

4.12 Исследование поляризационных свойств стеклянной призмы

Содержание

Введение	2
Экспериментальная установка	9
Проведение измерений	10
Указания к выполнению работы	11
Обработка результатов	15
Контрольные вопросы	16
Приложение	17

Цели работы

1. Овладеть основами эллипсометрии на примере призмы Дове.
2. Исследовать поляризующую способность призмы Дове и проверить соответствие полученных экспериментальных данных рассчитанным по формуле Френеля.

Введение

Призма Дове (рис. 1) применяется в оптических приборах для поворота изображения предметов.

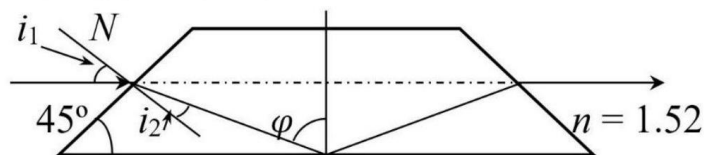


Рис. 1. Схема лучей в призме Дове

Лучи, проходящие через призму, испытывают преломление на входной и выходной гранях и полное внутреннее отражение на нижней грани. Преломление и отражение на гранях призмы приводят к поляризации проходящего света. Поэтому при работе призмы в естественно-поляризованном свете проходящий свет становится частично поляризованным. В случае работы в поляризованном свете имеют место явления, приводящие к изменению состояния поляризации волны. В зависимости от азимута α (см. рис. 2) плоскости поляризации падающего линейно - поляризованного света выходящий из призмы свет может стать эллиптически поляризованным, или остаться линейно поляризованным.

Рассмотрим процессы, приводящие к поляризации исследуемого света при прохождении его через призму. Известно, что свет с любым видом поляризации можно представить в виде двух составляющих с ортогональными преимущественными колебаниями электрических векторов. Поляризацию с колебаниями электрического вектора в плоскости падения E_p будем называть параллельной, или p –поляризацией, а вторую, E_s , с перпендикулярными колебаниями к плоскости падения, перпендикулярной, или s –поляризацией. Обозначим через T_{1p} и T_{1s} соответствующие составляющие энергетических коэффициентов пропускания на первой грани.

Из формул Френеля следует:

$$\begin{aligned} T_{1p} &= \frac{4 \cos^2 i_1 \sin^2 i_2}{\sin^2 (i_1 + i_2) \cos^2 (i_1 - i_2)}, \\ T_{1s} &= \frac{4 \cos^2 i_1 \sin^2 i_2}{\sin^2 (i_1 + i_2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_1 – угол падения, i_2 – угол преломления.

Очевидно, что на второй преломляющей грани призмы коэффициенты пропускания равны $T_{2p} = T_{1p}$ и $T_{2s} = T_{1s}$, тогда суммарное пропускание призмы определяется соотношениями:

$$T_p = T_{1p}T_{2p} = T_{1p}^2 \text{ и } T_s = T_{1s}T_{2s} = T_{1s}^2. \quad (2)$$

В результате неравенства величин T_p и T_s прошедший свет становится частично поляризованным. Степень его поляризации равна:

$$P = \frac{T_s - T_p}{T_s + T_p}. \quad (3)$$

При полном внутреннем отражении, возникающем при отра-

жении от нижней грани призмы, между колебаниями в этих составляющих возникает разность фаз $\delta = \delta_s - \delta_p$, где δ_s и δ_p — соответствующие сдвиги по фазе соответствующих компонент. Величина δ зависит от угла падения φ и значения $n = 1/n_{\text{ст}}$, где $n_{\text{ст}}$ — показатель преломления стекла, тогда:

$$\operatorname{tg} \delta/2 = \frac{\cos \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi - n^2}}{\sin^2 \varphi} \quad (4)$$

Сложение ортогонально ориентированных колебаний с разностью фаз φ приводит в общем случае к появлению эллиптически поляризованного света. Пространственная ориентация эллипса и его эллиптичность (отношение длин малой полуоси b и большой полуоси a) зависят от азимута α (отсчитываемого от плоскости падения). При α , равном нулю или 90° , свет остаётся линейно поляризованным.

Анализ состояния поляризации эллиптически поляризованного света осуществляется с помощью поляризационных компенсаторов. В настоящей работе используется компенсатор Сенармона. Он представляет собой сочетание кристаллической пластинки, толщиной $(k+1)\frac{\lambda}{4}$, вырезанной параллельно оптической оси и вносящей разность фаз $\pi/2$, и анализатора (поляризатора), расположенных последовательно. Пластика $\lambda/4$ при своей определенной ориентации превращает исследуемый эллиптический свет в линейно поляризованный. Азимут полученного линейно поляризованного света определяется с помощью анализатора.

Рассмотрим физическую сторону процесса исследования поляризующей способности призмы Дове, имея в виду измерение вносимых ею разности фаз δ и поворота плоскости поляризации $\Delta\alpha$. Предположим, что плоскость поляризации света, падающего на первую грань призмы, выставлена под углом α по отношению

к плоскости падения света (рис. 2).

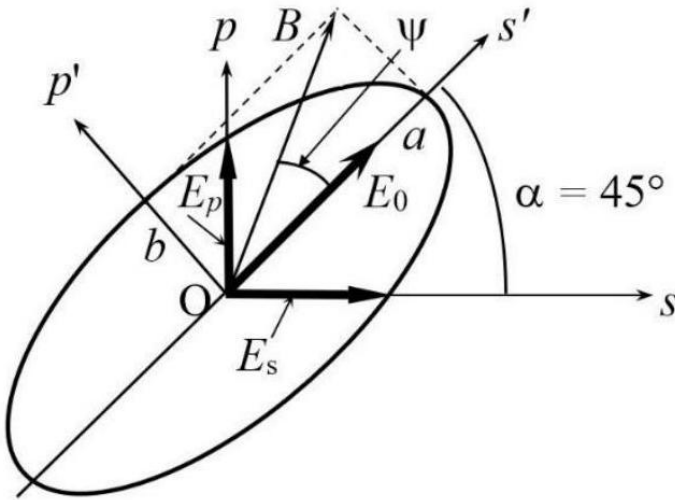


Рис. 2. Поляризационный эллипс и его параметры

Пусть E_s и E_p – ортогональные проекции электрического вектора E_0 падающей волны с амплитудой A_0 . При $\alpha = 45^\circ$ $E_s = E_p$. В этом случае при произвольном значении δ , вводимым между этими компонентами, выражение для эллипса поляризации имеет вид:

$$E_s^2 + E_p^2 - 2E_s E_p \cos \delta = A_0^2 \sin^2 \delta, \quad (5)$$

а его большая ось располагается под углом 45° к плоскости падения света. Уравнение этого эллипса в системе координат $s'p'$, повернутой на 45° и совпадающей с его осями, приобретает каноническую форму:

$$\frac{E_{s'}^2}{a^2} + \frac{E_p^2}{b^2} = 1, \quad (6)$$

где a и b — величины полуосей эллипса. При этом

$$\begin{aligned}a^2 &= E_0^2 \sin^2 \delta (1 - \cos \delta) \\ b^2 &= E_0^2 \sin^2 \delta (1 + \cos \delta),\end{aligned}\tag{7}$$

Вычислив отношение полуосей b/a , получаем, что

$$b/a = \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}\tag{8}$$

Таким образом, для определения величины δ необходимо измерить отношение b/a .

В методе Сенармона это измерение основывается на следующем обстоятельстве. Известно, что эллипс по уравнению (6) образуется в результате сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний вдоль осей эллипса, имеющих амплитуды a и b и разность фаз $\pi/2$. Следовательно, вводя в ход лучей компенсационную пластинку $\lambda/4$ с $\delta = 90^\circ$ и поворачивая ее так, чтобы ее главные направления совпали с осями эллипса поляризации, мы получим после нее линейно поляризованный свет, так как выходящие колебания будут синфазными (разность фаз между взаимно перпендикулярными колебаниями равна нулю). Компоненты a и b сложатся по правилу векторного сложения и получится результирующее колебание с вектором ОВ (рис. 2).

Если первоначально анализатор был установлен в скрещенное положение с поляризатором, то теперь поле просветлится. Поворачивая анализатор на угол ψ , можно опять добиться темноты поля. Очевидно, что

$$\operatorname{tg} \psi = b/a.\tag{9}$$

Из выражений (8) и (9) следует, что

$$\delta = 2\psi. \quad (10)$$

Процесс измерения величины δ в случае призмы Дове осложняется тем обстоятельством, что коэффициенты пропускания для s и p -компонент различны. В результате этого поворачивается и эллипс поляризации. Поэтому при повороте анализатора не наступает полное гашение, а соотношение (10) не выполняется точно. Для получения правильного результата нужно установить угол α' , при котором ортогональные составляющие будут равны, т.е. $E'_p \tau_p^2 = E'_s \tau_s^2$.

Учитывая амплитудные коэффициенты пропускания на каждой преломляющей грани

$$\begin{aligned} \tau_p &= \frac{2 \cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)}, \\ \tau_s &= \frac{2 \cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_1 + i_2)} \end{aligned} \quad (11)$$

и, обращаясь к рис. 3, видим, что призма поворачивает плоскость поляризации света.

Отсюда следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{E'_p}{E'_s} = \frac{\tau_s^2}{\tau_p^2} \quad (12)$$

и с учетом (11) получаем

$$\operatorname{tg} \alpha' = \cos^2(i_1 - i_2), \quad (13)$$

а угол поворота плоскости поляризации равен тогда

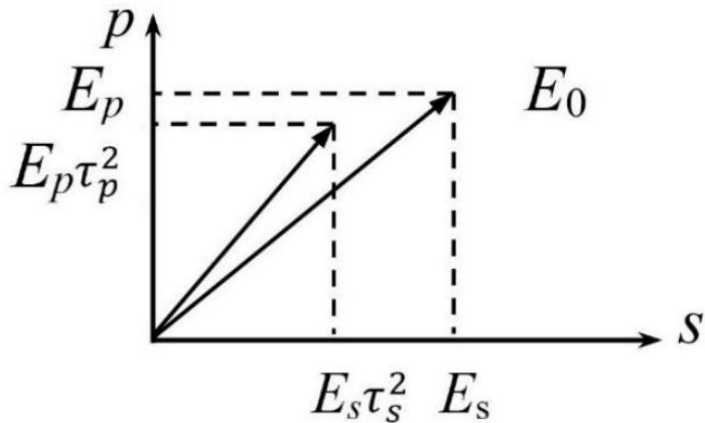


Рис. 3. p - и s -компоненты вектора E_0

$$\alpha' = 45^\circ - \Delta\alpha. \quad (14)$$

В реальном эксперименте, как будет указано ниже, этот угол оценивается путем малых приближений.

Экспериментальная установка

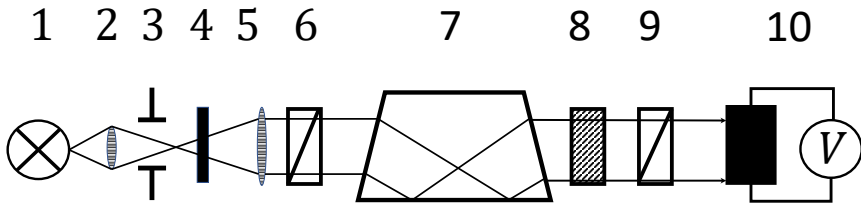


Рис. 4. Схема установки для изучения поляризационных свойств стеклянной призмы: 1 - светодиодный источник, 2 - линза 50мм, 3 - диафрагма, 4 - интерференционный светофильтр, 5 - линза 100мм, 6 - поляризатор, 7 - призма Дове, 8 - пластинка $\lambda/4$, 9 - анализатор, 10 - фотодетектор

Проведение измерений

1. Научиться выставлять плоскости поляризации поляризатора и анализатора.
2. Исследовать зависимость вида эллипса поляризации света, прошедшего пластинку $\lambda/4$, от азимута поляризации при $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 90^\circ$.
3. Исследовать зависимость вида эллипса поляризации света, прошедшего призму Дове, от азимута поляризации при $\alpha = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 90^\circ$.
4. Пользуясь методом Сенармона, измерить разность фаз, возникающую при полном внутреннем отражении в призме. Оценить вносимый призмой поворот плоскости поляризации.
5. Рассчитать степень поляризации в прошедшем призму свете при ее освещении естественным светом.
6. Рассчитать разность фаз при полном внутреннем отражении в призме, вносимый ею поворот плоскости поляризации и сопоставить их с экспериментальными данными.

Указания к выполнению работы

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки, приведенной на рисунке 4.
 - 1.1 Установить систему линз 2,5 в положение, которое позволяет получить параллельный пучок света. Проконтролировать изображение светящейся области источника на расстоянии многократного превышения величины фокусного расстояния.
 - 1.2 Закрепить на рельсе держатель с ирисовой диафрагмой 3.
 - 1.3 Установить поляризатор 6 и анализатор 9 на рельс после осветительной системы (источник излучения - конденсор ирисовая диафрагма).
 - 1.4 Вручную подобрать размер ирисовой диафрагмы для получения пучка света диаметром, совпадающем со световым диаметром поляризатора.
 - 1.5 Выставить поляризатор 6 в положение, которое позволяет получить свет, плоскость поляризации которого ориентирована вертикально относительно оптической оси. Для этого установить поляризатор в положение $\alpha = 0^\circ$ по шкале лимба.
 - 1.6 Вращая анализатор из положения $\psi = 0^\circ$ по шкале лимба добиться максимального гашения света и снять отсчет по лимбу. Наблюдение выполняется визуально или при помощи экрана. В этом случае плоскости поляризации поляризатора и анализатора будут выставлены соответственно вертикально и горизонтально.

2. Исследование по п.2 задания выполняется путем качественной оценки изменения вида эллипса поляризации по положению его большой оси и визуальной оценке яркости светового поля при расположении плоскости поляризации анализатора по осям эллипса (максимальное просветление и максимальное затемнение поля зрения). Результаты наблюдений фиксируются в Таблице №1.

2.1 Пластинку $\lambda/4$ установить между скрещенными поляризатором и анализатором. Наблюдать просветление светового поля. Поворачивая пластинку вокруг оси, необходимо добиться темноты, то есть полного гашения света. Отсчет по лимбу поляризатора в таком случае принимается за $\alpha = 0^\circ$. Угол поворота анализатора $\psi = 90^\circ$.

2.2 Далее устанавливается следующий угол азимута поляризации ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) и наблюдается просветление поля, а затем путем поворота анализатора, добиваясь максимального гашения света, находится положение большой оси эллипса. Отсчет, снимаемый по шкале лимба анализатора, записывается в Таблицу № 1.

Визуально ориентировочно оценивается изменение яркости поля при повороте анализатора из найденного положения на 90° . В отчете по работе необходимо схематично изобразить положение осей эллипсов поляризации для разных углов азимута поляризации.

2.3 По окончании эксперимента пластинку $\lambda/4$ необходимо убрать из оптической схемы.

3. Исследования по п.3 выполняются с использованием призмы Дове 7. Для этого необходимо ознакомиться с ее конструкцией и характеристиками.
- 3.1 Выставить плоскость поляризатора 6 вертикально, а анализатора 9 - в скрещенное положение.
- 3.2 Установить между поляризатором и анализатором призму Дове 7 и проконтролировать прохождение пучка света через оптические элементы.
- 3.3 Произвести исследования аналогично п.2 указаний. Результаты отсчета по лимбу анализатора записать в Таблицу № 2.
- 3.4 Убрать из схемы эксперимента призму Дове 7.
- 3.5 Выставить положения поляризатора 6 и анализатора 9 в скрещенное положение, как указано в п.1. При этом установить поляризатор 6 под углом 45° к вертикальной плоскости, а анализатор - в положение гашения света. Снять отсчеты по лимбам поляризатора (азимут поляризации α) и анализатора (угол ψ).
- 3.6 Ввести в ход лучей пластинку $\lambda/4$, расположив ее на некотором расстоянии от анализатора, как показано в схеме на рисунке 4.. Наблюдать просветление поля.
- 3.7 Вращая пластинку $\lambda/4$, добиться максимального гашения света. В этом случае главные направления кристаллической пластинки будут совпадать с плоскостями поляризации поляризатора и ориентированы под углом 45° к вертикальной плоскости.
- 3.8 Установить призму Дове 7, как показано на рисунке 4. Наблюдать просветление поля зрения. Последова-

тельными поворотами пластинки $\lambda/4$ и анализатора добиться максимального гашения света, после чего снять отсчеты по лимбам пластинки $\lambda/4$ и анализатора.

- 3.9 Разность отсчетов по лимбу пластинки $\Delta\alpha$, полученная после компенсации просветления в поле зрения, вносимой призмой Дове, определит угол, характеризующий степень поляризации светового пучка. Полученную величину необходимо сравнить с расчетной величиной.
- 3.10 Разность аналогичных отсчетов по лимбу анализатора есть полуразность фаз между параллельной и перпендикулярной составляющими электрического вектора, прошедшего через призму светового пучка. Сравнить полученное значение разности фаз с расчетным значением.

Обработка результатов

1. Используя данные рисунка 1, вычислить углы падения и преломления i_1 и i_2 , а также угол падения на основание призмы φ .
2. С помощью выражений (1) и (2) вычислить теоретическую степень поляризации, вносимую призмой.
3. Рассчитать угол поворота плоскости поляризации α по формуле (11) и степень поляризации, измеренную в ходе эксперимента, используя соотношение

$$P_{\text{эксп.}} = \frac{E'_p}{E'_s} = \frac{(\operatorname{tg}(45^\circ - \Delta\alpha) - 1)}{(\operatorname{tg}(45^\circ - \Delta\alpha) + 1)}.$$

4. Сравнивать теоретическую и экспериментальную степени поляризации.
5. Оценить теоретическую разность фаз δ , используя формулу (4) и сравнить ее значение с экспериментальной величиной, согласно формуле (10).

Контрольные вопросы

1. Объясните принципы анализа состояния поляризации света.
2. Поясните причины, из-за которых происходит изменение состояния поляризации и фазы световой волны, прошедшей через призму Дове.
3. Объясните принцип действия пластинки $\lambda/4$.
4. Какова зависимость вида поляризации света, прошедшего через пластинку $\lambda/4$, от азимута α ?
5. Поясните основные параметры эллипса поляризации.
6. Какие приборы для измерения состояния поляризации вам известны?

Приложение

Таблица 1: Исследование вида поляризации света, прошедшего через пластинку $\lambda/4$

№	Азимут поляризации	Угол поворота анализатора	Комментарий
1	$\alpha = 0^\circ$	$\psi = 90^\circ$	Поляризатор и анализатор скрещены. Темное поле Минимум напряжения на вольтметре
2	$\alpha = 0^\circ$	$\psi = 90^\circ$	Установка $\lambda/4$. Увеличение напряжения на вольтметре.
	$\alpha = 0^\circ$		Темное поле. Минимум напряжения
3	$\alpha = 15^\circ$		
4	$\alpha = 30^\circ$		
5	$\alpha = 45^\circ$		
6	$\alpha = 60^\circ$		
7	$\alpha = 75^\circ$		
8	$\alpha = 90^\circ$		

Таблица 2: Исследование вида поляризации света, прошедшего через призму Дове

№	Азимут поляризации	Угол поворота анализатора	Комментарий
1	$\alpha = 0^\circ$	$\psi = 90^\circ$	Поляризатор и анализатор скрещены. Темное поле Минимум напряжения на вольтметре
2	$\alpha = 0^\circ$	$\psi = 90^\circ$	Установка призмы Дове.
	$\alpha = 0^\circ$		Темное поле. Минимум напряжения
3	$\alpha = 25^\circ$		
4	$\alpha = 45^\circ$		
5	$\alpha = 65^\circ$		
6	$\alpha = 90^\circ$		