

# **ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ. ПОЛЯРИМЕТРИЯ**

## **Описание лабораторной работы № 46**

Разработчик описания: Т.Л. Ткаченко

Санкт-Петербург

2016

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Краткая теория поляризованного света и оптической активности .....	5
1.1. Поляризованный свет .....	5
1.2. Вращение плоскости поляризации в кристаллах и растворах.....	10
1.3. Феноменологическая теория вращения плоскости поляризации .....	12
1.4. Измерение оптической активности с помощью поляриметров .....	15
2. Методика проведения эксперимента.....	19
2.1. Задание №1. Проверка закона Малюса.....	19
2.1.1. Описание экспериментальной установки.....	19
2.1.3. Обработка результатов измерений.....	21
2.2. Задание № 2. Экспериментальное изучение принципа работы полутеневого поляриметра.....	22
2.2.1. Описание экспериментальной установки.....	22
2.2.2. Порядок выполнения работы .....	23
2.3. Задание №3. Определение угла поворота плоскости поляризации для разных сортов кварца.....	25
2.3.1. Описание экспериментальной установки.....	25
2.3.2. Порядок выполнения работы .....	25
2.4. Задание №4. Определение удельного вращения и концентрации раствора сахара.....	28
2.4.1. Описание экспериментальной установки.....	28
2.4.2. Порядок выполнения работы .....	28
2.4.3. Обработка полученных результатов .....	30
3. Техника безопасности .....	31
4. Примерная структура отчета .....	32
5. Контрольные вопросы.....	33
6. Список литературы .....	34

## Введение

Дисперсия и рассеяние света не исчерпывают явлений, возникающих при взаимодействии света и вещества. Среди них чрезвычайно важное место занимает эффект вращения плоскости поляризации света. Способностью поворачивать плоскость поляризации проходящего света (оптической активностью) обладают очень многие тела. К ним относятся двулучепреломляющие кристаллы (например, кварц), отдельные оптические изотропные кристаллы кубической симметрии ( $\text{NaClO}_2$ ,  $\text{NaBrO}_2$ ), некоторые чистые жидкости (скипидар, никотин) и их пары, растворы (широко известный пример – водный раствор сахара). Особенно много активных веществ среди органических соединений. Причины оптической активности скрыты как в особенностях строения молекул, так и в особенностях расположения атомов и молекул (частиц) в кристаллической решетке.

Явление вращения плоскости поляризации указывает на определенную диссимметрию, свойственную оптически активным средам. Она выражается в том, что в таких средах молекулы или кристаллические структуры представляют собой две зеркально эквивалентные пространственные конфигурации, направление вращения плоскости поляризации в которых происходит по или против часовой стрелки.

Многие оптически активные вещества существуют в двух модификациях, характеризующихся равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку удельными вращениями плоскости поляризации. У кристаллов это связано с существованием двух зеркально симметричных (энантиоморфных) кристаллических структур, а у жидкостей – с двумя зеркальными формами молекул, подобными правой и левой руке. Такие, так называемые диссимметричные (или хиральные) молекулы, существуют в виде двух форм – правой и левой. Если жидкость содержит молекулы одного сорта (например, левые), то все они вращают плоскость поляризации в одну и ту же сторону. Для оптически активных сред вращение плоскости поляризации называется правым или положительным, если плоскость поляризации световых волн для наблюдателя, смотрящего навстречу проходящему лучу, поворачивается по часовой стрелке.

В неживой природе активные вещества встречаются только в виде рацематов (т.е. содержат равные количества право- и левовращающих молекул). Совершенно иная картина в живой природе. Важнейшие биологические вещества – аминокислоты, белки, нуклеиновые кислоты,

углеводы – присутствуют в виде чистых диссимметричных форм. Это свойство живого открыто уже давно. Оно, несомненно, имеет огромное общебиологическое значение.

Объяснение явления вращения плоскости поляризации можно получить, рассматривая общую задачу взаимодействия поля световой волны с молекулами или атомами вещества, если только принять во внимание конечные размеры молекул и их структуру. Распространяющаяся в среде световая волна является результатом сложения вторичных волн, излучаемых атомами вещества, и ее поляризация определяется их пространственным строением.

Сказанное можно выразить иным, несколько более формальным, но общим образом. Вторичная волна в среде вызывается электрическим полем падающей волны, что требует учета диэлектрической проницаемости среды, т.е. локальное поле, действующее на атомы, должно учитывать поляризацию среды. В то же самое время значение напряженности локального поля в данный момент времени и в конкретной точке зависит как от поляризации среды в предыдущие времена, так и от величины поляризации среды в окрестности данной точки. Тот факт, что поляризация устанавливается не мгновенно, приводит к частотной зависимости диэлектрической постоянной, а из-за пространственной нелокальности эффекта поляризации возникает зависимость диэлектрической проницаемости от направления распространения света. Это обуславливает целый ряд явлений, получивших название эффектов пространственной дисперсии [1, 2]. Вращение плоскости поляризации представляет собой простейший и наиболее сильный из этих эффектов.

Цель работы:

1. Изучение и проверка экспериментально установленных законов Малюса и Био.
2. Теоретическое и практическое изучение устройства и принципа работы полутеневого поляриметра.
3. Изучение явления вращения плоскости поляризации в оптически активных средах: кристаллическом кварце, растворе сахара.

# 1. Краткая теория поляризованного света и оптической активности

## 1.1. Поляризованный свет

Электромагнитные волны в вакууме, в том числе и световые, являются поперечными [2]. Это означает, что вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , характеризующие электромагнитную волну, перпендикулярны вектору скорости распространения волны (фазовой скорости волны) (рис. 1). Плоскости, в которых колеблются векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , всегда взаимно перпендикулярны. Плоскость, содержащая прямую, вдоль которой колеблется вектор  $\vec{E}$ , и прямую, вдоль которой распространяется световая волна, называется плоскостью колебаний. Плоскость, содержащая прямую, вдоль которой колеблется вектор  $\vec{H}$ , и прямую, вдоль которой распространяется световая волна, называется плоскостью поляризации. В дальнейшем все выводы будут касаться только вектора  $\vec{E}$ , который обычно называют *световым вектором*.

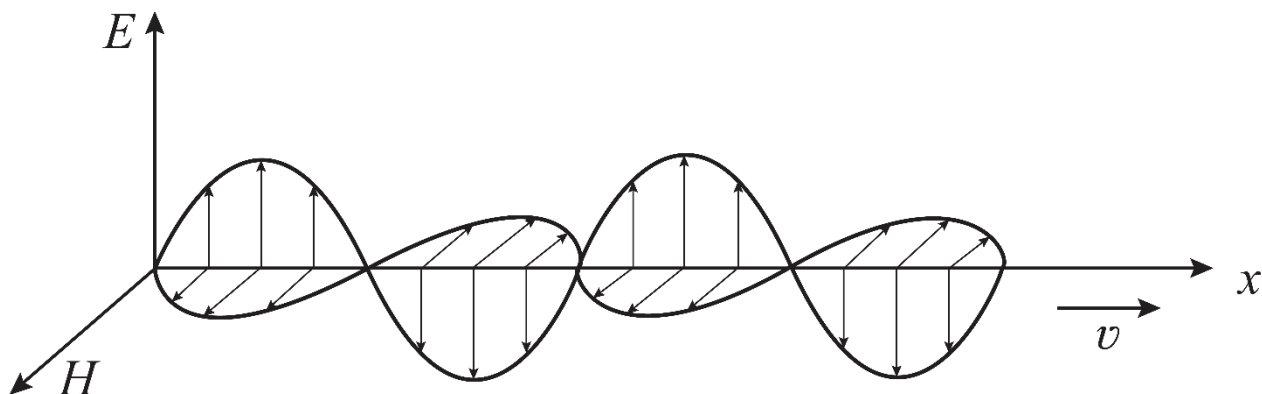


Рис. 1. Схематическое представление световой волны.

В свете, испускаемом обычными источниками (дневной свет, свет от лампы накаливания, ртутной лампы), имеются колебания, совершающиеся в самых различных направлениях, перпендикулярных к лучу. В *естественном* свете колебания напряженности электрического поля быстро и беспорядочно сменяют друг друга в различных направлениях. Свет, в котором направления колебаний упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным. Если колебания светового вектора происходят только в одной, проходящей через луч плоскости, свет называется

*полностью линейно (или плоско) поляризованным* (рис.1). Существуют и более сложные виды упорядоченных колебаний, которым соответствуют иные типы поляризации, например, *круговая или эллиптическая* поляризации, при которых конец электрического (и магнитного) вектора описывает эллипс с тем или иным эксцентриситетом. *Частично поляризованный* свет характеризуется тем, что одно из направлений колебаний оказывается преимущественным, но не исключительным. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного и поляризованного.

Для того, чтобы получить полностью поляризованный свет, применяют специальные оптические устройства, называемые *поляризаторами*. Действие поляризаторов может быть основано на различных оптических явлениях: на отражении света заданной поляризации при определенных условиях (эффект Брюстера), на явлениях двойного лучепреломления, дихроизма или рассеяния.

При падении естественного света на анизотропный кристалл наблюдается явление двойного лучепреломления. Среду называют оптически анизотропной, если ее оптические свойства (в частности, фазовая скорость света и показатель преломления) зависят от направления распространения световой волны и характера ее поляризации. Для толстого кристалла и узкого падающего пучка раздвоение лучей в пространстве хорошо заметно (рис.2). Этот факт связан с разными показателями преломления для различно поляризованных лучей. В кристаллах существуют направления, в которых оптический луч независимо от поляризации имеет один и тот же показатель преломления. Это направление называется оптической осью кристалла. В других направлениях распространяются два луча с разной фазовой скоростью в зависимости от их поляризации. Кристаллы, имеющие лишь одну оптическую ось, называются одноосными. Такими свойствами обладают исландский шпат, кварц и др. Существуют кристаллы, имеющие две оптические оси, двуосные кристаллы. Здесь мы рассматриваем только одноосные кристаллы.

Один из лучей, который распространяется во всех направлениях с одинаковой фазовой скоростью, называется *обыкновенным* и обозначается буквой *o*. Другой, называемый *необыкновенным* (буква *e*), распространяется в кристалле с различными фазовыми скоростями в зависимости от направления распространения. Оба луча поляризованы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Вектор  $\vec{E}$  обыкновенного луча всегда перпендикулярен к главному сечению кристалла (рис.2). Главным сечением называется плоскость, проходящая через световой луч и оптическую ось кристалла. Колебания же необыкновенного луча совершаются в плоскости главного сечения.

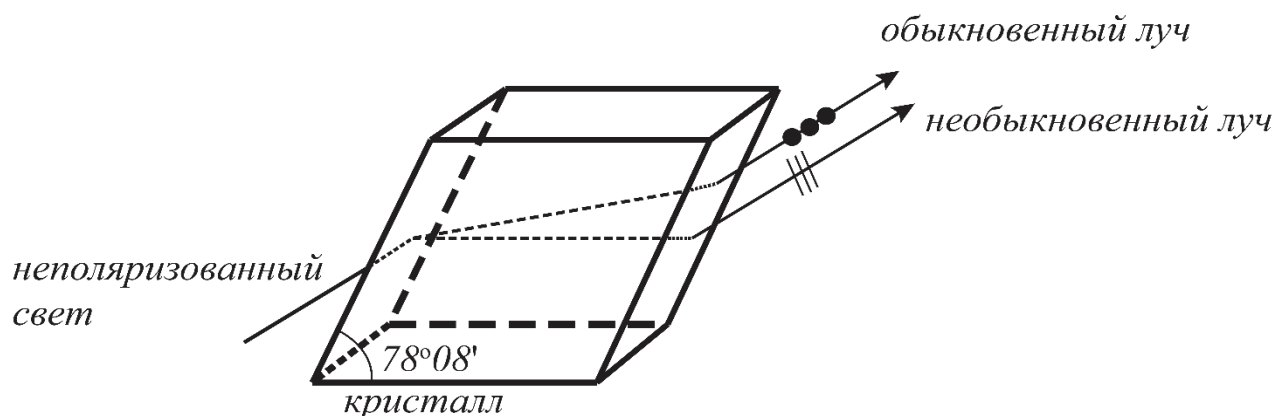


Рис.2. Прохождение света через кристалл исландского шпата (двойное лучепреломление). Штрихами и точками показаны направления колебаний электрического вектора в обыкновенном и необыкновенном лучах.

На описанном явлении основано действие поляризатора, называемого призмой Николя (сокращенно – николь) [3]. Он представляет собой призму из исландского шпата (рис.3), разрезанную по диагонали и склеенную канадским бальзамом.

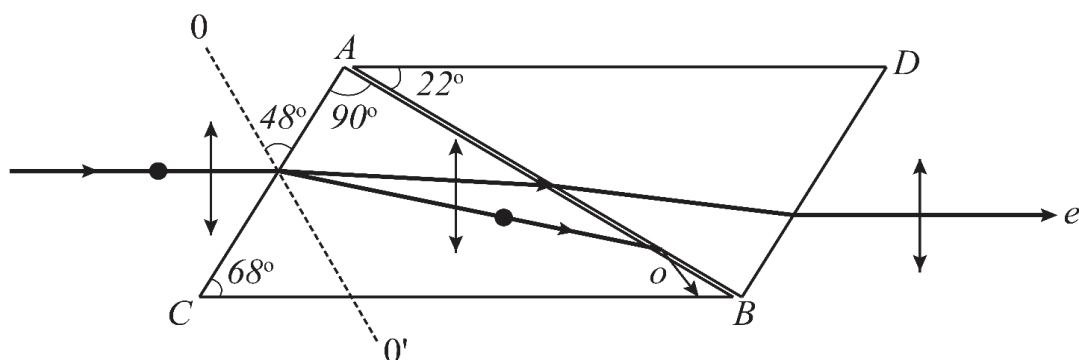


Рис.3. Поляризационная призма Николя.

Показатель преломления канадского бальзама  $n$  лежит между показателем преломления  $n_o$  и  $n_e$  обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле ( $n_o > n > n_e$ ). Угол падения оказывается таким, что обыкновенный луч претерпевает на прослойке бальзама полное внутреннее отражение и отклоняется в сторону. Необыкновенный же луч свободно проходит через эту прослойку и выходит из призмы.

В анизотропном кристалле существует различие в поглощении света разной поляризации. Это влечет за собой различие в поглощении естественного света в зависимости от направления его распространения, т.к. от последнего зависит ориентация электрического вектора относительно кристаллографических направлений. Такое явление носит название дихроизма [3]. Так, например, одноосный кристалл турмалина поглощает обыкновенный луч во много раз сильнее, чем необыкновенный. Поглощение зависит также от частоты света. Поэтому при освещении дихроичного кристалла белым светом кристалл по-разному окрашен в зависимости от направления наблюдения. Поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма, называются *поляроидами*. При использовании отдельного дихроичного монокристалла требуется, чтобы он был большого размера и хорошего качества, т.е. без оптических дефектов. Изготовление такого кристалла – достаточно дорогостоящая процедура. Поэтому часто применяются более дешевые поляроидные пленки, которые получают либо путем нанесения на пленку мелких ориентированных параллельно друг другу кристалликов дихроичного вещества (герапатита), либо сильным растяжением в одном направлении пленки поливинилового спирта.

Поляроиды обладают рядом преимуществ перед другими поляризаторами: с помощью поляроидной пленки можно получить поляризованный световой пучок большого диаметра; малая толщина поляроида позволяет устанавливать его в любом месте оптической системы; поляроиды пропускают свет большого диапазона длин волн.

Если на пути линейно поляризованного света, полученного с помощью какого-либо поляризатора, поставить второй поляризатор



(который называется в данном случае *анализатором*), то этот поляризатор, также как и первый, будет пропускать свет, в котором вектор  $\vec{E}$  колеблется только в какой-то определенной плоскости.

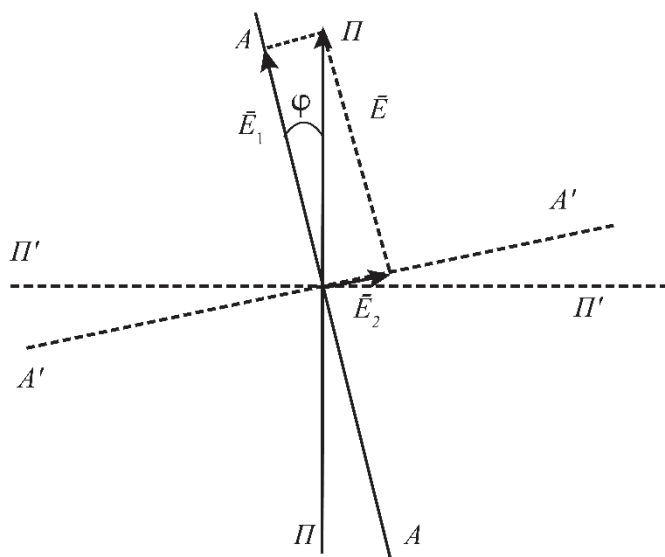


Рис.4. Направление колебаний света, вышедшего из поляризатора (ПП) и анализатора (АА).

Пусть луч, вышедший из поляризатора и направленный перпендикулярно плоскости чертежа, падает на анализатор (рис. 4). ПП – направление колебаний вектора  $\vec{E}$ , вышедшего из поляризатора; АА – направление колебаний, пропускаемых анализатором;  $AA \perp A'A'$ ,  $\Pi\Pi' \perp \Pi\Pi$ . Разложим вектор  $\vec{E}$  света, прошедшего через поляризатор, на две составляющие  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ . Из рисунка видно, что анализатор будет пропускать только составляющую  $\vec{E}_1$ , которая по величине равна  $\vec{E}_1 = \vec{E} \cdot \cos \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между плоскостями колебаний вектора  $\vec{E}$ , пропускаемых поляризатором и анализатором.

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора, то интенсивность света  $I$ , прошедшего анализатор, будет равна:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi,$$

где  $I_0$  – интенсивность света, вышедшего из поляризатора и падающего на анализатор. Данное выражение носит название **закона Малюса**.

## 1.2. Вращение плоскости поляризации в кристаллах и растворах

Если в пространство между двумя скрещенными поляризаторами поместить какое-либо оптически активное вещество (см. Введение), то в монохроматическом свете вместо отсутствия освещенности поля зрения будет наблюдаться некоторая интенсивность прошедшего света, которую можно свести к нулю, поворачивая анализатор вправо или влево вокруг выходящего луча.

Явление вращения плоскости поляризации было открыто Домиником Франсуа Жаном Араго (1811г.) при изучении эффекта двойного лучепреломления в кварце, в котором оно выражено весьма заметно[3]. Параллельный пучок естественного света от источника  $S$ , пройдя через светофильтр  $F$ , направлялся на оптическую систему (рис. 5). Между скрещенными николями  $N_1$  и  $N_2$  расположена пластинка из кристаллического кварца, оптическая ось которой совпадает с направлением луча. Так как вдоль оптической оси не происходит двойного лучепреломления, то при скрещенном положении николей свет не должен проходить через систему (согласно закону Малюса). Однако, как показал опыт, наблюдается прохождение света через пластинку. Поворачивая поляризатор  $N_2$  на некоторый угол, можно вновь добиться полного затемнения поля.

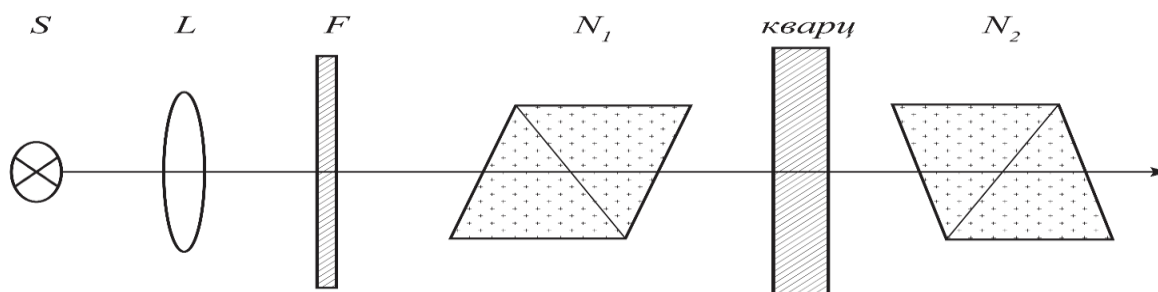


Рис.5. Схема наблюдения вращения плоскости поляризации в кристалле.

Это показывает, что в описанном опыте поляризованный свет, прошедший через кварц, не приобрел эллиптической поляризации, а остался линейно-поляризованным; при прохождении через кварц плоскость

поляризации лишь повернулась на некоторый угол, измеряемый поворотом анализатора  $N_2$ , необходимым для затемнения поля в присутствии кварца. Меняя светофильтр, легко обнаружить, что угол поворота плоскости поляризации для разных длин волн различен, т.е. имеет место вращательная дисперсия.

Вращательная способность твердых тел характеризуется величиной угла  $\alpha$ , на который поворачивает плоскость поляризации пластинка толщиной 1 мм [3]. Для данной длины волны ***угол поворота плоскости поляризации пропорционален толщине пластинки***. Таким образом:

$$\varphi = \alpha \cdot d, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол поворота (в град),  $d$  – толщина пластинки (в мм),  $\alpha$  – коэффициент (в град/мм), зависящий от длины волны, природы вещества и температуры.

Для кварца в направлении оптической оси  $\alpha \approx 15$  град/мм в красной области спектра и 51 град/мм в фиолетовой. Конечно, явление вращения плоскости поляризации имеет место и тогда, когда свет направлен не вдоль оси кристалла, а под углом к ней. Но изучение его в этих условиях значительно труднее, т.к. явление частично маскируется обычным двойным лучепреломлением.

Наблюдения вращения плоскости поляризации в кварце позволили установить, что существуют два сорта кварца *правовращающий*, или положительный, дающий поворот плоскости поляризации вправо (по часовой стрелке), и *левовращающий*, или отрицательный (поворот против часовой стрелки). Направление вращения принято устанавливать для наблюдателя, смотрящего навстречу световому пучку. Величина коэффициента  $\alpha$  в обоих случаях одинакова ( $\alpha_+ = \alpha_-$ ).

Явление вращения плоскости поляризации весьма распространено и обнаруживается также многими некристаллическими телами. В настоящее время известны тысячи активных веществ, обладающих различной вращательной способностью, от едва заметной до очень большой.

Для растворов **Жан-Батист Био** (1831г.) установил на опыте следующие количественные законы: угол поворота плоскости поляризации  $\varphi$  прямо пропорционален толщине  $d$  слоя раствора и прямо пропорционален концентрации  $C$  вещества:

$$\varphi = [\alpha] \cdot d \cdot C. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности  $[\alpha]$  (для растворов всегда обозначается в квадратных скобках) характеризует природу вещества и носит название *постоянной вращения* или *удельного вращения*. Величина  $[\alpha]$  зависит от длины волны и температуры, она может также меняться при изменении растворителя и, притом, довольно сложным образом.

Влияние длины волны на вращательную способность может быть охарактеризовано лишь в общих чертах и для каждого случая должно быть изучено отдельно. Био установил, что вращательная способность обратно пропорциональна примерно квадрату длины волны:

$$[\alpha] \sim \frac{1}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Это формула передает зависимость не точно и может служить лишь в качестве грубого приближения. Вообще говоря,  $[\alpha]$  с увеличением  $\lambda$  убывает, но существуют вещества, для которых вращательная дисперсия аномальна.

### **1.3. Феноменологическая теория вращения плоскости поляризации**

Объяснение вращения плоскости поляризации света впервые дал Огюстен Жан Френель (1817г.) [3]. Он предположил, что, используя принцип суперпозиции, в оптически активных веществах линейно-поляризованное световое колебание можно разложить на два колебания, поляризованных по правому и левому кругу. При этом лучи, поляризованные по правому и левому кругу, имеют различные фазовые скорости распространения. Так, для правых веществ большее значение имеет скорость правокруговой волны, а для левых веществ – наоборот. Различие показателей преломления для волн, поляризованных по правому и

левому кругу, связано с особенностями строения молекул оптически активных веществ. Здесь мы не будем проследивать эту связь и ограничимся только констатацией того факта, что показатели преломления различны для волн, поляризованных по правому и левому кругу. Подобное рассмотрение обычно называют в физике феноменологической теорией.

Запишем допущения Френеля в следующем виде: для правых веществ  $v_{np} > v_l$  ( $n_{np} < n_l$ ); для левых веществ  $v_{np} < v_l$  ( $n_{np} > n_l$ ), где  $v_{np}$ ,  $v_l$  – фазовые скорости циркулярно-поляризованного света,  $n_{np}$ ,  $n_l$  – соответствующие коэффициенты преломления. Эта гипотеза позднее была подтверждена Френелем экспериментально[3].

Линейно-поляризованную волну  $\vec{E}$  разложим на две волны, поляризованные по правому  $\vec{E}_{np}$  и по левому  $\vec{E}_l$  кругам. Если  $n_{np} = n_l$ , то число оборотов электрических векторов  $\vec{E}_{np}$  и  $\vec{E}_l$  в слое вещества толщиной  $d$  будет одинаковым и результирующее (исходное) колебание будет происходить вдоль первоначального направления  $\vec{E}$ , т.е. вещество не будет обладать свойством оптической активности (рис. 6).

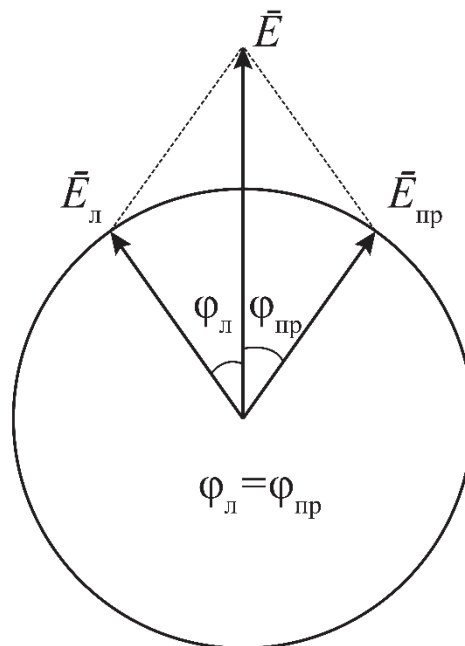


Рис. 6. Разложение линейно-поляризованной волны на циркулярно-поляризованные волны, распространяющиеся с одинаковыми фазовыми скоростями в оптически неактивном веществе.

Если же  $n_{np} \neq n_l$ , то число оборотов векторов  $\vec{E}_{np}$  и  $\vec{E}_l$  различно, и они повернутся на различные углы  $\phi_{np}$  и  $\phi_l$ . А это приведет к повороту результирующего вектора  $\vec{E}$  на некоторый угол  $\phi$ . Предположим, что это

так, и определим угол  $\varphi$  (рис.7). После прохождения циркулярно-поляризованными волнами оптически активной среды толщиной  $d$  электрический вектор правой волны  $\vec{E}_{np}$  будет повернут вправо на больший угол, чем вектор левой волны  $\vec{E}_л$ , так как правая волна распространяется с большей фазовой скоростью. В итоге плоскость симметрии, разделяющая пополам сумму углов  $\varphi_{np}$  и  $\varphi_л$ , будет повернута вправо на угол  $\varphi$ , определяемый из условия:

$$\varphi_{np} - \varphi = \varphi_л + \varphi. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\varphi = \frac{\varphi_{np} - \varphi_л}{2}. \quad (5)$$

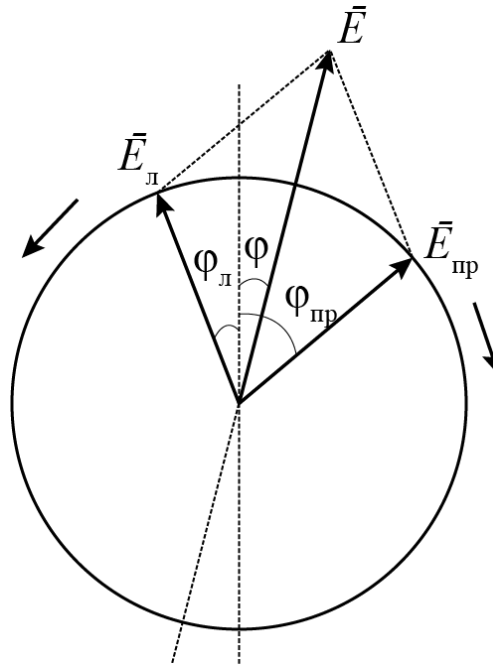


Рис.7. Разложение линейно-поляризованной волны на циркулярно-поляризованные волны, распространяющиеся с различными фазовыми скоростями ( $v_{np} > v_л$ ) в оптически активном веществе.

Выразим  $\varphi_{np}$  и  $\varphi_л$  через время  $t$  и длину пути волны в оптически активном веществе толщины  $d$ :

$$\varphi_{np} = \omega \cdot \left( t - \frac{d}{v_{np}} \right) \quad \text{и} \quad \varphi_л = \omega \cdot \left( t - \frac{d}{v_л} \right). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим окончательно выражение для  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{\omega t}{2} \cdot \left( \frac{1}{v_{np}} - \frac{1}{v_л} \right). \quad (7)$$

Если фазовые скорости распространения левой  $v_l$  и правой  $v_{np}$  волн выразить через соответствующие показатели преломления  $n_l$  и  $n_{np}$  ( $v_l = \frac{c}{n_l}$  и  $v_{np} = \frac{c}{n_{np}}$ ) и принять во внимание, что  $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{cT} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ , где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме, то получим

$$\varphi = \frac{\pi \cdot d}{\lambda_0} \cdot (n_l - n_{np}). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что при  $n_l > n_{np}$ , угол  $\varphi$  является положительным, т.е. вращение плоскости поляризации происходит вправо, а при  $n_l < n_{np}$  угол  $\varphi$  становится отрицательным, т.е. вращение происходит влево.

Молекулярная оптика объясняет различие  $n_{np}$  и  $n_l$  диссимметричным строением молекул (для активных жидкостей) или диссимметричным строением кристаллов (в случае активных кристаллических тел). Такие молекулы (кристаллы) не имеют ни центра, ни плоскости симметрии. Все оптически активные вещества существуют в виде двух модификаций, обладающих, соответственно, правым и левым вращением. Эти две модификации являются зеркальными изображениями друг друга.

#### **1.4. Измерение оптической активности с помощью поляриметров**

Явление вращения плоскости поляризации используется для измерения очень малых различий показателей преломления, для получения информации о структуре молекул, точного определения концентрации оптически активных веществ в растворителях и других целей.

Лишь самые тонкие интерференционные методы позволяют обнаружить различие в показателе преломления порядка  $10^{-6}$ . Между тем различие между  $n_l$  и  $n_{np}$  в одну миллионную приводит к очень легко наблюдаемому вращению. Действительно, при толщине слоя  $d = 25$  см и  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  см на основании формулы (8)  $\varphi = 90^\circ$ .

Оптическую активность измеряют для узкого участка спектра или одной спектральной линии натрия ( $\lambda = 589,3\text{ нм}$ ) или зеленой линии ртути ( $\lambda = 561,1\text{ нм}$ ). Приборы, предназначенные для этих измерений, разделяют на поляриметры и сахариметры в зависимости от метода компенсации угла поворота плоскости поляризации и конструкции шкалы угломерного устройства. Более широкую информацию об исследуемом веществе получают при измерениях вращательной дисперсии значений углов поворота плоскости поляризации для ряда длин волн в представляющей интерес области спектра. Применяемые для этой цели приборы называются спектрополяриметрами. Схема простейшего поляриметра изображена на рис.8.

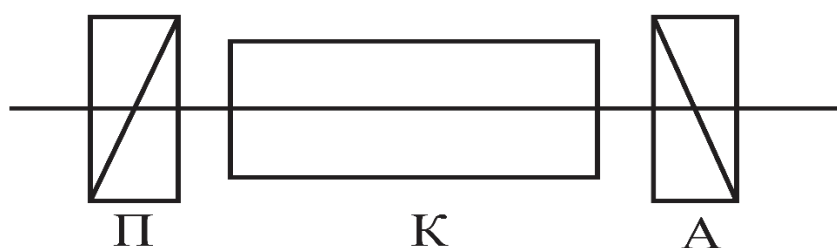


Рис.8. Схема простейшего поляриметра.

Между скрещенными поляризатором П и анализатором А помещена кювета К с оптически активным веществом. При прохождении света через кювету плоскость его поляризации повернется на угол  $\varphi$ , в результате чего поле зрения просветлеет. Для компенсации угла поворота плоскости поляризации (т.е. для восстановления прежнего затемнения) анализатор нужно повернуть на такой же угол  $\varphi$ . Если в кювете был раствор какого-либо оптически активного вещества, то, зная удельное вращение  $[\alpha]$  данного вещества, длину кюветы  $d$  и измерив угол  $\varphi$ , можно определить концентрацию  $C$  раствора по формуле (2).

Однако измерение углов поворота таким методом является недостаточно точным, так как человеческий глаз малочувствителен к небольшим изменениям абсолютной величины яркости равномерно освещенного (или затемненного) поля зрения. Но глаз чувствителен к малейшему различию в яркостях смежных частей поля зрения, окрашенных в один и тот же цвет. Это свойство используется в *полутеневом поляриметре* (рис. 9).



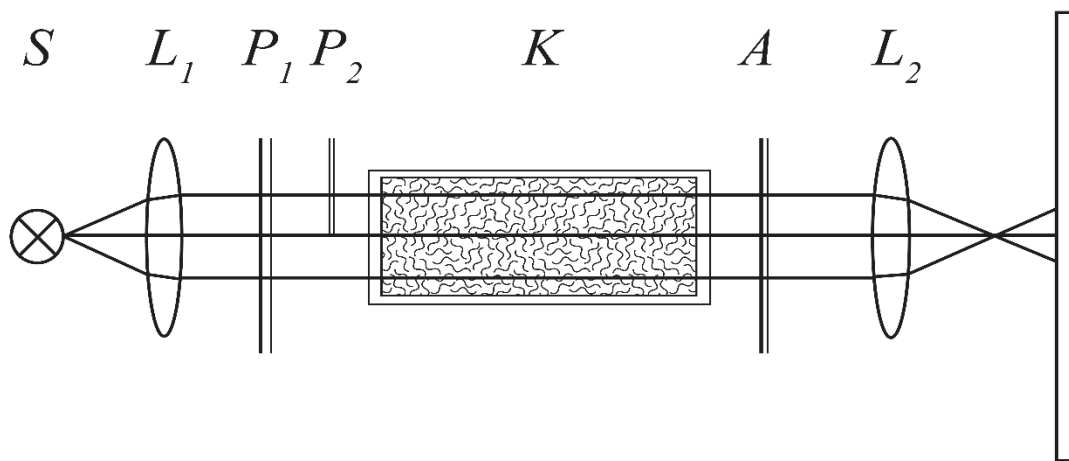


Рис.9. Оптическая схема полутеневого поляриметра.

Линза  $L_1$  создает параллельный пучок света от источника  $S$ . Далее свет проходит через поляризатор  $P_1$ , полутеневого поляризатор  $P_2$ , кювету  $K$  с веществом, анализатор  $A$  и с помощью линзы  $L_2$  проектируется на экран. Здесь дополнительный поляризатор  $P_2$ , перекрывающий половину поля зрения, размещается между поляризатором  $P_1$  и кюветой  $K$  с оптически активным веществом. Плоскости пропускания поляризаторов  $P_1$  и  $P_2$  составляют между собой малый угол  $2\alpha$ . После прохождения через поляризатор  $P_1$  световой поток будет линейно-поляризованным. После полутеневого поляризатора  $P_2$ , который поворачивает плоскость поляризации на угол  $2\alpha$ , световой поток становится неоднородным в том смысле, что его правая и левая части будут поляризованы в разных плоскостях  $P_1$  и  $P_2$  (рис.10). В результате поле зрения оказывается разделенным на две части, освещенность которых зависит от ориентации плоскости пропускания анализатора  $AA$ .

Рассмотрим вначале случай, когда в кювете нет оптически активного вещества. Тогда, если плоскость пропускания анализатора  $AA$  перпендикулярна плоскости пропускания  $P_1$ , т.е. поляризатор  $P_1$  и анализатор  $A$  скрещены, то последний пропустит лишь ту часть светового потока, которая прошла через поляризатор  $P_2$  (рис. 10в).

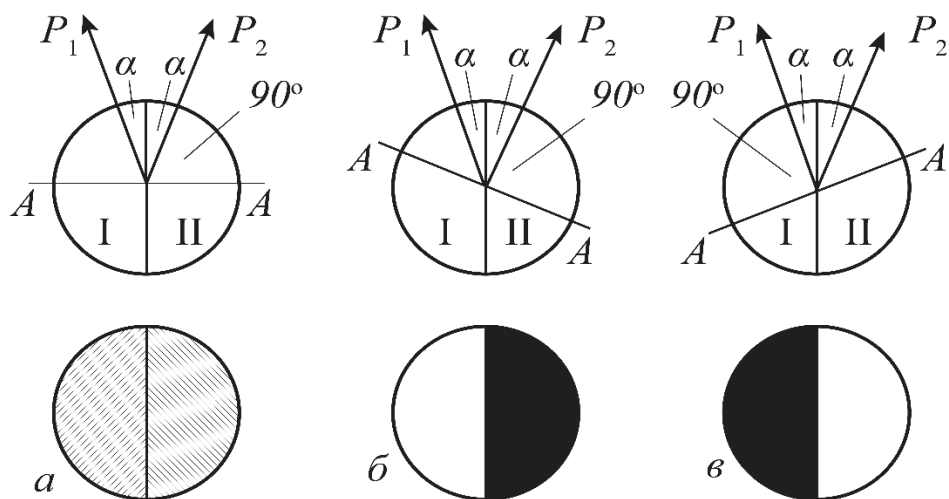


Рис.10. К настройке поляриметра на полутеневое равенство освещенностей.

Если же плоскость  $AA$  перпендикулярна плоскости  $P_2$ , то темная и светлая части поля зрения меняются местами (рис. 10б). Ясно, что имеется два таких положения, когда освещенность всех частей поля зрения одинакова. В одном из таких положений плоскость  $AA$  параллельна биссектрисе угла между  $P_1$  и  $P_2$ , а в другом – перпендикулярна (рис. 10а). Последнее из названных положений анализатора, называемое **установкой на полутень**, фиксируется более точно, так как в этом случае освещенность поля зрения меньше, а человеческий глаз более чувствителен к изменениям малых интенсивностей.

Если в установленный на полутень поляриметр поместить кювету с оптически активным веществом, то плоскости поляризации световых потоков повернутся на угол  $\varphi$ , и освещенности соседних частей поля зрения станут различными. Восстановление равенства освещенностей достигается поворотом анализатора на тот же угол  $\varphi$ .

В некоторых поляриметрах поляризатор  $P_2$  расположен таким образом, что он перекрывает среднюю часть поля зрения. Боковые же части поля зрения освещаются светом, прошедшим только через поляризатор  $P_1$ . Тогда в поле зрения наблюдается не двойное, а тройное поле. При этом суть метода остается прежней.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1. Задание №1. Проверка закона Малюса

#### Задачи:

- провести измерение зависимости интенсивности прошедшего анализатор света  $I$  от угла поворота анализатора  $\varphi$ ;
- построить график зависимости  $f_{\text{экс}}(\varphi) = I/I_0$  и сравнить с теоретической кривой  $f_{\text{теор}}(\varphi) = \cos^2 \varphi$ .

#### 2.1.1. Описание экспериментальной установки

Проверка закона Малюса проводится на установке, оптическая схема которой представлена на (рис. 11). Она состоит из источника естественного света  $S$ , линзы  $L_1$ , создающей параллельный пучок света от источника, поляризатора  $P$ , анализатора  $A$ , собирающей линзы  $L_2$ , фотоэлемента  $\Phi Э$ , соединенного с мультиметром  $M$ . Поляризаторы могут вращаться вокруг оси. Угол поворота плоскости поляризации анализатора относительно плоскости поляризации поляризатора отсчитывается по шкале, нанесенной на оправу анализатора  $A$ . Поворачивая анализатор, изменяем интенсивность света  $I$ , падающего на фотоэлемент. В зависимости от интенсивности света  $I$  сила фототока через мультиметр будет меняться.

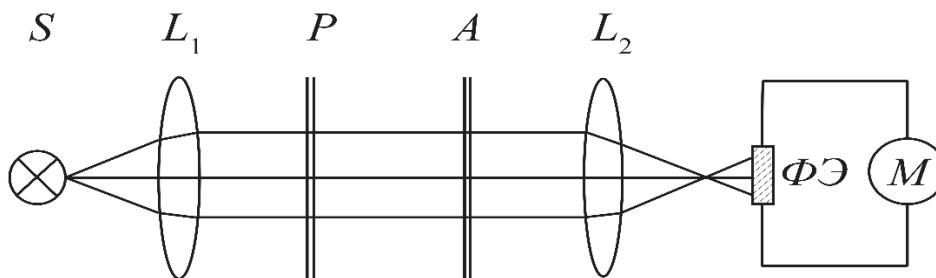


Рис. 11. Оптическая схема установки.

Вид экспериментальной установки представлен на рис.12. Свет от галогеновой лампы ( $S$ ) (12В/90Вт) проходит через конденсор ( $L_1$ ), создающий параллельный пучок света, и далее попадает на поляризатор ( $P$ ) (рис.13а). Поляризованный световой поток проходит через анализатор ( $A$ ) (рис.13б), далее собирается линзой ( $L_2$ ) и попадает на кремниевый

фотоэлемент (ФЭ)(STE 2/19), соединенный с цифро-аналоговым мультиметром (М) (МЕТРАНІТPRO)(рис.14).

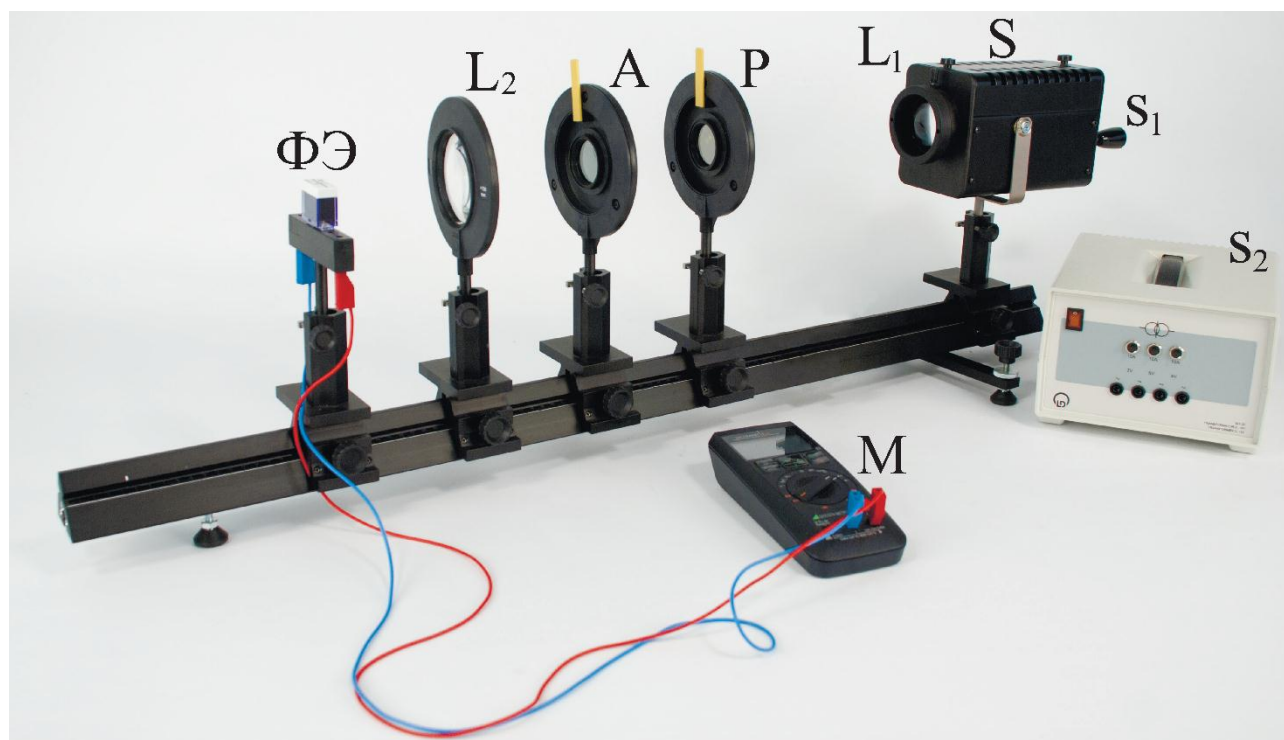


Рис. 12. Экспериментальная установка



Рис.13. Внешний вид поляризаторов в скрещенном положении.

### 2.1.2. Порядок выполнения работы

1. Включите с помощью источника питания( $S_2$ )(см. рис. 12) галогеновую лампу ( $S$ ).
2. Вращая ручку ( $S_1$ ), установите лампу так, чтобы пучок света, выходящий из нее, распространялся вдоль оптического рельса.
3. Двигая ручку ( $S_1$ ) назад-вперед, установите лампу (вместе с укрепленным за ней сферическим зеркалом) так, чтобы пучок света, созданный укрепленным в корпусе конденсором (это линза $L_1$ ), стал приблизительно параллельным.
4. Выставьте по высоте положение поляризатора( $P$ ), анализатора ( $A$ ) и собирающей линзы ( $L_2$ ) так, чтобы пучок света от конденсора проходил через их оптические центры.
5. Двигая линзу ( $L_2$ ), добейтесь максимальной освещенности фотоэлемента.
6. Установите поляризатор ( $P$ ) в положение “0”.
7. Вращая анализатор ( $A$ ), добейтесь максимального значения силы фототока. При этом плоскости поляризатора и анализатора будут параллельны. Измерьте отсчет анализатора  $\varphi_0$  и значение интенсивности прошедшего света (фототок)  $I_0$ , занесите их в таблицу.
8. Вращая анализатор, исследуйте зависимость  $I$  от  $\varphi$ . Измерения проводите, меняя  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  и от  $0^\circ$  до  $-90^\circ$  через каждые  $10^\circ$ .
9. Проведите несколько серий таких измерений  $I_i(i = 1, 2, \dots)$  (см. пункты 7 и 8) и занесите результаты измерений в таблицу.

### 2.1.3. Обработка результатов измерений

1. Вычислите среднее значение  $\bar{I}$  для каждого угла  $\varphi$ .
2. Результаты измерений и значения погрешностей занесите в таблицу.

Постройте график зависимости  $f_{\text{экс}}(\varphi) = \bar{I} / \bar{I}_0$ . На этом же графике

постройте теоретическую кривую  $f_{\text{теор}}(\varphi) = \cos^2 \varphi$ .

3. Сравните две полученные кривые и убедитесь, насколько хорошо в условиях опыта выполняется закон Малюса.

## 2.2.Задание№2.Экспериментальное изучение принципа работы полутеневого поляриметра

### Задачи:

- получить навыки экспериментальной работы с полутеневым поляриметром;
- определить нулевой отсчет анализатора  $\varphi_0$ .

### 2.2.1. Описание экспериментальной установки

Оптическая схема установки представлена на рис.9. Экспериментальная схема полутеневого поляриметра показана на рис.14. Свет от галогеновой лампы (а) (12В/90Вт) проходит через конденсор, создающий параллельный пучок света. Далее свет проходит через светофильтр (b) и поляризатор (с).

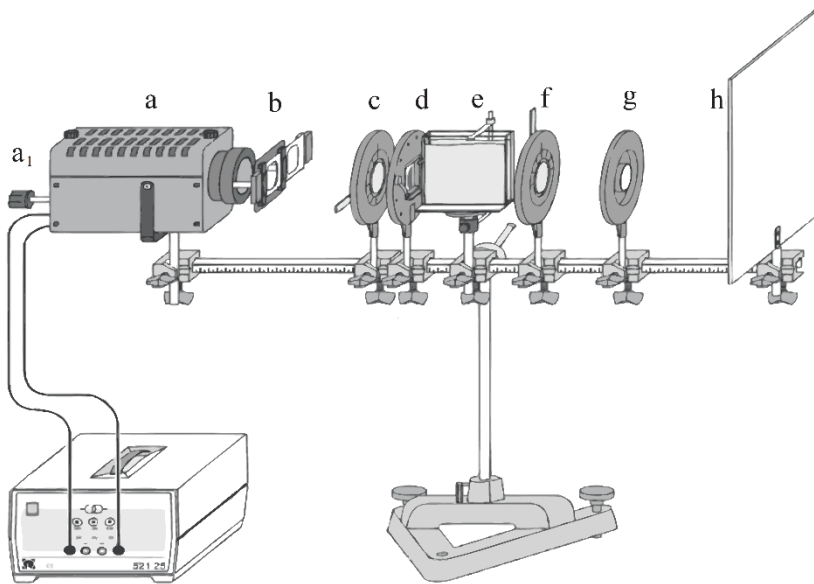


Рис.14. Схема полутеневого поляриметра.

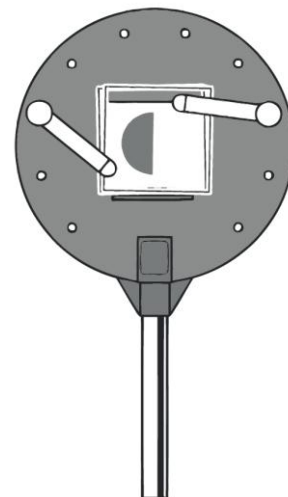


Рис. 15.Полутеневый поляризатор.

После этого поляризованный световой поток попадает на полутеневый поляризатор (d) (рис. 15), оптически активное вещество (е) (кварц или кювету с раствором сахара), анализатор (f), далее собирается линзой (g) и попадает на экран для наблюдений (h). Взаимное расположение линзы и экрана подбирается таким образом, чтобы на экране проецировалось изображение полутеневого поляризатора (d ).

В поляриметре применяется принцип уравнивания яркостей разделенного пополам поля зрения вблизи полного затемнения (см. пп.1.4). Вид поля зрения поляриметра представлен на рис. 10. Уравнивание яркостей производят путем вращения анализатора. Угол поворота анализатора отсчитывается по шкале. Если между анализатором и поляризатором поместить кювету с оптически активным веществом (в данной работе раствор сахара) или кристаллический кварц, то равенство яркостей полей сравнения нарушается. Оно может быть восстановлено поворотом анализатора на угол, равный углу поворота плоскости поляризации раствором сахара или кварцем. Следовательно, разностью двух отсчетов анализатора, соответствующих полутеневому равенству яркостей полей сравнения с оптически активными веществами и без них, определяется **угол поворота плоскости поляризации** данными веществами. (Напомним, что направление вращения плоскости поляризации может быть **по** и **против** часовой стрелки).

### 2.2.2. Порядок выполнения работы

После ознакомления с принципом работы полутеневого поляриметра подготовьте его к работе в следующем порядке:

1. Включите с помощью трансформатора галогеновую лампу S.
2. Вращая ручку ( $a_1$ ) (см. рис.13), установите лампу так, чтобы пучок света, выходящий из нее, распространялся вдоль оптической скамьи.
3. Двигая ручку ( $a_1$ ) вперед-назад, установите лампу (вместе с укрепленным за ней сферическим зеркалом) так, чтобы пучок света, созданный укрепленным в корпусе конденсором (это линза  $L_1$ ), стал приблизительно параллельным.
4. **Снимите** со столика оптически активное вещество.
5. Выставьте по высоте положение поляризатора (с), полутеневого поляризатора (d), анализатора (f) и собирающей линзы (g) так, чтобы пучок света от конденсора проходил через их оптические центры.
6. Перемещая вдоль оптической оси линзу (g) и, возможно, экран (h), получите на экране четкое изображение полутеневого поляризатора.

7. Для проведения наиболее точных измерений сначала выставьте плоскость пропускания поляризатора  $P_1$  (с – рис.14) и плоскость пропускания поляризатора  $P_2$  (d- рис.14) параллельно друг другу. Для этого: анализатор А (f – рис.14) временно снимите с оптического рельса, поверните поляризатор  $P_1$  на  $90^\circ$  по шкале (рис.13 б), затем полутеневого поляризатор  $P_2$  поверните рукой так, чтобы он полностью погасил свет, проходящий через него (т. е. поляризаторы скрещены). Далее выставьте поляризатор  $P_1$  на нуль по шкале (рис.13 а), на экране должно появиться освещенное пятно. Следовательно, плоскости пропускания поляризаторов  $P_1$  и  $P_2$  параллельны друг другу. После этого поставьте анализатор А на прежнее место на оптической скамье. Выставьте на анализаторе нуль по шкале и скорректируйте положение объектива, добившись резкого изображения полутеневого поляризатора на экране. Далее анализатор А поверните на  $90^\circ$  (см. рис.13б и рис.16а) (т. е. поляризаторы и анализатор скрещены), на экране вновь будет темное пятно.
8. Затем поверните (**например, против часовой стрелки**) поляризатор  $P_1$  на угол  $2\alpha$ , примерно равный  $15^\circ$ . (Экспериментально установлено, что при  $2\alpha < 15^\circ$  мы выигрываем в точности установки равенства яркостей полей сравнения, но теряем в освещенности полей зрения; при  $2\alpha > 15^\circ$ , наоборот, теряем в точности установки, но выигрываем в освещенности). При этом анализатор пропустит часть светового потока, прошедшего через поляризатор  $P_1$ , и на экране одна половина поля зрения просветлеет.
9. Определите нулевой отсчет анализатора. Для этого, вращая анализатор (**следуя п.8, также против часовой стрелки**), уравняйте яркость полей сравнения (наблюдайте равенство яркостей вблизи положения полного затемнения). Положение плоскости пропускания АА анализатора ( $AA \perp$  биссектрисе угла  $2\alpha$ ) соответствует отсчету



$\varphi_0$  по шкале анализатора (см. рис.16 б). Произведите отсчет  $\varphi_0$  и занесите его в таблицу.

Заметим, что непосредственно сам угол, на который повернули (против часовой стрелки) плоскость пропускания анализатора, равен

$$\varphi'_0 = 90^\circ - \varphi_0 \text{ и } \varphi'_0 = \alpha.$$

Сместите положение анализатора на несколько делений и снова уравнивайте яркость полей сравнения. Повторите операцию установки на нуль несколько раз. Произведите отсчеты  $\varphi_{0i}$  (где  $i=1,2,\dots$ ) и занесите их в таблицу.

Среднее арифметическое  $\overline{\varphi_0}$  из нескольких отсчетов  $\varphi_{0i}$  принимается за начало отсчета.

## **2.3. Задание №3. Определение угла поворота плоскости поляризации для разных сортов кварца**

### **Задачи:**

- получить навыки экспериментальной работы с полутеневым поляриметром;
- определить нулевой отсчет анализатора  $\varphi_0$ ;
- измерить углы поворота плоскости поляризации левовращающего и правовращающего кварца в зависимости от спектрального диапазона (от цвета светофильтра) и от толщины пластин;
- экспериментально проверить справедливость формулы  $\varphi = \alpha d$ .

### **2.3.1. Описание экспериментальной установки**

Схема экспериментальной установки показана на рис.14. Ее описание представлено в разделе 2.2.1.

### **2.3.2. Порядок выполнения работы**

1. Сначала выполните полностью задание №2.
2. Между полутеневым поляризатором и анализатором на рабочем столике установите **левовращающий** кварц толщиной  $d = 1,5\text{мм}$ .

3. Установите кварц так, чтобы он располагался в середине светового пятна.
4. За галогеновой лампой в держателе для слайдов установите **зеленый** светофильтр.
5. Уравняйте яркость полей сравнения (равенство яркостей наблюдайте вблизи положения полного затемнения), поворачивая анализатор **ПРОТИВ** часовой стрелки.
6. Положение плоскости пропускания АА анализатора соответствует отсчету  $\varphi_1^3$  по шкале анализатора (рис.16 в). Произведите отсчет  $\varphi_1^3$  и занесите его в таблицу.
7. Сместите положение анализатора на несколько делений и снова уравняйте яркости полей сравнения. Повторите операцию несколько раз. Произведите отсчеты  $\varphi_{1i}^3$  ( $i=1,2,\dots$ ) и занесите их в таблицу.
8. Поменяйте цвет светофильтра (на желтый, потом на красный) и проведите аналогичные измерения (см. пункты №4-7).
9. Произведите отсчеты  $\varphi_{1i}^{\text{ж}}$  и  $\varphi_{1i}^{\text{кр}}$  ( $i=1,2,\dots$ ) несколько раз и занесите в таблицу.
10. Непосредственно угол, на который повернули (**против часовой стрелки**) плоскость пропускания анализатора, **равен  $90^0 - \varphi_1$** .
11. На рабочем столике поставьте **правовращающий** кварц толщиной  $d = 2,4$  мм и проведите аналогичные измерения (см. пункты №4-9). **При выполнении пункта №5 анализатор сначала поверните на  $180^0$  по отношению к его первоначальному положению (рис.16 а), а затем уравняйте яркость полей сравнения, поворачивая анализатор ПО часовой стрелке .**
12. Положение плоскости пропускания анализатора АА соответствует отсчету  $\varphi_2^3$  по шкале анализатора (см.рис.16 г). Произведите отсчеты  $\varphi_{2i}^3$ ,  $\varphi_{2i}^{\text{ж}}$  и  $\varphi_{2i}^{\text{кр}}$  ( $i=1,2,\dots$ ) несколько раз и занесите их в таблицу
13. Непосредственно угол, на который повернули (**по часовой стрелке**) плоскость пропускания анализатора, **равен  $90^0 - \varphi_2$** .

14. Сделайте рисунок, демонстрирующий (подобно рис. 10) положение (в градусах) и направление вращения плоскости пропускания анализатора при настройке поляриметра на полутеневое равенство яркостей полей сравнения. Этот рисунок поможет проверить справедливость формул (9) и (10) для определения углов поворота плоскости поляризации для левовращающего и правовращающего кварца.

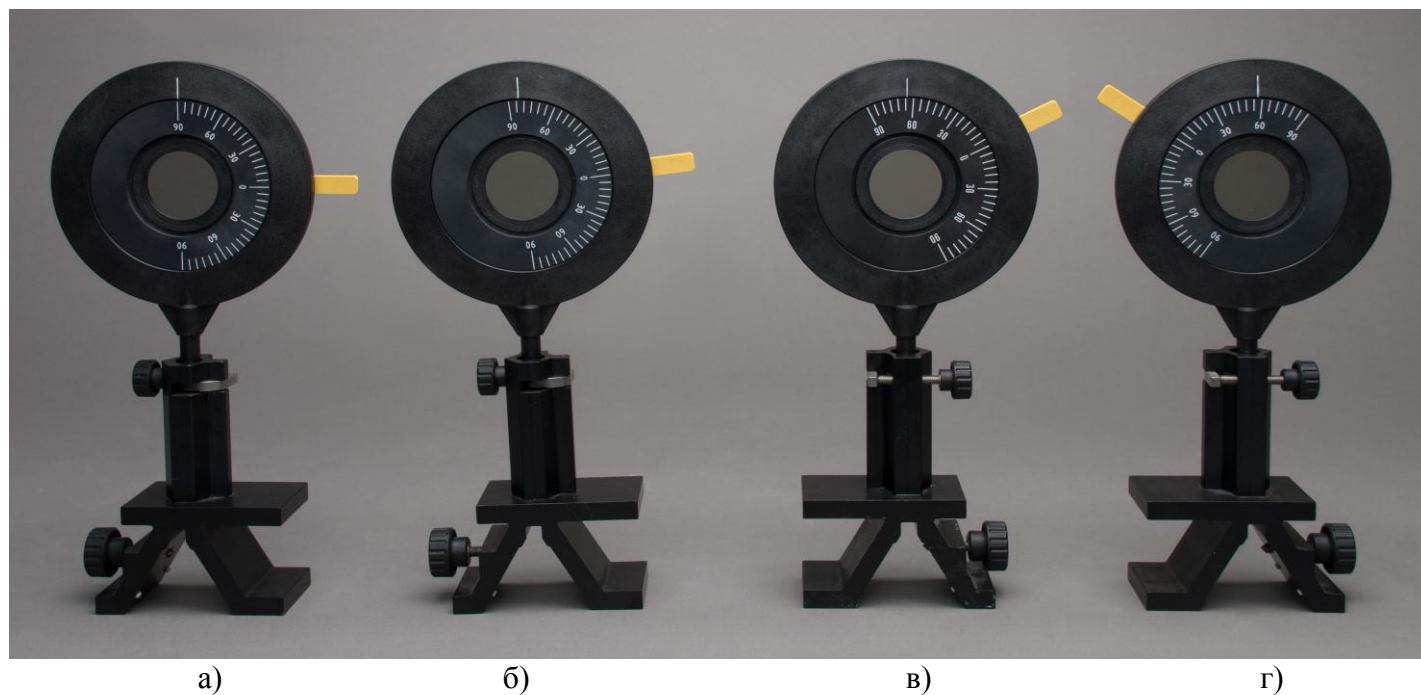


Рис.16. Внешний вид анализаторов, плоскости пропускания которых повернуты на разные углы.

### 2.3.3. Обработка полученных результатов

1. Занесите в таблицу экспериментальные данные по измерению нулевого отсчета анализатора и определению его погрешности.
2. Вычислите средние арифметические значения отсчетов анализатора для разных типов кварца при работе с разными светофильтрами, занесите их в таблицу.
3. Вычислите и занесите в таблицу значения погрешностей при определении отсчетов анализатора.

4. Определите углы поворота плоскости поляризации для левовращающего  $\varphi_{\text{л}}$  и правовращающего  $\varphi_{\text{пр}}$  кварца (для разных областей спектра) по формулам :

$$\varphi_{\text{лев}} = \varphi_1 - \varphi_0, \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{прав}} = 180 - \varphi_2 - \varphi_0 \quad (10)$$

5. Проверьте справедливость формулы (1):  $\varphi = \alpha d$ . Для этого сравните две величины:  $K_{\text{экс}}$  и  $K_{\text{теор}}$ .

$$K_{\text{экс}} = \frac{\varphi_{\text{пр}}}{\varphi_{\text{л}}}, \quad K_{\text{теор}} = \frac{\alpha d_{\text{пр}}}{\alpha d_{\text{л}}} = \frac{d_{\text{пр}}}{d_{\text{л}}}$$

## **2.4. Задание №4. Определение удельного вращения и концентрации раствора сахара**

### **Задачи:**

- получить навыки экспериментальной работы с полутеневым поляриметром;
- определить нулевой отсчет анализатора  $\varphi_0$ ;
- измерить углы поворота плоскости поляризации для растворов сахара различных концентраций в зависимости от спектрального диапазона (цвета светофильтра) и размеров кюветы;
- определить удельное вращение (постоянную вращения)  $[\alpha]$  сахара для различных светофильтров;
- экспериментально проверить справедливость формулы Био (2).

### **2.4.1. Описание экспериментальной установки**

Схема экспериментальной установки показана на рис.13. Ее описание представлено в разделе 2.2.1.

### **2.4.2. Порядок выполнения работы**

1. Сначала выполните полностью задание №2.

2. Экспериментальные данные по измерению нулевого отсчета анализатора и определению его погрешностей занесите в таблицу.
3. Установите за галогеновой лампой в держателе для слайдов один из светофильтров («зеленый», «желтый», «красный», и т.д.).
4. Вставьте в поляриметр кювету с раствором сахара известной концентрации  $C$ .
5. Установите ее так, чтобы она располагалась в середине светового пятна.
6. Уравняйте яркость полей сравнения вращением анализатора **ПО** часовой стрелке (равенство яркостей нужно наблюдать вблизи положения полного затемнения).
7. Произведите отсчет по шкале анализатора  $-\varphi_1^3$  (нижний индекс – номер раствора, верхний индекс – цвет светофильтра).
8. Сместите положение анализатора на несколько делений и снова уравняйте яркость полей сравнения, повторите эту процедуру несколько раз; произведите отсчеты  $\varphi_{1i}^3 (i = 1, 2, \dots)$ .
9. Поменяйте цвет светофильтра и проведите аналогичные (№3-8) измерения для данного раствора:  $\varphi_{1i}^{\text{ж}}$ ,  $\varphi_{1i}^{\text{кр}}$  и т. д.
10. Аналогичные измерения (№3-9) проведите с кюветами, наполненными раствором сахара всех имеющихся концентраций, включая неизвестную:  
 $\varphi_{2i}^3, \varphi_{2i}^{\text{ж}}, \varphi_{2i}^{\text{кр}}$  и т.д.;  $\varphi_{3i}^3, \varphi_{3i}^{\text{ж}}, \varphi_{3i}^{\text{кр}}$  и т.д.;  $\varphi_{4i}^3, \varphi_{4i}^{\text{ж}}, \varphi_{4i}^{\text{кр}}$  и т. д.
11. Поменяйте длину кюветы (т.е. измените величину  $d$ ) и проведите аналогичные (см. пункты №3-10) измерения.
12. Сделайте рисунок, демонстрирующий (подобно рис. 10) положение (в градусах) и направление вращения плоскости пропускания анализатора при настройке поляриметра на полутеневое равенство яркостей полей сравнения. Этот рисунок поможет правильно определить углы поворота плоскости поляризации для раствора сахара (см. формулу (10)).

### 2.4.3. Обработка полученных результатов

1. Вычислите средние арифметические значения отсчетов анализатора для растворов сахара различных концентраций при работе с разными светофильтрами и кюветами. Занесите их в таблицу.
2. Вычислите и занесите в таблицу значения погрешностей при определении отсчетов анализатора.
3. Определите **углы поворота плоскости поляризации** для растворов сахара различной концентрации в зависимости от цвета светофильтра и длины кюветы.
4. Постройте графики зависимости угла поворота плоскости поляризации от концентрации растворов сахара для различных светофильтров:  $\varphi = \varphi (C_i)$
5. Определите по графику неизвестную концентрацию  $C_x$  одного из растворов сахара.
6. Определите значения удельного вращения  $[\alpha]$  сахара по углу наклона графика  $\varphi = \varphi (C_i)$  и по формуле (2). Сравните эти значения.
7. Приведите в отдельной таблице результаты измерений зависимости угла поворота плоскости поляризации от цвета светофильтра.
8. Проверьте справедливость формулы **Био** (2):  $\varphi = [\alpha] \cdot d \cdot C$ . Для этого сравните для разных концентраций и разных светофильтров две величины:  $K_{\text{экс}}$  и  $K_{\text{теор}}$ .

$$K_{\text{экс}} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2}, \quad K_{\text{теор}} = \frac{[\alpha] C d_1}{[\alpha] C d_2} = \frac{d_1}{d_2}.$$

**Количество и номера заданий выполняются на усмотрение преподавателя.**

### **3. Техника безопасности**

Галогеновая лампа питается от источника напряжения 12 вольт. Во время работы кожух лампы и укрепленный на нем в специальной рамке для слайдов светофильтр сильно разогреваются. Это обстоятельство затрудняет смену светофильтров при выполнении работы. Поэтому желательно вставлять светофильтры не в рамку для слайдов, а в другие держатели, имеющиеся в комплекте к данной экспериментальной работе. Далее, следите за тем, чтобы свет от галогеновой лампы не попадал в глаза. Старайтесь не касаться пальцами оптических поверхностей, с большой осторожностью вращайте лимбы поляризаторов, чтобы не допустить их повреждений.

## **4. Примерная структура отчета**

1. Цель и задачи работы.
2. Схема экспериментальной установки.
3. Процедура проведения эксперимента.
4. Процедура обработки экспериментальных данных.
5. Расчетные формулы с указанием всех используемых обозначений.
6. Таблицы и графики результатов вычислений.
7. Результаты вычислений погрешностей.
8. Обсуждение результатов и выводы по работе.



## 5. Контрольные вопросы

1. Как направлены векторы напряженности электрического и магнитного полей в световой волне по отношению к вектору фазовой скорости? (Сделать рисунок).
2. Какой свет называется естественным, частично-поляризованным, линейно-поляризованным?
3. Назовите способы получения линейно-поляризованного света.
4. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
5. Получите и проанализируйте закон Малюса. В каком случае интенсивность света на выходе анализатора минимальна?
6. Какие вещества называются оптически активными? В чем отличие оптической активности от двойного лучепреломления?
7. Как объясняет теория Френеля поворот плоскости поляризации в оптически активных средах?
8. Выведите формулу (8) для угла поворота плоскости поляризации света в оптически активных веществах.
9. Какой физический смысл имеет величина  $\alpha$ , характеризующая вращательную способность?
10. В чем состоит закон Био?
11. Опишите принцип работы и устройство полутеневого поляриметра.

## 6. Список литературы

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн*. Москва: Наука, 1979. - 384с.
2. Бутиков Е.И. *Оптика*. Москва, Санкт-Петербург, Краснодар. Лань. 2012. - 607с.
3. Ландсберг Г.С., *Оптика*. Москва: Наука.1976. - 928с.