

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка

по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 84

**ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА БРЮСТЕРА
ПРИ ОТРАЖЕНИИ СВЕТА ОТ
СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНКИ,
НАХОЖДЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ
ПРОПУСКАНИЯ ПОЛЯРОИДОВ И
ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА**

Работу поставил доцент Авксентьев Ю.И.

Москва 2012 г.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА БРЮСТЕРА ПРИ ОТРАЖЕНИИ СВЕТА ОТ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНКИ, НАХОЖДЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ПРОПУСКАНИЯ ПОЛЯРОИДОВ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Целью работы является измерение угла Брюстера при отражении света от стеклянной пластинки, нахождение направлений пропускания поляроидов и проверка закона Малюса.

1. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛА БРЮСТЕРА

В опытах по взаимодействию света с веществом (диэлектриком) установлено, что как отраженные, так и преломленные лучи являются поляризованными. Исследования, проведенные Брюстером, показали, что при определенном угле падения φ_0 отраженный луч является полностью поляризованным. *Угол, при котором достигается полная поляризация отраженного луча, называют углом Брюстера*, а соотношение, связывающее этот угол с показателями преломления n_1 и n_2 двух сред, на границе между которыми происходит отражение, — *законом Брюстера*

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

Глаз человека не в состоянии отличить поляризованный свет от естественного, но чувствителен к изменению интенсивности света. Поэтому в опытах с поляризованным светом полезно иметь оптическое устройство, при прохождении через которое интенсивность света менялась бы в зависимости от направления поляризации падающего на него пучка света. Такое устройство получило название поляризатора, так как естественный свет, пропущенный через него, становится поляризованным. Для нахождения угла Брюстера можно предложить следующую оптическую схему, использующую поляризатор, рис.1а.

На рис.1а падающий 1 и отраженный 2 лучи изображены лежащими в плоскости чертежа. Отражение происходит от стеклянной пластинки, перпендикулярной плоскости чертежа, а след отраженного луча наблюдается на экране 5 в виде светового пятна. На пути луча 2 установлен поляризатор А, ориентированный так, чтобы направление пропускания его было параллельно плоскости чертежа. В соответствии с законом Брюстера путем вращения пластинки 3 вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, можно установить такой угол падения φ , при котором яркость светового

пятна на экране 5 станет равной нулю. Найденный таким образом угол φ равен углу Брюстера φ_0 . Действительно, при отражении падающий под углом Брюстера луч становится полностью поляризованным. При этом направление вектора E будет перпендикулярным плоскости чертежа, и при

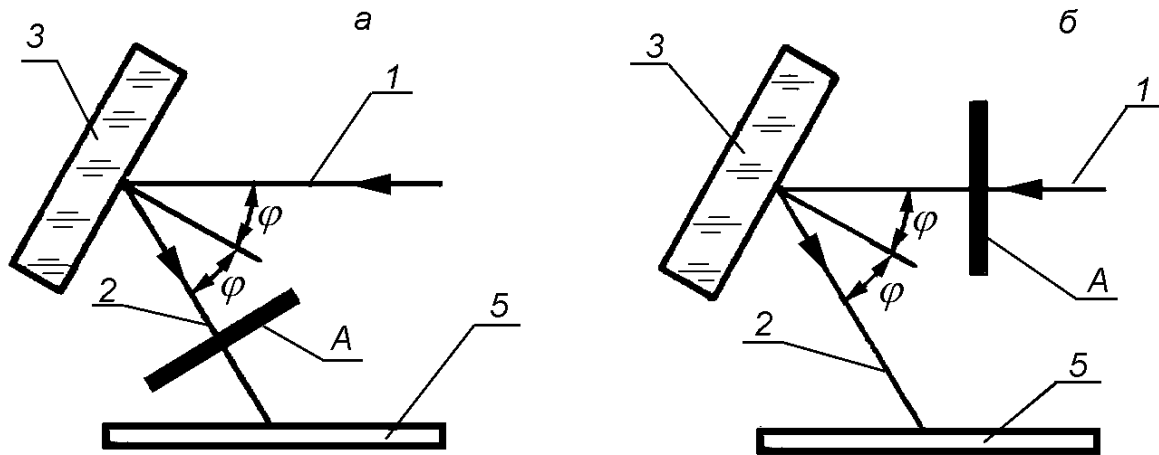


Рис. 1

указанной выше ориентации поляризатора луч 2 не достигает экрана. При практической реализации этой схемы возникает необходимость в одновременном вращении пластинки 3 и поляризатора А, причем угол поворота поляризатора должен быть в два раза больше угла поворота пластинки. Схема, представленная на рис. 1б, свободна от этого недостатка. Как видно из рисунка, в ней поляризатор А помещается на пути падающего луча 1 и таким образом необходимость в его вращении отпадает. Направление пропускания поляризатора по-прежнему ориентируется параллельно плоскости чертежа. Именно такая схема нахождения угла Брюстера используется в данной задаче. Студентам предлагается самостоятельно объяснить исчезновение отраженного луча 2 при условии равенства угла φ углу Брюстера φ_0 .

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки представлен на рис. 2 и 3. Все оптические узлы установки размещены на оптической скамье б. Источником света

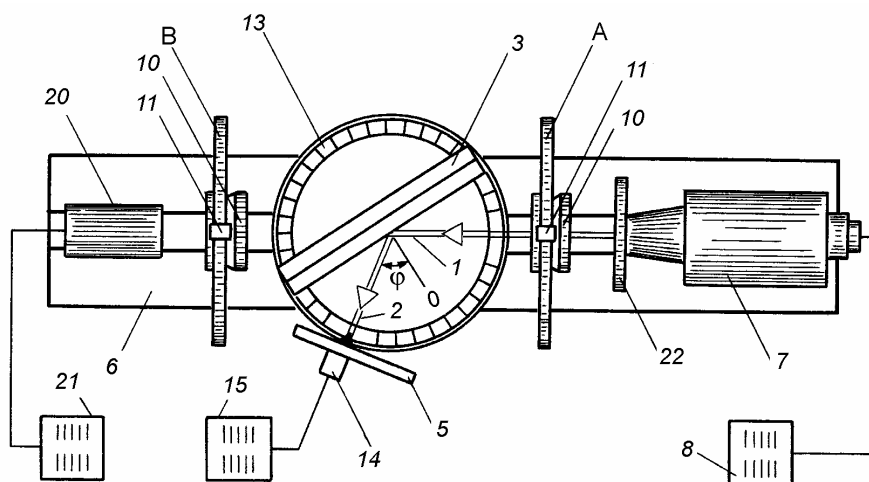


Рис. 2

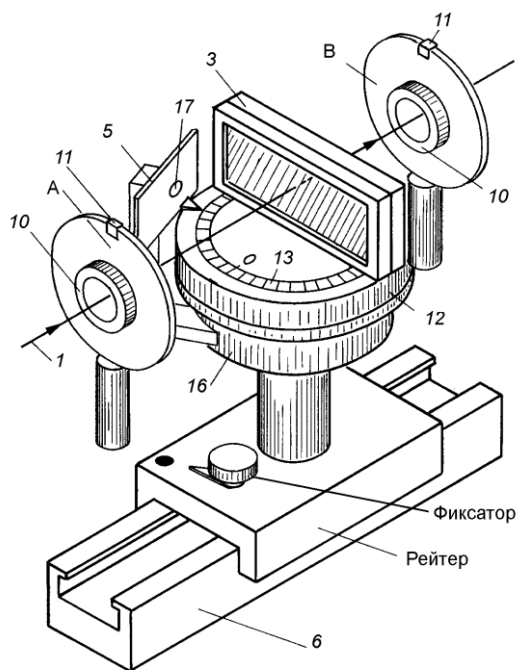


Рис. 3

служит осветитель 7 с коллиматором. Напряжение накала лампы осветителя регулируется источником питания 8, передняя панель которого с ручкой регулировки 9 изображена на рис. 4. Луч света 1, прежде чем попасть на стеклянную пластинку, проходит через поляризатор А,

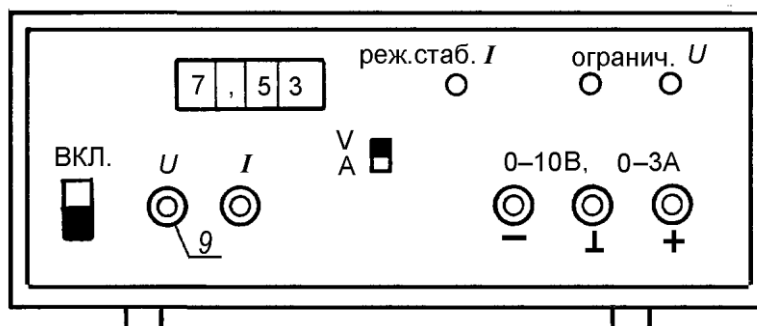


Рис. 4

размещенный в специальном держателе. В качестве поляризатора используется *поляроидная пленка* (поляроид). Держатель обеспечивает возможность вращения поляроида с помощью кольца с накаткой 10 (рис. 2 и 3) и отсчет угла поворота в градусах по шкале 18 относительно метки 11 (рис.5).

Вместо стеклянной пластинки используется стопа стеклянных пластин. 3. Стопа укрепляется вертикально на столике 12 (рис.3), который может вращаться вокруг вертикальной оси. Столик снабжен шкалой 13, проградуированной в градусах. Стеклянная пластинка расположена относительно шкалы 13 так, что нормаль к ее поверхности, проходящая через центр столика, проходит через нулевое деление шкалы (рис. 2). Такое расположение стеклянной пластинки на столике позволяет легко измерять угол отражения φ луча 2 от стеклянной пластинки с помощью фотоприемника 14 (рис. 2). Для этого фотоприемник снабжен меткой, определяющей его положение на шкале 13, и регистрирующим устройством 15 со стрелочным индикатором. Передняя панель регистрирующего устройства изображена на рис. 6. Как и стеклянная пластинка, фотоприемник может вращаться вокруг вертикальной оси. Для его вращения служит кольцо с накаткой 16 (рис. 3). Движения стеклянной пластинки и фотоприемника независимы. Луч света, отраженный от стеклянной пластинки, попадает в фотоприемник через отверстие 17 в экране 5 (рис. 3). Экран 5 вращается вместе с фотоприемником. Помимо упомянутых элементов на оптической скамье установлены: второй поляриод В, фотоприемник 20 и регистрирующее устройство 21.

3. ВКЛЮЧЕНИЕ УСТАНОВКИ И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение угла Брюстера

а. Включить источник питания осветителя: ползунок

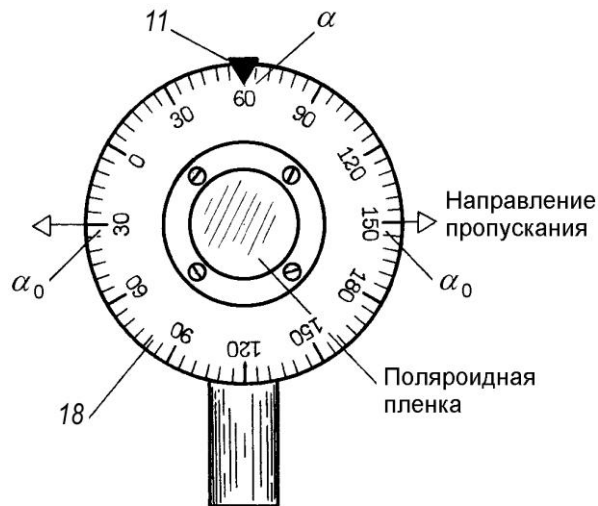


Рис. 5

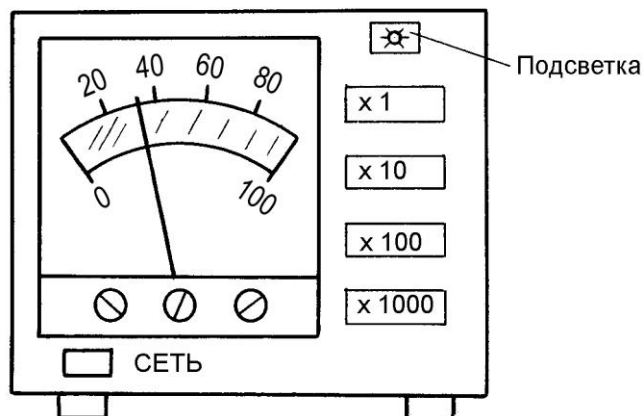


Рис. 6

переключателя перевести в положение “Вкл”. Установить максимальное значение напряжения накала лампы ($\sim 10\text{ В}$), повернув рукоятку 9 по часовой стрелке до упора. С помощью рукоятки 9 напряжение можно менять как плавно так и грубо. При плавной регулировке рукоятка 9 вращается легко, при грубой к ней нужно приложить большее усилие. При напряжении 10 В лампа работает с перекалом. Поэтому, если измерения по

какой-либо причине прерываются, то напряжение накала следует понизить до 5–6 В.

б. Включить регистрирующее устройство фотоприемника 15, нажав кнопку “Сеть” (рис. 6). Включить подсветку шкалы индикатора, нажав кнопку “*”. Выбрать наиболее чувствительный диапазон измерений, нажав кнопку “X1”.



Рис. 7

в. Подвижный экран 5 (рис. 2 и 3) расположить параллельно оптической скамье. Еще раз напомним, что вращение стеклянной пластинки и экрана с фотоприемником необходимо осуществлять с помощью колец 12 и 16 (рис. 3).

г. Повернуть стопу 3 так, чтобы световое пятно, образованное световым лучом 2, вначале оказалось слева от входного отверстия фотоприемника 17. Затем поворотом экрана 5 по часовой стрелке расположить его справа от отверстия 17. Такая ориентация стеклянной пластинки и экрана обеспечивает достаточно сильную зависимость яркости светового пятна на экране от угла поворота поляроида А.

д. Поворотом поляроида А добиться минимальной яркости светового пятна на экране 5.

е. Повернуть фотоприемник по часовой стрелке так, чтобы левый край экрана 5 коснулся стопы 3. Такой поворот предотвратит выход светового пятна за пределы экрана при выполнении указаний следующего пункта.

ж. Вращая стопу 3 по часовой стрелке, найти положение, при котором яркость светового пятна на экране 5 по визуальной оценке станет минимальной. При этом само световое пятно должно находиться справа от отверстия 17. Если минимум приходится на отверстие 17, то экран 5 с фотоприемником повернуть дополнительно по часовой стрелке на некоторый угол.

з. Поворачивая стопу 3 на небольшой угол в ту или иную сторону относительно найденного положения, убедиться в том, что найденное положение, действительно, соответствует минимальной яркости светового пятна.

и. После выполнения предыдущего пункта повернуть экран 5 так, чтобы центр светового пятна совпал с центром отверстия фотоприемника 17. Так как яркость светового пятна минимальна, то отклонение стрелки регистрирующего устройства 15 будет небольшим. В дальнейшем при

отыскании угла Брюстера необходимо будет найти такое положение фотоприемника, при котором отклонение стрелки станет максимальным. Эту операцию легче выполнить, когда стрелка находится вдали от нуля шкалы.

к. Поворачивая поляроид *A* за кольцо *10* в произвольном направлении, установить стрелку индикатора регистрирующего устройства *15* на отметку *50 делений*.

л. Для нахождения угла Брюстера φ_0 необходимо путем медленного вращения фотоприемника за кольцо *16* в ту или иную сторону, добиться максимального отклонения стрелки индикатора регистрирующего устройства *15*, после чего по шкале *13* (рис. 2 и 3) произвести отсчет φ_0 . Для освещения шкалы при отсчете угла φ_0 воспользоваться маломощным электрическим фонариком (рис. 7).

При освещении шкалы *13* необходимо следить за тем, чтобы луч света от фонарика не попадал в отверстие фотоприемника *17*. Результаты измерения φ_0 записать в таблицу данных №1.

Угол φ_0 измерить три раза. Результаты измерений записать в таблицу данных №1.

Таблица данных №1

φ_0 , град	α , град	α_{0A} , град	$\bar{\varphi}_0$, среднее	$\bar{\alpha}_{0A}$, среднее	$\Delta\varphi_0$, град ε_φ (%)	$\Delta\alpha_{0A}$, град ε (%)

Упражнение № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ ПОЛЯРОИДА *A*

Поворотом поляроида *A* добиться минимального отклонения стрелки индикатора регистрирующего устройства *15*. Путем медленного вращения поляроида *A* в ту или иную сторону убедиться в том, что найденное положение действительно соответствует минимальному отклонению стрелки индикатора, после чего по шкале *18* (рис. 5) отсчитать против метки *11* угол α в градусах. Как следует из пункта 1 описания, минимальная яркость отраженного луча будет наблюдаться при расположении направления пропускания поляроида *A* в горизонтальной плоскости. На рис. 5 это направление указано стрелками. Так как метка *11* располагается на вертикали, то направление пропускания поляроида α_{0A} можно вычислить по формуле

$$\alpha_{0A} = |\alpha \pm 90^\circ| \quad (2)$$

Значение α записать в таблицу данных №1. Измерения α произвести три раза. После последнего измерения α оставить поляроид A в положении с горизонтальным расположением направления пропускания. Такое положение он должен занимать при выполнении упражнения №2.

При отчете представить:

1. Таблицу данных №1 с расчетом средних значений φ_0 и α_{0A} и абсолютной и относительной погрешностей этих величин.
2. Уметь объяснить по рис. 1а и рис. 1б принципиальную схему измерения угла Брюстера и направления пропускания поляроида.

Упражнение № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ ПОЛЯРОИДА В И ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Для проверки закона Малюса на оптической скамье установлены поляроид B и второй фотоприемник света 20 с регистрирующим устройством 21 . Фотоприемник 20 неподвижно закреплен на оптической скамье. Поляроид B и регистрирующее устройство 21 идентичны устройствам A и 15 (рис. 2).

1. Определение направления пропускания поляроида B .

- а. Включить регистрирующее устройство 21 (см. упр. №1, п. 3б).
- б. Фотоприемник 14 с экраном 5 повернуть против часовой стрелки на такой угол, чтобы он не мешал установить стопу 3 перпендикулярно падающему лучу 1 .

в. Установить стопу 3 перпендикулярно падающему лучу. Для этого повернуть столик 12 против часовой стрелки до появления луча, отраженного

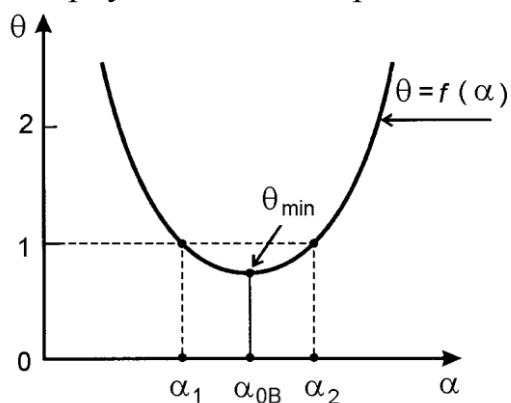


Рис. 8

от стопы на экране 22 и далее в том же направлении до попадания его в отверстие коллиматора осветителя 7 (рис. 2). При таком расположении стопы направление колебаний электрического вектора E луча 1 после прохождения им стопы будет определяться направлением пропускания поляроида A . Если ориентация поляроида A после выполнения упражнения №1 не менялась (убедиться в этом), то вектор E в луче 1 , падающем на поляроид B , будет ориентирован горизонтально.

г. Вращением поляроида B за кольцо 10 в ту или иную сторону добиться минимального отклонения θ стрелки индикатора регистрирующего устройства 21 . Так как направление колебаний вектора E в падающем луче ориентировано горизонтально, то минимальное

отклонение стрелки индикатора $21 - \theta_{\min}$ будет наблюдаться при вертикальной ориентации направления пропускания поляроида B . Таким образом, направление пропускания поляроида α_{0B} можно сосчитать по шкале 18 против метки 11 (рис. 5). В процессе отыскания θ_{\min} становится очевидным, что из-за плавной зависимости θ от α в области минимума ошибка при изменении α_{0B} может быть большой. Для уменьшения ошибки можно воспользоваться тем обстоятельством, что кривая $\theta = f(\alpha)$ в области минимума симметрична относительно α_{0B} (рис. 8) и проводить измерение α_{0B} в следующем порядке.

Вращением поляроида B в ту или иную сторону определить величину минимального отклонения θ_{\min} (на рис. 8 θ_{\min} меньше одного деления).

Поворотом поляроида B в произвольном направлении установить стрелку индикатора между двумя соседними, ближайшими к минимуму, делениями шкалы (на рис. 8 — между делениями 1 и 2).

Медленным вращением поляроида B в обратном направлении установить стрелку индикатора на ближайшее к минимуму деление шкалы (на рис. 8 деление 1) и произвести отсчет угла α_1 по шкале 18 рис. 5.

Записать в таблицу № 2 значение угла α_1 .

Продолжить вращение поляроида B в том же направлении до тех пор, пока стрелка не пройдет минимум и вновь не станет напротив ближайшего к нему деления шкалы (на рис. 8 деление 1). В этом положении произвести отсчет угла α_2 по шкале 18 .

Записать в таблицу № 2 значение угла α_2 .

Направление пропускания поляроида B — α_{0B} является средним значением α_1 и α_2

$$\alpha_{0B} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (3)$$

Значения α_1 и α_2 измерить три раза.

Таблица данных 2

№	α_1 , град.	α_2 , град.	α_{0B} , град.	α_{0B} , град. (среднее)	$\Delta\alpha_{0B}$, град.	$\varepsilon(\%)$
1						
2						
3						

2. Проверка закона Малюса. Вывод рабочей формулы

Согласно закону Малюса интенсивность света I , прошедшего через поляризатор B , зависит от угла α между направлениями пропускания поляризаторов A и B , т.е.

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на поляризатор B . Эта формула справедлива для идеальных поляризаторов. Поляризаторы, выпускаемые промышленностью, не обеспечивают полную поляризацию света и, кроме того, поглощают часть световой энергии, проходящей через них. Поэтому интенсивность света, падающего на поляризатор B , может быть представлена в виде двух слагаемых: интенсивности поляризованной компоненты $I_{\text{поляр.}}$ и интенсивности неполяризованной компоненты $I_{\text{естеств.}}$, т.е.

$$I_0 = I_{\text{поляр.}} + I_{\text{естеств.}} \quad (5)$$

Так как потери энергии имеются как в поляризованной, так и в естественной компонентах, то закон Малюса (4) для поляризаторов можно записать в виде:

$$I = (I_{\text{поляр.}} - I_{\text{потерь}}) \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} (I_{\text{естеств.}} - I_{\text{потерь}}), \quad (6)$$

см. стр. 176 пособия “Электродинамика и волновая оптика”.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} A &= I_{\text{поляр.}} - I_{\text{потерь}} \\ B &= I_{\text{естеств.}} - I_{\text{потерь}} \end{aligned} \quad (7)$$

Равенство (6) теперь можно переписать в виде

$$I = A \cos^2 \alpha + B. \quad (8)$$

Коэффициенты A и B не трудно найти, если измерить интенсивности I для случаев $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha = 0$.

$$\begin{aligned} I &= I_{\min} = B \\ I &= I_{\max} = A + B \end{aligned} \quad (9)$$

Из соотношений (9) имеем

$$\begin{aligned} B &= I_{\min} \\ A &= I_{\max} - I_{\min} \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив значения A и B в (8), получаем

$$I = (I_{\max} - I_{\min}) \cos^2 \alpha + I_{\min}. \quad (11)$$

Показания стрелочного индикатора θ регистрирующего устройства 21 пропорциональны интенсивности I света, падающего на фотоприемник 20

$$\theta = kI, \quad (12)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Поэтому равенство (11) с учетом (12) можно переписать в виде

$$\theta = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \cos^2 \alpha + \theta_{\min}, \quad (13)$$

или

$$\frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} = \cos^2 \alpha. \quad (14)$$

Относительно $\cos^2 \alpha$ уравнение (14) представляет собой прямую с тангенсом угла наклона, равным единице, проходящую через начало координат.

$$Y = X, \quad (15)$$

где

$$Y = \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}, X = \cos^2 \alpha. \quad (16)$$

При $\theta_{\min} \ll \theta_{\max}$ можно положить $\theta_{\min} = 0$.

В упражнении производится экспериментальная проверка соотношения (15).

Проведение измерений

а. Поляриод B установить в положение, при котором угол α между направлениями пропускания поляридов A и B равен 90° . Если положение поляриода A после выполнения упражнения №1 не изменялось (проверить), т.е. поляриод A находится в состоянии с горизонтальным расположением направления пропускания, то для этого достаточно против метки 11 поляриода B установить среднее значение α_{0B} , взятое из таблицы данных №2.

б. Повернуть поляриод B на 90° в произвольном направлении. В таком положении интенсивность света, прошедшего через поляриод B будет максимальной и соответствовать отсчету α_{\max} по шкале 18. Изменяя напряжение накала лампы, установить $\theta_{\max} = 70 \text{ дел.}$

в. Вернуть поляриод B в первоначальное положение. Записать в таблицу данных № 3 значение $\alpha = 90^\circ$ и показания θ_{\min} регистрирующего устройства 21.

г. измерить очередное значение θ при $\alpha = 80^\circ$. Для этого повернуть поляриод B на 10° в направлении α_{\max} (угол поворота отсчитать по шкале 18). Записать полученное значение θ и α в таблицу данных № 3.

д. Измерить θ для углов $\alpha = 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10$ и 0 градусов, всякий раз поворачивая поляризатор B в направлении α_{\max} .

Результаты всех измерений записать в таблицу данных № 3. По результатам измерений вычислить и записать в таблицу данных № 3 значения X и Y .

При отчете представить заполненные таблицы данных № 2 и № 3 и график $Y = f(X)$ на миллиметровой бумаге. При построении графика на осях X и Y выбрать одинаковый масштаб. Значения X и Y , равные $0,1$, отстоят от начала координат на расстоянии 10 мм.

Таблица данных 3.

№	α , град.	θ , делений	у	х
1	90	θ_{\min}		
2	80			
..	..			
10	0	θ_{\max}		

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Д.В. “Электромагнетизм и волновая оптика” Изд. МГУ, 1994 г. часть 2-я глава III §§ 36,43.

2. Савельев И.В. «Курс общей физики». Учебное пособие в 5 кн. Кн. 4 «Волновая оптика». М. Наука. Физматлит. 1998.

Ч. II. Оптика. Гл. 6. Поляризация света.

6.1 - Естественный и поляризованный свет.

6.2 – Поляризация при отражении и преломлении .

6.3- Поляризация при двойном лучепреломлении.