящее в оптически активную среду, на два круговых противоположно направленных колебания (рис. 151). В каждый момент времени вращающиеся векторы круговых колебаний образуют равные углы с вектором плоскополяризованного колебания. Предположим теперь, что оба круговых колебания распространяются в среде с различными скоростями. Тогда между ними возникнет дополнительная разность фаз и нарушится указан-



Огюстен Жан Френель (1788—1827).

ное равенство углов. Биссектрисой угла между векторами круговых колебаний явится уже новое направление, соответствующее новому результирующему световому вектору. Таким образом, возникнет поворот светового вектора в сторону, соответствующую направлению вращения более быстро распространяющегося в среде кругового колебания.

Теория Френеля не освещает причины различия скоростей двух противоположно направленных круговых колебаний. На этот вопрос дает ответ молекулярная теория вращения плоскости поляризации. В молекулярной теории приходится учитывать конечные размеры молекул, сказывающиеся на интерференции вторичных волн, возникающих в отдельных частях молекулы под действием проходящей световой волны.

В 1846 г. Фарадей опубликовал статью под странным названием «О магнетизации света и освещении магнитных силовых линий». Фарадей понимал необычность такого заголовка и сделал следующее пояснение: «Заголовок этой статьи, я думаю, привел многих в недоумение относительно ее содержания, и потому я считаю долгом прибавить объяснительное примечание... Я думаю, что в опытах, описанных мной в этой статье, свет подвергался действию магнитной силы, т. е. магнетизм в силах материи подвергался действию и в свою очередь действовал на магнетизм в силе света». Речь шла об открытом Фарадеем новом эффекте вращения плоскости поляризации света, проходящего сквозь тело, помещенное в продольное магнитное поле. Это явление получило название *эффекта Фарадея*.

Приведенное примечание Фарадея показывает, что, несмотря на неудачное название статьи, он понимал, что причиной наблюдающихся эффектов является не непосредственное действие магнитного поля на свет, а изменение оптических свойств вещества в магнитном поле.

До сих пор речь шла лишь о плоскополяризованном свете. Однако понятие поляризации света является гораздо более общим и обнимает гораздо больший круг явлений. Поляризованным, вообще говоря, называют луч, в котором существует какая-либо упорядоченность колебаний. Например, световой луч, в каждой точке которого равномерно вращается его электрический вектор, называется *поляризованным по кругу*. Световой луч, у которого конец электрического вектора описывает эллипс, называется *эллиптически поляризованным*.

В природе эллиптически поляризованный свет получается при отражении естественного света от металла. Накаленные металлы испускают свет, обладающий некоторой долей эллиптической поляризации. Легко также получить эллиптически поляризованный свет из плоскополяризованного. Собственно говоря, мы его уже получали в наших схемах в качестве промежуточного состояния, но не обращали на это внимание. В самом деле, при прохождении света

сквозь кристаллическую пластинку в интерференционных опытах из нее выходил луч, состоявший из двух взаимно-перпендикулярных колебаний, отстававших друг от друга по фазе. При разности фаз, не равной нулю или целому числу  $\pi$ , сложение таких колебаний дает, вообще говоря, движение по эллипсу, а в частном случае (т. I, § 59, 1959 г.; в пред. изд. § 69).

Таким образом, кристалл кварца, вырезанный параллельно оптической оси и расположенный соответствующим образом, может превратить плоскополяризованный свет в свет, поляризованный по кругу. Кварц же, вырезанный перпендикулярно к плоскости оси, просто поворачивает плоскость поляризации на некоторый угол, как это указывалось выше. Анализ эллиптически поляризованного света заключается в определении осей эллипса, равных соответствующим амплитудам, и разности фаз слагающих колебаний. Для этой цели употребляют кроме анализаторов упомянутые выше компенсаторы, служащие для определения разности фаз. Эллиптически поляризованный свет является самым общим типом поляризованного света; все остальные виды поляризации являются частными случаями эллиптически поляризованного света, как мы это уже указывали.

С эллиптической поляризацией связано наиболее общее определение естественного света. С. И. Вавилов пишет: «Естественный свет теоретически можно осуществить бесчисленными способами, рассматривая его или как результат наложения однотипных эллипсов с хаотически распределенными осями, или как сумму всевозможных, беспорядочно ориентированных эллипсов».



Сергей Иванович Вавилов (1891—1951).