

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

С.Л. Тимченко, Н. А. Задорожный А.В. Семиколенов, В. Г. Голубев, А.В. Кравцов

## **ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Методические указания к лабораторной работе О-79 по курсу общей физики  
Под редакцией Горелика В.С.

Москва  
2014

Цель работы - экспериментальное и теоретическое изучение процессов отражения естественного и плоскополяризованного света от диэлектрической поверхности.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Световые волны поперечны, т.е. электрический ( $\vec{E}$ ) и магнитный ( $\vec{H}$ ) векторы колеблются в направлениях, перпендикулярных к направлению распространения волны ( $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ ).

Волна, изображенная на рис. 1, является плоской, монохроматической, линейно поляризованной волной, в которой векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  не теряют со временем своей ориентации. Плоскость  $\vec{E}$ ,  $\vec{S}$  называется плоскостью поляризации. Естественный свет представляет собой суперпозицию двух некогерентных волн с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации.

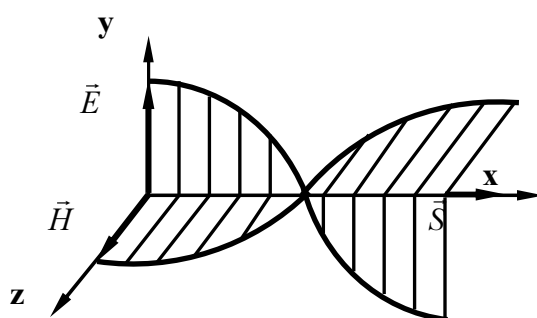


Рис. 1

Формулы Френеля - соотношения, устанавливающие связь между амплитудами падающей, отраженной и прошедшей волнами.

Рассмотрим процесс отражения плоской монохроматической световой волны от границы диэлектрика (рис. 2), плоскость поляризации которой совпадает с плоскостью падения светового луча (Р – компонента).

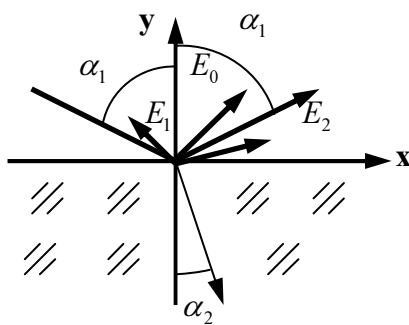


Рис. 2

Из уравнений Максвелла следует, что соотношение между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  для плоской монохроматической волны, распространяющейся вдоль оси "х" с частотой  $\omega$ , имеет вид [ 1 ]

$$H = \frac{nE}{\mu_0 \cdot c} \quad (1)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме;  $n$  - комплексный показатель преломления, определяемый из уравнения

$$n^2 = \frac{\varepsilon - i\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2)$$

для проводящей среды с проводимостью  $\sigma$  и  $\mu = 1$ .

Если выделить действительную  $n$  и мнимую  $\kappa$  части показателя преломления:

$$n = n - i\kappa$$

то волну можно представить в следующей форме:

$$E = E_m \exp\left(\frac{-\omega \cdot \chi \cdot x}{c}\right) \cdot \exp\left(i \cdot \omega \left(t - \frac{n \cdot x}{c}\right)\right),$$

откуда видно, что мнимая часть показателя преломления определяет коэффициент затухания волны  $\frac{\omega \cdot \chi}{c}$ . Затуханием волны в условиях данной задачи пренебрегаем.

Из уравнений Максвелла следует, что на границе раздела двух сред должны выполняться граничные условия:

тангенциальные компоненты напряженности электрического поля непрерывны

$$E_0 \cos \alpha_1 - E_1 \cos \alpha_1 = E_2 \cos \alpha_2; \quad (3)$$

нормальные компоненты вектора электрического смещения непрерывны,

$$\varepsilon_0 (E_0 \sin \alpha_1 + E_1 \sin \alpha_1) = \varepsilon \varepsilon_0 E_2 \sin \alpha_2; \quad (4)$$

тангенциальные компоненты вектора напряженности магнитного поля непрерывны,

$$H_{0\tau} + H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad (5)$$

нормальные компоненты вектора индукции магнитного поля непрерывны,

$$B_{0n} + B_{1n} = B_{2n}.$$

Подставив (1) в (5), получим

$$\frac{(E_0 + E_1)}{\mu_0 c} = \frac{nE_2}{\mu_0 c}. \quad (6)$$

Без доказательства примем известный факт, что угол падения луча, имеющего амплитуду напряженности вектора электрического поля  $\vec{E}_0$ , равен углу отражения отраженного луча с амплитудой  $\vec{E}_1$ , а также что угол преломления  $\alpha_2$  связан с углом падения  $\alpha_1$  соотношением

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad (7)$$

Из (3), (6), (7) следует

$$r_p = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{\cos \alpha_1 \sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha_2)}{\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (*)$$

где  $r_p = \frac{E_1}{E_2}$  - амплитудный коэффициент отражения для Р - компоненты.

Коэффициентом отражения  $R$  называется отношение интенсивности отраженной волны  $I_{отр}$  к интенсивности падающей волны  $I_{пад}$ :

$$R = \frac{I_{отр}}{I_{пад}}$$

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды ( $I \sim E^2$ )

Получаем выражение для коэффициента отражения волны, поляризованной в плоскости падения:

$$R_p = \left[ \frac{\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha_2)}{\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2)} \right]^2 \quad (8)$$

Если падающая волна поляризована в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (S - компонента) (рис. 3), то условие равенства тангенциальных компонент электрического и магнитного поля будут выглядеть так:

$$E_0 + E_1 = E_2,$$

(9)

$$H_0 \cos \alpha_1 - H_1 \cos \alpha_1 = H_2 \cos \alpha_2.$$

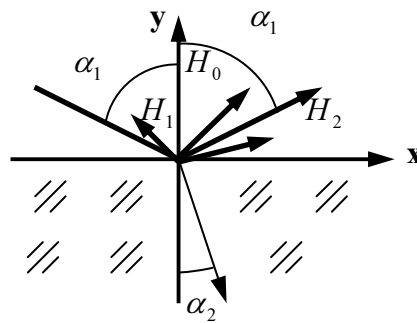


Рис. 3

Откуда после преобразований получим

$$r_s = \frac{E_1}{E_0} = - \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 - \cos \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1 \sin \alpha_2} = - \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (**)$$

где  $r_s$  - амплитудный коэффициент отражения для S - компоненты.

Коэффициент отражения волны, поляризованной перпендикулярно плоскости падения, есть

$$R_s = \left[ \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right]^2. \quad (10)$$

В случае нормального падения лучей, т.е. когда  $\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow 0$ ,  $n_1=1$ ,  $n_2=n$

$$R_s = R_p = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad (11)$$

Коэффициент пропускания  $D = (E_2/E_1)$  можно получить из очевидного соотношения

$$R + D = 1.$$

При отражении P - компоненты, если выполнено условие  $\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ ,

$R_p$  обращается в 0. Это соответствует углу  $\alpha_1 = \alpha_B$ , где  $\alpha_B$  - угол Брюстера:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n.$$

Интенсивность естественного света может быть представлена как сумма интенсивностей двух плоскополяризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях волн, например S - и P - компонент:

$$I = I_s + I_p$$

Причем у естественного света  $I_s = I_p$ , откуда коэффициент отражения

$$R = (R_s + R_p) / 2 \quad (12)$$

На рис.4 представлены зависимости коэффициентов отражения  $R_s$  ( $R_{\perp}$ ),  $R_p$  ( $R_{\parallel}$ ) и  $R$  ( $R_{\text{ест}}$ ) от угла падения  $\alpha$ .

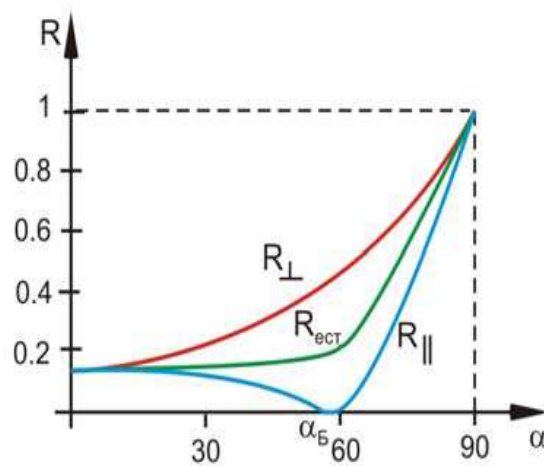


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения от угла падения

Если естественный свет падает под углом  $\alpha_B$  на диэлектрическое зеркало, то отражается только S - компонента, т.е. отраженный свет полностью поляризован (Рис.5).

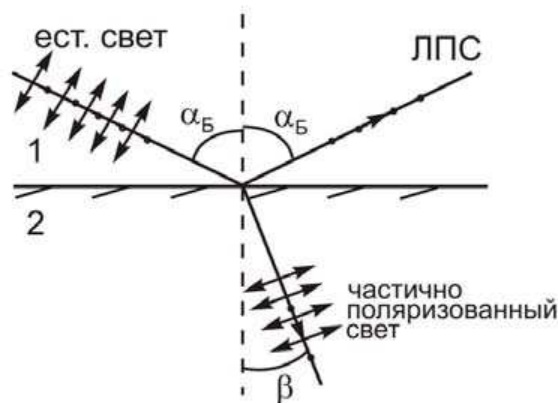


Рис. 5. Поляризация при отражении и преломлении:  $\alpha_B + \beta = \pi/2$

Оптическое устройство, преобразующее естественный свет в линейно поляризованный, называется поляризатором. Плоскость поляризации прошедшей световой волны называется главной плоскостью поляризатора.

Если вращать плоскость поляризатора, то при определенной ориентации интенсивность прошедшей световой волны  $I$  достигает максимального значения  $I_{\max}$ . При повороте плоскости поляризатора на  $90^\circ$  интенсивность прошедшей световой волны будет равна  $I_{\min}$ . Свет, у которого  $I_{\max} \neq I_{\min}$ , называется эллиптически поляризованным. Степень поляризации эллиптически поляризованного света

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

Для естественного света  $P = 0$ , для линейно поляризованного  $P = 1$ . Степень поляризации отраженного луча от диэлектрической поверхности в этом случае

$$P = \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p}. \quad (13)$$

. Рассмотрим прохождение через границу линейно поляризованной волны, в которой электрическое поле совершает колебания под произвольным углом  $\delta$  к плоскости падения. Угол  $\delta$  называется азимутом колебания падающей волны. Для анализа отражения вектор амплитуды  $\vec{E}^{\text{пад}}$  надо разложить на две компоненты, для которых справедливы формулы Френеля (рис. 6).

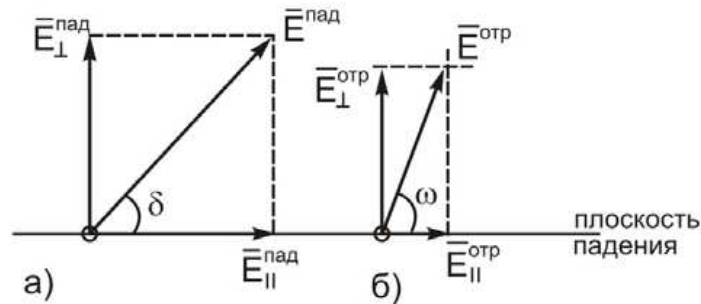


Рис. 6. Направление колебаний электрического поля в падающей (а) и отраженной (б) волнах.

Очевидно, что  $E_{\parallel}^{\text{пад}} = E^{\text{пад}} \cos \delta$ ;  $E_{\perp}^{\text{пад}} = E^{\text{пад}} \sin \delta$  (14)

Так как каждая из компонент имеет свой коэффициент отражения, то азимут колебания в отраженной волне будет другим (рис. 6). Так как  $R_{\perp} > R_{\parallel}$  для всех углов падения, кроме 0 и  $\pi/2$ , то  $\omega > \delta$ . Плоскость колебания линейно поляризованной волны повернулась при отражении на угол

$$\psi = \omega - \delta \quad (15)$$

Из рис. 6б следует, что

$$\operatorname{tg} \omega = E_{\perp}^{\text{отр}} / E_{\parallel}^{\text{отр}} \quad (16)$$

С учетом (\*), (\*\*), (14), (16) получим для азимута отраженной волны:

$$\operatorname{tg} \omega = -\operatorname{tg} \delta (\cos(\alpha - \beta) / \cos(\alpha + \beta)). \quad (17)$$

Частный случай: азимут колебания в падающей волне  $\delta = \pi/4$ . Тогда  $\psi = \omega - \delta$

$$\operatorname{tg} \Psi = \operatorname{tg} (\omega - \pi/4) = (1 - \operatorname{tg} \omega) / (1 + \operatorname{tg} \omega). \quad (18)$$

Из (15) и (16) после преобразований следует, что

$$\operatorname{tg} \Psi = -(\cos \alpha (1 - \sin^2 \beta)^{1/2} (\sin \alpha \sin \beta)^{-1}) \quad (19)$$

Заменяя в (17)  $\sin \beta$  по закону преломления, получим для угла поворота плоскости

поляризации при отражении выражение:

$$\Psi = \arctg(\cos \alpha (n^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin^{-2} \alpha) \quad (20)$$

Анализируя (20), можно заметить, что при падении света с азимутом колебаний  $\delta = \pi/4$  на границу диэлектриков под углом полной поляризации  $\alpha_B$ , плоскость колебаний поворачивается на угол  $\psi = \pi/4$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общий вид установки для исследования законов отражения от диэлектрической поверхности представлен на рис. 7. Установка включает в себя лазер He-Ne (1 мВт,  $\lambda=0,6328$  мкм.), фотодатчик, многопредельный измерительный прибор с усилителем, показания, которого пропорциональны интенсивности регистрируемого излучения, поляризатор, анализатор, столик с призмой (флинтглас  $n = 1.63$ , преломляющий угол  $60^\circ$ ), поворотное радиальное устройство, транспортер.



Рис. 7. Общий вид установки

Поворотное радиальное устройство (рис. 8), состоящее из треножника, в котором закрепляются штативные стержни, столика с призмой, транспортера со стрелкой, позволяет установить угол падения луча на призму и направить отраженный лазерный луч на фотодатчик.



Рис. 8. Поворотное радиальное устройство

Поляризатор представляет собой поляроид, закрепленный в оправе, имеющей шкалу с делениями 0- 90°, и может вращаться вокруг оптической оси и задавать плоскость поляризации: в плоскости падения - Р - волну; перпендикулярно плоскости падения - S - волну.

Анализатор представляет собой поляроид, закрепленный в оправе, имеющей шкалу с делениями 0-90°, и может вращаться вокруг оптической оси, предназначен для определения степени поляризации отраженного света.

## ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 9 дана схема установки призмы, транспортира и лазерного луча при угле падения  $\alpha = 0$ , где 1 – затемненная сторона призмы; 2 – столик ;3 – транспортир; 4 – стрелка-указатель; 5 – штативный стержень; 6 – лазерный луч.

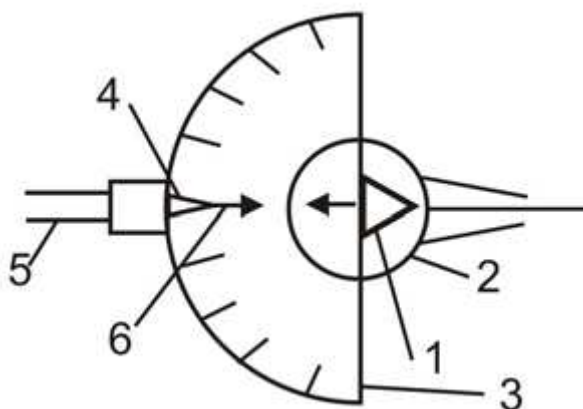


Рис. 9. Установка призмы при угле падения  $\alpha = 0$ .



### Задание 1.

. Исследование законов отражения плоскополяризованного света (плоскость поляризации ориентированна в плоскости падения, Р - компонента).

1. Включить лазер, прогреть его в течение 5 минут.

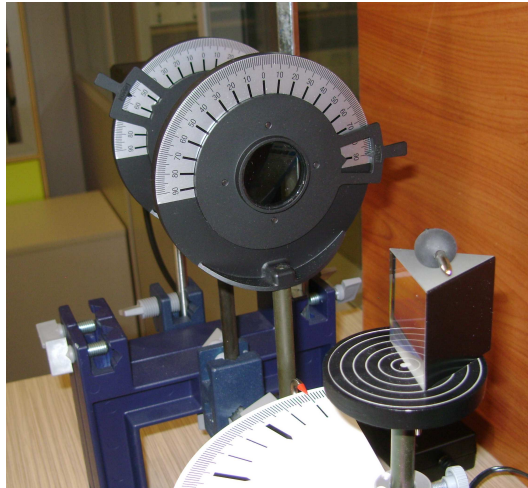


Рис.10.

Плоскость поляризации ориентированна в плоскости падения (Р - компонента).

2.2-й поляризатор установить так, как показано на рис. 10, чтобы плоскость колебаний электрического поля волны совпадала с плоскостью падения ( $90^\circ$  по шкале поляроида). Анализатор перед фотодатчиком убрать.

3. Положение лазера подобрать так, чтобы луч распространялся параллельно стержню и проходил через центр столика для призмы. Транспортир установить в положение «нуль» (рис. 9).

4. Установить предел измерительного прибора - 20В. Развернуть штативный стержень с фотоэлементом, вдоль нулевого деления транспортира. Установить первичную интенсивность  $I_0$  луча вращением 1-го поляризатора так чтобы показания измерительного прибора не превышали 10 В. Показания записать в таблицу 1.

5. Поместить призму на столик, отражающей поверхностью в центре (рис. 9). Падающий луч должен отражаться в обратном направлении. Это соответствует углу падения  $\alpha = 0$ . Закрепить транспортир и столик с призмой верхним винтом.

6. Ослабить нижний винт. Поворачивая столик с призмой и транспортиром, установить угол падения  $\alpha$  в пределах от  $15^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . При этом необходимо развернуть и стержень с фотоэлементом, и добиться максимальных показаний прибора. Для каждого угла падения  $\alpha$ , показания прибора ( $I_p$ ), пропорциональные интенсивности отраженного света, поляризованного в плоскости падения, записать в таблицу 1.

### Задание 2.

Исследование законов отражения плоскополяризованного света (плоскость поляризации ориентирована перпендикулярно плоскости падения, S –компонента).

1. 2-й поляризатор установите на  $0^\circ$  (рис. 11).. Теперь колебания электрического поля в волне происходит перпендикулярно плоскости падения. Анализатор перед фотодатчиком убрать.

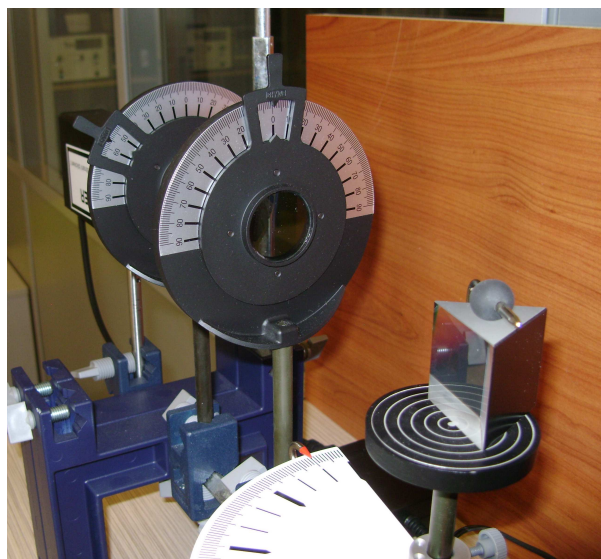


Рис.11

Плоскость поляризации ориентирована перпендикулярно плоскости падения  
( S –компонента)

2. Положение лазера подобрать так, чтобы луч распространялся параллельно стержню и проходил через центр столика для призмы. Транспортир установить в положение «нуль» (рис. 9).
3. Развернуть штативный стержень с фотоэлементом, вдоль нулевого деления транспортира. Предел измерительного прибора - 20В. Установить первичную интенсивность  $I_0$  луча вращением 1-го поляризатора так чтобы показания измерительного прибора не превышали 10 В. Показания записать в таблицу 1.
4. Поместить призму на столик, отражающей поверхностью в центре (рис. 9). Падающий луч должен отражаться в обратном направлении. Это соответствует углу падения  $\alpha = 0$ . Закрепить транспортир и столик с призмой верхним винтом.
5. Ослабить нижний винт. Поворачивая столик с призмой и транспортиром, установить угол падения  $\alpha$  в пределах от  $15^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . При этом необходимо развернуть и стержень с фотоэлементом, и добиться максимальных показаний прибора. Для каждого угла падения показания прибора ( $I_s$ ), пропорциональные интенсивности отраженного света, поляризованного перпендикулярно плоскости падения, записать в таблицу 1.

### Задание 3.

(для более глубокого изучения теории отражения )

Исследование изменения направления поляризации при отражении под разными углами  
(выполняется при наличии дополнительного поляризатора-анализатора)

1. Установите лазер, как в п. 1 задания 2 (рис. 11). 2-й поляризатор установите по шкале на  $45^\circ$ . Теперь колебания электрического поля в волне происходят под углом  $45^\circ$  к плоскости падения, т. е. азимут колебания падающей волны  $\delta = \pi/4$ .
2. Поворачивая столик с призмой, изменять угол падения  $\alpha$  от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . При этом, поворачивая штативный стержень с фотоэлементом, добиться максимальных показаний прибора.
3. Установить анализатор в отраженном пучке. Вращая анализатор, найти для каждого угла падения  $\alpha$  направление колебаний в отраженной волне ( $\omega$ ). Оно соответствует максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором. Значения углов  $\omega$  записать в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1

$\alpha$	$I_s$ отн.ед.	$I_p$ отн.ед.	$\omega$	$\psi$	$R_s$	$R_p$	$R_{\text{ест}}$	$\Pi$
10								
15								
20								
·								
·								
·								
·								
80								
$I_0$ отн.ед.								

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитать значения коэффициентов отражения  $R_s$  и  $R_p$ . Отнести значения показаний приборов  $I_p$ ,  $I_s$  к соответствующим значениям  $I_0$  падающего излучения.

Результаты занести в таблицу 1.

2. Рассчитать значения коэффициентов отражения для естественного света  $R_{\text{ест}}$  по формуле (12). Результаты занести в таблицу 1

3. Рассчитать степень поляризации  $\Pi$  отраженного луча по формуле (13) Результаты занести в таблицу 1.

4. Построить теоретическую зависимость  $R = f(\alpha)$  для P - и S - компонент плоскополяризованного света по формулам (8) и (10). Значение показателя преломления  $n$  указано на экспериментальной установке. На построенные графики нанести экспериментальные точки отчетливыми знаками (например, P - компонента - крест, S - компонента - кружок).

5. Построить теоретическую зависимость  $R = f(\alpha)$  для естественного света по формуле (12) в том же масштабе, что для P - и S - компонент. По данным таблицы на этом же графике нанести экспериментальные точки коэффициента отражения для естественного света отчетливым знаком (например, квадрат).

6. Построить теоретическую зависимость степени поляризации отраженного луча  $\Pi = f(\alpha)$  по формуле (13).

7. Рассчитать угол поворота плоскости поляризации при отражении

$\psi = \delta - \omega = \pi/4 - \omega$ . Построить график зависимости  $\psi(\alpha)$ .

8. По формуле (20) рассчитать значения  $\psi$  угла поворота плоскости поляризации при отражении, соответствующие разным углам падения  $\alpha$  ( $20^\circ \div 80^\circ$ ) и построить теоретическую зависимость  $\psi(\alpha)$ .

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определить по графикам величину угла Брюстера, а по величине этого угла рассчитать показатель преломления  $n$  призмы и сравнить его с указанным на экспериментальной установке значением.
2. Сделать вывод о степени поляризации отраженного луча.
3. Сделать вывод об интенсивности отраженного луча и его S- и P- компонент.
4. Сравните экспериментальную и теоретическую зависимости угла поворота плоскости поляризации при отражении. Определите угол Брюстера  $\alpha_B$ , зная, что при угле падения, равном  $\alpha_B$ , плоскость колебаний при отражении поворачивается на  $\pi/4$ .

## ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Вывести формулу (II), исходя из формул (8) и (10) и проанализировать влияние показателя преломления ( $n = 1,2 \div 1,8$ ) на величину коэффициента отражения при нормальном падении лучей.
2. Показать, что естественный свет можно рассматривать как совокупность S- и P - компонент.
3. Построить график зависимости коэффициента отражения для света, поляризованного под углом к плоскости падения (например,  $\phi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ).

## Контрольные вопросы

1. Запишите формулы Френеля. Какие величины они связывают? Для какого света применимы?
2. Что называется коэффициентом отражения? От чего зависит его величина?
3. Как рассчитать коэффициент отражения при нормальном падении света на границу двух диэлектриков, а также при произвольном угле падения?
4. Какой свет называется естественным? Линейно поляризованным? Частично поляризованным?
5. В чем заключается закон Брюстера?
6. Что такое степень поляризации?
7. Что называется азимутом колебания электрического поля волны?
8. Если на границу двух диэлектриков падает под углом Брюстера естественный свет, то каким будет состояние поляризации отраженного света? Преломленного света?
9. Почему при отражении линейно поляризованной волны происходит поворот плоскости поляризации?
10. Начертите график зависимости коэффициента отражения от угла падения для волны:  
а) поляризованной в плоскости падения;  
б) поляризованной перпендикулярно плоскости падения;  
в) неполяризованной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Матвеев А.И. Оптика. М.: Высш. шк., 1989. 351 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1987. 317 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. М.: Наука, 1980. – Т. IV, гл V. – §§ 62, 65.
4. Бутиков Е. И. Оптика / Е. И. Бутиков. С-Пб.: Невский диалект, 2003. – Гл. 3.
5. Иродов И. Е. Волновые процессы Основные законы / И. Е. Иродов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – Гл. 6. – §§ 6.1, 6.2.
6. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. М.: Физматгиз, 2003. – Гл. XVI.