

4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Основные теоретические положения, закономерности явления поляризации света, особенности экспериментальных методов наблюдения этого явления подробно изложены в [1]–[5]. В данном разделе настоящего учебного пособия кратко приводятся общие теоретические сведения и методические описания лабораторных работ 4.1, 4.2 и 4.3 по поляризации света физического практикума кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

В электромагнитной волне, распространяющейся в безграничном пространстве, векторы напряженности электрического E и индукции магнитного B полей перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (вдоль оси Z), определяемому волновым вектором k , т. е. электромагнитная волна является поперечной (рис. 4.1). Плоскость, в которой лежат векторы E и k , называется *плоскостью колебаний вектора E* , которая в современной концепции имеет также название *плоскости поляризации*. Если положение плоскости колебаний вектора E неизменно во времени и направление вектора E является единственным, то световая волна называется плоско- или линейно-поляризованной [1]. Возможны и другие типы поляризации поперечной волны, при которых колебания вектора E , оставаясь в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, имеют более сложный характер (конец вектора описывает эллипс или окружность). Волна имеет тогда *эллиптическую* или *круговую поляризацию*.

Световые волны суть электромагнитные волны с длинами волн от 400 до 760 нм. Естественный свет от обычных (не лазерных) источников (например, от нити накаливания ламп) представляет собой совокупность большого числа *волновых пакетов (цугов волн)*, каждый из которых является результатом единичного акта испускания электромагнитного излучения

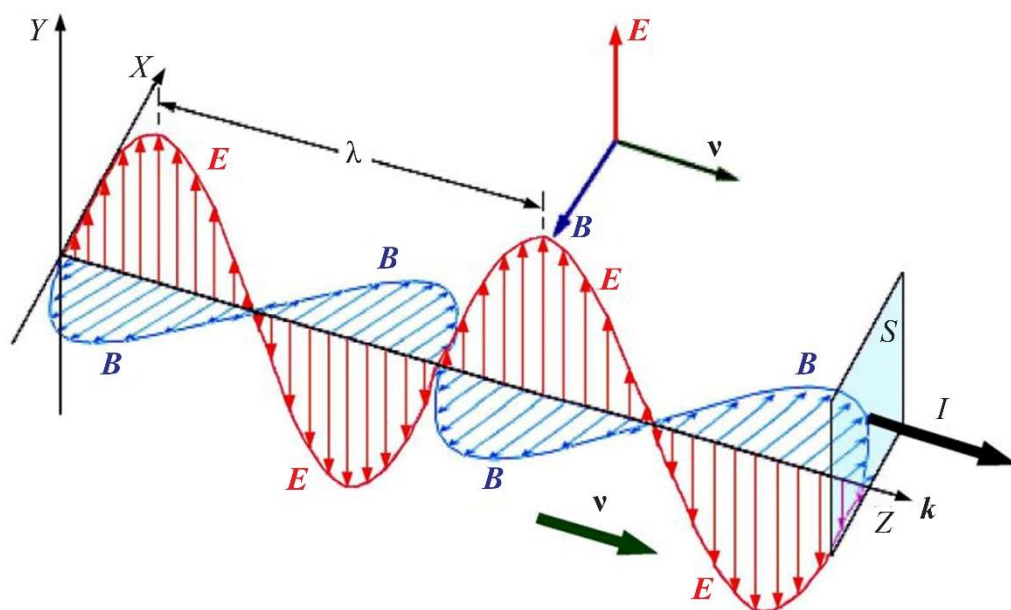


Рис. 4.1. Электромагнитная волна

атомом вещества. Процесс излучения отдельного атома длится около 10^{-8} с. За это время испускается цуг волн протяженностью примерно 3 м. Через некоторое время после излучения атом возбуждается и снова начинает излучать. Цуги волн, излучаемые ими, накладываются друг на друга, образуя световую волну. Электромагнитная волна в каждом волновом пакете линейно поляризована. Отсутствие взаимосвязи между актами испускания различных атомов приводит к тому, что плоскости колебаний вектора E различных волновых пакетов ориентированы случайным образом.

Излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых его атомами. Одновременно наблюдается излучение огромного числа атомов, посылающих свет с различным направлением плоскостей колебаний векторов E и B . Кроме того, в естественном свете наблюдается быстрая смена ориентации этих плоскостей. Поэтому естественный свет является неполяризованным.

Изучение поляризованного света выполняется с помощью поляризационных приборов. Если поляризационный прибор используется для получения поляризованного света из естественного, то он называется *поляризатором*, если же он используется для анализа поляризованного света, то называется *анализатором*, т. е. является данное устройство поляризатором или анализатором зависит только от того, для чего оно используется в конкретном опыте. Получение поляризованного света возможно при разнообразных физических эффектах – прохождении света через анизотропные среды, отражении от диэлектриков и др. Поляризаторы пропускают колебания, параллельные плоскости, называемой плоскостью поляризатора, и полностью или частично задерживают колебания, перпендикулярные этой плоскости.

Поляризация при двойном лучепреломлении. Если электромагнитная волна падает на границу раздела двух *изотропных* сред, то во второй среде имеется только одна волна, распространяющаяся по «обычным» законам преломления. Если вторая среда *анизотропна*, т. е. ее свойства (в частности, диэлектрическая проницаемость) различны вдоль разных направлений, то во второй среде распространяются две различно преломленные волны (*обыкновенная* и *необыкновенная*) с разными скоростями. Это явление называется *двойным лучепреломлением*. Обыкновенная и необыкновенная волны линейно поляризованы, и плоскости их колебаний взаимно перпендикулярны. Эффект двойного лучепреломления света наблюдается в прозрачных анизотропных кристаллах. У одноосных кристаллов (исландский шпат, турмалин) имеется направление (*оптическая ось*), вдоль которого обе волны распространяются с одинаковой скоростью. Плоскость, проведенная через оптическую ось кристалла и направление распространения света, называется *главным сечением* кристалла. Колебания вектора E в обыкновенной волне перпендикулярны плоскости главного сечения кристалла, в необыкновенной – совершаются в плоскости главного сечения.

Одним из широко распространенных поляризаторов света является *призма Николя* (рис. 4.2), изготовленная специальным образом из исландского шпата так, что необыкновенная (e) волна проходит через призму, а обыкновенная (o) волна претерпевает на прослойке AA' из канадского бальзама полное внутреннее отражение и поглощается зачерненной гранью $A'C$.

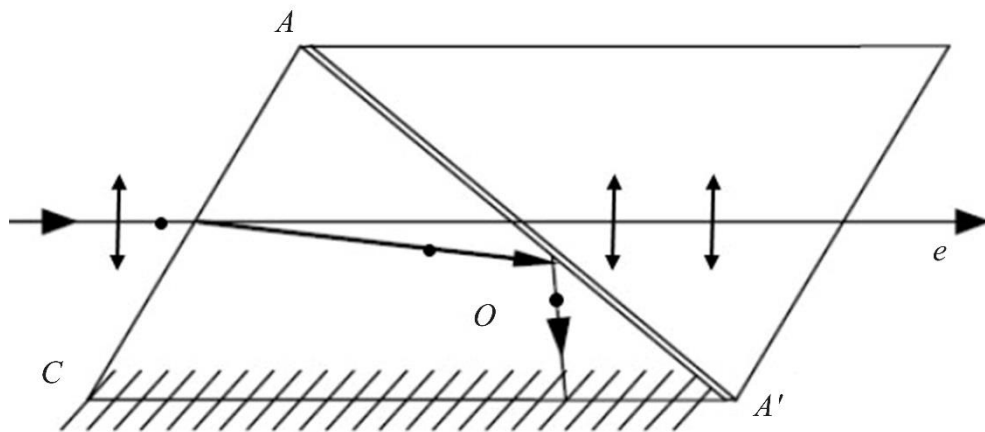


Рис. 4.2. Поляризатор (призма Николя)

В некоторых кристаллах одна из преломленных волн поглощается больше, чем другая (*явление дихроизма*). Турмалин, например, поглощает почти полностью обыкновенную волну в слое толщиной 1 мм. Явление дихроизма положено в основу *поляроидов* – одного из видов поляризаторов. Используемые в лаборатории поляроиды представляют собой тонкие

целлулоидные пленки с введенными в них и одинаковым образом ориентированными кристалликами сульфата йодистого хинина. В таких поляроидах одна из плоскополяризованных волн поглощается при толщине пленки около 1 мм. Пленка защищена от механических повреждений и действия влаги пластинками из стекла.

Закон Малюса. Пусть на анализатор падает плоскополяризованная волна с амплитудой вектора напряженности электрического поля E_1 , плоскость колебаний которого образует с плоскостью главного сечения поляризатора угол φ (рис. 4.3). Интенсивность волны пропорциональна квадрату вектора напряженности электрического поля. На выходе анализатора амплитуда вектора напряженности электрического поля будет равна $E_1 \cos \varphi$, а интенсивность света пропорциональна $(E_1 \cos \varphi)^2$.

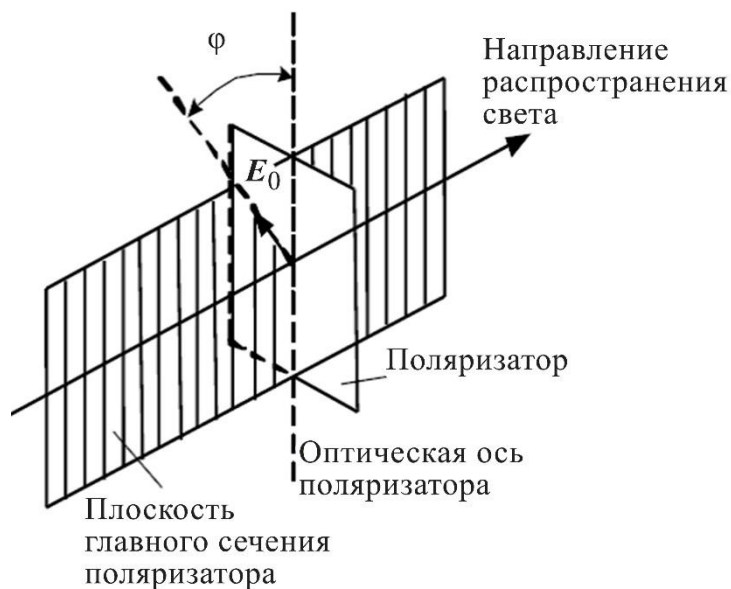


Рис. 4.3. К обоснованию закона Малюса

Если на анализатор падает плоскополяризованный свет, то интенсивность прошедшего света определяется законом Малюса:

$$I_p = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (4.1)$$

где I_0 – интенсивность света, падающая на анализатор; φ – угол между плоскостью колебаний вектора E и плоскостью пропускания анализатора.

Если на поляризатор падает естественный свет с интенсивностью I_0 , то все значения φ равновероятны и доля света, прошедшего через поляризатор, будет равна среднему значению $\langle \cos^2 \varphi \rangle = 1/2$. При вращении поляризатора вокруг направления естественного луча интенсивность света остается постоянной, а изменяется лишь направление плоскости колебаний света, выходящего из

прибора. Интенсивность прошедшего света, регистрируемая детектором, при этом остается постоянной и равной $I_0/2$. Если после первого поляризатора установить второй однотипный поляризатор, называемый анализатором, то интенсивность на выходе анализатора будет изменяться по закону Малюса (4.1):

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi = \left(\frac{I_0}{2} \right) \cos^2 \varphi,$$

где I_0 и I_1 – интенсивности естественного и линейно-поляризованного света на входе первого и второго поляризаторов соответственно; φ – угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

Частично поляризованный свет. Степень поляризации. Идеальных поляризационных устройств не бывает, и полученные с помощью реальных поляризационных устройств световые пучки всегда частично поляризованы, т. е. представляют смесь поляризованного и неполяризованного (естественного) света с интенсивностями I_p и I_e . Для характеристики частично поляризованных световых пучков вводят понятие *степени поляризации*, под которой понимают отношение интенсивности поляризованной составляющей к полной интенсивности светового пучка на выходе поляризатора (I):

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_e} = \frac{I_p}{I}.$$

Этому выражению можно придать другой вид. Если такой частично поляризованный свет пропустить через анализатор, то при вращении прибора вокруг направления луча интенсивность света на его выходе будет изменяться в пределах от $I_{\max} = I_p + I_e/2$ до $I_{\min} = I_e/2$ при параллельных ($\varphi = 0^\circ$) и взаимно перпендикулярных ($\varphi = 90^\circ$) плоскостях поляризатора и анализатора соответственно. При этом учтен тот факт, что естественная составляющая ослабляется при прохождении через анализатор в 2 раза, а поляризованная изменяется в соответствии с законом Малюса:

$$I(\varphi) = I_p \cos^2 \varphi + \frac{I_e}{2}. \quad (4.2)$$

Выразив I_p и I_e через $I_{\max}$ и $I_{\min}$, получим:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (4.3)$$

Для плоскополяризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$.

Поляризация волны может возникать при отражении и преломлении от границы раздела сред. Пусть естественный свет падает по углом θ_1 на границу раздела двух изотропных диэлектриков с показателями преломления n_1 и n_2 (рис. 4.4).

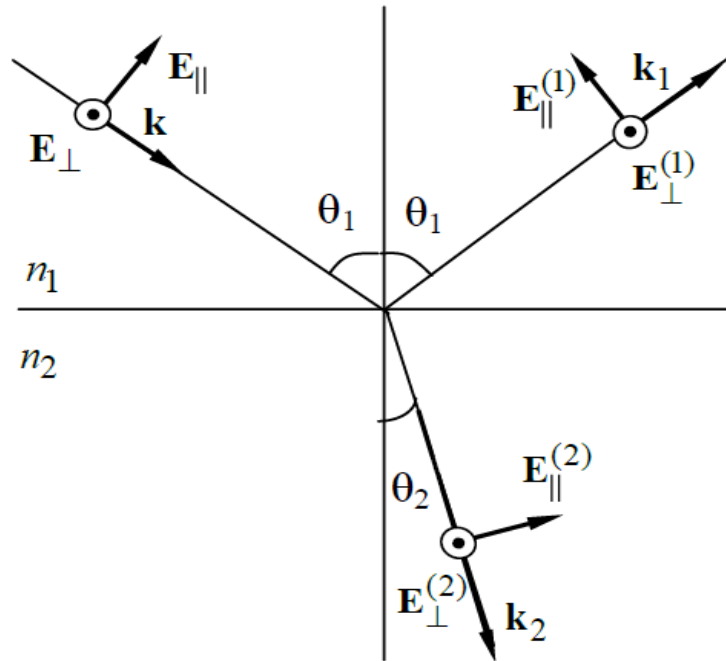


Рис. 4.4. Падение электромагнитной волны на границу раздела двух сред

Обозначим векторы напряженности электрического поля в падающей, отраженной и преломленной волнах, соответственно, $E, E^{(1)}, E^{(2)}$. Падающую волну можно представить суперпозицией двух линейно-поляризованных волн со взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний: в одной из волн плоскость колебаний вектора E совпадает с плоскостью падения, в другой перпендикулярна ей. Векторам напряженностей электрических полей E в таких волнах соответствуют на рис. 4.4, соответственно, индексы $\langle \parallel \rangle$ и $\langle \perp \rangle$. Для естественного света $E_{\parallel} = E_{\perp}$.

Для характеристики перераспределения интенсивности падающей волны между отраженной и преломленной волнами вводят *коэффициенты отражения R и пропускания T* , равные отношениям интенсивности отраженной и преломленной волн к интенсивности падающей волны.

Используя формулы Френеля [3], можно показать, что

$$R_{\parallel} = \left| \frac{E_{\parallel}^{(1)}}{E_{\parallel}} \right|^2 = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)}{\operatorname{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)}; T_{\parallel} = \left| \frac{E_{\parallel}^{(2)}}{E_{\parallel}} \right|^2 \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} = \frac{4 \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)};$$

$$R_{\perp} = \left| \frac{E_{\perp}^{(1)}}{E_{\perp}} \right|^2 = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}; T_{\perp} = \left| \frac{E_{\perp}^{(2)}}{E_{\perp}} \right|^2 \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} = \frac{4 \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}$$
(4.4)

где θ_2 – угол преломления.

На рис. 4.5 показаны зависимости коэффициентов от угла падения θ_1 на границу раздела двух диэлектриков.

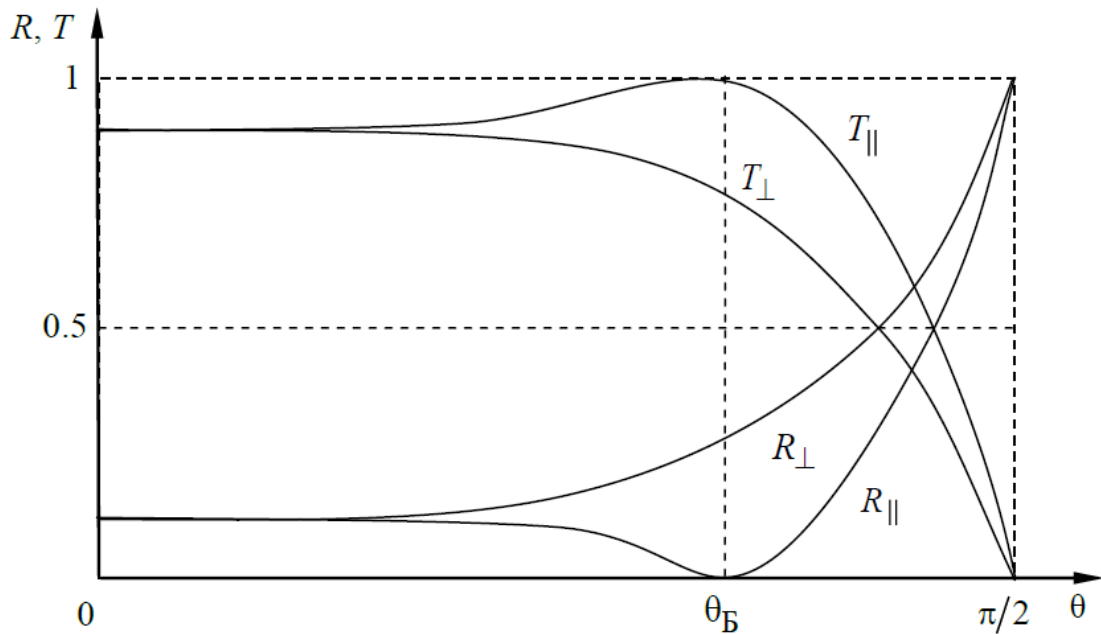


Рис. 4.5. Зависимость коэффициентов отражения R и прохождения T электромагнитной волны от угла падения на границу раздела двух диэлектриков

Из (4.4) видно, что при $\theta_1 + \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ коэффициенты отражения

$R_{\parallel} = 0, R_{\perp} \neq 0$. Следовательно, в этом случае *отраженная волна линейно поляризована* в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Угол падения θ_1 , удовлетворяющий условию $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$, называют *углом Брюстера*. Проходящая волна в этом случае поляризована частично; для нее $T_{\parallel} > T_{\perp}$. Закон преломления света $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1$ (закон Снеллиуса) для угла Брюстера принимает вид $\operatorname{tg} \theta_1 = \operatorname{tg} \theta_B = n_2 / n_1$. Так как $n_2 / n_1 = n_{21}$, то

$$\operatorname{tg} \theta_B = n_{21}. \quad (4.5)$$

Выражение (4.5) представляет собой *закон Брюстера*. Если свет падает на границу раздела двух сред под углом Брюстера, то отраженный луч полностью поляризован в перпендикулярном направлении, преломленный же луч остается поляризован частично, однако степень его поляризации достигает наибольшего значения. Угол между преломленным и отраженным лучами составляет 90° . Если преломленные лучи подвергнуть второму, третьему и т. д. преломлениям, то степень поляризации преломленных лучей возрастает. Если имеется 8–10 пластинок (стопа Столетова), то при падении под углом Брюстера и отраженный, и прошедший свет практически оказываются полностью поляризованными.

Лабораторная работа 4.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [6].

Цели работы: проверка закона Малюса; нахождение степени поляризации частично поляризованного света.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка (рис. 4.6) состоит из источника естественного света S (лампа накаливания), диафрагмы D , линзы L , сменных светофильтров C , поляризатора P , анализатора A , фотоэлемента Φ и микроамперметра $РА$. Анализатор A и фотоэлемент Φ расположены в кожухе K .

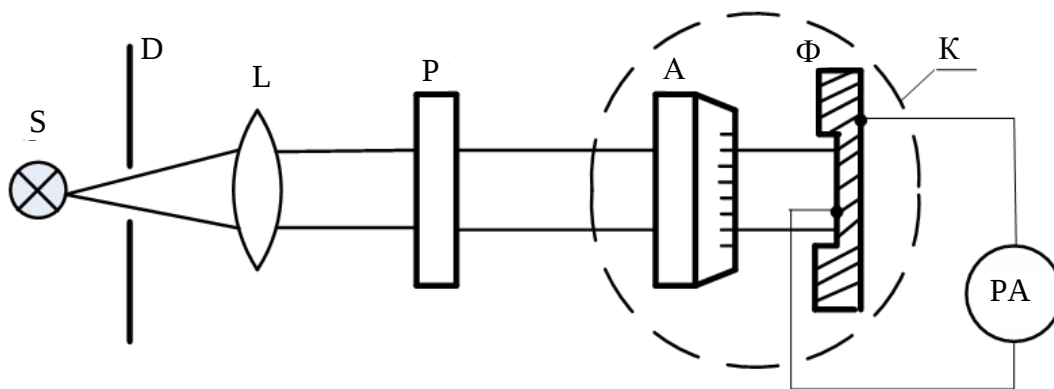


Рис. 4.6. Структурная схема установки для исследований поляризованного света

Угол φ между главными сечениями поляризатора и анализатора можно изменять вращением анализатора вокруг оси, совпадающей с оптической осью установки. Угловое положение главного сечения анализатора определяется по шкале, находящейся на его корпусе. Вид экспериментальной установки по исследованию поляризованного света приведен на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Экспериментальная установка по исследованию поляризованного света

Сила тока в цепи фотоэлемента пропорциональна интенсивности света (I), падающего на фотоэлемент. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, измеряется в условных единицах (делениях шкалы микроамперметра).

Исследуемые закономерности

Теоретическое рассмотрение закономерностей, исследуемых в данной лабораторной работе, приведено в общих сведениях разд. 4.

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о явлении поляризации света, основных характеристиках и способах получения поляризованного света.
2. Ознакомиться с описанием экспериментальной установки и методикой эксперимента.
3. Нарисовать эскиз лабораторной установки, записать формулы для расчетов.
4. Подготовить протокол наблюдений, в который будут заноситься результаты экспериментов.

Указания по проведению эксперимента

1. Включить лампу S . Поворачивая анализатор, найти угловые положения, соответствующие максимальному и минимальному показаниям микроамперметра. Записать значения углов $\beta_{\max}$ и $\beta_{\min}$ по шкале анализатора и показания микроамперметра $I_{\max}$ и $I_{\min}$ (в делениях шкалы). Повторить наблюдения пять раз.

2. Изменяя угол β от 0 до 360° с шагом в 10° , записать значения отсчетов угла поворота β и фототока I .

3. Закрыть лампу непрозрачным экраном. Записать значение «темнового» тока (I_T) фотоэлемента в делениях шкалы микроамперметра.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Используя среднее значение положения первого максимума $\overline{\beta_{\max 1}}$ как начала отсчета, рассчитать значения углов $\varphi = |\beta - \overline{\beta_{\max 1}}|$.

2. С учетом значения темнового тока (I_T) рассчитать экспериментальные интенсивности $I(\varphi)_{\text{эксп}} = I(\varphi) - I_T$.

3. Построить график приведенной экспериментальной зависимости $\frac{I(\varphi)_{\text{эксп}}}{I_{\max}}$ от угла поворота φ .

4. На том же графике, исходя из закона Малюса (4.1), построить приведенную теоретическую зависимость $\frac{I(\varphi)_{\text{теор}}}{I_{\max}}$ в соответствии с (4.2).

Сравнить приведенные экспериментальную и теоретическую зависимости и дать заключение о справедливости закона Малюса.

5. Используя выборки значений $I_{\max}$ и $I_{\min}$ (п. 1), рассчитать степень поляризации света $\bar{P}$ и погрешность измерений $\Delta \bar{P}$.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой свет? Какие векторы характеризуют световую волну и как они направлены друг относительно друга? Что такое интенсивность света?

2. Световая волна поперечная или продольная? В чем заключается отличие продольных волн от поперечных?

3. Что такое естественный свет? Что такое поляризованный свет? Что называют плоскостью колебаний вектора $\mathbf{E}$, а что плоскостью поляризации?

4. Что такое степень поляризации света и какой формулой она определяется?

5. Охарактеризовать основные способы получения поляризованного света.

6. Каково соотношение между интенсивностью естественного света, падающего на поляризатор и прошедшего через него? Почему?

7. Сформулировать закон Малюса и особенности его использования при анализе полностью и частично поляризованного света.

8. Где применяются явления поляризации света?
9. В чем сущность поляризации света при эффекте двойного лучепреломления?
10. Применимо ли понятие степени поляризации к эллиптически поляризованному свету? Почему?

Лабораторная работа 4.2

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ЗАКОН МАЛЮСА. УГОЛ БРЮСТЕРА

Методическое описание данной лабораторной работы разработано на кафедре общей физики Новосибирского ГТУ [7]. Макет изготовлен в ООО «Опытные приборы» (г. Новосибирск).

Цели работы: изучение поляризации света при отражении и преломлении; нахождение степени поляризации лазерного излучения.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка для изучения поляризации света, представляющая собой модульный учебный комплекс по волновой оптике (МУК-ОВ).

Установка состоит из механического и электронного блоков (рис. 4.8). Механический блок 1 представляет собой основание 10, на котором установлены и закреплены: стойка 17, служащая вертикальной оптической скамьей; турель 19; защитный экран 18; электронный блок 5. На стойке смонтированы оптические узлы 2–4, 16, которые могут вращаться и выводиться из поля зрения, если при выполнении эксперимента они не используются. Защитный экран 18 не вращается и участвует во всех экспериментах на данной установке.

Электронный блок 5 содержит кнопки, индикаторы измерительных устройств и окна фотоприемников.

При выполнении данной лабораторной работы используются следующие узлы механического блока 1: защитный экран 18, поляризатор 2, устройство для измерения угла Брюстера 4 с матовой полупрозрачной шкалой, анализатор 16. Вращающаяся втулка на устройстве 4 позволяет изменять угол падения луча на стеклянную пластинку относительно вертикальной шкалы. Поляризатор 2 и анализатор 16 снабжены угломерной шкалой. На электронном блоке 5 используются: кнопка включения лазера 12; регулятор интенсивности 13; кнопка переключения фотоприемников 8; индикатор относительной интенсивности света 7; четыре индикатора включенного фотоприемника 14 с определенным диапазоном длин волн; кнопка включения электронного блока «Сеть» 9 и окно фотоприемника лазерного излучения 6.

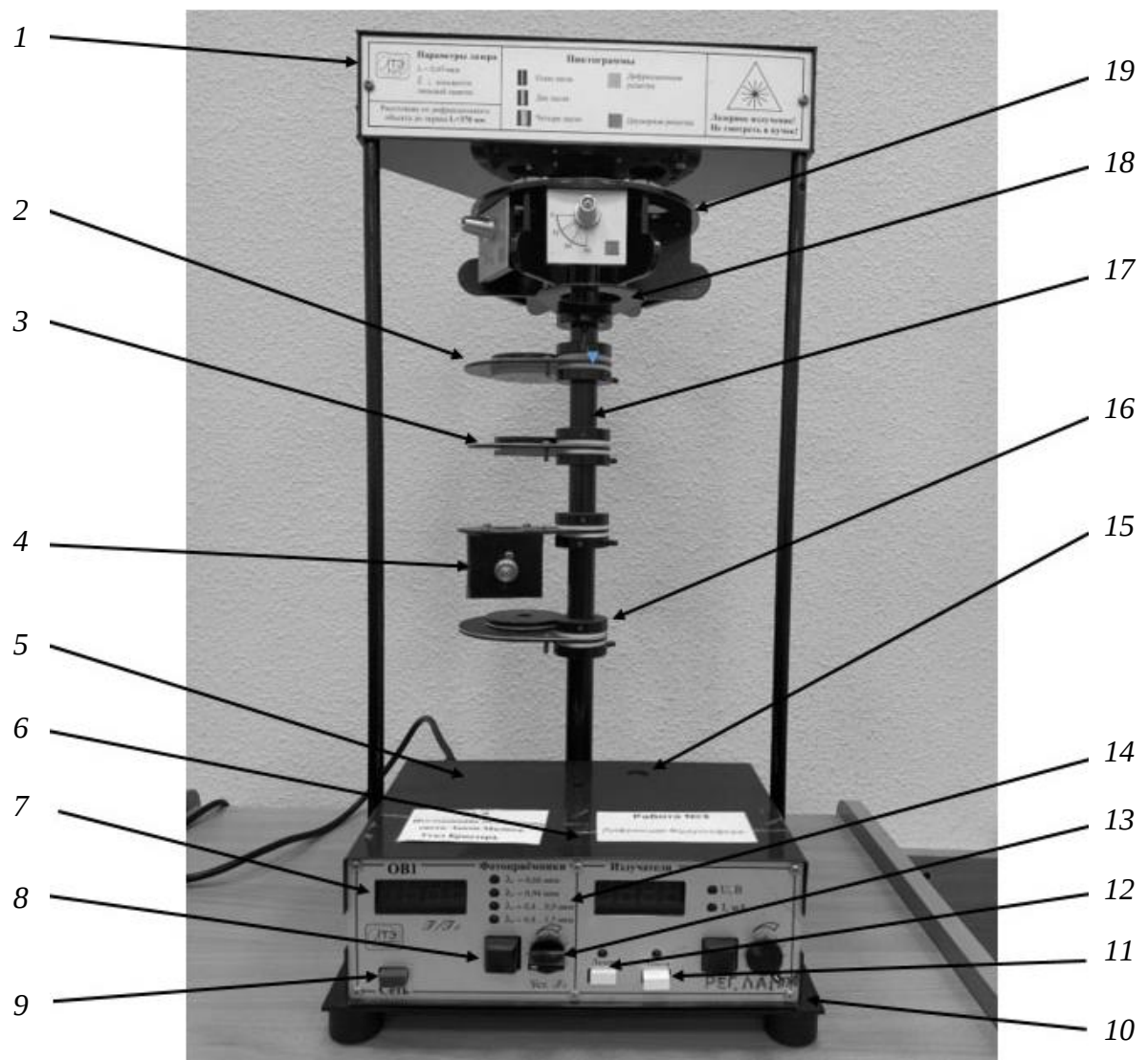


Рис. 4.8. Экспериментальная установка по волновой оптике (МУК-ОВ)

В лабораторной установке на индикаторе 7 показывается не абсолютная, а относительная интенсивность излучения $I_{\text{отн}} = I/I_0$, где I_0 – некоторая константа, задаваемая чувствительностью измерительного прибора.

Исследуемые закономерности

Теоретическое рассмотрение закономерностей, исследуемых в данной лабораторной работе, приведено в общих сведениях разд. 4.

В данной работе осуществляется проверка закона Малюса и оценивается степень поляризации частично поляризованного лазерного излучения. В качестве поляризатора и анализатора используются поляроиды. Для исследования поляризованного света осуществляется вращение анализатора вокруг направления луча лазера и с помощью фотоприемника измеряется интенсивность прошедшего света.

В работе также изучается получение поляризованного света при отражении и преломлении на границе раздела двух изотропных диэлектриков и определяется угол Брюстера для стеклянной пластинки.

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Приготовить протокол наблюдения.
2. Вывести формулу для определения погрешности измерения степени поляризации ΔP .
3. Исходя из (4.1), построить на миллиметровой бумаге график теоретической зависимости $(I_p/I_0) = \cos^2 \varphi$ от угла φ с шагом $\pi/8$, учитывая, что $\cos^2 \varphi = (1 + \cos 2\varphi)/2$.

Указания по проведению эксперимента

1. Нахождение степени поляризации излучения лазера.

1.1. Включить лазерный источник света, соблюдая правила техники безопасности (не допускать прямого попадания лазерного излучения в глаз). Турель 19 (рис. 4.8) установить так, чтобы излучение от источника проходило ее беспрепятственно.

1.2. Кнопкой переключения фотоприемников 8 установить диапазон длин волн $\lambda_4 = 0.4 \dots 1.2$ мкм, о чем будет свидетельствовать включение одного из индикаторов 14. Вращением ручки 13 добиться наибольших показаний максимальной относительной интенсивности $I_{\text{отн}} = I/I_0$ на индикаторе 7 (рис. 4.8).

1.3. Поскольку выходящий из лазерного источника свет является эллиптически-поляризованным, то для превращения его в плоскополяризованный на пути лазерного луча поместить поляризатор 2. Стрелку шкалы поляризатора установить на 0° .

1.4. Установить между лазером и фотоприемником анализатор 16.

1.5. Вращая анализатор и непрерывно следя за показаниями цифрового индикатора интенсивности, измерить максимальное ($I_{\text{отн max}}$) и минимальное ($I_{\text{отн min}}$) значения относительной интенсивности проходящего излучения. Наблюдения выполнить 5 раз и результаты записать в протокол.

2. Проверка закона Малюса.

2.1. Схема установки (рис. 4.8) для проверки закона Малюса состоит из источника света – лазера, поляризатора 2, анализатора 16, фотоприемника 6. Правила включения лазерного источника и настройки установки не меняются и соответствуют пп. 1.1–1.4.

2.2. Вращая анализатор, снять зависимость относительной интенсивности $I_{\text{отн}}(\varphi)$ от угла поворота анализатора φ через каждые 10° от $\varphi = -150^\circ$ до $\varphi = +150^\circ$, проходя через 0° (вращать против часовой стрелки). Результаты наблюдений занести в протокол.

3. Нахождение угла Брюстера для стеклянной пластинки.

3.1. Схема установки (см. рис. 4.8) по определению угла Брюстера для стеклянной пластинки состоит из источника света – лазера, поляризатора 2, устройства для измерения угла Брюстера 4 с матовой полупрозрачной вертикальной шкалой и фотоприемника 6. В данном эксперименте анализатор 16 не используется, поэтому его нужно установить в положение вне хода лазерного луча. Правила включения лазерного источника и настройки установки не меняются и соответствуют пп. 1.1–1.3.

3.2. Установить по ходу луча устройство для измерения угла Брюстера 4.

3.3. Вращая втулку на устройстве 4, визуально пронаблюдать за изменениями интенсивности луча лазера, отраженного от стеклянной пластинки под углом θ , фиксируемым на вертикальной шкале.

3.4. Добиться минимальной интенсивности луча, визуально наблюдаемого при отражении от стеклянной пластинки, что соответствует падению светового луча на стеклянную пластинку под углом Брюстера. Определить по шкале числовое значение полученного угла θ_B . Результат наблюдений занести в протокол.

3.5. Выключить установку кнопкой «Сеть» 9.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Исходя из результатов наблюдений п. 1.5 найти степень поляризации P_i согласно (4.3) для каждого наблюдения. Рассчитать результат измерения $P = \bar{P} \pm \Delta \bar{P}$.

2. По результатам наблюдений п. 2.2 найти максимальное значение $I_{\text{отн max}}$, рассчитать значения отношения $I_{\text{отн}}/I_{\text{отн max}}$ для каждого значения угла φ и построить на миллиметровой бумаге график зависимости $I_{\text{отн}}/I_{\text{отн max}}$ от угла φ . Сравнить полученный экспериментальный график с теоретическим графиком, построенным согласно заданиям по подготовке к работе (п. 3).

3. Используя полученное экспериментально значение угла Брюстера (п. 3.4) и формулу (4.5), вычислить значение показателя преломления стеклянной пластинки устройства 4 (см. рис. 4.8).

Контрольные вопросы

1. Почему свет, отраженный от границы раздела двух диэлектриков под углом Брюстера, является плоскополяризованным?
2. Чему равен угол между плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в четыре раза?
3. Как изменяется интенсивность света за поляризатором при его вращении вокруг пучка естественного света?
4. Свет, отраженный от диэлектрика, полностью поляризован. Каков угол падения света на диэлектрик? Ответ обосновать.
5. Оцените угол Брюстера при отражении света от границы «воздух–стекло», если абсолютный показатель преломления стекла равен 1,5.
6. Естественный свет падает на границу «воздух–диэлектрик» под углом Брюстера. Под какими углами распространяются отраженный и преломленный пучки света? Как они поляризованы?
7. Какое явление используется в призме Николя для поляризации света? В чем сущность этого явления?
8. Частично поляризованный пучок света падает на поляризатор. Чему равна максимальная интенсивность пучка света, вышедшего из поляризатора?
9. Дайте определение угла Брюстера. Проиллюстрируйте ответ формулой и рисунком.
10. Что такое поляроиды? Для чего они применяются?

Лабораторная работа 4.3

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА В РАСТВОРАХ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [8].

Цели работы: изучение вращения плоскости поляризации света при прохождении через раствор оптически активного вещества; нахождение удельного вращения сахара; оценка процентного содержания сахара в растворе.

Приборы и принадлежности: структурная схема экспериментальной установки для исследований распространения света в растворах оптически активных веществ приведена на рис. 4.9.

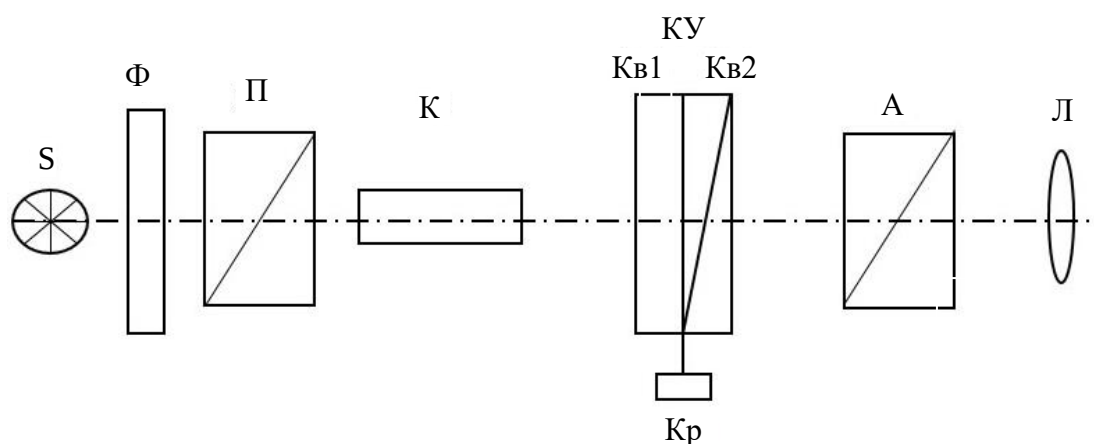


Рис. 4.9. Структурная схема установки для исследований распространения света в растворах оптически активных веществ

В состав схемы входят: S – источник света, Φ – светофильтр, Π – поляризатор, A – анализатор, K – кювета с раствором оптически активного вещества; KY – компенсационное устройство, состоящее из пластины левовращающего кварца (K_{B1}) и двух клиньев правовращающего кварца (K_{B2}), Kp – кремальерная передача, L – линза окуляра.



Рис. 4.10. Сахариметр СУ-3

В лабораторной работе данная схема реализована в сахариметре СУ-3 (рис. 4.10). В состав сахариметра входят: 1 – измерительный узел, 2 – осветительный узел. Эти узлы соединены между собой траверсой 4, на которой укреплен камера 3 для поляризметрических кювет (трубок). С лицевой стороны измерительной головки прибора имеются зрительная труба 7 и окуляр 8 для отсчета показаний по шкале. В нижней части измерительного

узла расположена головка винта 6 кремальерной передачи для компенсации поворота плоскости поляризации. На передней части основания находится тумблер 5 для включения осветительной лампы. С тыльной стороны основания имеются вилка разъема для подключения электролампы к трансформатору и вилка со шнуром для подключения трансформатора в сеть.

Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

При прохождении линейно-поляризованного света через некоторые вещества, называемые *оптически активными*, наблюдается вращение плоскости поляризации световой волны. Это явление получило название *вращение плоскости поляризации* [1]–[3]. Оно наблюдается как в кристаллах (кварц, киноварь), так и в аморфных веществах (водный раствор сахара, скипидар, раствор виннокаменной кислоты и др.). Существует два вида оптически активных веществ: *левовращающие* и *правовращающие*, в зависимости от направления вращения плоскости поляризации (влево или вправо по отношению к наблюдателю, к которому приближается световая волна). Вращение вправо считается *положительным*, а влево – *отрицательным*.

Вращение плоскости поляризации в оптически активных веществах объяснил Френель. Он доказал экспериментально [1]–[3], что при попадании в оптически активную среду свет испытывает двойное круговое лучепреломление, образуются лучи, поляризованные по правому и левому кругу, которые распространяются внутри оптически активной среды с разными фазовыми скоростями. Если падающий свет был поляризован линейно, то после двойного кругового лучепреломления внутри оптически активной среды, на выходе из нее эти волны снова складываются в линейно-поляризованную волну, но уже с повернутой плоскостью поляризации.

Если оптически активное вещество представляет собой раствор, то угол поворота плоскости поляризации φ пропорционален толщине слоя активного вещества l и его концентрации C :

$$\varphi = [\alpha]Cl, \quad (4.6)$$

где $[\alpha]$ – величина, называемая *удельным вращением*. Удельное вращение зависит от природы вещества, его температуры T и длины волны λ проходящего через него света. На этой связи между концентрацией оптически активного раствора и углом вращения плоскости поляризации (плоскости колебаний вектора E) основан метод определения концентрации оптически активных растворов. В случае кюветы с раствором оптически активного

вещества неизвестной концентрации, измерив угол поворота плоскости поляризации φ для кюветы с длиной l , можно по градуировочному графику зависимости $\varphi(C)$ определить концентрацию C исследуемого раствора.

В частности, на этом принципе основана работа сахариметров – приборов для определения концентрации сахара в растворах. Главные части сахариметра – поляризатор и анализатор, между которыми помещается кювета с исследуемым раствором сахара (см. рис. 4.9).

Если главные сечения поляризатора и анализатора (призмы Николя) взаимно перпендикулярны, то при отсутствии между ними оптически активного вещества свет через систему не проходит. При помещении между ними кюветы с оптически активным веществом определенной длины, угол поворота плоскости колебаний вектора E световой волны на выходе из кюветы равен φ , свет через систему проходит, и поле зрения в окуляре просветляется. Повернув анализатор вокруг оптической оси установки на 90° , можно «погасить» просветление и наблюдать затемнение. Таким образом, сравнивая углы поворота анализатора относительно поляризатора при реализации условий затемнения поля зрения в отсутствие и при наличии оптически активного вещества, можно измерить угол φ . Но такой способ довольно неточный, так как при этом отсутствует объект для сравнения степени темноты.

Точность измерений повышается при использовании полутеневых устройств, в которых настройка осуществляется не на «темноту», а на равное освещение двух половин поля зрения. В таких устройствах (см. рис. 4.9) световой поток от источника света проходит через светофильтр и поляризатор, который преобразует его в линейно-поляризованный поток света. Этот поток разделяют на два пучка поляризованных лучей, у которых плоскости колебаний вектора E составляют небольшой угол друг с другом $1...2^\circ$. Каждый из пучков освещает половину поля зрения прибора. Если кювета с раствором отсутствует, в окуляре зрительной трубы наблюдаются две равно освещенные половины светового поля, разделенные тонкой линией.

В сахариметре полутеневое устройство реализуется путем распила призмы Николя (анализатора) пополам по главному сечению с последующей шлифовкой и склеиванием обеих половин, в результате чего они составляют друг с другом некоторый угол. Если поворачивать такой анализатор вокруг оси, проходящей через световой пучок, то равенство освещенности обеих половин поля зрения будет наблюдаться в двух положениях: 1) когда главная плоскость поляризатора делит угол между

половинами анализатора пополам; 2) когда биссектриса угла между половинами анализатора перпендикулярна главной плоскости поляризатора.

В сахариметре, который применяют в данной работе (см. рис. 4.9), поляризатор (П) и анализатор (А) установлены неподвижно, а угол поворота плоскости поляризации световой волны измеряют посредством компенсационного устройства (КУ). Это устройство состоит из пластинки правовращающего кварца (Кв1) и двух скользящих один относительно другого клиньев левовращающего кварца (Кв2). Сдвигая и раздвигая клинья в присутствии кюветы (К) с раствором какого-либо вещества, суммарную толщину клиньев левовращающего кварца можно сделать равной толщине пластинки правовращающего кварца, тогда правое и левое вращения плоскости поляризации светового пучка взаимно компенсируются, и обе половины поля зрения нижнего окуляра 7 сахариметра (см. рис. 4.10) окажутся освещенными одинаково.

Смещение клиньев осуществляется с помощью винта кремальеры (Кр), которая связана со шкалой, перемещаемой вдоль неподвижного нониуса.

Отсчеты показаний шкалы при помощи нониуса показаны на рис. 4.11. Целое число градусов отсчитывается по основной (нижней) шкале против нуля нониуса. Десятые доли градуса соответствуют номеру деления шкалы нониуса (верхней шкалы), совпадающему с делением основной шкалы. Например, на рис. 4.11, а отсчет равен -29.4° , а на рис. 4.11, б отсчет равен $+7.8^\circ$.

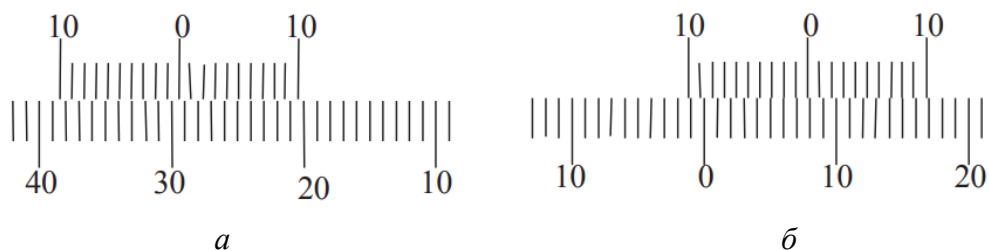


Рис. 4.11. Отсчеты по шкале нониуса

Шкала сахариметра, наблюдаемая через верхний окуляр 8 (см. рис. 4.10), проградуирована в градусах международной сахарной шкалы $[\text{°S}]$. Сахариметр показывает 100 °S , что соответствует $34,62^\circ$, когда при 20 °C в 200-миллиметровой кювете находится водный раствор, содержащий в 100 см^3 26 г химически чистой сухой сахарозы (процентное содержание сахара в этом случае 24,3 %).

Угол вращения плоскости поляризации световой волны при прохождении через оптически активное вещество можно найти путем сравнения отсчетов по шкале сахариметра для кювет без оптически активного вещества (например, с химически чистой водой) и с оптически активным веществом (с раствором

сахара), добиваясь одинаковой освещенности обеих половин поля зрения в каждом случае.

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Ознакомиться с процедурой отсчета угла поворота плоскости поляризации света при его прохождении через кювету с раствором по шкале сахариметра.
2. Подготовить в протоколе к лабораторной работе таблицы для записи результатов наблюдений.

Указания по проведению эксперимента

1. Вращая оправы окуляра 7 зрительной трубы и окуляра 8 шкалы (см. рис. 4.10), установить максимальную резкость изображения таким образом, чтобы четко были видны: вертикальная линия, разделяющая поле зрения на две половины; штрихи и цифры шкалы и нониуса.
2. Вложить в камеру кювету с химически чистой водой, вращая головку винта кремальерной передачи 6 (см. рис. 4.10), добиться равномерной освещенности обеих половин поля зрения, наблюдаемого в окуляре 7 (изображение посередине на рис. 4.12). При малых поворотах винта в одну и другую сторону должна наблюдаться смена освещенности обеих половинок поля зрения (изображения слева и справа на рис. 4.12).

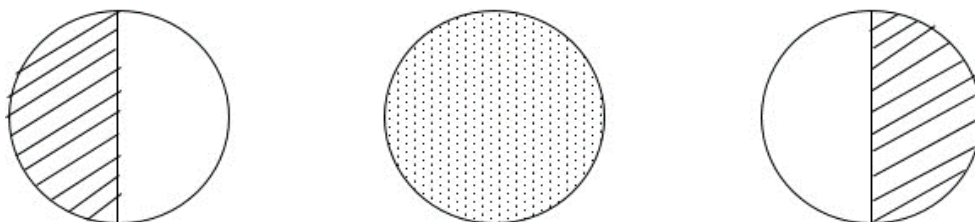


Рис. 4.12. Смена освещенности двух частей (половинок) поля зрения

Для момента смены освещенности (среднее изображение на рис. 4.12) выполнить отсчет угла поворота α_0 по наблюдаемой через верхний окуляр 8 (см. рис. 4.10) международной сахарной шкале при помощи нониуса с точностью до $0,1^\circ\text{S}$. Пересчитать градусы международной сахарной шкалы в угловые градусы ($1^\circ\text{S} = 0,3462^\circ$). Наблюдения провести 5 раз, результаты наблюдений α_{0i} в угловых градусах занести в приготовленную таблицу протокола к лабораторной работе.

3. Проградуировать шкалу сахариметра с помощью трех кювет с растворами различной концентрации сахара. Для этого последовательно вкладывать в камеру прибора поляризметрические кюветы с раствором разного известного процентного

содержания сахара C [%]. В каждом случае будет наблюдаться изменение однородности освещения обеих половин поля зрения. Аналогично проведению измерений в п. 2, вращая головку винта 6, добиться равномерной освещенности обеих половин поля зрения, наблюдаемого в окуляре. Записать результаты наблюдений отсчетов угла поворота α_n ($n = 1, 2, 3$). Наблюдения провести пять раз для каждой концентрации сахара C [%] $_n$, результаты наблюдений α_{ni} в угловых градусах занести в подготовленную таблицу протокола к лабораторной работе. В эту же таблицу занести значения концентрации сахара в кюветах и длины кювет. Стараться выполнить измерения для кювет с одинаковой длиной. Если для градуировки используются кюветы разной длины, то все отсчеты нужно приводить к кювете длиной 20 см, т. е., например, для кюветы длиной 10 см отсчеты удваивать.

4. Наблюдения по методике п. 2 выполнить для раствора с неизвестным процентным содержанием сахара C_x [%] для кюветы длиной 20 см. Результаты наблюдений α_{xi} в угловых градусах занести в подготовленную таблицу.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. По измеренным значениям отсчетов углов поворота α_{0i} , α_{ni} , α_{xi} необходимо составить и статистически обработать выборки из пяти значений этих величин, определить среднее выборочное значение $\bar{\alpha}$ и доверительный интервал $\overline{\Delta\alpha}$ для каждой выборки. Рассчитать средние значения углов поворота плоскости поляризации света по формулам $\bar{\varphi}_n = \bar{\alpha}_n - \bar{\alpha}_0$ и $\bar{\varphi}_x = \bar{\alpha}_x - \bar{\alpha}_0$.

2. Построить на миллиметровой бумаге градуировочный график зависимости $\bar{\varphi}(C)$ с нанесением доверительных интервалов, т. е. $\bar{\varphi} \pm \overline{\Delta\varphi}$, по трем точкам с известной концентрацией C [%]. Доверительный интервал $\overline{\Delta\varphi}$ принять равным доверительному интервалу $\overline{\Delta\alpha}_n$.

3. Пользуясь градуировочным графиком $\bar{\varphi}(C)$, по измеренному среднему выборочному значению $\bar{\varphi}_x$ найти значение C_x [%].

4. Из градуировочного графика $\bar{\varphi}(C)$ найти значение углового коэффициента k , используя (4.6), вычислить *удельное вращение раствора сахара* $[\bar{\alpha}]$.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называют оптически активными?

2. Что называется удельным вращением? Напишите формулу для определения удельного вращения.
3. Какой свет называют плоскополяризованным? Чем он отличается от естественного света?
4. Как отличить линейно-поляризованный свет от света, поляризованного по кругу?
5. Как определяется концентрация раствора вещества поляризметрическим методом?
6. Что такое «сахарный градус» (1°S)?
7. Объяснить принцип действия кварцевого компенсатора.
8. Опишите принцип действия сахариметра.
9. В чем проявляется оптическая активность в кристаллах кварца?
10. В чем сущность эффекта Керра?

Список литературы

1. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
2. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики: учеб.: в 3 т. Т. 3: Оптика. Атомная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 656 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. IV: Оптика. – М.: Физматлит, 2006. – 792 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Лань, 2007. – 496 с.
5. Иродов И. В. Волновые процессы. Основные законы: учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 264 с.
6. Физика атома и атомного ядра. Руководство для выполнения лабораторных работ по физике / под ред. А. Г. Граμμαкова; ЛЭТИ. – Л., 1965. – 174 с.
7. Квантовая физика. Методические рекомендации к лабораторным работам № 36, 38, 46 а, 47, 49 / сост.: А. М. Погорельский, А. В. Морозов, В. В. Христофоров, А. А. Шевченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 48 с.
8. Волновая и квантовая оптика: руководство к выполнению лабораторных работ по физике: в 2 ч. Ч. 2 / под ред. А. Г. Граμμαкова; ЛЭТИ. – Л., 1975. – 58 с.