

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 14
Проверка закона Малюса
и изучение эллиптически
поляризованного света

Ярославль
2013

Оглавление

1.	Вопросы для подготовки к работе	3
2.	Краткая теория	3
3.	Описание установки	9
4.	Порядок выполнения работы	10
	Задание 1.	10
	Задание 2.	10
	Задание 3.	11
5.	Контрольные вопросы	12

Составители: В.К. Мухин, старший преподаватель кафедры общей физики
Г.В. Жусь, кандидат технических наук, доцент кафедры
общей физики

Лабораторная работа № 14

Проверка закона Малюса и изучение эллиптически поляризованного света

Цель работы: получение и графическое исследование плоскополяризованного и эллиптически поляризованного света.

Приборы и принадлежности: фонарь с оптической скамьей, светофильтр, два поляроида, одноосная двоякопреломляющая пластинка, полупроводниковый фотоэлемент, микроамперметр.

Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1971. – Т.3.

1. Вопросы для подготовки к работе

1. Какой свет называют поляризованным (плоскополяризованным, эллиптически поляризованным, кругополяризованным)?
2. Способы получения плоскополяризованного света. Закон Малюса.
3. Получение света поляризованного по эллипсу и по кругу.

2. Краткая теория

Свет, согласно электромагнитной теории, представляет собой поперечные электромагнитные волны, частота которых лежит в пределах от $0,75 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ до $0,43 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$. Плоскую электромагнитную волну можно наглядно представить, изобразив картину поля векторами \vec{E} — напряженности электрического поля и \vec{B} — индукции магнитного поля в некоторый момент времени t (рис. 2.1).

Вектора \vec{E} и \vec{B} всегда перпендикулярны друг другу и с направлением распространения волны образуют правовинтовую систему. При этом крест векторов \vec{E} и \vec{B} может располагаться произвольным образом в плоскости xOz , перпендикулярной распространению волны.

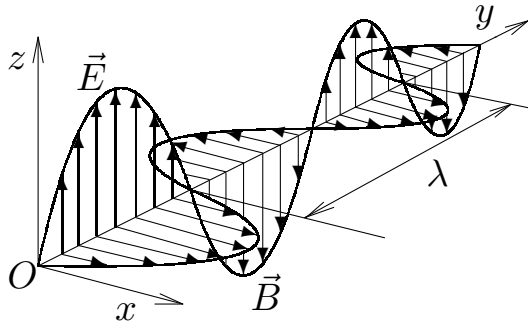


Рис. 2.1

При взаимодействии электромагнитной волны с веществом основную роль играет электрическое поле, поэтому в дальнейшем мы будем говорить только о колебаниях вектора \vec{E} .

Свет, испускаемый различными источниками (Солнце, лампы накаливания и т.д.) представляет собой совокупность цугов электро-

магнитных волн, излучаемых отдельными атомами. Плоскость колебаний вектора \vec{E} для каждого цуга произвольна и, следовательно, такая волна имеет всевозможные ориентации вектора \vec{E} . Такой свет называется естественным.

Если в световой волне вектор \vec{E} колеблется в одной единственной плоскости, то такой свет называется **плоскополяризованным**.

Если конец электрического вектора \vec{E} описывает круг или эллипс, то свет называется **поляризованным по кругу или по эллипсу**.

Плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} , называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость, в которой колеблется вектор \vec{B} , называется **плоскостью поляризации**.

Примечание. По новой терминологии плоскополяризованная волна характеризуется только плоскостью поляризации, под которой понимается плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} (по-старому это “плоскость колебаний”). В литературе, в том числе и новой, часто еще используется старая терминология, поэтому перед чтением книги по этой теме следует разобраться в терминах.

Рассмотрим некоторые способы получения плоскополяризованного света.

Отраженный от диэлектрика свет всегда частично поляризован. Степень поляризации отраженного луча всегда зависит от i – угла падения (рис. 2.2). Полная поляризация света в отраженном луче достигается при угле падения

$$i = \operatorname{arctg} n_{21}, \quad (2.1)$$

где n_2 – относительный показатель преломления диэлектрика.

2. Краткая теория

Этот угол называется углом Брюстера. Вектор \vec{E} в отраженном луче колеблется в плоскости; перпендикулярной плоскости падения луча (схематически на рис. 2.2 он изображен точками). При этом преломленный луч будет частично поляризован. Вектор \vec{E} в этом луче имеет преимущественное направление колебаний в плоскости падения луча (схематически на рис. 2.2 он показан стрелками и точками). Доля поляризованного света в преломленном луче невелика (порядка 0,1 от интенсивности падающего света). Для увеличения степени поляризации преломленного луча используют несколько слоев пластин диэлектрика (сток, стеклянных пластин). При большом числе пластин можно получить преломленный луч полностью поляризованным (рис. 2.3). Колебания вектора \vec{E} в этом луче лежат в плоскости падения луча.

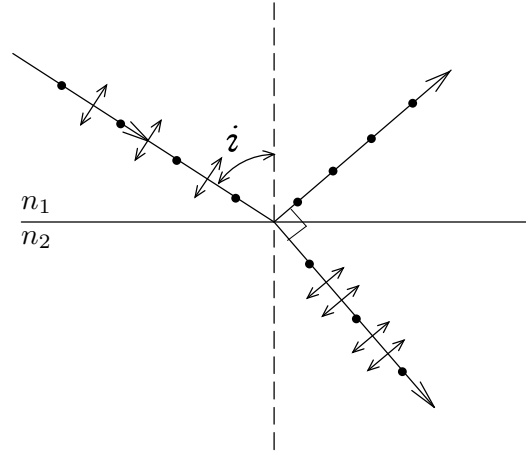


Рис. 2.2

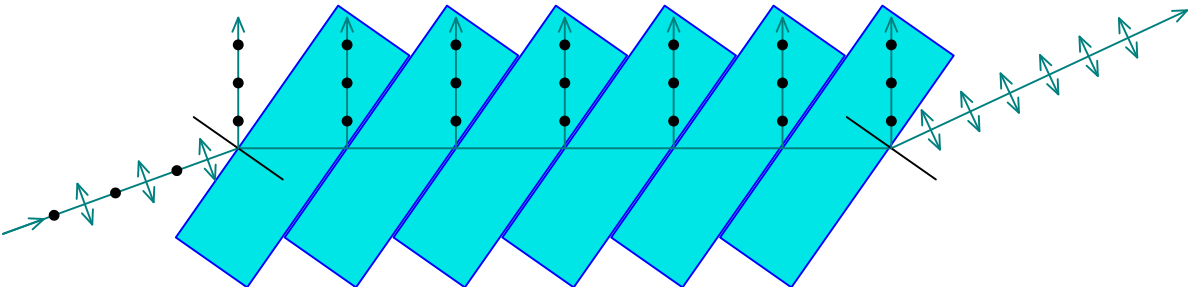


Рис. 2.3

При прохождении света через кристаллы некоторых веществ за счет анизотропии их оптических свойств наблюдается двойное лучепреломление — световой луч разделяется на два. Один из лучей подчиняется закону преломления света $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, и его называют обыкновенным лучом (*o* - луч). Для другого луча отношение $\frac{\sin i}{\sin r}$ не остается постоянным при изменении угла падения луча. Этот луч называют необыкновенным (*e* - луч на рис. 2.4). Даже при нормальном падении света на такой кристалл необыкновенный луч отклоняется от первоначального направления. Если вращать кристалл вокруг оси, параллельной падающему лучу, то обыкновенный луч остается

на месте, а необыкновенный описывает окружность в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света. Эти два луча поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Колебания вектора \vec{E} в e -луче совпадают с плоскостью падения света, а в o -луче перпендикулярны плоскости падения света.

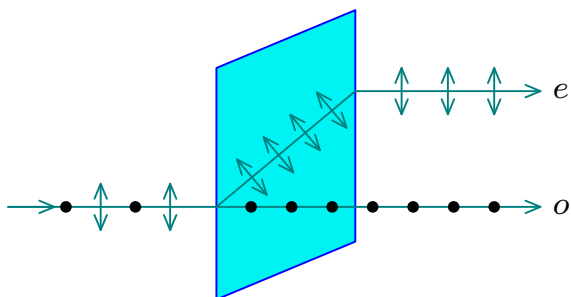


Рис. 2.4

Обыкновенный и необыкновенный лучи могут погашаться некоторыми кристаллами в неодинаковой степени. Это явление называется дихроизмом. Дихроизм кристаллов может быть настолько велик, что в сравнительно тонких кристаллических пленках один из лучей практически полностью поглощается. Это свойство кристаллов позволяет сделать тонкие дихроические пластинки из кристаллов, ориентированных определенным образом, – поляроиды. Свет, падающий на поляроид, поляризуется в некоторой плоскости — плоскости пропускания поляроида. (Используют и другие эквивалентные термины: главная плоскость, главное направление, разрешенное направление и др.)

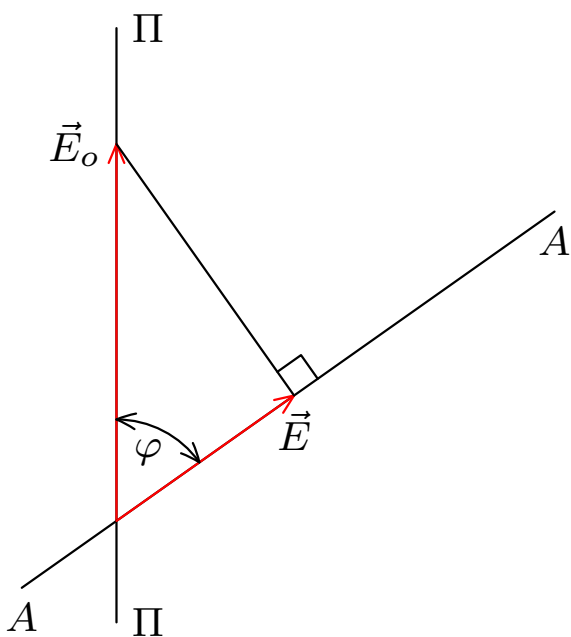


Рис. 2.5

плоскостью рисунка.

Глаз человека не может отличить естественный свет от поляризованного. Чтобы обнаружить поляризованный свет, его необходимо пропустить **через устройство, плоскополяризующее световой луч**. Такое устройство называется **анализатором**. Анализатор действует следующим образом. Пусть на него падает поляризованный свет (рис.2.5), $\Pi\Pi$ — сечение плоскости колебаний вектора \vec{E} плоскостью рисунка. \vec{E}_0 — вектор амплитуды этих колебаний. AA — сечение плоскости пропускания анализатора

плоскостью рисунка.

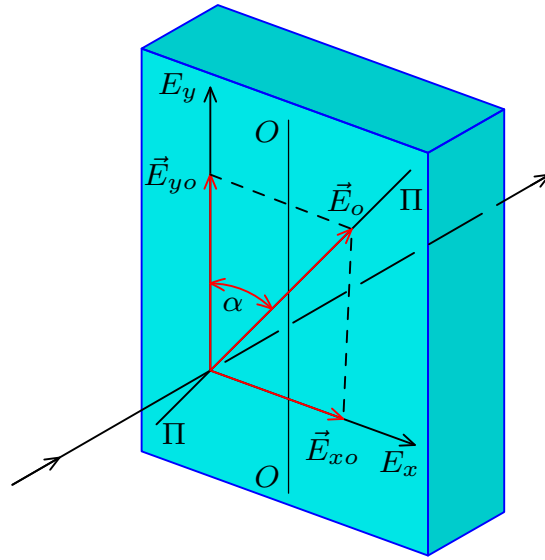


Рис. 2.6

Через анализатор пройдут колебания, амплитуда которых равна

$$E = E_o \cos \varphi .$$

Возведя обе части в квадрат, получим соотношение для интенсивностей

$$J = J_o \cos^2 \varphi ,$$

где J_o — интенсивность света, падающего на анализатор,
 J — интенсивность света, вышедшего из анализатора.

Этот закон носит название закона Малюса.

При изменении угла (вращении поляризатора или анализатора) интенсивность света, вышедшего из анализатора, меняется от $J = J_o$ при $\varphi = 0$ (максимальная интенсивность, плоскости пропускания поляризатора и анализатора параллельны) до $J = 0$ при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (минимальная интенсивность, плоскости пропускания поляризатора и анализатора перпендикулярны).

Таким образом, если на анализатор падает полностью или частично поляризованный свет, то при вращении анализатора интенсивность J света меняется. Полное погасание светового луча может быть только у полностью плоскополяризованного света.

Эллиптически поляризованный свет получается в результате сложения двух когерентных световых волн, имеющих разные амплитуды, некоторую разность фаз и поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для этого плоскополяризованный свет направляют на двоякопреломляющую пластину из одноосного кристалла (кварц, исландский шпат, турмалин) так, чтобы направление колебание вектора \vec{E}_o плоскополяризованного света составляло некоторый угол α с OO — главным направлением кристаллической пластинки (направлением, в котором лучи не претерпевают двойного лучепреломления, т.е. распространяются с одинаковой скоростью (рис. 2.6).

Сквозь пластинку будут распространяться в одном направлении, но с разной скоростью две волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях с амплитудами

$$E_{x_o} = E_o \sin \alpha \quad \text{и} \quad E_{y_o} = E_o \cos \alpha ,$$

где E_o — модуль вектора \vec{E}_o амплитуды волны, падающее на пластинку. Пройдя расстояние α (толщину пластинки), эти две волны приобретают разность хода

$$\Delta = dn_o - dn_e = d(n_o - n_e) ,$$

где n_o — показатель преломления обыкновенной волны,
 n_e — показатель преломления необыкновенной волны,
 что соответствует φ — разности фаз, равной

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d .$$

Обыкновенная волна отстает по фазе от необыкновенной.

Если сложить эти два взаимно перпендикулярных колебания, то получим колебание, при котором конец результирующего вектора описывает эллипс в плоскости волнового фронта с частотой сложенных колебаний.

Колебания волн, прошедших через пластинку, описываются уравнениями

$$E_x = E_{x_o} \cos(\omega t + \varphi) ; \quad E_y = E_{y_o} \cos \omega t .$$

Исключив время t из этих уравнений, получим траекторию, которую описывает конец вектора \vec{F}_o амплитуда результирующего колебания:

$$\frac{E_x^2}{E_{x_o}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y_o}^2} - \frac{2E_x E_y}{E_{x_o} E_{y_o}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi .$$

3. Описание установки

Это уравнении эллипса. Форма эллипса и ориентация его осей относительно x и y зависит от углов α и φ . При соответствующей толщине пластинки (разности хода) можно получить такую разность фаз φ , что большая и малая полуоси эллипса будут ориентированы вдоль осей x и y (вдоль главных направлений кристалла).

Это случай соответствует разности хода $\frac{\lambda}{4}$ или разности фаз $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Такая пластинка называется пластинкой в четверть длины волны. При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ уравнение эллипса принимает вид

$$\frac{E_x^2}{E_{xo}^2} + \frac{E_y^2}{E_{yo}^2} = 1.$$

Соотношение длин осей эллипса зависит от угла α . При $\alpha = 45^\circ \implies E_{xo} = E_{yo} = \sqrt{2}E_o$ эллипс обращается в круг. Получаем свет, поляризованные по кругу.

Если толщина пластинки такова, что

$$d(n_o - n_e) = \frac{\lambda}{2},$$

то $\varphi = \pi$, и эллипс вырождается в прямую

$$\frac{E_x}{E_{xo}} + \frac{E_y}{E_{yo}} = 0.$$

В этом случае свет остается линейно поляризованным, но направление колебаний изменяется на угол $(180^\circ - 2d)$.

3. Описание установки

Установка для исследования поляризованного света (рис.3.1) состоит из источника S , светофильтра $C\Phi$, поляризатора Π , двоякопреломляющей пластинки O , анализатора A и измерительного устройства Φ . Измерение интенсивности света производится измерительным устройством в условных единицах числа делений шкалы микроамперметра.

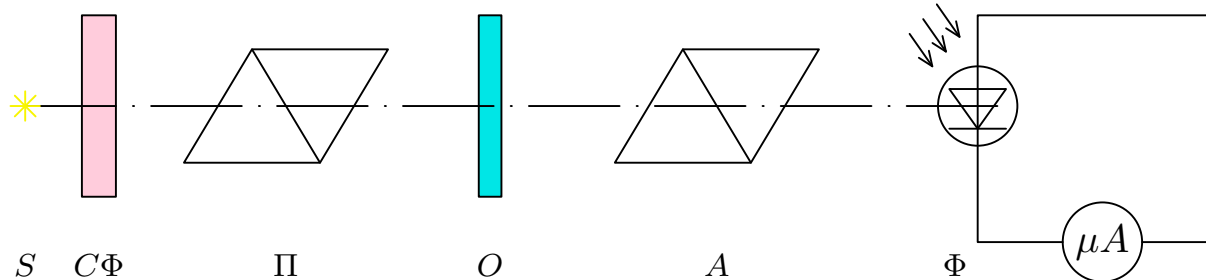


Рис. 3.1

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Знакомство с описанием и конструкцией экспериментальной установки.

Задание 2. Проверка закона Малюса.

Для проверки закона Малюса надо исследовать зависимость изменения интенсивности J поляризованного света от угла ψ между главными направлениями поляризатора и анализатора.

Соберите установку (рис. 3.1) без двоякопреломляющей пластины O . Поставьте указатель анализатора на “нуль” и, вращая поляризатор, добейтесь максимального отброса стрелки прибора. Оставьте поляризатор в этом положении и сделайте первый отсчет интенсивности света J (при $\psi = 0^\circ$). (Если стрелка в максимуме отклоняется на малый угол или, наоборот, зашкаливает, надо изменить предел измерения прибора, повернув ручку на корпусе прибора.) Затем, повернув анализатор на 30° относительно начала отсчета, снимите второе показание. И так далее, вращая анализатор до угла 360° , снимите показания через каждые 30° . Данные опыта занесите в таблицу 1.

Таблица 1

ψ	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
J													

По данным опыта постройте график зависимости $J = f(\psi)$ в полярных координатах. Сравните полученный график с графиком функции закона Малюса $J = J_0 \cos^2 \psi$. Сделайте выводы.

Задание 3. Исследование эллиптически поляризованного света.

Для получения эллиптически поляризованного света на оптическую скамью между поляризатором и анализатором поставьте двоякопреломляющую пластину O . Такая пластинка, как уже говорилось, создает некоторую разность фаз между лучами, поляризованными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Пройдя через ана-

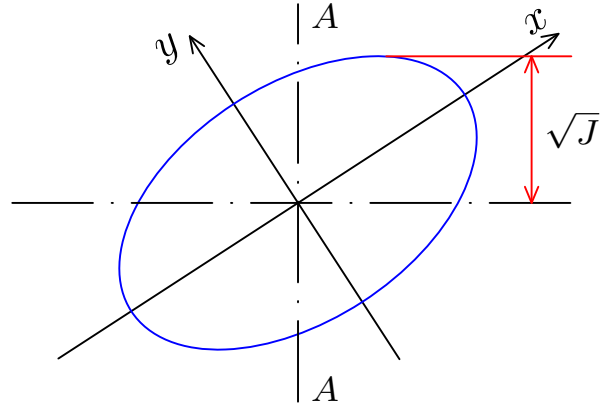


Рис. 4.1

лизатор, лучи интерферируют. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, зависит от ориентации главной плоскости AA анализатора по отношению к осям эллипса (рис. 4.1). Если AA совпадет с осью OX , то интенсивность света максимальна, а если с OY , то минимальна. Поэтому при вращении анализатора наблюдается частичное изменение интенсивности. Чтобы исследовать зависимость интенсивности света, вышедшего из анализатора при эллиптической поляризации, от угла поворота анализатора, поступите следующим образом. Поставьте угол α между оптической осью двоякопреломляющей пластинки (указана на оправе пластинки) и главным направлением поляризатора таким, чтобы стрелка микроамперметра при повороте анализатора на $\Delta\psi = 360^\circ$ не подходила близко к нулю. Другими словами, ни при каком положении анализатора исследуемая интенсивность света не должна обращаться в нуль (в противном случае свет будет плоскополяризованным).

Вращая анализатор, как во 2-ом задании, снимите показания прибора через каждые 30° . Данные заносите в таблицу 2, аналогичную таблице 1. Затем постройте график зависимости $J = f(\psi)$. По построенному графику определите форму эллипса, а именно отношение $\frac{E_{x0}}{E_{y0}}$ и

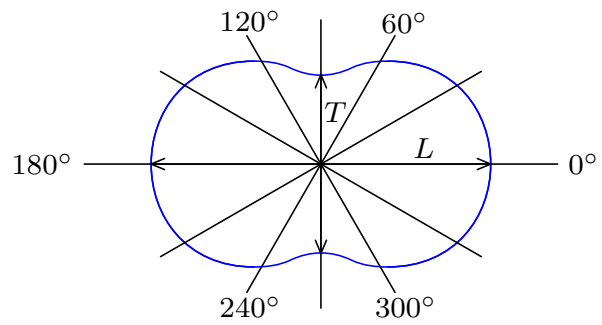


Рис. 4.2

угол α между направлением оси пластинки и плоскостью колебаний

света, вышедшего из поляризатора. Пусть эта зависимость имеет вид, как на рис. 4.2. Длина L и толщина T “тали” этой кривой соответственно пропорциональны $\sqrt{L} \sim E_{x0}$; $\sqrt{T} \sim E_{y0}$. Принимая во внимание

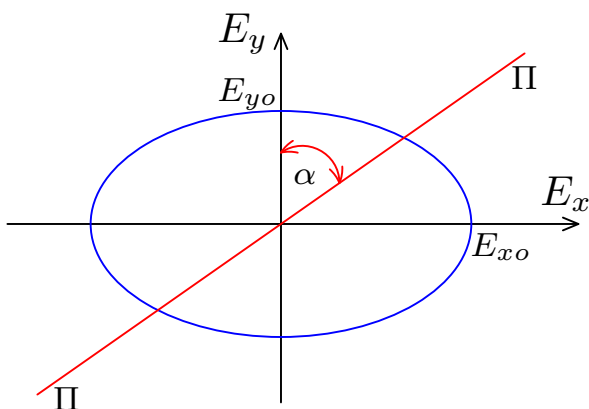


Рис. 4.3

$$\frac{E_{x0}}{E_{y0}} = \operatorname{tg} \alpha,$$

найдем значение угла

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{L}}{\sqrt{T}} \right).$$

Подобрав подходящий масштаб для E_{x0} и E_{y0} , а также используя значение α , постройте эллипс, как на рис. 4.3. Для построения используйте уравнение эллипса

$$\frac{E_x^2}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y0}^2} = 1.$$

5. Контрольные вопросы

1. Как экспериментально отличить естественный свет от кругополяризованного? А частично от эллиптически поляризованного?
2. Объясните отличие экспериментальной кривой от теоретической в задании 2.