

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Руководство к лабораторной работе для студентов  
всех специальностей

Разработчик:  
\_\_\_\_\_ Кондратьева Н.П

2003

## ВВЕДЕНИЕ

Из электромагнитной теории Максвелла непосредственно следует, что электромагнитные волны поперечные, то есть векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , определяющие мгновенное состояние волны, взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны образуя правовинтовую тройку со скоростью распространения  $V$  (рис.1.1). Однако крест  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  может быть произвольно ориентирован по отношению к скорости  $V$  распространения волнового фронта в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

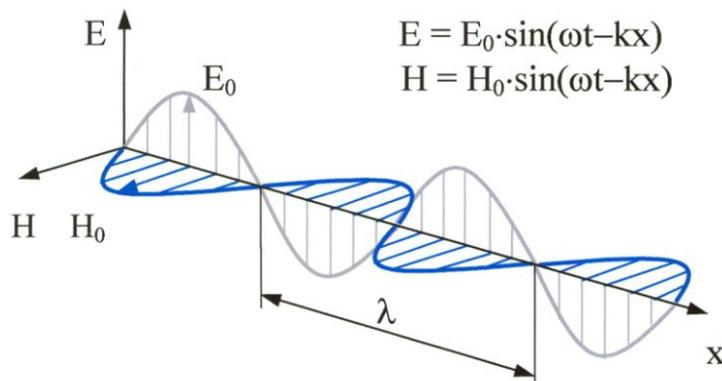


Рисунок 1.1 - Плоская электромагнитная волна

Для подавляющего большинства оптических явлений основную роль играет электрический вектор  $\mathbf{E}$ , который называют световым вектором и при рассмотрении оптических явлений оперируют именно этим вектором. Если вектор  $\mathbf{E}$  изменяется хаотически, свет называют *неполяризованным*. Неполаризованный или *естественный* свет испускают лампы накаливания, солнце, другие тепловые источники.

Если вектор  $\mathbf{E}$  изменяется упорядоченно, то такой свет называют *поляризованным*: если конец вектора  $\mathbf{E}$  описывает круг или эллипс, то этот свет имеет *круговую* или *эллиптическую поляризацию*. Если же направление колебаний вектора  $\mathbf{E}$  остается строго ориентированным в одном направлении в пространстве, и, следовательно, вектор  $\mathbf{E}$  все время остается в одной плоскости, содержащей вектора  $\mathbf{E}$  и  $V$ , то это световая волна называется *линейнополяризованной* или *плоскополяризованной*. Плоскость, проходящая через вектора  $\mathbf{E}$  и  $V$  называется *плоскостью колебаний*, или *плоскостью поляризации*. *Частично поляризованным* светом называется свет, в котором одно из направлений колебаний оказывается преимущественным, но не исключительным. Такой свет можно рассматривать как смесь естественного света и поляризованного. Частично поляризованный

свет количественно характеризуется *степенью поляризации*  $P$ , которая для света, обладающего частичной линейной поляризацией, определяется как

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора  $\mathbf{E}$ . Для плоскополяризованного света  $I_{\min} = 0$ ,  $P = 1$ , для естественного света  $I_{\max} = I_{\min}$  и  $P = 0$ .

Поляризованный свет можно получить из естественного света путем отражения последнего от поверхности диэлектрика либо при прохождении света через анизотропные кристаллы. Источником мощного линейнополяризованного излучения являются некоторые оптические квантовые генераторы - лазеры. Устройства для получения поляризованного света называют поляризаторами. Поляризаторы пропускают колебания, параллельные плоскости главного сечения поляризатора (*плоскости поляризатора*), и задерживают колебания, перпендикулярные этой плоскости. Если поляризованный свет интенсивностью  $I_0$  направить на другой поляризатор, то последний будет играть роль анализатора, применяемого для исследования поляризованного света. Интенсивность света, прошедшего через систему поляризатора и анализатора, будет зависеть от взаимной ориентации их плоскостей поляризации. Интенсивность  $I$  света, прошедшего через анализатор, определяется по закону Малюса и пропорциональна квадрату косинуса угла  $\varphi$  между плоскостью колебаний вектора  $\mathbf{E}$  в падающей волне и плоскостью главного сечения анализатора:

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

Целью данной лабораторной работы является изучение закона Малюса для излучения, создаваемого гелий-неоновым лазером и изучение вращения плоскости поляризации оптически активными веществами (кристаллом исландского шпата, раствором сахара) и определение концентрации сахарного раствора поляризационным методом.

## 2 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

### 2.1 Оптически анизотропные среды

В оптически анизотропных средах ее оптические свойства различны в разных направлениях и законы распространения световых

волн зависят от ориентации решетки кристалла относительно направления распространения волны, а также от состояния поляризации волны. Примером такой зависимости служит явление *двойного лучепреломления*, которое наблюдается во многих природных минералах и кристаллах (кварце, исландском шпате, турмалине). Если на грань такого кристалла направить узкий пучок света, то при вхождении в кристалл пучок разделяется на два пучка, которые преломляются в разных направлениях. Эти две преломленные волны, называемые обыкновенная и необыкновенная, являются линейнополяризованными с колебаниями вектора  $E$  во взаимно перпендикулярных направлениях. У одноосных кристаллов, к которым относятся кварц, турмалин и исландский шпат, есть только одно направление (направление оптической оси), вдоль которого обе волны распространяются с одинаковой скоростью. Во всех других направлениях скорости распространения обыкновенной и необыкновенной волны различаются из-за анизотропности свойств кристаллов, в частности, из-за различия диэлектрической проницаемости среды вдоль разных направлений. Обыкновенная волна удовлетворяет обычному закону преломления, соответствующий ей световой луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности кристалла. Для необыкновенного луча отношение синусов углов падения и преломления зависит от угла падения светового луча на кристалл.

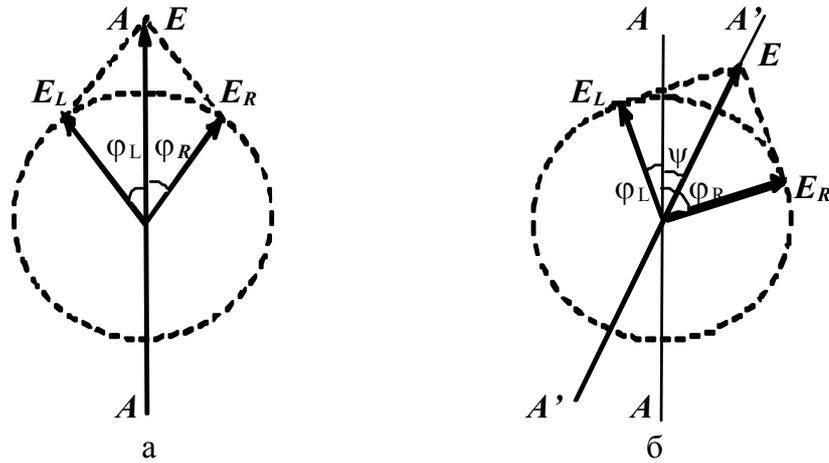
В некоторых кристаллах одна из преломленных волн поглощается больше, чем другая, то есть некоторые кристаллы обладают дихроизмом. Так, турмалин, например, поглощает обыкновенную волну почти полностью в слое толщиной 1 мм, и используется для получения линейнополяризованного света. В качестве поляризаторов и анализаторов широко используются поляроиды, представляющие собой желатиновые пленки с введенными в них одинаково ориентированными кристалликами герпатита (сульфата йодистого хинина), либо поливиниловые пленки, содержащие йод. Действие таких пленок также основано на различии в поглощении света, пропускаемого через пленку, в зависимости от состояния его поляризации, то есть на явлении дихроизма. Наиболее удобным и дешевым способом получения интенсивных пучков почти полностью плоскополяризованного света является применение поляроидных пленок, в которых одна из волн поглощается при толщине пленки около 0,1 мм.

## 2.2 Оптическая активность

В направлении оптической оси свет в анизотропной среде распространяется так же, как в изотропной, не давая двойного лучепреломления, но распространение света вдоль оптической оси отличается от его распространения в изотропной среде. Плоскополяризованный свет, распространяясь в таких средах, остается плоскополяризованным, но плоскость его поляризации поворачивается по мере продвижения пучка в веществе. Подобные вещества называются оптически активными. Этим свойством обладают исландский шпат, кварц и ряд других кристаллов, при условии распространения света вдоль направления оптической оси, а также некоторые жидкости и пары. К таким жидкостям относятся скипидар, никотин, растворы сахара, глюкозы и другие. Для растворов этих веществ угол поворота плоскости поляризации пропорционален их концентрации и толщине слоя, то есть он пропорционален числу молекул на пути луча. Это явление называется естественной оптической активностью.

Естественное вращение плоскости поляризации может иметь различные направления. Правое вращение, называемое положительным вращением, происходит по часовой стрелке (левое вращение – против часовой стрелки) для наблюдателя, смотрящего вдоль луча навстречу направлению распространения пучка света. Вещества, которые обнаруживают правое или левое вращение, называются правовращающими или левовращающими веществами соответственно. К правовращающим веществам, в частности, относится водный раствор сахара.

Для объяснения вращения плоскости поляризации Френель предположил, что в оптически активных веществах световые волны, распадаются на две волны, поляризованные по кругу с противоположными направлениями вращения, то есть с правой и левой поляризацией, с одинаковыми амплитудами и распространяющихся с разными скоростями, демонстрируя круговое двойное лучепреломление. Тогда плоскополяризованный свет можно представить как суперпозицию двух поляризованных по кругу волн с одинаковыми частотами и амплитудами  $E_L$  и  $E_R$  (рис.2.2).



а - представление плоскополяризованного света  $E$  в виде суммы поляризованных по кругу компонент  $E_L$  и  $E_R$  до входа в активное вещество; б - то же самое после прохождения активного вещества.

Рисунок 2.2 – К вращению плоскости поляризации

Если скорости распространения лево- и правополяризованных волн  $V_L$  и  $V_R$  были бы одинаковы в веществе, то углы  $\varphi_L$  и  $\varphi_R$  и результирующий вектор  $E$  не отклонялся бы от направления  $AA$  (см. рис.2.2а), и в веществе распространялась бы плоскополяризованная волна со скоростью  $V = V_L = V_R$ .

При  $V_L \neq V_R$ , если на входе в активную среду фазы обеих поляризованных волн одинаковы по величине, то суммарный вектор  $E$  колеблется вдоль направления  $AA$  (см. рис.2.2а). По мере прохождения через вещество один из векторов (на рис.2.2б это вектор  $E_L$ ) будет отставать в своем вращении от вектора  $E_R$ , то есть результирующий вектор  $E$  будет поворачиваться относительно направления  $AA$ , и после прохождения активного вещества займет положение  $A'A'$ , при этом угол поворота составит  $\psi$ . Угол поворота вектора  $E$  в среде на расстоянии  $L$  от входа равен фазе волны в данной точке, то есть  $\varphi_R = \omega \cdot (t - L/V_R)$ ;  $\varphi_L = \omega \cdot (t - L/V_L)$ . Из рис.2.2б следует, что  $\varphi_L + \psi = \varphi_R - \psi$ , то есть  $\psi = (\varphi_R - \varphi_L)/2$ . Тогда для угла поворота плоскости поляризации или разности фаз  $\psi$ , возникшей при прохождении расстояния  $L$  двух поляризованных по кругу волн в оптически активной среде, выражая через показатели преломления волн, получим:

$$\psi = \frac{\omega \cdot L}{2} \left( \frac{1}{V_R} - \frac{1}{V_L} \right) = \frac{\omega \cdot L}{2c} (n_R - n_L) = \frac{\pi \cdot L}{\lambda} (n_R - n_L), \quad (2.1)$$

где  $\lambda$  - длина волны в воздухе;

$\omega$  - круговая (циклическая) частота колебаний в падающей волне;

$n_R$  и  $n_L$  - показатели преломления для право- и левополяризованных волн.

Как видно из формулы (2.1), для веществ, у которых  $n_R > n_L$ , плоскость поляризации поворачивается вправо ( $\varphi_R > \varphi_L$ ) – то есть это правовращающие вещества, а для веществ, у которых  $n_R < n_L$ , - влево ( $\varphi_R < \varphi_L$ ) - левовращающие вещества.

Итак, вращение плоскости поляризации объясняется в рамках теории Френеля. Однако эта теория не вскрыла причины разбиения линейно поляризованного луча на два циркулярно поляризованных и причины различия фазовых скоростей волн с левым и правым вращением в оптически активном веществе.

С молекулярной точки зрения считается, что различие фазовых скоростей распространения лево- и правополяризованных волн в оптически активных веществах обусловлено асимметрией молекул или асимметричным расположением атомов в кристалле. Вращение плоскости поляризации зависит также от магнитного момента, индуцируемого в асимметричной молекуле магнитным полем световой волны.

В растворах угол поворота плоскости поляризации пропорционален пути  $L$  волн в растворе и концентрации  $C$  активного вещества:

$$\psi = \alpha \cdot C \cdot L ,$$

(2.2)

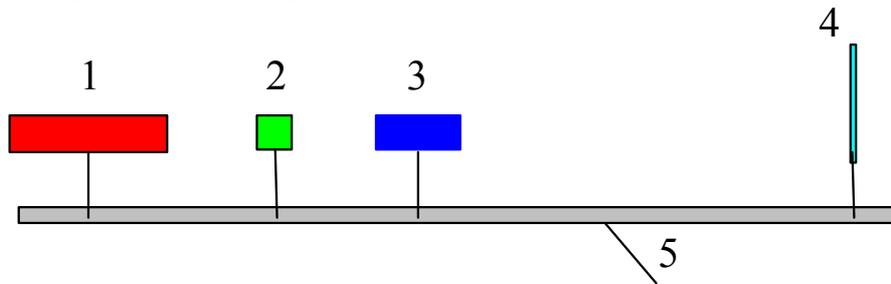
где  $\alpha$  - удельное вращение, характеризующее вращение плоскости поляризации на единицу длины пути (постоянная вращения). Удельное вращение растворов равно вращению, осуществляемому слоем толщиной 10 см, деленному на концентрацию оптически активного вещества, выраженную в граммах этого вещества на один кубический сантиметр раствора. Постоянная вращения  $\alpha$  зависит от длины волны  $\lambda$  (дисперсия вращательной способности).

### 3 ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе используются две установки, необходимые для выполнения основных заданий. На усмотрение преподавателя предлагаются дополнительные задания для наблюдения двойного лучепреломления, вращения плоскости поляризации одноосными кристаллами (исландским шпатом) и концентрированными растворами (для исследования вращения плоскости поляризации с использованием индикатрисы рассеяния).

### 3.1 Проверка закона Малюса

Установка для проверки закона Малюса изображена на рис.3.1 и включает гелий-неоновый лазер, поляроид, вставленный в оправу, позволяющую поворачивать поляроид вокруг горизонтальной оси, блок регистрации фототока, состоящий из фотодиода, помещенного в светонепроницаемый кожух и соединенного с микроамперметром, экрана. Вся установка крепится на оптической скамье.



1 - лазер; 2 - поляроид; 3 - блок регистрации фототока;  
4 - экран; 5 - оптическая скамья.

Рисунок 3.1 - Схема установки для проверки закона Малюса

Гелий-неоновый лазер 1 является источником монохроматического ( $\lambda=632,8$  нм), поляризованного излучения. Поляроид 2 служит анализатором излучения лазера и позволяет наблюдать на экране изменение интенсивности светового потока по мере вращения поляроида относительно горизонтальной оси. Угол поворота поляроида отсчитывается по шкале, нанесенной на оправу и позволяющей задавать углы от  $0$  до  $180^0$ . Интенсивность света, прошедшего через анализатор 2, определяется по величине фототока, регистрируемого блоком 3.

### 3.2 Исследование вращения плоскости поляризации и определение концентрации раствора

Для выполнения этого задания собирается установка, содержащая кроме элементов, указанных на рис.3.1, кюветы с активным веществом, помещаемые между лазером 1 и поляроидом 2, или между двумя поляризаторами, если излучение лазера не плоскополяризовано. В качестве активного вещества используется водный раствор сахара, с удельным вращением  $\alpha = 58$  град·см<sup>3</sup>/г·дм, для длины волны  $\lambda = 632,8$  нм, генерируемой *He-Ne* лазером.

Если между двумя предварительно скрещенными поляроидами поместить оптически активное вещество, то поле зрения на экране просветляется. Чтобы снова получить на экране "темноту",

необходимо повернуть анализатор на угол  $\varphi$ , равный углу поворота плоскости поляризации  $\Psi$ . Установку анализатора на "темноту" можно осуществлять и при помощи блока фоторегистрации.

Кюветы представляют собой стеклянные цилиндры, с указанной длиной, закрытые с торцов стеклянными пластинами, что позволяет наблюдать за ходом луча лазера в кювете с боку и на экране. Однако при прохождении кюветы лазерный луч периодически может исчезать, что связано с тем, что наблюдатель, смотрящий на пучок лучей сбоку, видит свет, рассеянный раствором сахара. Интенсивность рассеянного частицей света зависит от угла между направлением колебаний вектора  $E$  и направлением наблюдения.

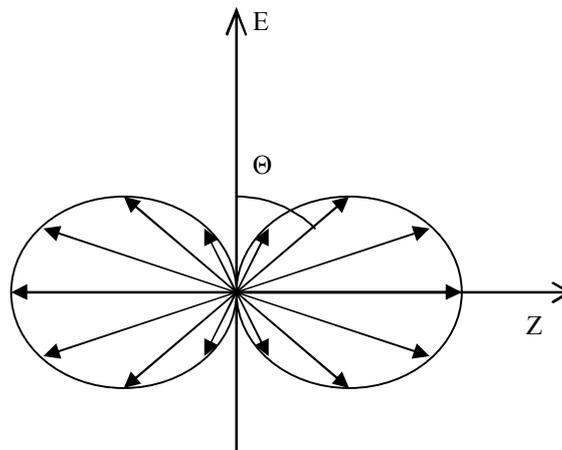


Рисунок 3.2- Индикатриса рассеяния световой волны

На рис.3.2 приведена индикатриса рассеяния световой волны. Видно, что интенсивность рассеянного света максимальна в направлении, перпендикулярном направлению колебания вектора  $E$ , и равна нулю в направлении, параллельном вектору  $E$ . Поэтому, если плоскость поляризации лазерного луча составляет небольшой угол с направлением наблюдения при входе в оптически активный раствор, то луч может исчезнуть при прохождении через правовращающий раствор сахара из-за вращения плоскости поляризации раствором. В случае сильно концентрированных растворов можно наблюдать периодическое прерывание луча через равные промежутки, при прохождении каждого из которых происходит поворот плоскости поляризации на  $180^\circ$ .

#### 4. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

##### 4.1. Проверка закона Малюса

4.1.1. Собрать установку согласно рис.3.1. Включить лазер.

4.1.2. Вращая анализатор относительно горизонтальной оси, убедиться, что освещенность на экране изменяется периодически.

4.1.3. Установить на оптической скамье перед экраном блок регистрации фототока, так, чтобы световой луч падал в центр окошка.

4.1.4. Вращая анализатор, добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра. Зафиксировать деление шкалы анализатора  $\varphi$  и показание микроамперметра  $i$ .

4.1.5. Постепенно поворачивать анализатор вплоть до  $90^0$ , записывая в таблицу показания микроамперметра через каждые  $10^0$ .

4.1.6. По данным таблицы построить график зависимости интенсивности  $I$  проходящего света, от квадрата косинуса угла поворота  $\varphi$ . При этом учитывать неполяризованную часть  $I_{min}$  падающего света от посторонних источников, равной показанию прибора при скрещенных поляризаторах, если  $I_{min} > 0$ . Тогда  $I = i - I_{min}$ .

Если построенный график зависимости  $I(\cos^2\varphi)$  представляет собой прямую линию, это означает, что интенсивность света, прошедшего через анализатор, подчиняется закону Малюса.

4.2. Определение концентрации раствора поляризационным методом

4.2.1. Включить лазер и вращая анализатор в отсутствии кюветы с активным веществом настроить установку на "темноту".

4.2.2. Между лазером и анализатором поместить кювету с исследуемым раствором.

4.2.3. Вращая анализатор, скомпенсировать получившееся просветление. Определить угол поворота  $\varphi$  анализатора по шкале, нанесенной на оправу.

4.2.4. Повторить п.п. 4.2.1-4.2.3 по три раза для кювет разной длины.

4.2.5. Найти средние значения угла поворота  $\varphi$  анализатора для каждой кюветы, тем самым установить зависимость угла поворота плоскости поляризации  $\Psi$  лазерного излучения раствором оптически активного вещества от длины кюветы  $L$ .

4.2.6. Построить график зависимости  $\psi$  от  $L$ , и учитывая формулу (2.2) определить объемную концентрацию  $C$  сахара в растворе как угловой коэффициент полученной прямой.

4.2.7. Рассчитать погрешность измерения концентрации  $C$ .

4.3. Наблюдение двойного лучепреломления и вращения плоскости поляризации одноосными кристаллами (исландским шпатом) и концентрированными растворами (для исследования вращения плоскости поляризации с использованием индикатрисы рассеяния).

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

5.1. Чем отличаются естественный свет, плоскополяризованный свет и частично поляризованный свет?

5.2. Какой вид поляризации имеет лазерное излучение в данной работе? Что служит поляризатором и анализатором?

5.3. Как изменяется направление вектора  $E$  в световой волне, выходящей из анализатора при повороте анализатора? Как при этом изменяется интенсивность света?

5.4. Как по виду зависимости интенсивности выходящего из анализатора излучения от угла поворота анализатора определить характер поляризации света?

5.5. Запишите математическое выражение закона Малюса.

5.6. Какие вещества называют оптически активными?

5.7. Какое явление используется в данной работе для определения концентрации сахара?

5.8. Почему луч лазера иногда исчезает при распространении внутри кюветы с сахаром?

5.9. Почему в растворе сахара лазерный луч становится видимым при боковом наблюдении?

5.10. Зависит ли угол поворота плоскости поляризации от концентрации оптически активного вещества, от длины пути, пройденного световой волной в оптически активном веществе, от мощности падающего на кювету излучения, от длины волны излучения?

## 6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

6.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Оптика. -М.: Наука, 1987. -568с.

6.2. Ландсберг Г.С. Оптика. -М.: Наука, 1976. -926с.

6.3. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики. -М.: Высшая школа, 1989. -607с.