

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 3.2.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ
ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА***

* Степанова Л.Ф. Волновая оптика: Методические указания к выполнению лабораторных работ по физике / Л.Ф. Степанова, В.В. Некрасов, М.М. Яблоновская. – Архангельск: РИО АЛТИ, 1988. – 36 с.

Теоретические положения

Световые волны представляют собой совокупность периодических электрических и магнитных полей, распространяются в пространстве со скоростью света. В вакууме эта скорость равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Уравнение световой волны представляет собой совокупность двух уравнений, описывающих изменение векторов напряженности полей E и H во времени и в пространстве. Уравнения плоской монохроматической волны имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0 \sin 2\pi \left(\nu t - \frac{r}{\lambda} \right); \\ H &= H_0 \sin 2\pi \left(\nu t - \frac{r}{\lambda} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где E_0, H_0 – амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей;

ν – частота колебаний электрического и магнитного полей;

λ – длина световой волны.

Векторы E и H взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны. Т.е. \vec{E}, \vec{H} и \vec{v} образуют праввинтовую систему.

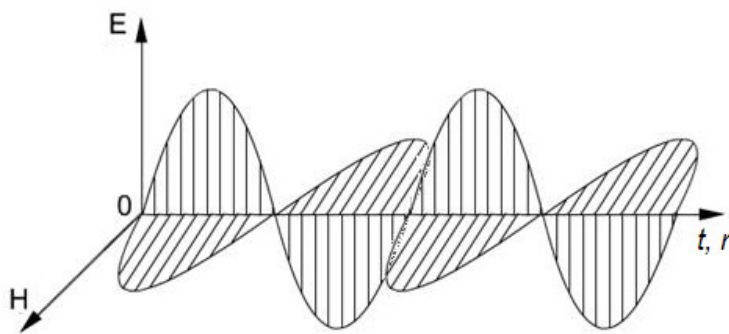


Рисунок 1 – Плоскополяризованная волна

Графическое изображение плоской монохроматической волны предоставлено на рис.1. Из сказанного следует, что световые волны поперечны.

Поперечным волнам свойственно явление поляризации. Если в поперечной волне колебания происходят в одной какой-либо

плоскости, то такая волна называется поляризованной и свет в этом случае называется поляризованным. Плоскость, в которой изменяется вектор H , называют плоскостью поляризации, а перпендикулярную к ней плоскость, в которой колеблется вектор E , – плоскостью колебаний. Изображения на рисунке 1 волна является плоскополяризованной.

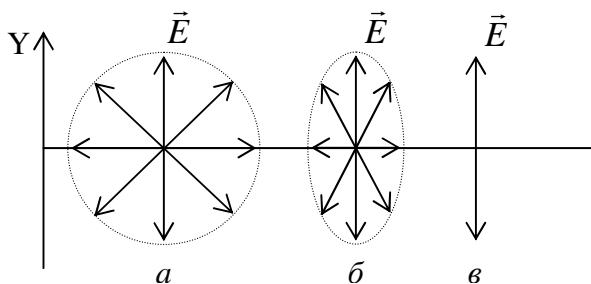


Рисунок 2 – Естественный, частично поляризованный и полностью поляризованный свет

Обычно источники света (солнце, звезды, электрические лампочки и др.) излучают свет, в котором векторы напряженности электрического (и магнитного) полей ориентированы в пространстве различным образом. Такой свет называется естественным.

В естественном луче все направления колебаний перпендикулярны к лучу и равновероятны, все амплитуды оди-

наковы. Если в некоторых направлениях колебания каким-либо образом ослаблены, то такой свет называют частично поляризованным. На схеме (рис.2) дано расположение векторов напряженности электрического поля (\vec{E}) в естественном (а), частично поляризованном (б), и полностью поляризованном свете (в). Предполагается, что луч распространяется по оси z , то есть перпендикулярно к плоскости рисунка. Поляризация наблюдается при прохождении света через некоторые прозрачные тела, например турмалин, исландский шпат и др. Поляризация света происходит также при отражении и преломлении естественных лучей. электрического поля световой волны относительно плоскости В этом случае поляризация является следствием того, что коэффициент отражения света зависит от ориентации вектора напряженности отражения. В большей степени отражаются те волны, у которых вектор E параллелен отражающей плоскости. Таким образом, отраженные и преломленные лучи оказываются частично поляризованным. Степень поляризации отраженных лучей зависит от материала отражающих поверхностей и угла падения.

Степень поляризации определяется соотношением

$$P = \frac{E_y^2 - E_x^2}{E_y^2 + E_x^2} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

где I_{\max} , I_{\min} – интенсивности световых потоков соответствующих составляющим E_y и E_x .

При отражении света от диэлектриков зависимость степени поляризации света от угла падения выражена очень ярко. Угол падения, при котором отраженный луч полностью поляризован, называется углом полной поляризации или углом Брюстера. Для этого угла выполняется закон Брюстера

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n, \quad (3)$$

где n – относительный показатель преломления двух сред.

Нетрудно доказать, что в этом случае (для угла Брюстера) $\alpha_B + \beta = \pi/2$, то есть угол между преломленным и отраженным лучом равен $\pi/2$. На рисунке 3 изображены лучи: падающий, отраженный и преломленный. Схематично принято колебания светового характера, происходящие в плоскости чертежа, изображать черточками, а колебания, совершающиеся перпендикулярно чертежу, - точками. В естественном (падающем) луче число черточек и точек одинаково; интенсивность компонентов по двум взаимно перпендикулярным направлениям одинакова; в отраженном луче колебания происходят только в плоскости, перпендикулярной чертежу, в преломленном преобладают колебания в плоскости чертежа. Как уже отмечалось, поляризованный свет можно получить, пропуская естественный свет через некоторые кристаллы. При этом наблюдается двойное лучепреломление, то есть разделение луча на два, идущих по разным направлениям в кристалле. Один из них называется обыкновенным, другой - необыкновенным. Обыкновенный луч подчиняется известным законам преломления. Для необыкновенного луча показатель преломления и скорость распространения зависят от направления распространения луча в кристалле. Оба луча поляризованы во взаимно пер-

пендикулярных плоскостях. Во всяком кристалле существует хотя бы одно направление, распространяясь вдоль которого, луч не испытывает двойного лучепреломления, так как в этом направлении скорости обыкновенного и необыкновенного лучей одинаковы. Это направление называется оптической осью кристалла. Плоскость, проходящая через падающий луч и через оптическую ось, называется главным сечением кристалла. В обыкновенном луче колебания светового вектора E перпендикулярны главному сечению (главной плоскости) кристалла, а в необыкновенном луче колебания происходят в плоскости главного сечения. Если каким-либо образом исключить один луч, то кристалл становится поляризатором, то есть прибором, позволяющим получить поляризованный свет. Существуют кристаллы, в которых по-разному поглощаются обыкновенный и необыкновенный лучи. Это явление называется дихроизмом. Дихроизм сильно выражен в кристаллах турмалина, серо-кислого йодистого хинина, последний широко используется для поляроидов. В поляризационной призме Николя обыкновенный луч исключают посредством полного внутреннего отражения. Наш глаз не способен отличить поляризованный луч от естественного. Для анализа поляризованного света служат анализаторы. В качестве анализаторов используются такие же

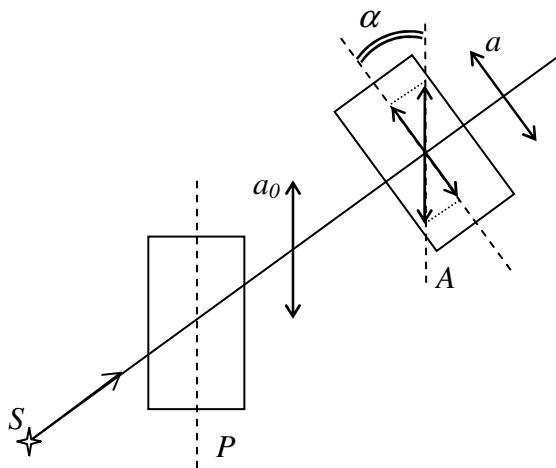


Рисунок 4 – Прохождение света через поляризатор и анализатор

приборы, как и для поляризаторов (призма Николя, турмалин и др.).

На рисунке 4 показаны последовательно расположенные поляризатор P и анализатор A , пунктирные линии – направления оптических осей. От источника S свет проходит сначала через поляризатор P , становится поляризованным, то есть колебания вектора E (а также H) будут происходить в одной плоскости с амплитудой a_0 . Такой поляризованный свет доходит до второго поляроида – анализатора A , главное сечение которого составляет некоторый угол α с главным сечением поляризатора.

Амплитуда (a) прошедших через анализатор световых колебаний будет равна проекции a_0 на направление оптической оси анализатора:

$$a = a_0 \cos \alpha ,$$

Интенсивность I света пропорциональна квадрату амплитуды, следовательно, между интенсивностями падающего на анализатор и прошедшего через анализатор света должно выполняться соотношение

$$I = I_0 \cos^2 \alpha , \tag{4}$$

Интенсивность света, выходящего из анализатора I , прямо пропорциональна интенсивности света, вышедшего из поляризатора, I_0 и квадрату косинуса угла α между главными сечениями поляризатора и анализатора (закон Малюса). Прохождение плоскополяризованного света через некоторые оптические активные вещества сопровождается изменением ориентации плоскости поляризации (и плоскости колебаний), то есть поворотом этой плоскости на некоторый угол. К таким веществам относятся кварц, нефть, скипидар, винная кислота, раствор сахара и т. д. Вращение плоскости поляризации у различных веществ различно по величине и направлению. Если поворот плоскости колебаний вектора E для наблюдателя, смотрящего навстречу проходящему лучу, совершается по часовой стрелке, то вещество называется правовращающим, если против часовой стрелки, то левовращающим (рис.5). Поворот плоскости колебаний вызывается молекулами оптически активного вещества, поэтому, очевидно, что угол поворота пропорционален числу активных молекул, встречающихся на пути луча. Если, например, оптически активное вещество – (сахар) растворено в неактивном веществе – в воде, то угол поворота плоскости колебаний φ пропорционален длине пути света в растворе l и концентрации раствора C . Кроме того, угол поворота φ зависит от природы активного вещества, от частоты световых колебаний и немного от температуры.

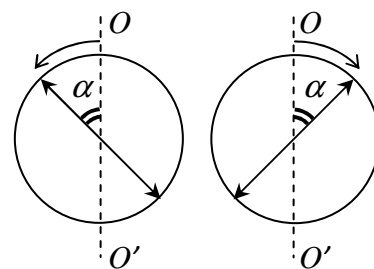


Рисунок 5 – Поворот плоскости поляризации

Эта зависимость выражается формулой

$$\varphi = \varphi_0 l C, \quad (5)$$

где φ_0 - постоянная вращения (удельное вращение), величина, зависящая от рода вещества, длины волны (частоты) и температуры, а также от выбора единицы измерения.

Определив из опыта три величины, входящее выражение (5), можно найти четвертую. Чаще всего опытным путем определяют φ , φ_0 , l и по формуле (5) находят концентрацию оптически активного вещества.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цель работы - определение концентрации сахара в водных растворах по углу поворота плоскости поляризации поляризованного света, проходящего через исследуемый раствор

Описание установки и метода измерения

Для определения концентрации сахара в водных растворах в данной работе применяется круговой поляриметр СМ и сахариметр СУ-2. Принципиальная оптическая схема приборов приведена на рисунке 8. Свет от источника S собирается линзой L_1 в параллельный пучок лучей, проходит через светофильтр Φ и поляририд P . Плоскополяризованный свет идет через трубку

с раствором оптически активного вещества и второй поляроид А, который служит анализатором (L_2 и L_3 - окулярные линзы). В поляриметре СМ кварцевая пластинка К имеет форму параллелепипеда, проекция которого на плоскость поляризатора имеет форму прямоугольника и занимает среднюю часть поля зрения. В результате поле зрения разбито на три части. В сахариметре СУ-2 К – бикварцевая пластинка, состоящая из двух полукруглых пластинок, вырезанных перпендикулярно оптической оси кристалла и закрывающих правую и левую половины поля зрения. Одна пластинка изготовлена из правовращающего кварца, а другая – из левовращающего.

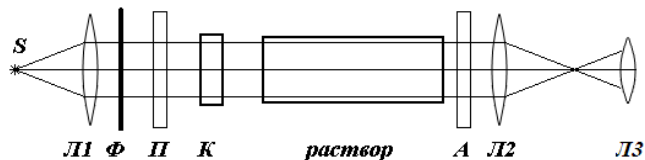


Рисунок 8 – Схема лабораторной установки

Для выяснения принципа работы прибора рассмотрим назначение основных частей прибора; поляризатора, трубки с раствором и анализатора. Если источник монохроматического света наблюдать через два скрещенных николя (поляризатор и анализатор), то поле зрения будет темным. При помещении между поляризатором и анализатором трубки с оптически активным веществом поле зрения просветлеет, так как плоскость колебаний для лучей, вышедших из поляризатора, будет повернута раствором на некоторый угол φ и уже не будет перпендикулярна плоскости поляризации анализатора. Для восстановления прежнего поля зрения анализатор надо повернуть на угол φ . Этот угол поворота и отсчитывается по лимбу с нониусом. Однако возможности человеческого глаза ограничены, и он не может точно фиксировать состояние полного затемнения поля зрения. Поэтому в прибор ставят пластинки кварца, с помощью которых измерения производят не при темном поле зрения, а при равной освещенности его частей. Рассмотрим это подробнее на примере кварцевой пластинки в поляриметре СМ. Толщина пластинки подобрана так, что она поворачивает плоскость поляризации прошедших через нее лучей на 10° . В этом случае при скрещенных поляроидах (Р и А) средняя часть поля зрения будет довольно светлой. На рис.9 вертикальная линия ОА – положение главной плоскости анализатора, линия ОР - положение главной плоскости поляризатора, ОК - положение плоскости колебаний лучей, прошедших через кварц, β - угол поворота этих лучей в кварце, a_p и a_k - амплитудные значения световых колебаний. Из всех лучей, доходящих до анализатора, только лучи с плоскостью колебаний по линии ОК дадут проекцию на плоскость анализатора a_{AK} . Для получения однородно освещенного поля зрения достаточно повернуть анализатор на угол $\beta/2$. В этом случае проекции амплитуд световых колебаний, прошедших только поляризатор и прошедших поляризатор и кварц, на плоскость поляризации анализа-

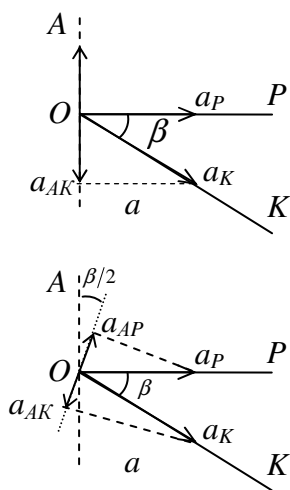


Рисунок 9 - Поворот лучей в кварце

тора будут равны: $a_{AK} = a_{AP}$. При наличии раствора однородность освещенности поля зрения нарушится. Для восстановления однородности анализатор надо повернуть на угол вращения раствором плоскости поляризации φ .

Отсчетные устройства для углов поворота φ в разных приборах несколько различны. В поляриметре СМ - это круговой лимб, разделенный на 360° , и два нониуса. Нониусы имеют по 20 делений, цена одного деления $0,05^{\circ}$. В сахариметре – горизонтальная отсчетная шкала, имеющая в центре “0” и по 100 делений справа и слева от нуля. Здесь применена международная сахарная шкала. Нониус также имеет центральное деление, соответствующее нулю, и по 10 делений справа и слева от нуля. Части шкал и нониусы для поляриметра и сахариметра изображены на рисунках 10 и 11.

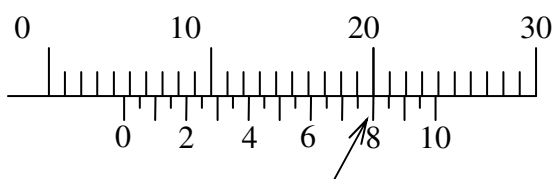


Рисунок 10 – Шкала и нониус поляриметра

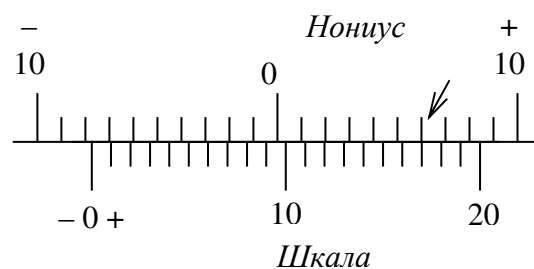


Рисунок 11 – Шкала и нониус сахариметра

При определении углов по любой шкале отсчитываем, на сколько полных градусов смещен нуль нониуса относительно нуля лимба (основной шкалы), что должно соответствовать целому числу градусов. Далее находим то деление нониуса, которое совпадает с каким-либо делением шкалы; это деление нониуса указывает доли градуса. Например, на рис.10 отсчет составляет $4,8^{\circ}$, на рис.11 - $9,6^{\circ}$. На шкале сахариметра пользуются правой частью нониуса, от 0 до +10, если нуль нониуса расположен в положительной части шкалы (справа от нуля шкалы), и левой частью, от 0 до -10, если нуль слева. Среди трубок с раствором сахара есть одна с раствором известной концентрации C' . Измерив длину этой трубки l' и определив угол поворота плоскости колебаний φ' , можно из выражения (5) найти постоянную вращения для сахара:

$$\varphi_0 = \frac{\varphi'}{lC'}$$

Измеренные значения угла поворота φ для остальных трубок позволяют высчитать концентрацию раствора в этих трубках:

$$C = \frac{\varphi}{\varphi_0 l}$$

Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

1. Включить источник света и добиться четкого изображения поля зрения зрительной трубки и шкалы прибора.

2. Получить равномерное освещение всего поля зрения, вращая анализатор вблизи нуля шкалы. Последнее должно быть не очень ярким. Если найдено правильное положение анализатора, то малейший поворот его вправо и влево резко меняет картину поля зрения: в поляриметре темнеет середина и светлеют края (или наоборот), в сахариметре резко темнеет одна часть поля зрения по сравнению с другой. Это нулевое положение N_0 может не совпадать с нулем шкалы. Записать значение N_0 в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты измерений

№ п/п	ℓ , см	N, град.	$\varphi = N - N_0$, град	C, %

3. Установить в камеру трубку с известной концентрацией, предварительно измерив ее длину ℓ' . Найти опять равномерную освещенность поля зрения. Сделать отсчет по шкале N' , получив значения $\varphi' = N' - N_0$. Записать данные в таблицу 3.

4. Установить в камеру поочередно трубки с номерами 1,2,3... и, повторяя действия п.3, найти для них отсчеты по шкале N, записать данные в таблицу 3.

5. Заполнить до конца таблицу 3, определив и высчитав для всех исследуемых растворов концентрацию сахара C.

6. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности для одного случая, пользуясь следующим выражением:

$$\frac{\Delta C}{C} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta N}{N - N_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta N}{N' - N_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{C'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \ell'}{\ell'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2}.$$

Пренебрегая последними двумя слагаемыми под корнем, получаем

$$\sqrt{\left(\frac{2\Delta N}{N - N_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta N}{N' - N_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{C'}\right)^2}.$$

Для ΔN можно взять $0,1^0$, для $\Delta C' = 0,1\%$, так как измерения будем производить с точностью до десятых долей градуса, а концентрацию измеряют до $0,1\%$.

Контрольные вопросы

1. Какой свет называется поляризованным, чем он отличается от естественного?
2. В чем заключается двойное лучепреломление света в кристаллах и в чем различие между двумя лучами?
3. От чего зависит угол поворота плоскости поляризации оптически активным веществом?
4. Какой физический смысл имеет постоянная вращения?

5. Объясните назначение пластинки К (кварца или бикварца) в приборе.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика.- М.: Наука, 1976.- 926 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.-М.: Наука, 1978.-480 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики.- М.: Высш.шк., 1985.-432 с.
4. Шубин А.С. Курс общей физики.- М.: Высш.шк., 1976.- 480 с.