

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ САХАРА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУТЕНЕВОГО ПОЛЯРИМЕТРА

1. Цель работы

Целью работы является изучение поляризации света и физических основ работы полутеневого поляриметра.

2. Краткая теория

2.1. Естественный и поляризованный свет

Из электромагнитной теории света известно, что световые волны являются поперечными, т.е. три вектора, характеризующие волну – вектор напряженности электрического поля \vec{E} , напряженности магнитного поля \vec{H} и волновой вектор \vec{k} , определяющий направление распространения волны, взаимно перпендикулярны.

Поляризованным называется свет, в котором колебания вектора \vec{E} упорядочены каким-либо образом. В естественном свете колебания происходят беспорядочно во всех направлениях.

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных колебания электрического вектора, совершающихся вдоль осей x и y и отличающихся по фазе на δ :

$$E_x = A_1 \cos \omega t, \quad E_y = A_2 \cos(\omega t + \delta). \quad (3.06.1)$$

Результирующая напряженность \vec{E} является векторной суммой \vec{E}_x и \vec{E}_y (рис. 6.1). Угол между направлениями векторов \vec{E} и \vec{E}_x определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos \omega t}. \quad (3.06.2)$$

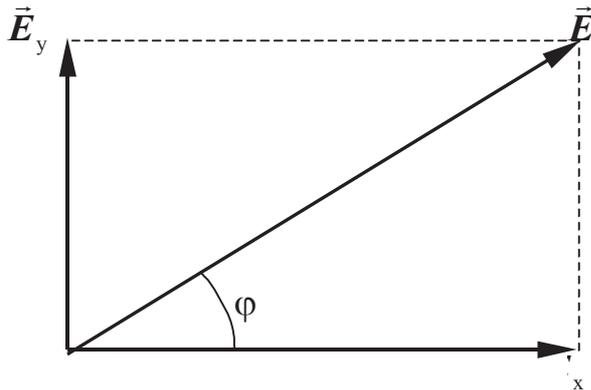


Рис. 6.1. Разложение вектора напряженности электрического поля на составляющие по осям координат

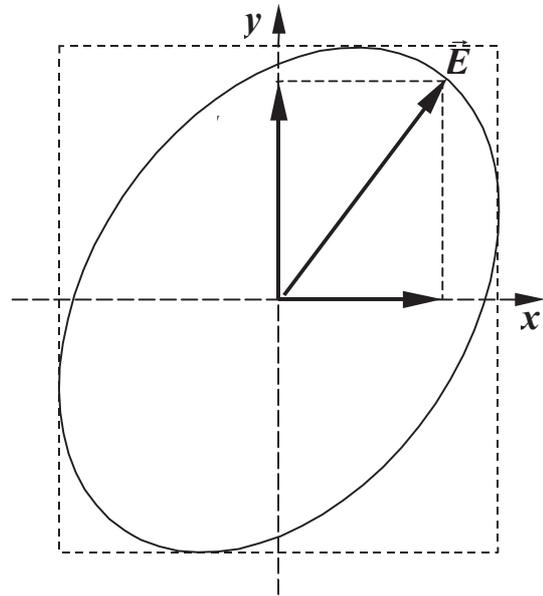


Рис. 6.2. Эллиптическая поляризация света

Если разность фаз δ претерпевает случайные хаотические изменения, то и угол φ , определяющий направление вектора \vec{E} , будет испытывать постоянные неупорядоченные изменения. В соответствии с этим, естественный свет можно представить себе как наложение двух некогерентных волн, поляризованных по взаимно перпендикулярным направлениям и имеющих одинаковую интенсивность.

Если компоненты световой волны \vec{E}_x и \vec{E}_y когерентны, то есть δ имеет постоянное значение, свет будет поляризованным. Вид поляризации при этом зависит от величины δ . При $\delta = 0$ поляризация линейная, колебания вектора \vec{E} происходят в одной плоскости. При $\delta = \pi/2$ поляризация круговая, конец вектора \vec{E} описывает окружность. При промежуточном значении δ поляризация эл-

липтическая, причем ориентация эллипса относительно осей координат x и y определяется значением δ (рис. 6.2).

Если колебания вектора \vec{E} происходят хаотически по всем направлениям, но при этом имеется преимущественное направление колебаний, свет является частично поляризованным.

Согласно новой терминологии плоскость, в которой происходят колебания вектора \vec{E} , называют плоскостью поляризации линейнополяризованного света. (Прежде эту плоскость называли плоскостью колебаний, а плоскостью поляризации – плоскость, ей перпендикулярную, и такая терминология часто встречается в литературе).

2.2. Оптические явления в анизотропных средах

При распространении света в анизотропных средах наблюдается ряд интересных явлений

Двойное лучепреломление. Данное явление наблюдается при прохождении света через прозрачные кристаллы, за исключением кристаллов кубической симметрии. Оно заключается в том, что падающий луч разделяется внутри кристалла на два луча, распространяющихся, вообще говоря, с разными скоростями в различных направлениях. Один луч подчиняется обычному закону преломления, т.е. показатель преломления этого луча не зависит от угла падения света. Такой луч называется обыкновенным (o). Показатель преломления для другого луча не является постоянным, а зависит от угла падения. Этот луч получил название необыкновенного (e). Даже при нормальном падении света на поверхность кристалла необыкновенный луч, отклоняется от первоначального направления и, вообще говоря, не лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль к поверхности кристалла (рис. 6.3).

Впервые двойное лучепреломление наблюдалось при прохождении через кристаллы исландского шпата (разновидность кальцита CaCO_3 , имеющего гексагональную структуру).

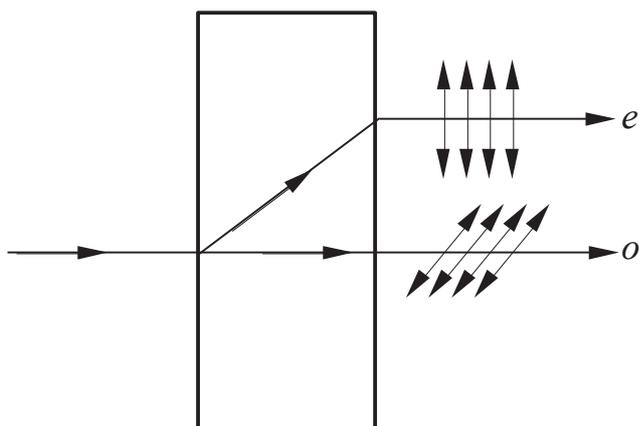


Рис. 6.3. Двойное лучепреломление при прохождении света в кристаллах

В каждом двоякопреломляющем кристалле имеется по крайней мере одно направление, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь, в одном направлении. Такое направление называется оптической осью кристалла. Кристаллы, имеющие одну оптическую ось, называются одноосными.

Примером такого кристалла может служить упомянутый выше исландский шпат. В одноосных кристаллах наблюдаются обыкновенный и необыкновенный лучи. Существуют кристаллы, имеющие две оптические оси. Такие кристаллы называют двухосными. В них оба луча являются необыкновенными. Двухосными кристаллами являются слюда, гипс.

Плоскость, проходящая через оптическую ось кристалла и падающий луч, называется главной плоскостью или главным сечением кристалла.

Опыт показывает, что обыкновенный и необыкновенный лучи являются линейнополяризованными во взаимно перпендикулярных направлениях. Обыкновенный луч поляризован перпендикулярно главной плоскости кристалла, плоскость поляризации необыкновенного луча совпадает с главной плоскостью. Показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей различны, а это означает, что скорости распространения обыкновенного и необыкновенного лучей различны. Причем, скорость распространения необыкновенного луча зависит от угла падения света на кристалл. Следовательно, причиной двойного лучепреломления является различие скоростей распространения света, поляризованного во взаимно перпендикулярных направлениях. Явление двойного лучепреломления может применяться для получения и исследования поляризованного света.

Дихроизм. В некоторых кристаллах, обладающих двойным лучепреломлением, один из лучей поглощается сильнее другого. Это явление называется дихроизмом. В кристаллах турмалина, например, необыкновенный луч практически полностью поглощается на длине 1 мм.

Вращение плоскости поляризации. Некоторые вещества, в частности кварц, обладают способностью поворачивать плоскость поляризации линейно-поляризованного света, проходящего вдоль одного из направлений в кристалле. Это направления является оптической осью кристалла. Такое явление называется вращением плоскости поляризации. Свойством вращать плоскость поляризации обладают также сахар, киноварь, водный раствор сахара и сахаристых веществ, никотин, скипидар, винная кислота, нефть и др. Эти вещества называют оптически активными.

Вращение плоскости поляризации объясняется особенностями структуры оптически активных веществ: наличием анизотропных молекул, не имеющих ни центра симметрии, ни плоскости симметрии. В оптически активных кристаллах асимметричными являются элементарные ячейки.

Явление вращения плоскости поляризации может использоваться для определения и идентификации оптически активных веществ, для измерения их концентрации в растворах. Поляриметрические методы анализа и контроля ценны своей простотой и высокой точностью. Они применяются в минералогии, для анализа эфирных и минеральных масел, горных смол и т.д.

Для оптически активных кристаллов угол поворота плоскости поляризации равен:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot l, \quad (3.0,6.1)$$

для чистых жидкостей:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \rho \cdot l \quad (3.06.2)$$

для оптически активных растворов:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot C \cdot l \quad (3.06.3)$$

где ρ – плотность жидкости;

l – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе (принято выражать в дм);

C – концентрация оптически активного вещества в растворе (в г/см³).

Величина α_0 называется удельным вращением. Эта величина характеризует вращательную способность вещества. Удельное вращение численно равно углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (1 дм) и единичной концентрации (г/см³).

Удельное вращение зависит от природы вещества, температуры (для большинства веществ при повышении температуры на 1 °С α_0 уменьшается на 0,001 α_0), и длины волны света (обычно α_0 возрастает с уменьшением λ). Зависимость α_0 от длины волны света называется вращательной дисперсией.

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации различают право– и левовращающие оптически активные вещества. Во первых, если смотреть навстречу лучу, плоскость поляризации поворачивается по часовой стрелке, во вторых – против часовой стрелки. Одно и то же вещество, например, кварц, винная кислота, в различных кристаллических состояниях может быть как правовращающим, так и левовращающим.

В данной работе нужно определить концентрации нескольких растворов сахара по результатам измерений угла поворота плоскости поляризации α , который определяют с помощью поляриметра.

3. Выполнение работы

3.1. Необходимые приборы и материалы: полутеневого поляриметр, источник света, трубка для растворов ($l = 2$ дм), растворы сахара известной и неизвестной концентраций.

3.2. Устройство и принцип действия полутеневого поляриметра. Основными частями всякого поляризационного прибора являются поляризатор и анализатор. В качестве поляризатора и анализатора служат призмы Николя (николи). Николь (рис. 6.4) представляет собой призму, вырезанную из кристалла исландского шпата по плоскости спайности. Длина продольных ребер призмы в 3,65 раза больше длины ребер основания. Основания кристалла отшлифовываются таким образом, чтобы они составляли с боковыми ребрами угол 68° вместо 71° у естественного кристалла. После этого кристалл распиливается по диагональной плоскости, которая перпендикулярна боковым граням кристалла. Обе половины полируются и склеиваются вдоль линии **AB** канадским бальзамом (смолистое прозрачное вещество с $n = 1,55$).

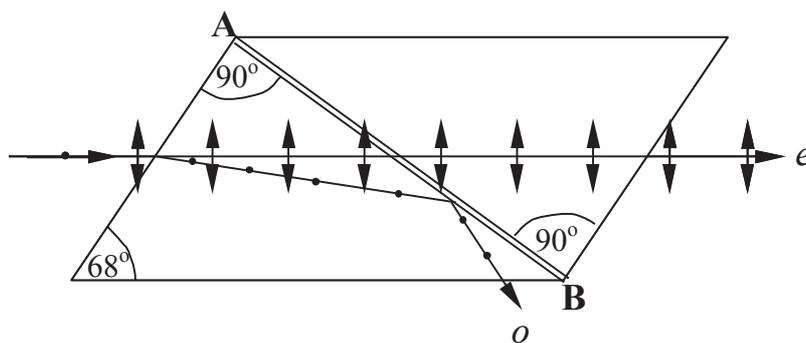


Рис.6.4. Ход лучей в призме Николя

Кристалл исландского шпата, как и некоторые другие прозрачные кристаллы, обладает свойством двойного лучепреломления.

Естественный луч, падая на переднюю грань призмы, расщепляется на два луча – обыкновенный (*o*) и необыкновенный (*e*), которые плоско поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, как показано на рис. 6.4. Угол падения луча на переднюю грань призмы Николя и углы между гранями призмы таковы, что необыкновенный луч проходит через призму практически без преломления, а угол падения обыкновенного луча на слой канадского бальзама больше или равен предельному, и он испытывает полное внутреннее отражение (показатель преломления обыкновенного луча исландским шпатом $n_o = 1,66$).

На выходе обыкновенный луч поглощается зачерненной оправой призмы. Не-
обыкновенный луч ($n_e = 1,51$) проходит сквозь слой канадского бальзама прак-
тически без преломления, лишь незначительно смещаясь.

На рис. 6.5 показан внешний вид поляриметра, а на рис. 6.6 – его оптиче-
ская схема.

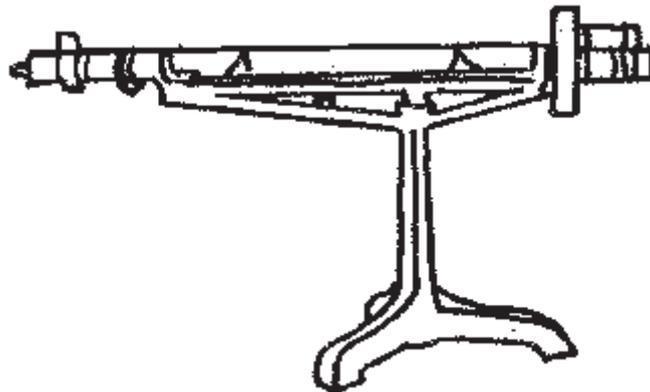


Рис. 6.5. Внешний вид поляриметра

Оптическая схема поляриметра состоит из источника света S , собираю-
щей линзы L , поляризатора P , полутеневой пластинки B , кюветы (трубки) с ис-
следуемым веществом C , компенсатора K , анализатора A и объектива O .

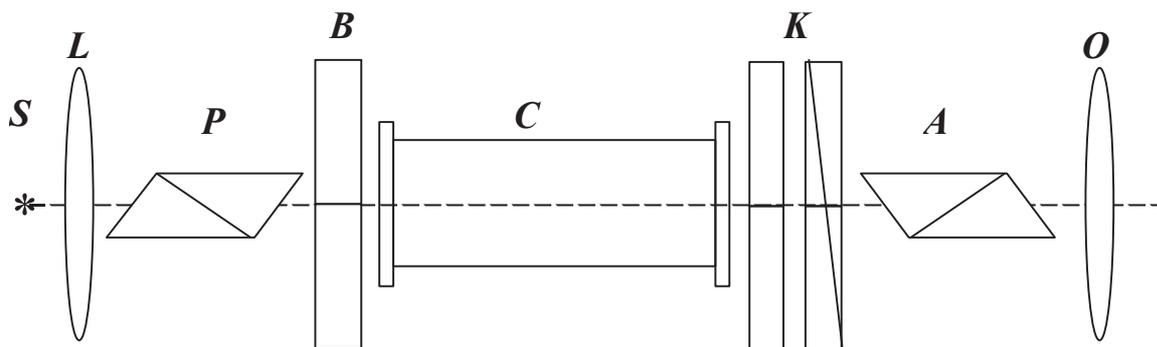


Рис. 6. Оптическая схема поляриметра

Линза L преобразует расходящийся пучок света в параллельный. Поляризатор P падающий свет превращает в плоскополяризованный. Полутеневая пластинка B делит поле зрения прибора на две половины и служит для повышения точности измерений угла поворота плоскости поляризации.

Полутеневая пластинка состоит из двух половин, стеклянной и кварцевой. Кварцевая пластинка вырезана параллельно оптической оси CC и имеет такую толщину, что разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей при распространении света перпендикулярно пластинке равна половине длины волны $\lambda/2$ для желтых лучей. Пусть на кварцевую пластинку падает из николя плоскополяризованный луч, колебания вектора напряженности электрического поля \vec{E} в котором происходят в плоскости PP (рис. 6.7, *a*), составляющей малый угол $\varphi/2$ с CC . Его можно разложить на два компонента, колебания в которых перпендикулярны и параллельны оптической оси CC (вектора \vec{E}_\perp и \vec{E}_\parallel соответственно, рис. 6.7, *б*). Эти два компонента распространяются с разной скоростью и на выходе из пластинки будут иметь разность хода $\lambda/2$. Иначе говоря, колебания в одном из компонентов изменяют фазу на π и колебания происходят в противоположном направлении (вектор \vec{E}'_\perp , рис. 6.7, *в*). При их сложении на выходе из пластинки возникает луч, в котором колебания происходят в плоскости $P'P'$ (вектор \vec{E}' , рис. 7, *г*), составляющей угол $\varphi/2$ с CC .

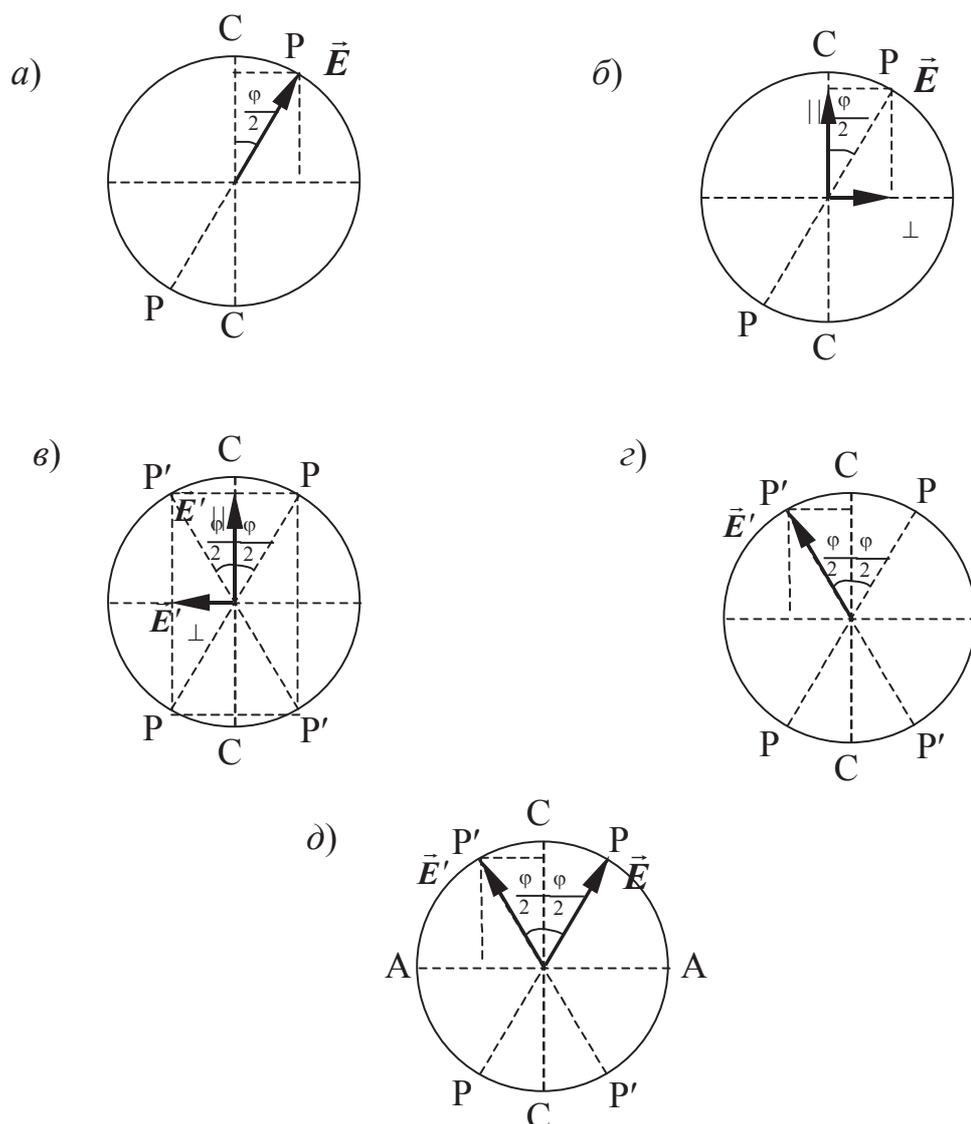


Рис. 6.7. Преобразование плоскополяризованного луча при прохождении через полутеневую пластинку

Таким образом, в луче, прошедшем через стеклянную пластинку, колебания происходят в плоскости PP , а в луче, прошедшем через кварцевую пластинку – в плоскости $P'P'$ (рис. 7, д). Угол между плоскостями поляризации света в двух частях поля зрения равен φ .

Если свет, прошедший через полутеневую пластинку, пропустить через анализатор A , плоскость поляризации которого AA перпендикулярна оптической оси CC , освещенность обеих половин поля зрения будет одинаковой (рис. 6.8). Если между поляризатором и анализатором находится правовращающее вещество, плоскости колебаний векторов \vec{E} и \vec{E}' поворачиваются на угол α (рис. 6.8), проекции векторов \vec{E} и \vec{E}' на плоскость анализатора становятся различными и освещенность двух половин поля зрения будет различной. Угол α является углом вращения плоскости поляризации.

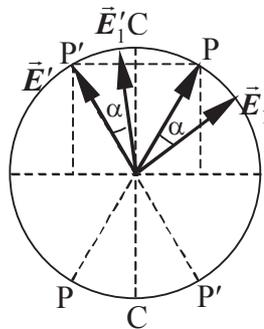


Рис. 6.8. Преобразование освещенностей двух половин поля зрения при прохождении света через правовращающее вещество

Для компенсации вращения перед анализатором помещается компенсатор (рис. 6.9), который состоит из двух пластинок правого и левого кварца, установленных одна за другой. Пластинка правого кварца имеет постоянную толщину, тогда как пластинка левого кварца состоит из двух клиньев, которые могут скользить один по другому, благодаря чему можно изменять толщину левовращающей пластинки.

Если между поляризатором и анализатором нет вращающего раствора сахара, то клинья сдвинуты так, как это показано на рис. 6.9, *a*. При этом толщина право – и левовращающих пластинок одинаковы, и их действие взаимно ком-

пенсироваться. Чтобы скомпенсировать вращение плоскости поляризации, возникающее при прохождении света через правовращающий раствор сахара, клинья должны быть сдвинуты в положение *б*, а в случае левовращающего раствора – *в*.

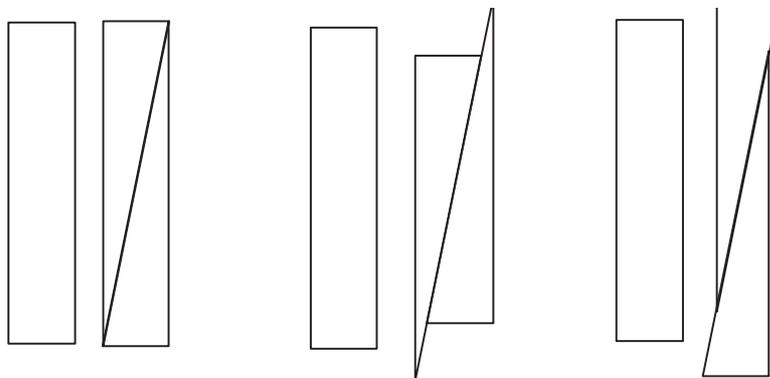


Рис. 6.9. Устройство компенсатора

С левовращающей пластинкой жестко связаны шкала и винт. Вращением винта можно сдвигать клинья компенсатора и изменять толщину пластины. Это вызывает смещение шкалы, которую видит наблюдатель в окуляр поляриметра, вдоль неподвижного нониуса. Шкала имеет угловые деления, что позволяет непосредственно определять угол вращения плоскости поляризации. Нониус и основная шкала имеют нуль посередине. В окуляре *О* видны две половинки поля зрения. При отсутствии вращающего вещества в трубке *С*, если компенсатор находится в положении *а*, ноль нониуса и основной шкалы совпадают (рис. 6.10). При этом обе половинки поля зрения имеют одинаковую освещенность.

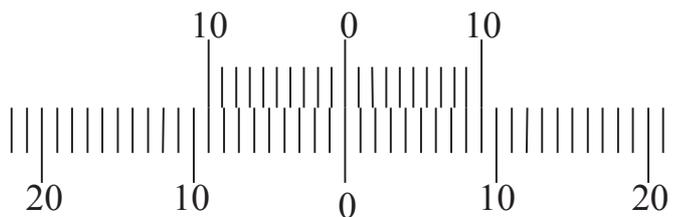


Рис. 6.10. Вид измерительной шкалы

При наличии в трубке вращающего вещества равенство освещенностей двух полей зрения нарушается. Вращением винта можно снова добиться равенства освещенностей. При этом вращение плоскости поляризации за счет вращающего вещества компенсируется компенсатором. Нуль основной шкалы смещается относительно нуля нониуса. Целое число градусов отсчитывается по основной шкале против нуля нониуса. Отсчеты вправо от нуля основной шкалы берутся со знаком плюс, влево – со знаком минус. Десятые доли градуса отсчитываются по нониусу обычным способом (деление, совпадающее с делением основной шкалы). Если нуль нониуса смещен в положительную часть основной шкалы, для нахождения десятых долей градуса используется правая часть нониуса, если он смещен в отрицательную часть основной шкалы, используется левая часть нониуса. Например, на рис. 6.11, *а* отсчет равен минус $29,4^\circ$, а на рис. 6.11, *б* отсчет $+7,8^\circ$.

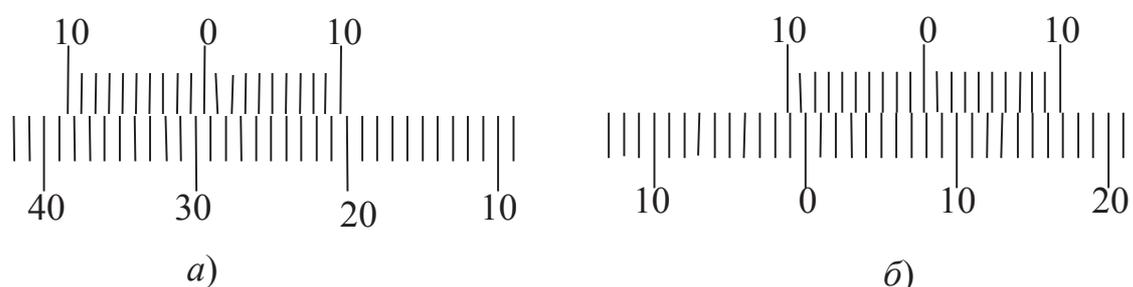


Рис. 6.11. Отсчеты по шкале нониуса

3.3. Порядок проведения измерений. Сначала следует определить нулевую точку прибора. Для этого вынимают из прибора трубку для раствора, включают источник света и фокусируют нижний окуляр так, чтобы четко была видна граница раздела половин поля зрения. Опыт рекомендуется производить в темноте. Винтом компенсатор устанавливается так, чтобы обе половинки поля зрения были одинаково максимально затемнены. По шкале определяется значение нулевой точки прибора. При хорошей настройке нуль основной шкалы и нуль нониуса должны совпадать.

Внутри прибора помещается трубка с раствором сахара известной концентрации C . Трубку следует наполнять так, чтобы в ней не оставалось пузырьков воздуха. Равенство освещенностей двух половин поля зрения нарушается, так как раствор поворачивает плоскость поляризации на некоторый угол α . Снова, вращая винт компенсатора, добиваются равенства освещенностей. Производится отсчет по шкале с учетом нулевой точки. Отсчет производится три раза.

Аналогично производятся измерения углов вращения плоскости поляризации α_{x_1} и α_{x_2} двумя растворами с неизвестными концентрациями C_{x_1} и C_{x_2} .

По измерениям угла вращения плоскости поляризации раствором известной концентрации определяется удельное вращение α_0 для растворов сахара:

$$\alpha_o = \frac{\bar{\alpha}}{C \cdot \ell}, \quad (3.06.6)$$

где $\bar{\alpha}$ – среднее значение из произведенных измерений угла α ,

ℓ – длина трубки.

Пользуясь формулой (3.06.3), вычисляют неизвестные концентрации растворов:

$$C_x = \frac{\alpha_x}{\alpha_0 \cdot \ell}. \quad (3.06.7)$$

Данные опыта и вычислений заносятся в таблицу 6.1. Вычисляются средние абсолютные погрешности $\Delta \bar{C}_{x_1}$ и $\Delta \bar{C}_{x_2}$.

Относительную погрешность для каждого раствора определяют по формуле:

$$E = \frac{\Delta \bar{C}_x}{\bar{C}_x}. \quad (3.06.8)$$

Окончательный результат для каждого раствора записывается в виде:

$$C = \bar{C}_x + \Delta \bar{C}_x \quad (3.06.9)$$

Таблица 6.1

Результаты измерений

Номер опыта	α , град	α_0 , $\frac{\text{град}}{\text{дм} \cdot \%}$	α_{x_1} , град	C_{x_1} , %	ΔC_{x_1} , %	α_{x_2} , град	C_{x_2} , %	ΔC_{x_2} , %
1								
2								
3								
Средние значения								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. В чем отличие поляризованного света от естественного?
2. Какие вещества называются оптически активными? Перечислите разновидности оптически активных веществ.
3. Что называется удельным вращением? От чего зависит эта величина? Запишите формулу для определения удельного вращения.
4. Нарисуйте оптическую схему полутеневого поляриметра. Перечислите основные его части и объясните их назначение.
5. Расскажите о назначении и устройстве призмы Николя.
6. Опишите устройство и принцип действия кварцевого компенсатора.
7. Расскажите о порядке измерения углов плоскости поляризации в данной работе.
8. Опишите порядок определения удельного вращения раствора сахара в данной работе.
9. Приведите примеры применения явления вращения плоскости поляризации.

10. Задача. Пластинка кварца, вырезанная параллельно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света. Определить толщину кварцевой пластинки, если свет полностью гасится при помещении этой пластинки между двумя николями, плоскости которых параллельны. Удельное вращение кварца при данной длине волны света равно 200 град/см.

Ответ: 0,45 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. Т.3. – М.: Физматгиз, 1962. – 608 с.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985. – 432 с.
3. Кортнева А. В. и др. Практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1963. – 516 с.
4. Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1981. – 496 с.
5. Островский Ю. И. Оптика. Часть 1, 2. Руководство к лабораторным работам по физике. – Ленинград, 1971. – 123 с.