

Работа № 34

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА И ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Цель работы – исследовать зависимость интенсивности света, прошедшего поляризатор и анализатор от угла между их главными плоскостями, и зависимость угла поворота плоскости поляризации света, прошедшего раствор сахара, от концентрации сахара в растворе.

Закон Малюса

Устройства для получения линейно поляризованного света называются поляризаторами. В каждом поляризаторе существует плоскость, называемая главной плоскостью поляризатора. Если в световой волне, падающей на поляризатор, колебания происходят параллельно этой плоскости, то такая волна свободно проходит сквозь поляризатор. Световая волна с колебаниями, перпендикулярными к этой плоскости, сквозь поляризатор не проходит (поглощается, отражается).

При произвольном угле наклона α плоскости поляризации падающей волны относительно главной плоскости поляризатора напряженность электрического поля световой волны, прошедшей через поляризатор, равна (рис. 1)

$$E(\alpha) = E \cos \alpha, \quad (1)$$

где E – напряженность падающей волны.

Если на поляризатор падает естественный свет, представляющий собой совокупность волн с самыми различными направлениями поляризации, то свет, прошедший поляризатор, является линейно поляризованным с плоскостью поляризации, параллельной главной плоскости поляризатора.

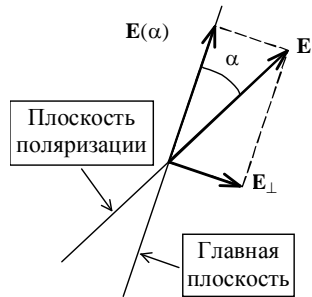


Рис. 1

Для того чтобы выяснить, как ориентирована в пространстве плоскость поляризации пучка света, применяются устройства, называемые анализаторами. Конструктивно поляризаторы и анализаторы одинаковы. Различие в названии отражает лишь их разное назначение.

Если на пути естественного света, распространяющегося вдоль оси Z , установить, как это показано на рис. 2, поляризатор Π и анализатор A , то интенсивность света, прошедшего поляризатор и анализатор, будет зависеть от угла α между главными плоскостями поляризатора и анализатора (на рис. 2 они заштрихованы). Поскольку интен-

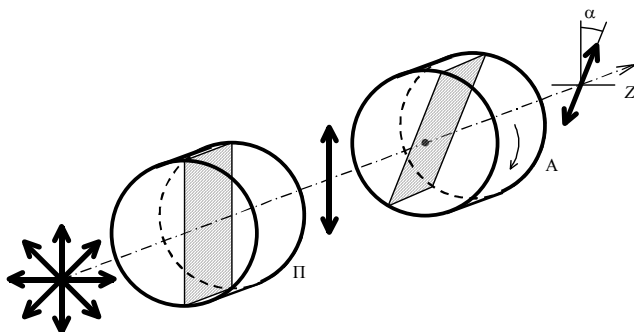


Рис. 2

сивность, т.е. плотность потока энергии световой волны, пропорциональна квадрату напряженности электрического поля, то $I(\alpha)$ – интенсивность света, прошедшего поляризатор и анализатор при заданном значении угла α , равна

$$I(\alpha) \sim E^2(\alpha) = E^2 \cos^2 \alpha \sim I(0) \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

где $I(0)$ – интенсивность света, прошедшего поляризатор и анализатор при $\alpha = 0$. Эта зависимость называется законом Малюса.

Описание экспериментальной установки 1

Зависимость интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор, от угла между их главными плоскостями исследуется на установке, схема которой показана на рис. 3. На этом рисунке S – источник света, Π – поляризатор, A – анализатор, $\Phi\Pi$ – фотоприемник,

мкА – микроамперметр. Источником света является лампа накаливания. В данной лабораторной работе в качестве поляризатора и анализатора используются поляроиды. Поляроид представляет собой пленку из прозрачной пластмассы, в которую введено большое количество одинаково ориентированных кристалликов сульфата йодистого хирина. Эти кристаллики обладают двойным лучепреломлением. Луч света в них разделяется на два поляризованных луча: обыкновенный и необыкновенный. Однако один из этих лучей очень быстро поглощается (на пути примерно в 0,1 мм). Для характеристики направления, при колебаниях вдоль которого свет проходит свободно, в случае тонких поляроидов вместо термина «главная плоскость» используется термин «ось свободного пропускания».

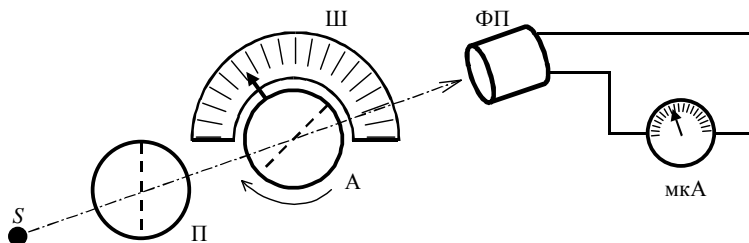


Рис. 3

В поляризаторах другого типа, поляризационных призмах, используется зависимость коэффициента отражения света от его поляризации.

Угол между осями свободного пропускания поляроидов в установке может изменяться. Он измеряется по угловой шкале Ш. Свет, прошедший поляризатор и анализатор, регистрируется фотоприемником ФП. В настоящей работе в качестве фотоприемника используется вакуумный фотоэлемент. Ток этого элемента (фототок) измеряется микроамперметром. Фотоэлемент работает в режиме, при котором фототок i пропорционален интенсивности падающего на элемент света I . В этом случае

$$\frac{i(\alpha)}{i(0)} = \frac{I(\alpha)}{I(0)}. \quad (3)$$

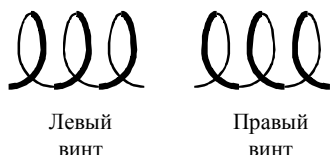
Учитывая формулу (2), получим выражение для предполагаемой зависимости фототока от угла:

$$\frac{i(\alpha)}{i(0)} = \cos^2 \alpha . \quad (4)$$

Экспериментальное подтверждение этой зависимости означает также подтверждение справедливости формулы (2).

Распространение линейно поляризованного света в оптически активном веществе

У некоторых веществ не только коэффициент пропускания света зависит от его поляризации, но и скорость распространения излучения. Этот эффект может быть связан как со структурой кристалла, так и с анизотропией молекул. Сложные молекулы одного и того же вещества могут существовать в виде разных пространственных структур – изомеров. Один из вариантов изомерии – зеркальная симметрия. Простейший пример – левая и правая руки. На рис. 4 показаны две спиралевидные структуры – право- и левовинтовая. Утолщенную часть витка можно считать ближней к наблюдателю.



Левый
винт

Правый
винт

Рис. 4

Спирали отображаются одна в другую зеркальным отражением. Однако никаким пространственным перемещением и поворотом совместить их невозможно. Различие право- и левовинтовых молекул сохраняется при любой их ориентации, даже

в растворе. Это проявляется в оптических свойствах изомера. Оказывается, световое излучение с право- и левовинтовой круговой поляризацией распространяется через раствор изомера с разной скоростью. Раствор изомера способен вращать плоскость поляризации распространяющегося в нем линейно поляризованного света. Такие вещества называются оптически активными. Как известно, спиралевидную структуру имеет молекула ДНК. Однако и гораздо более простые органические вещества, например сахар, обладают оптической активностью.

Для того чтобы объяснить явление оптической активности, представим линейно поляризованное излучение как сумму двух волн с круговой поляризацией. Поляризованный по кругу свет — это плоская монохроматическая электромагнитная волна, вектор \mathbf{E} которой в каждой точке пространства вращается с частотой ω , не изменяясь по величине. Если свет распространяется вдоль оси Z , то конец вектора \mathbf{E} в плоскости XY описывает окружность. Совокупность точек — концов векторов $\mathbf{E}(X, Y, Z, t)$ представляет собой цилиндрическую спираль, радиус которой равен E , а шаг равен длине волны λ . В зависимости от направления вращения вектора \mathbf{E} различают поляризацию по правому и по левому кругу. Волна называется поляризованной по правому кругу, когда вектор \mathbf{E} вращается по часовой стрелке, если смотреть навстречу распространяющейся волне. В случае противоположного направления вращения говорят о поляризации по левому кругу.

Если вдоль оси Z распространяются с одинаковой скоростью две поляризованные по кругу волны одинаковой частоты и амплитуды, но с противоположными направлениями вращения вектора \mathbf{E} , то их сумма эквивалентна одной линейно поляризованной волне. Для доказательства этого утверждения рассмотрим векторную диаграмму, показанную на рис. 4. Ось Z перпендикулярна к плоскости чертежа. Волна распространяется навстречу наблюдателю. Дуговыми стрелками показаны направления вращения векторов волн, поляризованных по правому и левому кругу, $\mathbf{E}_п$ и $\mathbf{E}_л$. Так как векторы $\mathbf{E}_п$ и $\mathbf{E}_л$ вращаются с одинаковой угловой скоростью, равенство углов наклона векторов к оси X не нарушается. Из чертежа видно, что результирующий вектор \mathbf{E} всегда направлен вдоль оси X .

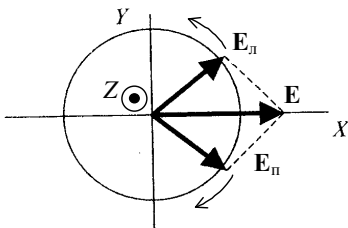


Рис. 4

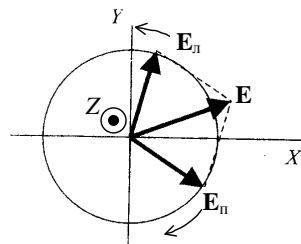


Рис. 5

В оптически активных веществах скорости распространения волн, поляризованных по правому и по левому кругу, не совпадают. В результате после прохождения светом слоя с оптически активным веществом волны приобретут разные набеги фазы. Векторы \mathbf{E}_n и \mathbf{E}_l окажутся под разными углами относительно оси X , как это показано на рис. 5. Результирующий вектор \mathbf{E} при этом не будет совпадать с направлением оси X , т.е. произойдет поворот плоскости поляризации вектора \mathbf{E} на некоторый угол. Величина этого угла пропорциональна толщине слоя оптически активного вещества.

Опытным путем установлено, что угол поворота плоскости поляризации β пропорционален концентрации C сахара в растворе и длине пути света l в этом растворе:

$$\beta = k l C . \quad (5)$$

Коэффициент k определяется прежде всего природой оптически активного вещества. Кроме того, он зависит от применяемого растворителя, длины световой волны, температуры раствора.

Описание экспериментальной установки 2

Обнаружить поворот плоскости поляризации и измерить угол этого поворота можно с помощью поляризатора и анализатора, как в первом эксперименте. Однако для увеличения точности измерений в данном опыте применен полутеневого метод индикации угла поворота плоскости поляризации. Схема соответствующей установки показана на рис. 6.

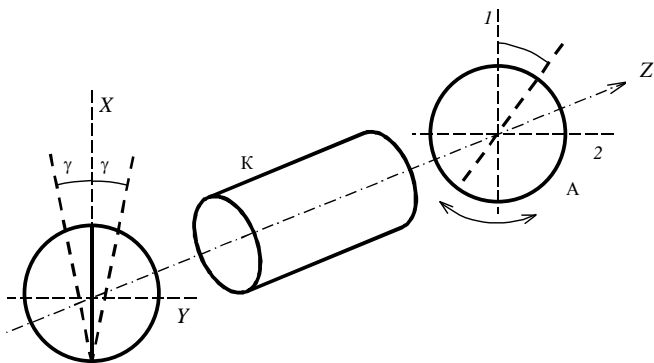


Рис. 6

Для получения поляризованного света используют два поляризатора Π_1 и Π_2 , которые разделяют падающий на них световой пучок на две части. Оси свободного пропускания поляризаторов развернуты в их плоскости XU на малый угол 2γ (несколько градусов). Свет, прошедший поляризаторы Π_1 и Π_2 , имеет одинаковую интенсивность, но две части пучка имеют разную ориентацию плоскостей поляризации. Между поляризаторами и вращающимся анализатором A может быть установлена кювета K с раствором сахара.

Анализатор вращают так, чтобы добиться одинаковой освещенности двух половин поля зрения. Если кювета с сахаром отсутствует, это возможно при двух положениях анализатора. Во-первых, когда главная плоскость (и ось свободного пропускания) анализатора параллельна плоскости симметрии XZ составного поляризатора $\Pi_1 - \Pi_2$ (ориентация 1 анализатора на рис. 6). При этом углы между осью свободного пропускания анализатора и осями свободного пропускания поляризаторов равны γ . Во-вторых, когда ось свободного пропускания анализатора перпендикулярна к плоскости симметрии XZ (ориентация 2 анализатора на рис. 6). При этом углы между осью свободного пропускания анализатора и осями свободного пропускания поляризаторов равны

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \gamma \quad \text{и} \quad \alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \gamma,$$

а интенсивности, согласно закону Малюса (2), равны

$$I(\alpha_1) = I(0) \cos^2 \alpha_1 = I(\alpha_2) = I(0) \cos^2 \alpha_2.$$

Так как углы α_1, α_2 близки к $\pi/2$, интенсивность прошедшего света невелика. Поэтому поле зрения во втором варианте настройки анализатора должно быть достаточно темным (но не максимально темным).

Если между поляризаторами и анализатором находится кювета с раствором сахара, то плоскости поляризации волн, прошедших как поляризатор Π_1 , так и поляризатор Π_2 , на выходе из кюветы повернутся на один и тот же угол β в одну и ту же сторону. Отклонение этих плоскостей от главной плоскости анализатора перестает быть симметричным. Интенсивность света, прошедшего анализатор, в правой и левой половинах поля зрения становится неодинаковой.

Если теперь анализатор повернуть на угол β в том же направлении, в котором вращались плоскости поляризации света, то положение плоскостей поляризации по отношению к главной плоскости анализатора (оси свободного пропускания) становится опять симметричным. Интенсивность света, прошедшего анализатор, в правой и левой половинах поля зрения становится опять одинаковой. Повышение точности отсчета угла достигается за счет того, что глаз имеет повышенную чувствительность к разнице освещенностей в пределах поля зрения.

Разность угловых координат анализатора, измеренных по угломерной шкале в отсутствие кюветы и с кюветой, равна углу поворота плоскости β поляризации. Поскольку фазовая скорость зависит от длины волны излучения, то и угол поворота плоскости поляризации будет зависеть от λ . При освещении белым светом добиться равенства интенсивностей света в правой и левой частях поля зрения одновременно для всех длин волн невозможно. Правая и левая части поля зрения будут иметь разную окраску. Поэтому диапазон длин волн должен быть узким. Для этого используется светофильтр.

В настоящее время существует несколько конструкций промышленных приборов – сахариметров, предназначенных для контроля содержания сахара в растворе. Во всех этих приборах используется в различных модификациях полутеневого метод определения угла вращения плоскости поляризации.

Задания

1. На установке 1 измерить значения фототока i для ряда значений угла α между осями свободного пропускания поляризатора и анализатора в пределах от 0 до 90° с шагом 10° . При каждом значении α измерения проводить трижды, затем вычислять среднее значение фототока.

2. Построить зависимость $i(\alpha)/i(0)$ от $\cos^2 \alpha$. Сделать вывод.

3. На установке 2 измерить углы поворота β плоскости поляризации света для нескольких кювет с известными значениями концентрации сахара. Для каждого раствора измерения проделать три раза и найти среднее значение.

4. Построить график зависимости угла поворота плоскости поля-

ризации света от концентрации сахара в растворе C .

5. Измерить угол поворота плоскости поляризации света для кюветы с неизвестной концентрацией сахара. Определить концентрацию сахара в данном растворе, используя график зависимости β от C .

Контрольные вопросы

1. Что такое линейная поляризация света, естественная, круговая?
2. Какие физические явления используются в поляризаторах (анализаторах)?
3. Что такое главная плоскость поляризатора, ось свободного пропускания?
4. Что является началом отсчета угла в измерениях зависимости фототока от угла поворота анализатора?
5. Что такое оптически активные вещества? Каковы особенности молекулярного строения оптически активных веществ?
6. Как объяснить явление вращения плоскости линейной поляризации света раствором оптически активного вещества?
7. В чем заключается полутеневого метод измерения угла поворота плоскости поляризации?
8. Что является началом отсчета в измерениях угла вращения плоскости линейной поляризации полутеневым методом?

Литература

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4: Волны. Оптика. – М.: Астрель, 2001 (§ 6.1 – 6.3).
2. *Трофимова Т.И.* Курс физики. 4-е изд. – М.: Высш. шк., 1997 (§ 180).