

Лабораторная работа 4.09

Исследование поляризации света (стопа Столетова)

Цель работы

Изучение поляризованного света и определение показателей преломления

Приборы и принадлежности

Оптическая скамья, экран, фоторезистор, осветитель с источником питания ИП-1, прибор для измерения фототока, стопа пласти с фоторезистором (стопа Столетова), держатель поляроида, поляроиды, черное зеркало с фоторезистором

Теория эксперимента

Свет - это **поперечная электромагнитная волна**, в которой колебания вектора напряженности электрического поля E и вектора магнитной индукции B и перпендикулярны направлению распространения волны. При рассмотрении взаимодействия света с веществом, основную роль играем вектор напряженности электрического поля E , поэтому его называют **световым вектором**.

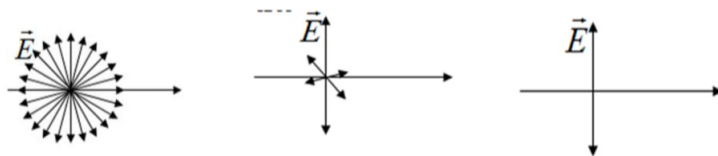


Рис. 1

Поляризация света - это свойство света, проявляющееся в пространственно временной упорядоченности ориентации электрического и магнитного векторов процесс получения поляризованного света. Атомы излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, которая излучается объектом в целом, может характеризоваться всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора E . Такой свет называется **естественным**.

Свет, в котором направление колебаний светового вектора каким-то образом упорядочено, называется **поляризованным**. Если в результате каких-то внешних воздействий появляется преимущественное, но не единственное направление колебаний вектора E , то такой свет называют **частично поляризованным**.

Свет, в котором вектор E колеблется только в одном выделенном направлении, перпендикулярном лучу, называется **линейно поляризованным**. Существует так же эллиптическая поляризация, когда конец светового вектора описывает эллипс, и как ее частный случай - круговая поляризация, которая в свою очередь разделяется на левую и правую (конец светового вектора описывает окружность).

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны, называется **плоскостью поляризации**.

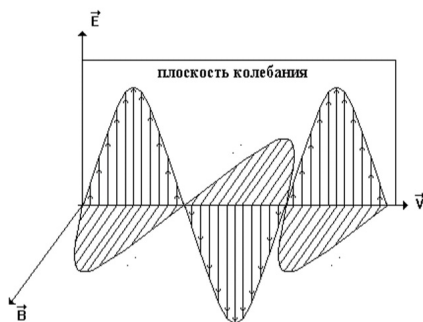


Рис. 2

Естественный свет можно превратить в плоскополяризованный с помощью устройства, которое называют **поляризатором**.

Для получения линейно поляризованного света используют поляризаторы, основанные на использовании одного из трех физических явлений: двойного лучепреломления, дихроизма или поляризации при отражении от поверхности раздела двух сред. В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора E , например, кристаллы. Из природных кристаллов, используемых в качестве поляризатора, следует отметить **турмалин**.

Закон Малюса

Рассмотрим естественный свет, прошедший через поляризатор P .

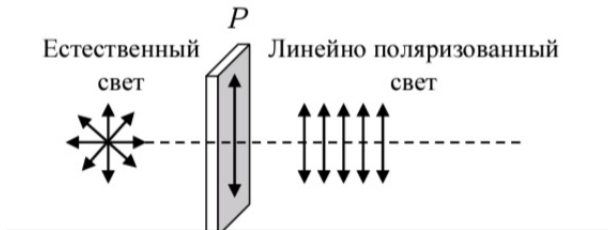


Рис. 3

После поляризатора свет будет поляризован в направлении оси пропускания поляризатора.

Пусть ось пропускания поляризатора OO' параллельна оси y . Колебания светового вектора можно разложить на две перпендикулярные составляющие E_x и E_y :

$$E_x = E \sin \phi \quad E_y = E_{OO'} = E \cos \phi \quad (1)$$

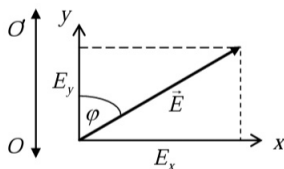


Рис. 4

Через поляризатор пройдет составляющая вектора напряженности электрического поля, параллельная оси пропускания поляризатора - E_y . Таким образом естественный свет после прохождения через поляризатор станет поляризованным. Поставим за поляризатором еще один поляризатор (анализатор A), и с его помощью проанализируем интенсивность прошедшего света. Пусть ось пропускания анализатора повернута относительно оси пропускания поляризатора на угол ϕ . Тогда через поляризатор пройдет только составляющая вектора напряженности, параллельная оси OO' .

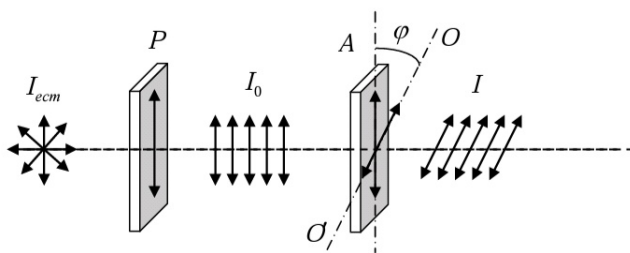


Рис. 5

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды. Обозначим интенсивность поляризованного света (после первого поляризатора) I_0

$$I_0 \sim E^2 \quad (2)$$

интенсивность после анализатора I

$$I \sim E_y^2 \quad (3)$$

С помощью уравнения (1) можно найти соотношение, связывающее интенсивность падающего на поляризатор поляризованного света I_0 с интенсивностью прошедшего света

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

где ϕ - угол между направлениями пропускания поляризатора и направлением колебаний светового вектора, падающего поляризованного света. Уравнение (4) называется **законом Малюса**. Интенсивность поляризованного света, прошедшего через поляризатор I_0 связана с интенсивностью падающего естественного света соотношением

$$I_0 = \frac{1}{2} I \quad (5)$$

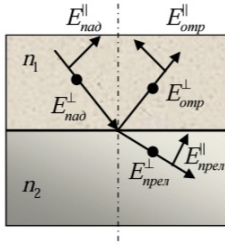
В естественном свете вектора напряженности направлены во все стороны, поэтому среднее значение $\langle \cos^2 \phi \rangle = \frac{1}{2}$

Таким образом, интенсивность света полученного на выходе из анализатора I связана с интенсивностью падающего естественного света соотношением

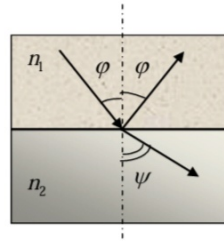
$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \phi \quad (6)$$

Закон Брюстера

Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Устанавливая на пути отражённого и преломлённого лучей анализатор (например, турмалин), убеждаемся в том, что отражённые и преломлённые лучи частично поляризованы: при поворачивании анализатора вокруг лучей интенсивность света периодически усиливается и ослабевает (полностью гашения не наблюдается!).



а) Направление колебаний векторов напряженности



б) Ход луча на границе двух сред

Количественные соотношения между интенсивностями падающего, отраженного и прошедшего света можно получить из граничных условий для напряженностей электрического и магнитного полей на границе раздела двух диэлектриков. Эти соотношения были получены Френелем и носят название **формул Френеля**:

$$E_{refl}^{\parallel} = E_{inc}^{\parallel} \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)}, \quad E_{refr}^{\parallel} = E_{inc}^{\parallel} \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)} \quad (7)$$

$$E_{refl}^{\perp} = -E_{inc}^{\perp} \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)}, \quad E_{refr}^{\perp} = E_{inc}^{\perp} \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (8)$$

Коэффициент отражения

$$R = \frac{I_{refl}}{I_{inc}}$$

Если учитывать, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, выразим коэффициенты отражения для продольной и поперечной составляющих

$$R^{\parallel} = \left(\frac{E_{refl}^{\parallel}}{E_{inc}^{\parallel}} \right)^2 = \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \psi)} \quad (9)$$

$$R^{\perp} = \left(\frac{E_{refl}^{\perp}}{E_{inc}^{\perp}} \right)^2 = \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} \quad (10)$$

Исследования показали, что в отражённом луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (на рисунке обозначено точками), в преломлённом – колебания, параллельные плоскости падения (стрелки).

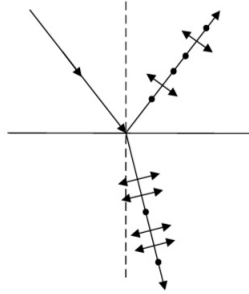


Рис. 6. Направление колебаний вектора напряженности в отраженном и преломленном свете

Степень поляризации света зависит от угла падения лучей и показателя преломления. Шотландский физик Д. Брюстер (1781-1868) установил закон, согласно которому при угле падения φ_{br} (угол Брюстера), определяемом соотношением:

$$\operatorname{tg} \varphi_{br} = n_{21} \quad (11)$$

где n_{21} – показатель преломления второй среды относительно первой, отражённый луч является плоскополяризованным (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения).

Преломлённый же луч, при угле падения φ_{br} поляризуется максимально, но не полностью. Если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны.

$$\operatorname{tg} \varphi_{br} = \frac{\sin \varphi_{br}}{\cos \varphi_{br}} \quad n_{21} = \frac{\sin \varphi_{br}}{\sin \psi} \quad (12)$$

где ψ угол преломления, откуда $\cos \varphi_{br} = \sin \psi$. Следовательно

$$\varphi_{br} + \psi = \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

но $\varphi'_{br} = \varphi_{br}$ (закон отражения), поэтому

$$\varphi'_{br} + \psi = \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

Это можно увидеть подставив выражение (13) в (9). Нулевой коэффициент отражения ($R^{\parallel} = 0$) означает, что в отраженном свете присутствует только составляющая перпендикулярная плоскости падения, то есть отраженный луч полностью поляризован.

Степень поляризации преломленного света может быть значительно повышена многократным преломлением при условии падения света каждый раз на границу раздела под углом Брюстера. Если, например, для стекла $n = 1,53$) степень поляризации преломленного луча составляет $\approx 15\%$, то после преломления на 8-10 наложенных друг на друга стеклянных пластинках, вышедший из такой системы свет будет практически полностью поляризованным. Такая совокупность пластинок называется стопой Столетова. Стопа может служить для анализа поляризованного света как при его отражении, так и при его преломлении.

Описание установки

Установку собирают на оптической скамье (рис 8). На одном конце скамьи 1 помещают источник света 2 (лампу накаливания), подключаемый к регулируемому источнику напряжения, который позволяет плавно изменять яркость источника света.

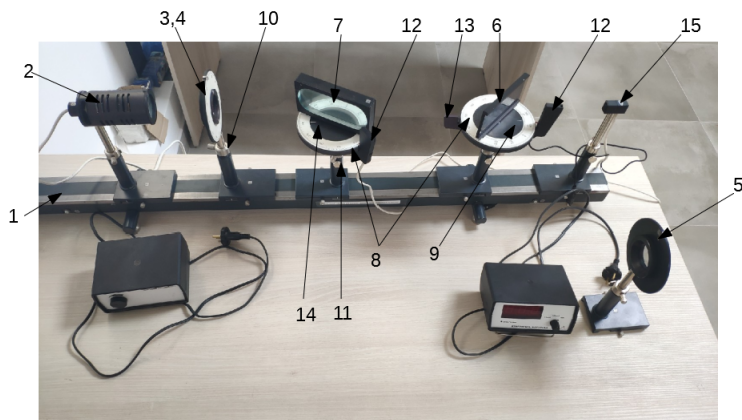


Рис. 7. Схема лабораторной установки

В качестве поляризатора используют поляроид 3, заключённый в оправу с лимбом 4 для отсчёта угла поляроида вокруг горизонтальной оси. В качестве анализатора в разных упражнениях используют такой же поляроид 5 или чёрное зеркало 6, или стопу Столетова 7. Чёрное зеркало и стопа пластин укреплены на внешней части горизонтального столика, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси и неподвижной центральной части столика. Поворот осуществляют посредством рифленого кольца 8 на боковой поверхности столика. Центральная часть 9 столика установлена на стойке 10 рейтера и может быть закреплена в нём при помощи зажимного винта 11.

Для измерения интенсивности отражённого от чёрного зеркала (стопы) или прошедшего через стопу света используются фоторезисторы 12, укрепленные на кронштейнах 13, которые независимо от столика также могут поворачиваться вокруг вертикальной оси. Углы поворота чёрного зеркала (стопы) и фоторезистора отсчитываются с помощью лимба 14 столика с ценой деления шкалы 10.

Для измерения интенсивности света, прошедшего через поляроиды, используется фоторезистор 15, укрепленный на отдельном рейтере. Используемый в процессе измерения фоторезистор подключают к фоторегистрирующему устройству, которое соединено с шунтами для переключения диапазона измерений тока.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Изучение закона Малюса

1. Устанавливают на оптической скамье приборы в следующей последовательности: источник света, два рейтера с поляроидами и рейтер с фоторезистором. Первый поляроид является поляризатором, второй - анализатором.
2. Сдвигают приборы до минимально возможного расстояния между ними и регулируют их по высоте так, чтобы центры выходного окна осветителя, поляроидов и тубуса фоторезистора располагались на одной горизонтальной прямой, параллельной оптической скамье. Плоскости выходного окна осветителя, поляроидов и фоторезистора должны быть перпендикулярны к оптической скамье.
3. Увеличивают расстояние между осветителем и фоторезистором до 80-100 см. Поляроиды устанавливают между ними произвольно. Стрелку на оправе анализатора совмещают с нулём шкалы.
4. Подключают источник света к регулятору напряжения, а фоторезистор к фоторегистрирующему устройству. Регулятор напряжения и фоторегистрирующее устройство подсоединяют к сети с напряжением 220 В.

5. Замыкают цепь источника света нажатием кнопки «сеть» на панели регулятора напряжения. Вращением ручки на панели прибора регулируют яркость источника.
6. Включают в измерительную цепь фоторезистор нажатием кнопки «сеть» на панели фоторегистрирующего устройства. Масштаб шкалы фоторегистрирующего устройства устанавливают поворотом ручки переключения диапазонов на панели. В процессе измерения следят за тем, чтобы показания прибора не выходили за пределы установленного диапазона. При перегрузке загорается светодиод «перегрузка».
7. Вращая поляризатор, добиваются максимальной величины интенсивности света, прошедшего через оба поляроида. Этому соответствует максимальная величина фототока i_{max} измеряемого фоторегистрирующим устройством.
8. Устанавливают шкалу фоторегистрирующего устройства так, чтобы при максимальном фототоке i_{max} показания прибора находились в пределах установленного диапазона. Если необходимо, ещё раз регулируют яркость источника света и перемещают фоторезистор вдоль оптической скамьи.
9. Поворачивают анализатор в пределах от 0° до 180° и через каждые 10° отмечают показания фототока I . Поляризатор должен находиться в положении "0". Заполняют таблицу 1.

Таблица 1

Угол поворота α	$\cos \alpha$	$x = \cos^2 \alpha$	Фототок I (мкА)

10. Выключают источник света и фоторегистрирующее устройство нажатием кнопки «сеть» на панели прибора.

11. Строят график фототока I от $x = \cos^2(\alpha)$

Упражнение 2. Исследование отражения поляризованного и естественного света от границы диэлектрика. Определение показателя преломления диэлектрика по углу Брюстера.

Выполняется студентами ФТФ. В остальных случаях на усмотрение преподавателя

1. На оптической скамье устанавливают осветитель, поляроид и чёрное зеркало.
2. Юстируют приборы так, чтобы центры выходного окна осветителя, поляроида и тубуса фоторезистора располагались на одной высоте. Плоскость выходного окна осветителя и поляроида должны быть перпендикулярны к оптической скамье.
3. Подключают фоторезистор чёрного зеркала к фоторегистрирующему устройству.
4. Включают в сеть источник света и фоторегистрирующее устройство нажатием кнопок «сеть» на панели приборов.
5. Освободив зажимный винт 11 на стойке рейтера со столиком и чёрным зеркалом, поворачивают столик так, чтобы метка на центральной части столика указывала направление падающего луча. Установив таким образом столик, фиксируют его положение зажимным винтом 11 на стойке рейтера. При совмещении нуля на лимбе с меткой на столике, падение луча на чёрное зеркало будет нормальным.
6. Поворотом вокруг вертикальной оси устанавливают чёрное зеркало так, чтобы луч света скользил вдоль чёрного зеркала, при этом угол падения луча на зеркале равен 90° . Поворачивают кронштейн с фоторезистором и устанавливают его так, чтобы скользящий вдоль чёрного зеркала луч попадал на фоторезистор. При этом показание фоторегистрирующего

устройства будет максимальным и не будет зависеть от угла поворота поляроида. Записывают это показание фоторегистрирующего устройства i_0 , пропорциональное интенсивности света, выходящего из поляроида.

7. Устанавливают чёрное зеркало так, чтобы падающий на него луч света составлял угол $\phi = 80^\circ$ с нормалью к его поверхности. При этом деление лимба, равное 80° , должно находиться против метки на столике. Поворачивают кронштейн с фоторезистором и устанавливают его так, чтобы указатель на кронштейне фоторезистора находился против деления лимбы, соответствующего углу $\phi = 80^\circ$ по другую сторону от 0° (помнить, что угол отражения равен углу падения).
8. Установить показания поляроида $\alpha = 0^\circ$. Записать величину фототока i_p .
9. Прodelывают п.п. 7 и 8 для углов падения ϕ в интервале от 80° до 5° через каждые 5° . По окончании измерений выключают осветитель и фоторегистрирующее устройство с помощью кнопок «сеть» на панели приборов. Заполняют таблицу 2.

Таблица 2

Угол падения $\phi, ^\circ$	Угол поворота анализатора $\alpha, ^\circ$	$i, \text{ мкА}$	Коэффициент отражения $\rho_p = i_p/i_0$

10. Строят график зависимости коэффициента p –компоненты поляризованного света $\rho_p = \frac{i_p}{i_0}$ от ϕ и по графику находят угол падения ϕ_{br} , при котором интенсивность отраженного света будет минимальной.

11. По формуле (11) определяют показатель преломления материала n из которого изготовлено стекло.
12. Поворачивают поляроид в положение $\alpha = 0^\circ$. В интервале углов падения луча $\phi = 10^\circ \dots 80^\circ$ через каждые 10° снимают зависимость фототока i_s , соответствующего отражённой от чёрного зеркала. По окончании измерений приборы выключают. Для всех углов φ вычисляют коэффициент отражения $\rho_s = \frac{i_s}{i_0}$. Данные заносят в таблицу 3. Строят график зависимости ρ_s от φ .

Таблица 3

Угол падения $\varphi, ^\circ$	Фототок i_s (мкА)	Коэффициент отражения $\rho_s = i_s/i_0$

13. Убирают поляроид и исследуют зависимость коэффициента отражения естественного света $\rho_e = i_e/i_{0e}$ от чёрного зеркала в интервале углов падения $\varphi = 10^\circ \dots 80^\circ$ через каждые 10° . Ток i_{0e} соответствует интенсивности естественного света, падающего на чёрное зеркало и определяется как и ток i_0 в п.б. но без поляроида. При измерениях пользуются шунтами фоторегистрирующего устройства и следят за тем, чтобы показания прибора не выходили за пределы диапазона. По окончании измерений приборы выключают. По данным измерениям заполняют таблицу 4. Строят график зависимости коэффициента отражения естественного света ρ_e от угла падения φ .

Таблица 4

Угол падения $\varphi, ^\circ$	Фототок i_e (мкА)	Коэффициент отражения $\rho_e = i_e/i_{0e}$

Упражнение 3. Изучение поляризованного света с помощью стопы Столетова.

1. На оптической скамье устанавливают осветитель, поляроид и стопу Столетова. Приборы юстируются так же как и в упражнении 2.
2. Подключают фоторезистор, установленный на столике вместе со стопой Столетова, к фоторегистрирующему устройству. Включают в сеть осветитель и фоторегистрирующее устройство нажатием кнопок «сеть» на панели приборов.
3. Устанавливают на шкале поляризатора $\alpha = 90^\circ$.
4. Поворачивая стопу Столетова вокруг вертикальной оси, устанавливают её так, чтобы падающий из поляризатора луч света составлял угол $\varphi = 5^\circ$ с нормалью к поверхности стопы.
5. Поворачивают кронштейн с фоторезистором так, чтобы отражённый свет (угол падения равен углу отражения) попадал в фоторезистор. Определяют по фоторегистрирующему устройству фототок интенсивности отраженного луча $i_{\text{отр}}^{(p)}$ и заносят это показание в таблицу 5.
6. При том же угле падения $\varphi = 5^\circ$ поворачивают кронштейн с фоторезистором так, чтобы прошедший через стопу свет попадал на фоторезистор. Определяют по фоторегистрирующему устройству фототок интенсивности преломленного луча $i_{\text{пр}}^{(p)}$ и заносят это значение в таблицу 5.
7. Прodelьвают п.п. 4,5 и 6 для $\varphi = 10^\circ, 15^\circ \dots 85^\circ$ и заполняют таблицу 5.
8. Устанавливают на шкале поляризатора угол $\alpha = \alpha_{av} + 90^\circ$.
9. Прodelьвают п.п. 4,5,6 и 7 для этого случая, измеряя $i_{\text{отр}}^{(s)}$ и $i_{\text{пр}}^{(s)}$.

10. Отключают осветитель и фоторегистрирующее устройство от сети.
11. По данным таблицы 5 строят графики зависимости $i_{\text{отр}}^{(p)}$ и $i_{\text{пр}}^{(p)}$ от угла падения φ для р - компоненты поляризованного света, а также графики зависимости $i_{\text{отр}}^{(s)}$ и $i_{\text{пр}}^{(s)}$ от угла падения φ для s - компоненты поляризованного света.
12. По полученным графикам находят $\text{tg } \varphi_{Br}$ и определяют показатель преломления материала n из которого изготовлено стекло.

Таблица 5

Угол па- дения φ , °	Фототок $i_{\text{пр}}^{(p)}$, мкА	Фототок $i_{\text{отр}}^{(p)}$, мкА	Фототок $i_{\text{пр}}^{(s)}$, мкА	Фототок $i_{\text{отр}}^{(s)}$, мкА

Контрольные вопросы

1. Что такое свет?
2. Дайте определение поляризации света
3. Перечислите типы поляризации света (дайте им определения)
4. Что называют плоскостью поляризации?
5. В чем заключается закон Малюса? Напишите формулу и поясните
6. Как можно изменить поляризацию?
7. На основании каких физических явлений основаны поляризаторы для получения линейно поляризованного света?
7. При каком условии отраженный от поверхности раздела двух сред луч является плоскополяризованным?
8. Как может быть повышена степень поляризации преломленного света?
9. Напишите формулу, связывающую угол Брюстера и относительный показатель преломления