

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

**ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА.  
ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ СВЕТА С КРУГОВОЙ  
И ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2013

Акрестина А.С., Шандаров С.М., Щербина В.В.

Проверка закона Малюса. Получение и анализ света с круговой и эллиптической поляризацией = Введение в фотонику и оптоинформатику: Методические указания к лабораторным работам для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / А.С. Акрестина, С.М. Шандаров, В.В. Щербина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2013. – 13 с.

Цель работы: Проверка закона Малюса, получение и анализ света с круговой и эллиптической поляризацией.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность анализировать и оценивать проектные решения (ПК-24).

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Введение в фотонику и оптоинформатику».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА.  
ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ СВЕТА С КРУГОВОЙ  
И ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик

\_\_\_\_\_ А.С. Акрестина  
\_\_\_\_\_ С. М. Шандаров  
\_\_\_\_\_ В.В. Щербина

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г

## Содержание

1	Введение .....	5
2	Теоретическая часть .....	5
3	Контрольные вопросы .....	9
4	Экспериментальная часть .....	9
4.1	Описание установки.....	9
4.2	Задание на работу.....	10
4.3	Методические указания по выполнению работы.....	10
4.4	Содержание отчета.....	11
	Список рекомендуемой литературы.....	11

## 1 Введение

**Цель работы:** Проверка закона Малюса, получение и анализ света с круговой и эллиптической поляризацией.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность анализировать и оценивать проектные решения (ПК-24).

## 2 Теоретическая часть

Электромагнитные волны поперечны, поэтому свет обладает свойством поляризации. Поляризованными называются световые волны, в которых колебания вектора  $\vec{E}$  каким-либо образом упорядочены. Волны называются линейно поляризованными или плоскополяризованными, если колебания вектора  $\vec{E}$  (и соответственно  $\vec{H}$ ) происходят в одной, проходящей через луч, плоскости.

Если вектор  $\vec{E}$  совершает колебания, при которых проекция конца вектора  $\vec{E}$  на любую плоскость, перпендикулярную лучу, описывает эллипс или круг, то такой свет называют эллиптически или циркулярно поляризованным.

Свет, испускаемый отдельным излучателем (атомом или молекулой) всегда поляризован. Любой реальный источник света состоит из большого числа излучателей, поляризация излучения которых случайна. Поэтому свет от такого источника имеет случайное распределение вектора  $\vec{E}$  в пространстве и во времени. Причем в среднем по времени это распределение одинаково для всех направлений. Такой свет называют неполяризованным или естественным. На практике часто имеют дело с частично поляризованным излучением, представляющим смесь поляризованного и неполяризованного света.

Линейно поляризованный свет можно получить при отражении естественного света от диэлектрика или при двойном лучепреломлении в анизотропных кристаллах. При прохождении через анизотропный кристалл луч света разбивается на два. Для одного из них, который назван обыкновенным, скорость распространения  $v_0$  и показатель преломления  $n_0$  одинаковы во всех направлениях. Скорость другого луча  $v_e$  зависит от его направления в кристалле. Этот луч называют необыкновенным и для него показатель преломления  $n_e$  является функцией угла падения.

Во всех кристаллах существует хотя бы одно направление, для которого  $n_0 = n_e$ . Это направление называют оптической осью кристалла. Если такое направление одно, то кристалл – одноосный.

Обыкновенный и необыкновенный лучи поляризованы и необыкновенный лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. В обыкновенном луче вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости, перпендикулярной оптической оси, а в необыкновенном луче колебания

вектора  $\bar{E}$  происходят в плоскости, содержащей оптическую ось и рассматриваемый луч.

Таким образом, для обыкновенного и необыкновенного лучей различны: показатели преломления ( $n_o \neq n_e$ ) и направления колебаний вектора  $\bar{E}$  ( $\bar{E}_o \perp \bar{E}_e$ ).

Одноосные кристаллы можно использовать либо в качестве поляризатора для получения плоскополяризованного света, либо в качестве анализатора для анализа имеющегося поляризованного излучения.

На практике в качестве поляризаторов и анализаторов используют специальные поляризованные приборы, которые дают на выходе один поляризованный луч. Существуют поляризованные приборы двух типов:

- составные призмы, в которых один из лучей уводится в сторону за счет преломления и отражения на гранях элементов, составляющих призму (например, интерференционный поляризатор);

- поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма, то есть различного поглощения необыкновенного и обыкновенного лучей.

Например, поляроид представляет собой пленку из целлулоида, в которую введено большое количество одинаково ориентированных кристаллов сульфата йодистого хинина. В этих кристаллах один из лучей полностью поглощается на пути в доли миллиметра.

Таким образом, поляризаторы свободно пропускают только световые волны, в которых колебания вектора  $\bar{E}$  происходят в определенной плоскости, называемой плоскостью поляризатора. Если плоскость колебаний вектора  $\bar{E}$  перпендикулярна плоскости поляризатора, то излучение через него не проходит.

Пусть на поляризатор падает поляризованный свет с амплитудой  $\bar{E}$  и интенсивностью  $I$  (рис.2.1). Через прибор пройдет составляющая вектора  $\bar{E}$  с амплитудой

$$\bar{E} = \bar{E}_1 + \bar{E}_{11}, \quad \bar{E}_{11} = \bar{E} \cos \alpha \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостью колебаний в падающей световой волне и плоскостью поляризатора  $\rho\rho'$ . Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$I_{11} = I \cos^2 \alpha \quad (2.2)$$

Это соотношение называют законом Малюса.

Рассмотрим вопрос о прохождении плоскополяризованного света через анизотропный кристалл. Пусть световая волна падает нормально на плоскопараллельную кристаллическую пластинку толщиной  $d$ , вырезанную параллельно оптической оси  $oo'$  (рис.2.2). Если направление колебаний вектора  $\bar{E}$  в падающей волне составляет угол  $\beta$  с плоскостью главного сечения, то амплитуды колебаний вектора  $\bar{E}$  в обыкновенной и необыкновенной волнах будут

$$\bar{E}_o = \bar{E} \sin \beta; \quad \bar{E}_e = \bar{E} \cos \beta; \quad (2.3)$$

Пройдя через пластинку толщиной  $d$ , обыкновенный и необыкновенный лучи приобретут оптическую разность хода  $\Delta = (n_e - n_o)d$  и, соответственно, разность фаз  $\varphi$ , причем

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d. \quad (4)$$

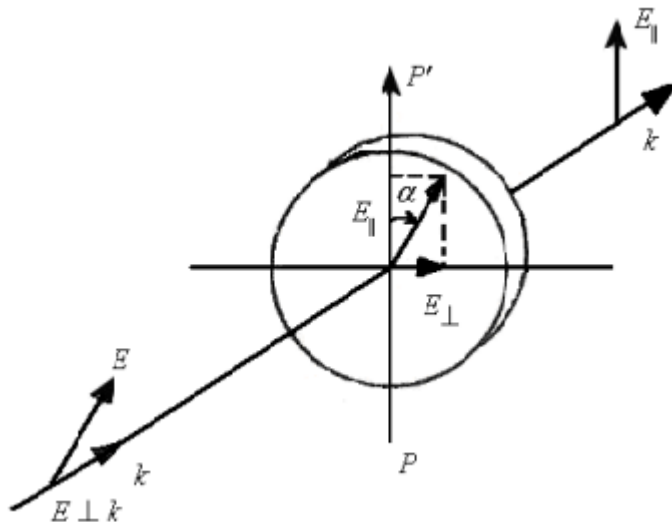


Рисунок 2.1 - На поляризатор падает поляризованный свет с амплитудой  $\bar{E}$  и интенсивностью  $I$ .

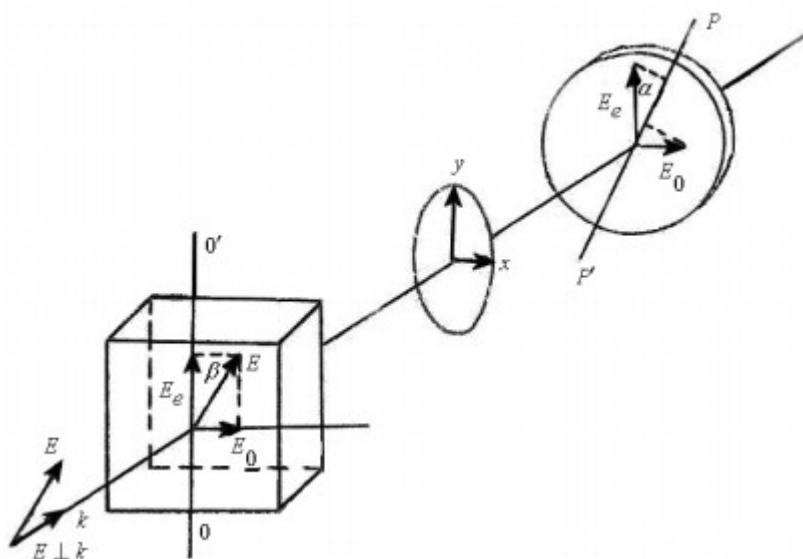


Рисунок 2.2 - Световая волна падает на плоскопараллельную кристаллическую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси  $00'$ .

Характер колебаний вектора  $\bar{E}$  на выходе из кристаллической пластинки определяется как результат сложения взаимноперпендикулярных колебаний векторов  $\bar{E}_o$  и  $\bar{E}_e$ .

Обозначим направления, вдоль которых колеблются  $\bar{E}_o$  и  $\bar{E}_e$  через  $x$  и  $y$ , тогда

$$E_x = E_o \cos \omega t, \quad E_y = E_e \cos(\omega t - \varphi). \quad (2.5)$$

Из теории колебаний известно, что уравнения (2.5) описывают вектор, вращающийся в пространстве. Найдем уравнение траектории, которую описывает конец вектора  $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$  в плоскости  $xу$ . Для этого исключим из (5) время  $t$ . После преобразований получим уравнение эллипса

$$\frac{\bar{E}_x^2}{\bar{E}_o^2} + \frac{\bar{E}_y^2}{\bar{E}_e^2} - \frac{2\bar{E}_x\bar{E}_y}{\bar{E}_o\bar{E}_e} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (2.6)$$

Форма эллипса и его ориентация относительно осей  $x$  и  $y$  ( $00'$ ) зависят от значений углов  $\beta$  и  $\varphi$ .

Рассмотрим частный случай, когда толщина кристаллической пластинки такова, что оптическая разность хода двух лучей составляет

$$(n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}; \quad \varphi = \frac{\pi}{2}. \quad (2.7)$$

Такую пластинку называют пластинкой в четверть волны. Уравнение (6) в этом случае примет вид

$$\frac{\bar{E}_x^2}{\bar{E}_o^2} + \frac{\bar{E}_y^2}{\bar{E}_e^2} = 1. \quad (2.8)$$

И мы имеем эллиптически поляризованный свет, причем одна из осей эллипса совпадает с направлением оптической оси пластинки (рис. 2). Соотношение полуосей эллипса, как это следует из (3), зависит от величины угла  $\beta$ . В частности, при  $\beta = \frac{\pi}{4}$ ,  $E_o = E_e$  и эллипс вырождается в окружность, при  $\beta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi \dots$  эллипс вырождается в прямую и излучение на выходе пластинки в четверть волны линейно поляризованное.

В эллиптически поляризованном свете вектор  $E$  может вращаться как по часовой стрелке, так и против.

Рассмотрим теперь вопрос об интенсивности света, прошедшего последовательно пластинку  $\frac{\lambda}{4}$  и поляризатор (рис.2). Если плоскость поляризатора определена векторами  $k$  и  $\vec{PP}'$ , то интенсивность света на выходе из него с учетом (3), определяется соотношением

$$I = E_e^2 \cos^2 \alpha + E_o^2 \sin^2 \alpha, \quad (2.9)$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостью поляризатора и оптической осью пластинки  $\frac{\lambda}{4}$ .

Если на выходе четвертьволновой пластинки  $E_o = E_e$ , то свет поляризован по кругу и его интенсивность после поляризатора не зависит от угла.

В качестве пластинки  $\frac{\lambda}{4}$  в работе используется пластинка одноосного кристалла кварца. Пользуясь соотношением (7), можно рассчитать толщину пластинки

$$d = \frac{\lambda}{4(n_o - n_e)}. \quad (2.10)$$



На длине волны излучения гелий-неонового лазера ( $\lambda=0,6328$  мкм) показатели преломления кварца имеют значения:  $n_e=1,5517$  и  $n_o=1,5427$ , а  $d=70$  мкм. Практически используют более толстые пластинки для которых оптическая разность хода не  $\frac{\lambda}{4}$ , а  $\frac{\lambda}{4}+k\lambda$  ( $k=1,2,\dots$ ), при этом, разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами равна не  $\frac{\pi}{2}$ , а  $\frac{\pi}{2}+2\pi k$ .

### 3 Контрольные вопросы

1. Что такое поляризованный свет? На каких физических явлениях основано получение линейно поляризованного света?

2. Как отличить с помощью поляризатора и пластинки  $\frac{\lambda}{4}$  естественный свет от света, поляризованного по кругу?

3. Что такое пластинка  $\frac{\lambda}{2}$ ? Дайте определение по аналогии с пластинкой в четверть волны. Что произойдет с линейно-поляризованным светом при прохождении через пластинку  $\frac{\lambda}{2}$ ?

### 4 Экспериментальная часть

#### 4.1 Описание установки

Схема установки, на которой выполняется работа, приведена на рис.4.1.

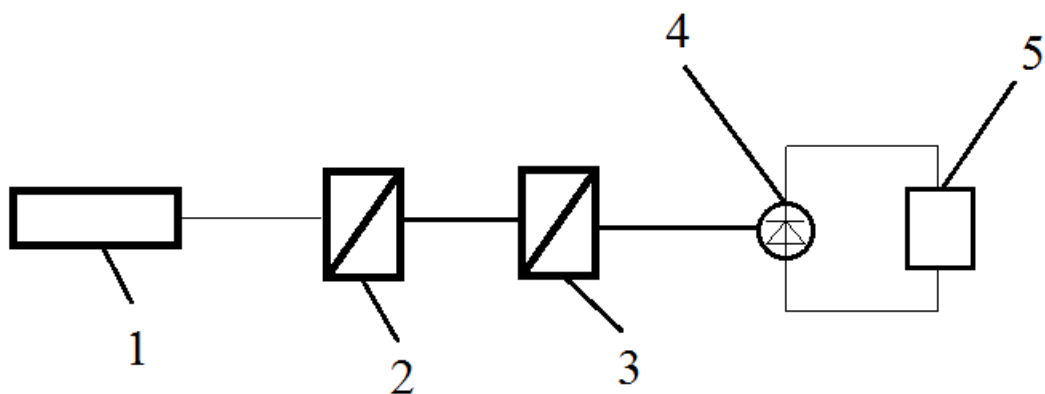


Рисунок 4.1 - Схема экспериментальной установки.

Источник света – 1, пластинка  $\frac{\lambda}{4}$  – 2, поляризатор – 3 и приемник излучения – 4. Ток в цепи фотоприемника и напряжение на сопротивлении нагрузки пропорциональны световому потоку, падающему на

фотоприемник. Поэтому для измерения электрического сигнала можно использовать либо миллиамперметр, либо милливольтметр – 5

## 4.2 Задание на работу

1. Проверка закона Малюса
2. Получение и исследование света, поляризованного по кругу
3. Получение и исследование эллиптически поляризованного света

## 4.3 Методические указания по выполнению работы

### 4.3.1 Проверка закона Малюса.

- 1 Включаем гелий-неоновый лазер.
- 2 Устанавливаем поляроид со стороны фотоприемника.
- 3 Вращая поляроид вокруг оптической оси, определяем значение угла, соответствующее максимальной величине электрического сигнала. Это значение угла принимают за начало отсчета.
- 4 Измеряем зависимость электрического сигнала от угла поворота поляроида. Измерения проводят через  $10^\circ$  на протяжении  $180^\circ$  сначала в одном ( $I_1$ ), а затем в противоположном ( $I_2$ ) направлениях.

Результаты измерений заносят в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

$\alpha$	$I_1$	$I_2$	$I_{cp} = \frac{I_1 + I_2}{2}$	$\frac{I_{cp}}{I_{max}}$	$\cos^2 \alpha$
$0^\circ$					
$10^\circ$					
$180^\circ$					

5. Строим две зависимости на одном графике: экспериментальную  $\frac{I_{cp}}{I_{max}}(\alpha)$  и теоретическую  $\cos^2 \alpha$ .

### 4.3.2 Получение и исследование света, поляризованного по кругу.

- 1 Поворачиваем поляроид до тех пор, пока показания измерительного прибора не будут минимальными и закрепляют его в этом положении.
- 2 Перед поляроидом устанавливаем пластинку в четверть волны и, поворачивая ее на один полный оборот, находят значения четырех углов (с точностью  $1 - 2^\circ$ ), при которых интенсивность прошедшего через систему света минимальна. Записываем значения этих углов. Одна пара углов определяет направление оптической оси, а другая – перпендикулярное ей направление.

3 Поворачиваем пластинку  $\frac{\lambda}{4}$  относительно одного из четырех углов на  $45^\circ$  и закрепляют его в этом положении.

4 Проводим анализ света, получившегося на выходе пластинки  $\frac{\lambda}{4}$ . Для этого поворачивают поляризатор через  $10^\circ$  на протяжении одного полного оборота и измеряют сигнал. Результаты записывают в виде таблицы.

5 Строим в полярных координатах график распределения интенсивности света.

### 4.3.3. Получение и исследование эллиптически поляризованного света.

1 Изменяем ориентацию пластинки  $\frac{\lambda}{4}$  на  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  или  $30^\circ$ .

2 Для заданной ориентации пластинки проводим анализ прошедшего света так же, как в 2.4. Результаты представляем в виде таблицы.

3 Строим в полярных координатах экспериментальный и теоретический (9) графики распределения интенсивности света  $I(\alpha)$ . При построении считать, что  $\alpha = 0$  соответствует  $I_{\max}$ .

4 Определив  $E_e \sim \sqrt{I_{\max}}$  и  $E_o \sim \sqrt{I_{\min}}$  по формулам (5) с учетом (7) находим  $E = E_o \cos \omega t$  и  $E = E_e \cos \omega t$ , вычисляем значение  $E_x$  и  $E_y$ , для различных значений  $\theta = \omega t$  в интервале  $0 - 360^\circ$  и строим эллипс в координатах  $x, y$ .

## 4.4 Содержание отчета

4.4.1. При составлении отчета необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчета о лабораторной работе.

4.4.2. В соответствующих разделах отчета необходимо представить:

- 1) задание;
- 2) таблицы экспериментальных данных;
- 5) результаты расчетов, предусмотренных заданием;
- 6) выводы.

## Список рекомендуемой литературы

1. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики: Пер. с англ./Под ред. С.А. Ахманова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., - 1989.-560 с.

2. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. 2 изд., . - М.: Физматлит, 2004, 512 с.

3. Гурздян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике: Справочник. -М.: Радио и связь, 1991.— 160 с.

Учебное пособие

Акрестина А.С., Шандаров С.М., Щербина В.В.

Проверка закона Малюса.  
Получение и анализ света с круговой  
и эллиптической поляризацией

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Введение в фотонику и оптоинформатику»

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40