

509. ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ КОЛЕБАНИЙ В КВАРЦЕ И САХАРНОМ РАСТВОРЕ

509.1. Цель работы

Изучение явления вращения плоскости колебаний, определение концентрации сахара в растворе и толщины кварцевой пластины.

509.2. Разделы теории

Поляризация света, вращение плоскости колебаний [1. Гл.25, §196]; [2. Гл. XIX; § 134, 138–141].

509.3. Приборы и принадлежности

Поляриметр, набор трубок с раствором сахара различной концентрации, пластины право- и левовращающего кварца, светофильтр.

509.4. Теоретическое введение

Напомним, что, световой луч, вышедший из поляризатора, содержит колебания в плоскости его главного сечения, для луча эта плоскость называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость – плоскостью поляризации.

Вещества, способные вращать плоскость колебаний светового луча, называются оптически активными. К их числу относятся двоякопреломляющие кристаллы (кварц, исландский шпат CaCO_3 , киноварь HgS и др.). Наибольшей вращательной способностью они обладают в случае, когда свет распространяется вдоль оптической оси кристалла, при этом двойного лучепреломления не происходит. Оптически активными являются и некоторые оптически изотропные кристаллы кубической симметрии (например, хлорат натрия NaClO_3 , бромат натрия NaBrO_3 и

др.). Наряду с названными кристаллами, оптически активными являются многие твердые кристаллические органические вещества (сахар, камфора, кокаин), смеси ряда органических веществ (нефть, патока), некоторые чистые жидкости (скипидар, никотин), а также растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (камфоры в бензоле, водные растворы сахара, винной кислоты, глюкозы) и их расплавы и пары. В общем оптически активные вещества подразделяются на два типа. Вещества, относящиеся к 1-му типу, – оптически активны в любом агрегатном состоянии, к примеру, сахар и водный раствор сахара, ко 2-му – активны только в кристаллической фазе, к примеру, кварц, киноварь. У веществ 1-го типа оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул, у веществ 2-го типа – асимметрией поля сил, связывающих частицы в кристаллической решётке.

Для наблюдения явления вращения плоскости колебаний нужно установить на оптической скамье два скрещенных поляризатора. Такая система не пропускает монохроматический свет. Если между поляризаторами внести пластину кварца, вырезанную перпендикулярно оптической оси, свет через систему будет проходить. Вращением одного из поляризаторов можно снова погасить проходящие лучи. Это означает, что после прохождения через оптически активное вещество свет остаётся линейно поляризованным, но плоскость колебаний оказывается повернутой. Если же через эту систему пропустить естественный свет, то, как и при монохроматическом освещении, наступает просветление поля зрения, но вращение второго поляризатора в этом случае ни при каком угле поворота не приводит к его полному затемнению, а лишь изменяет цвет пропускаемых лучей. Экспериментально установлено, что угол поворота плоскости колебаний пропорционален длине пути луча в веществе и зависит от длины волны проходящего света, т.е. имеет место дисперсия вращательной способности.

Кристаллы оптически активных веществ в зависимости от направления вращения плоскости колебаний разделяются на

право- и левовращающие. Если поворот плоскости колебаний совершается по часовой стрелке (для наблюдателя, смотрящего навстречу проходящему лучу), то вещество называется правовращающим. Если вращение происходит против часовой стрелки, то левовращающее. Решётка правовращающего кристалла зеркально-симметрична решётке левовращающего и не может быть пространственно совмещена с нею.

Явление вращения плоскости колебаний можно объяснить, используя гипотезу Френеля. Плоскополяризованная электромагнитная волна (плоскополяризованный свет) с произвольным направлением плоскости колебаний (вектор \vec{E}), попадая в оптически активную среду, разлагается на две поляризованные по кругу волны – одну с правым (вектор $\vec{E}_{\text{П}}$), другую с левым направлением вращения (вектор \vec{E}_{Λ}) (рис 509.1, а).

Эти волны распространяются в оптически активной среде с разными фазовыми скоростями: v_{Λ} – для волны с левым вращением, $v_{\text{П}}$ – для волны с правым вращением. Показатели преломления n_{Λ} и $n_{\text{П}}$ этих волн будут различны. После того как свет пройдет слой вещества l , поляризованная по левому кругу волна \vec{E}_{Λ} отстанет по фазе на угол $\varphi_{\Lambda} = 2\pi \frac{l}{\lambda_{\Lambda}}$, а волна $\vec{E}_{\text{П}}$ – на угол

$\varphi_{\text{П}} = 2\pi \frac{l}{\lambda_{\text{П}}}$; λ_{Λ} и $\lambda_{\text{П}}$ – соответствующие длины волн.

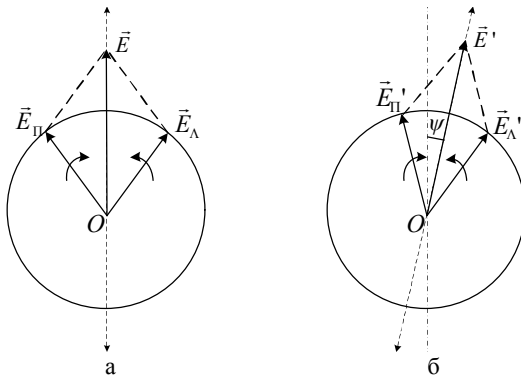


Рис. 509.1

Предположим, что величина l такова, что угол φ_Λ кратен 2π . Тогда вектор \vec{E}_Λ займет снова прежнее положение, вектор же \vec{E}_Π , для которого $\varphi_\Pi \neq \varphi_\Lambda$, займет некоторое новое положение (рис. 509.1,б). Это новое положение будет повернуто на угол

$$\Delta\varphi = \varphi_\Lambda - \varphi_\Pi = 2\pi \left(\frac{l}{\lambda_\Lambda} - \frac{l}{\lambda_\Pi} \right).$$

Результирующий вектор \vec{E} займет новое положение – \vec{E}' , а угол поворота будет равен

$$\psi = \frac{\Delta\varphi}{2} = \pi l \left(\frac{1}{\lambda_\Lambda} - \frac{1}{\lambda_\Pi} \right). \quad (509.1)$$

Если выразить длины волн через скорости их распространения в данном веществе и циклическую частоту колебаний ω ,

$$\lambda_\Lambda = \frac{2\pi v_\Lambda}{\omega} \quad \text{и} \quad \lambda_\Pi = \frac{2\pi v_\Pi}{\omega},$$

и подставить в (509.1), то получим

$$\psi \cong l\omega \left(\frac{1}{v_\Lambda} - \frac{1}{v_\Pi} \right). \quad (509.2)$$

В случае, показанном на рис. 509.1,б, плоскость колебаний оказывается повернутой по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу. Такое вращение плоскости колебаний называется *правым* и определяется как *положительное*. Из (509.2) следует, что вещества, в которых быстрее распространяются лучи с вращением по часовой стрелке $v_\Pi > v_\Lambda$, носят название *правовращающие*. Если $v_\Lambda > v_\Pi$, вещества – *левоповорачивающие*.

Угол поворота плоскости колебаний можно выразить через показатели преломления n_Λ и n_Π поляризованных по кругу компонент световой волны. Подставив в формулу (509.2) выражение для длины волны в вакууме $\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega}$ и известные соотношения

ния

$$v_{\Lambda} = \frac{c}{n_{\Lambda}}, \quad v_{\Pi} = \frac{c}{n_{\Pi}},$$

получаем

$$\psi \cong \frac{\pi l}{\lambda_0} (n_{\Lambda} - n_{\Pi}). \quad (509.3)$$

Отношение угла поворота плоскости колебаний к длине пути волны в данной среде численно равно так называемой *постоянной вращения* для кристаллических веществ или *удельному вращению* для растворов и обозначается

$$\psi_0 = \frac{\psi}{l}.$$

Из (509.3) следует, что ψ_0 определяется по формуле

$$\psi_0 \cong \frac{\pi}{\lambda_0} (n_{\Lambda} - n_{\Pi}).$$

Разность $(n_{\Lambda} - n_{\Pi})$ очень мала по сравнению с единицей. Для большинства оптически активных веществ она имеет величину порядка 10^{-4} . При обычном двойном лучепреломлении разность показателей преломления имеет величину порядка от 10^{-3} до 10^1 . Однако в выражении (509.3) длина волны λ_0 очень мала по сравнению с макроскопической величиной l ; это означает, что, несмотря на малость $(n_{\Lambda} - n_{\Pi})$, угол вращения ψ может иметь значительную величину. Например, известно, что кварцевая пластинка толщиной 1 мм поворачивает плоскость колебаний желтых лучей ($\lambda=0,5890$ мкм) на $21,7^\circ$, а фиолетовых ($\lambda = 0,4047$ мкм) – на $48,9^\circ$; в ультрафиолетовой части спектра вращение плоскости колебаний еще больше: та же пластинка поворачивает плоскость колебаний лучей с длиной волны $\lambda = 0,2147$ мкм на 236° .

На практике используют следующие выражения для расчета углов поворота плоскости колебаний в кристаллах:

$$\psi = \psi_0 l \quad (509.4)$$

и в растворах оптически активных веществ

$$\psi = \psi_0 l z, \quad (509.5)$$

где z – концентрация заданного вещества в растворе.

Необходимо отметить, что теория Френеля является в значительной мере формальной, поскольку не дает связи между величиной угла вращения и характерными свойствами данного оптически активного вещества. Современная электромагнитная теория оптической активности развивает теорию Френеля. Каждая молекула вещества или ячейка кристаллической решетки рассматривается как совокупность осцилляторов. Вращение плоскости колебаний является результатом взаимодействия проходящих через вещество световых волн и этих осцилляторов, при этом доказывается, что оптическая активность проявляется лишь у веществ, обладающих асимметрией строения самих молекул.

Рассмотренное выше явление вращения плоскости колебаний является естественным. Некоторые вещества приобретают свойство оптической активности при помещении их во внешнее магнитное поле. Вращение плоскости колебаний света в веществе при наличии внешнего магнитного поля называется эффектом Фарадея.

509.5. Описание установки и методики измерений

В работе используется прибор – полутеневого поляриметр. Поляриметр (сахариметр) служит для определения концентрации сахара в растворах и является контрольно-измерительным прибором, широко применяемым в заводских и научно-исследовательских лабораториях.

Оптическая схема поляриметра показана на рис. 509.2, где S – источник света, С – светофильтр, П – поляризатор (призма Николя), ПП – полутеневая пластинка, Т – камера для трубок с раствором сахара, К – кварцевый компенсатор, А – анализатор (призма Николя), О – окуляр для наблюдения полей зрения и шкалы. Поляриметр имеет окуляр для наблюдения поля зрения и окуляр для наблюдения отсчетной шкалы.

Свет, идущий от источника S через светофильтр C , попадает на призму-поляризатор Π , которая преобразует его в поляризованный свет.

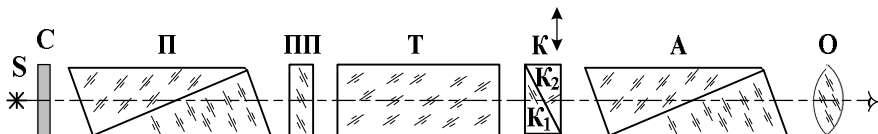


Рис. 509.2

Поскольку человеческий глаз очень чувствителен к небольшим различиям в освещенности двух рядом расположенных площадок (если их освещенность не слишком мала), установка системы поляризатор–анализатор настраивается на равенство затемнения двух половин поля зрения. Применяются различные так называемые полутеневые устройства. Одним из таких устройств является полутеневая пластинка ПП , состоящая из двух половинок: стеклянной C и кварцевой K ; MN – граница раздела стекла и кварца (рис. 509.3,а). Световой поток, проходя через полутеневую пластинку, делится ею на две половины линией раздела. Пластина ПП рассчитана и установлена так, что плоскости колебаний обеих половин светового потока составляют одинаковые углы с главным сечением анализатора (порядка $2^{\circ}30'$).

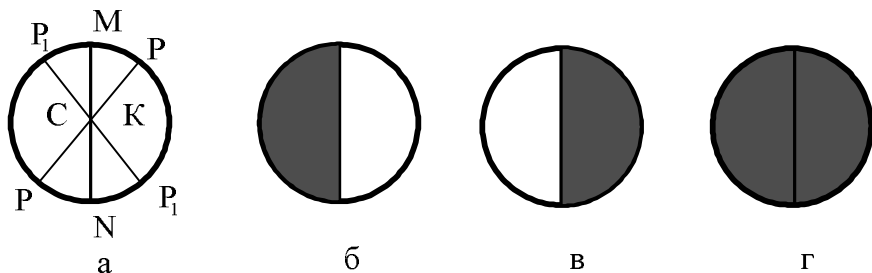


Рис. 509.3

Пусть на пластинку ПП падает монохроматический линейно-поляризованный свет с плоскостью колебаний PP . Через стеклянную часть пластинки свет пройдет, не изменив плоскости колебаний, а через кварцевую пластинку выйдет свет с новой плоскостью колебаний P_1P_1 (кварц – оптически активное вещество). Если затем пропустить оба луча через анализатор, у которого главное сечение, например, совпадает с плоскостью, перпендикулярной PP , то луч левой половины поля зрения С будет погашен, и поле зрения в этой половине будет темное (рис. 509.3,б), тогда как часть света правой половины К будет пропущена анализатором, и поле этой половины будет светлое. Если плоскость колебаний, пропускаемых анализатором, перпендикулярна P_1P_1 , то будет обратное явление (рис. 509.3,в). В среднем положении анализатора, при котором обе половины поля зрения будут одинаково затемнены (одинаково слабо освещены), получим *нулевую точку* (рис. 509.3,г).

При помещении раствора сахара между полутеневого пластинкой и анализатором, предварительно установленным на *нулевую точку*, равенство полей зрения нарушается, так как исследуемый раствор поворачивает плоскость колебаний света. Угол, на который надо повернуть анализатор, чтобы получить равное затемнение полей сравнения (зрения), равен углу поворота плоскости колебаний ψ .

В поляриметре, используемом в работе, для компенсации угла поворота плоскости колебаний луча, вызванного раствором сахара, применяется кварцевый компенсатор. Он состоит из двух клиньев, сделанных из левовращающего кварца. Один клин K_1 – неподвижный, второй K_2 – подвижный. Перемещая K_2 относительно K_1 , можно изменять величину левого вращения плоскости колебаний, даваемого клиньями K_1 и K_2 . Раствор сахара вращает плоскость колебаний вправо (по часовой стрелке), это вращение компенсируется левым вращением кварцевого компенсатора, при этом происходит уравнивание затемнения полей зрения.

Подвижный клин K_2 кварцевого компенсатора перемеща-

ется вместе со шкалой. Линейное перемещение клина пропорционально углу вращения плоскости колебаний. Шкала прибора проградуирована в угловых единицах Международной сахарной шкалы S (100^0S этой шкалы соответствуют $34,62^0$). Для точного отсчета шкала (рис. 509.4) имеет нониус, цена деления нониуса $-0,05^0S$. По нулевому делению нониуса определяют значение шкалы, соответствующее одинаковому затемнению обеих половин полей зрения (*нулевую точку*).

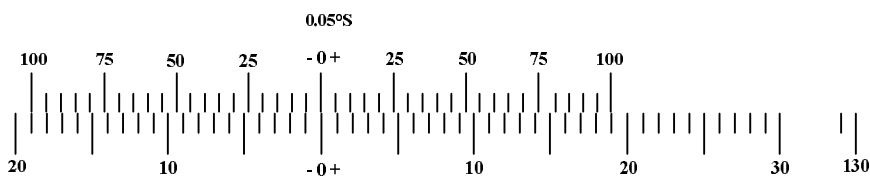


Рис. 509.4

Отсчет показаний при помощи нониуса поясняется рис. 509.5. На рисунке показано положение шкалы и нониуса, соответствующее отсчету « $+12,85^0S$ ». Значение целых величин определяется по нижней шкале, дробная часть – по верхней шкале (нониусу). Ноль нониуса расположен правее нуля шкалы (« $-0+$ ») на 12 полных делений. Находим, где в положительной части нониуса деления шкалы и нониуса совпадают. В нашем примере это значение «85». Следовательно, измеренная величина угла равна « $+12,85^0S$ ».

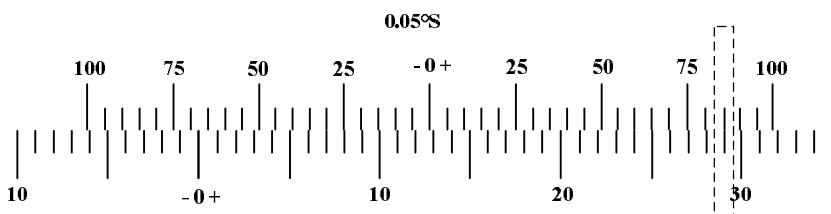


Рис. 509.5

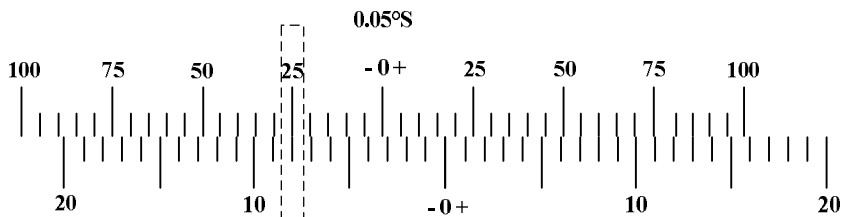


Рис. 509.6

На рис. 509.6 показано положение шкалы и нониуса, соответствующее отсчету « $-3,25^0\text{S}$ ». Ноль нониуса расположен левее нуля шкалы (« $-0+$ ») на 3 полных деления. Находим, где в отрицательной части нониуса деления шкалы и нониуса совпадают. В нашем примере это значение «25». Следовательно, измеренная величина угла равна « $-3,25^0\text{S}$ ».

Внешний вид поляриметра показан на рис. 509.7. Осветительный узел 1 и измерительный блок 3 (компенсатор и анализатор) соединены между собой траверсой, на которой укреплены камера для трубок 8 с исследуемым веществом, оправа с поляризатором 2 и диск со светофильтром 7. Измерительный блок имеет окуляр 4 для отсчета показаний по шкале и окуляр 5 для наблюдения полей зрения. В нижней части измерительного блока расположена рукоятка 6 для перемещения подвижного кварцевого клина и связанной с ним шкалы. Траверса крепится к основанию. На основании находится тумблер (кнопка) включения прибора.

В работе предлагается определить удельное вращение и концентрацию сахарного раствора, а также толщину кварцевой пластинки. Измерив угол поворота плоскости колебаний ψ для известных значений концентрации z сахарного раствора и зная длину трубки l , из (509.5) можно вычислить удельное вращение ψ_0 . Размерность удельного вращения $[\psi_0] = \left[\frac{\text{град}}{z / \text{см}^3 \times \text{дм}} \right]$. Определение неизвестной концентрации z_x сахарного раствора производится путём сравнения результатов измерений угла поворота плоскости колебаний для трубок с неизвестным и из-

вестным (эталонным) значениями концентрации. Для этого вначале измеряется угол поворота плоскости колебаний ψ сахарного раствора в эталонной трубке, определяемый соотношением $\psi = \psi_0 \cdot z_0 \cdot l$. Затем эталонная трубка заменяется трубкой с неизвестной концентрацией z_x и вновь измеряется угол ψ_x , определяемый соответственно выражением $\psi_x = \psi_0 \cdot z_x \cdot l$.

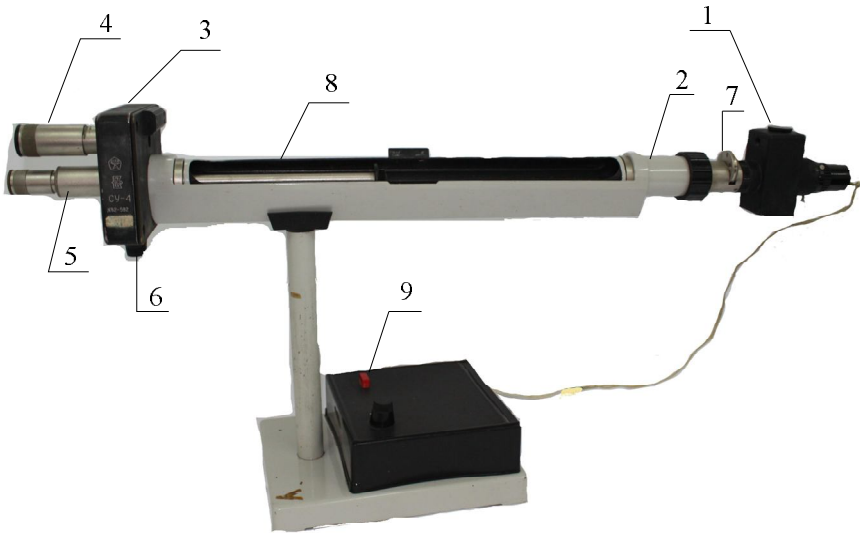


Рис. 509.7

Тогда неизвестная концентрация вычисляется по формуле

$$z_x = z_0 \frac{\psi_x}{\psi}. \quad (509.6)$$

Толщина кварцевой пластины l находится из выражения (509.4). Для этого производятся необходимые измерения углов поворота плоскости колебаний света кварцевой пластиной. Величина постоянной вращения кварца считается известной.

509.6. Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение удельного вращения и концентрации сахара в растворе.

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, методикой измерений и порядком выполнения работы, начертить таблицу для записи результатов измерений.

2. Включить прибор с помощью тумблера (кнопки) «Сеть».

3. Поставить желтый светофильтр ($\lambda = 589,3$ нм) на диске 7 в нижнее положение. Вращая окуляр 4, добиться четкой фокусировки шкалы и нониуса. Вращая окуляр 5, добиться отчетливой видимости линии раздела поля зрения.

4. Медленно вращая рукоятку 6 (компенсатор), в отсутствие трубки с раствором установить одинаковое затемнение обеих половин поля зрения и записать показания нониуса n_i . Повторить отсчет этого положения 5 раз, каждый раз предварительно немного смещая рукоятку 6 вправо или влево. Результаты записать. Среднее арифметическое пяти измерений принимаем за нулевую точку – n_0 .

5. Поместить трубку с сахарным раствором заданной концентрации z_0 в камеру 8, расположить ее ближе к окуляру. Глядя в окуляр и поворачивая трубку вокруг оси, установить ее в такое положение, чтобы линия раздела делила поле зрения на две равные части. (При необходимости произвести дополнительную фокусировку поля зрения – **линия раздела должна быть четко видна** (см. п. 3).) Обе половины поля зрения будут освещены различно.

6. Вращая рукоятку 6, добиться одинакового затемнения обеих половин поля зрения и произвести отсчет угла поворота плоскости колебаний ψ' по шкале и нониусу. Провести измерения 5 раз, каждый раз предварительно немного смещая рукоятку 6 вправо или влево. Результаты записать.

7. Среднее арифметическое пяти измерений принимаем за угол поворота ψ'_{cp} . «Истинный» угол поворота плоскости коле-

баний определяется по формуле $\psi = \psi'_{cp} - n_0$.

8. Выполнить действия по пп. 5–7 для раствора с концентрацией z_x .

9. По формуле (509.6) рассчитать неизвестную концентрацию сахарного раствора.

10. Произвести расчет удельного вращения сахарного раствора по формуле $\psi_0 = \frac{\psi}{z_0 l}$. (Градусы сахарной шкалы перевести в угловые, а длину трубки l взять равной 2 дм.)

11. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешность определения концентрации сахарного раствора Δz_x , сделать выводы.

Упражнение 2. Определение толщины кварцевой пластинки.

1. Ознакомиться с порядком выполнения работы, начертить таблицу для записи результатов измерений.

2. Поместить в камеру прибора трубку с кварцевой пластиной. Измерить угол поворота плоскости колебаний кварцевой пластиной, выполнив действия, описанные в пп. 5–7 предыдущего упражнения.

3. По формуле (509.4) рассчитать толщину кварцевой пластины. Градусы сахарной шкалы перевести в угловые, а величину постоянной вращения для кварца взять равной $\psi_0 = 21,72^\circ \times \text{мм}^{-1}$ ($\lambda = 589,3 \text{ нм}$).

4. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешность определения толщины кварцевой пластинки Δl , сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются оптически активными? Приведите примеры.

2. Объясните явление поворота плоскости колебаний при

прохождении света через оптически активные вещества, используя гипотезу Френеля.

3. Объясните понятие постоянной вращения и удельного вращения для твердых и жидких оптически активных веществ.

4. Приведите известные количественные соотношения между углом поворота плоскости колебаний света при прохождении оптически активного вещества и характеристиками данного вещества.

5. По каким характеристикам оптически активные вещества условно делят на правовращающие и левовращающие?

6. Почему величина угла поворота плоскости поляризации в кварце значительна?

7. Объясните различие между явлениями двойного лучепреломления и вращения плоскости колебаний света в веществах.

8. Расскажите об устройстве поляриметра. Какие закономерности распространения поляризованного света используются в работе поляриметра?

Библиографический список

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2011. – 487 с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Лань, 2007. – 496 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика. – М.: ООО "Изд-во Астрель": ООО "Изд-во АСТ" 2004. – 256 с.

4. Лабораторный практикум по физике/ Под ред. А.С. Ахматова. – М.: Высшая школа, 1980. – 360 с.

5. Руководство к лабораторным занятиям по физике/ Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 688 с.

6. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.

Содержание

501. Изучение преломления света и определение показателя преломления прозрачных сред.....	3
502. Изучение интерференционного микроскопа.....	17
503. Изучение явления интерференции света и определение длин световых волн при помощи бипризмы Френеля.....	29
504.-1. Измерение длины световых волн при помощи интерференционных колец Ньютона.....	46
504.-2. Наблюдение колец Ньютона с помощью видеоокуляра DCM-310.....	56
505. Дифракция плоских волн на щели и нити. Одномерная дифракционная решетка.....	70
506. Изучение интерферометра.....	76
507. Изучение поляризации света и опытная проверка закона Брюстера.....	88
508. Изучение поляризации света кристаллами. Проверка закона Малюса.....	95
509. Изучение вращения плоскости поляризации в кварце и сахарном растворе.....	100
Библиографический список.....	113

Куповых Геннадий Владимирович
Нестюрина Елена Евгеньевна
Филиппьева Наталья Николаевна
Погорелов Евгений Николаевич
Колпачева Ольга Валерьевна
Доценко Игорь Борисович
Гатько Людмила Евстафьевна
Какурина Наталья Андреевна
Какурин Юрий Борисович

ОПТИКА

Практикум по физике

(для укрупненных групп направлений подготовки:
математические и естественные науки;
инженерное дело, технологии и технические науки)

Ответственный за выпуск Нестюрина Е.Е.
Редактор Проценко И.А.
Корректор Надточий З.И.

ЛР №020565 от 23.06.1997 г. Подписано к печати 10.12.2013 г.

Формат 60x84¹/₁₆.

Бумага офсетная

Офсетная печать.

Усл. п.л. – 7,2.

Уч.-изд.л. – 7,2.

Заказ №

Тираж 150 экз.

"С"

Издательство ЮФУ

ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44

Типография ЮФУ

ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44