

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

В.И.Сафаров

ЗАДАЧА

Исследование и преобразование поляризации света с помощью поляризатора и фазовых пластинок. Проверка закона Малюса.

ВВЕДЕНИЕ

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. Электромагнитные волны являются поперечными, т.е. колебания вектора напряженности электрического (и магнитного) поля происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Рассмотрим волну, распространяющуюся в направлении Z. Колебания вектора \vec{E} происходят при этом в плоскости XY. Для незатухающих волн (при отсутствии поглощения в среде) в некоторой точке пространства, например в точке Z=0, для электрической компоненты волны можно записать:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E} &= E_{x_0} \vec{i} \cos \omega t \\ \vec{E} &= E_{y_0} \vec{j} \cos(\omega t + \gamma)\end{aligned}\quad (1)$$

где ω - частота колебаний, γ - разность фаз между взаимно перпендикулярными колебаниями \vec{E}_x и \vec{E}_y (рис 1.). Угол между направлениями вектора E и осью OX определяется следующим соотношением:

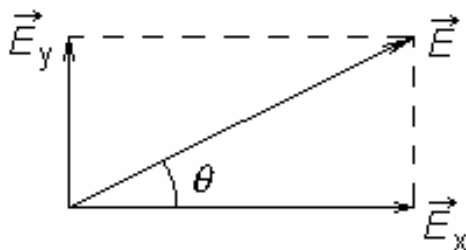


Рис. 1

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{E_{y_0}}{E_{x_0}} \frac{\cos(\omega t + \gamma)}{\cos \omega t} \quad (2)$$

Если разность фаз γ претерпевает случайные хаотические изменения, то угол θ , т.е. направление светового вектора \vec{E}

будет испытывать случайные, скачкообразные, неупорядоченные изменения. Такая ситуация характерна для естественного света. Соответственно с этим, естественный свет всегда можно представить как наложение двух волн с колебаниями \vec{E} в двух взаимно перпендикулярных направлениях, имеющих одинаковую интенсивность, но переменную разность фаз. В рамках данного рассмотрения поляризованный свет получается, если разность фаз этих волн постоянна и не флуктуирует во времени.

Рассмотрим два важных случая поляризации.

а) $\gamma=0, \pm \pi$. Согласно (2) имеем:

$$\operatorname{tg} \theta = \pm \frac{E_y}{E_x} = \operatorname{const}$$

Следовательно, результирующее колебание \vec{E} совершается в фиксированном направлении, вдоль определенной линии в плоскости ХУ.

Если в световой волне вектор \vec{E} направлен вдоль прямой линии (колеблется по этой линии), то такой свет называется линейно поляризованным.

б) $\gamma = \pm \pi/2$ и $E_{xo} = E_{yo}$. Согласно (2) имеем:

$$\operatorname{tg} \theta = \pm \operatorname{tg} \omega t$$

Отсюда вытекает, что направление колебаний поворачивается вокруг направления луча с угловой скоростью, равной частоте колебаний ω . Конец \vec{E} в этом случае описывает в плоскости ХУ окружность.

Если в световой волне при фиксированном Z изменение \vec{E} во времени представляет собой вращение по кругу, то такая волна называется циркулярно поляризованной (обладает круговой поляризацией). Случаи $\gamma = +\pi/2$ и $\gamma = -\pi/2$ отличаются направлением вращения \vec{E} .

Если $\gamma = \pm \pi/2$, а $E_{xo} \neq E_{yo}$, то имеет место вращение \vec{E} по эллипсу, причем полуоси эллипса равны соответствующим амплитудам E_{xo} и E_{yo} . Такая волна называется поляризованной по эллипсу (эллиптически поляризованной).

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ. ПОЛЯРИЗАТОР. Естественный свет является неполяризованным. Неполяризованный свет излучают все тепловые источники, например, лампа накаливания. Когерентные источники излучения – лазеры, испускают, как правило, линейно поляризованный свет.

Для изучения поляризации света используются поляризационные приборы-поляризаторы. В настоящее время для изготовления поляризаторов широкое распространение получили поляроидные пленки, или, сокращенно, поляроиды. Это пленки, в которых сильно поглощается свет одной поляризации, а перпендикулярной к ней поляризации пропускает свободно. Чтобы изготовить поляроид нужно вещество, молекулы которого состоят из длинных углеводородных цепей. Это вещество растягивают, так, что молекулы выстраиваются в одном направлении. После растяжения вещество опускают в раствор, содержащий иод. Молекулы иода “пришиваются” к длинным углеводородным цепям. В результате появляются свободные электроны, которые могут двигаться вдоль цепей, но не перпендикулярно им, т.е. колебания электронов возможны только в одном направлении. Если через такое вещество пропускать электромагнитную волну, то компонента электрического поля, параллельная углеводородным цепям, будет поглощаться, а перпендикулярная компонента будет проходить не поглощаясь.

Таким образом в поляроиде существует ось, называемая осью свободного пропускания. При поляризации света вдоль этой оси поглощение излучения практически отсутствует.

ЗАКОН МАЛЮСА. Пусть на поляризатор падает линейно поляризованный свет амплитуды E и интенсивности $I_0=E^2$, а \vec{e} направление оси пропускания идеального поляризатора. Тогда колебание \vec{E} , образующее с осью поляризатора угол θ можно разложить на два колебания с амплитудой $E_{||}$ и E_{\perp} (рис. 2). Первое колебание пройдет через прибор, а второе будет задержано. Следовательно, интенсивность прошедшего

света $I_{пр}$ будет определяться выражением, которое получило название закона Малюса.

$$I_{пр} = E_{||}^2 = I_0 \cos^2 \theta \quad (3)$$

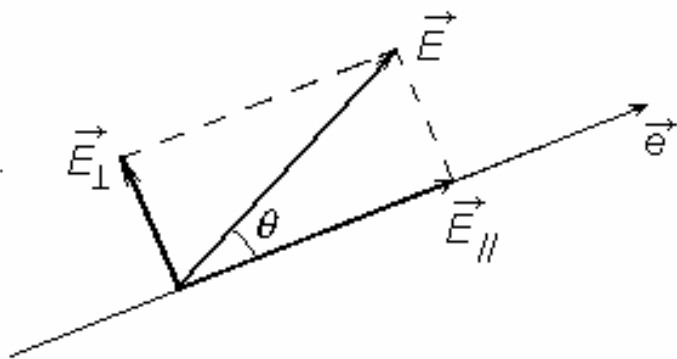


Рис. 2

Если поляризатор вращать вокруг луча линейно поляризованного света (менять угол θ), то интенсивность прошедшего света согласно закону Малюса, будет

осциллировать (рис. 3а). Максимальная интенсивность $I_{\max}=I_0$ получается при $\theta=0, \pi$. При углах $\pi/2; 3/2\pi$ интенсивность прошедшего света равна нулю.

Если на поляризатор падает эллиптически поляризованный свет, то прибор пропускает составляющую $E_{||}$ вектора E (проекцию E на ось поляризатора). Максимальные и минимальные значения интенсивности прошедшего света достигаются в тех случаях, когда ось поляризатора совпадает с направлениями полуосей эллипса (рис. 3б.). Если через поляризатор пропускается циркулярно поляризованный свет, то интенсивность на выходе поляризатора при его вращении остается постоянной (рис. 3в).

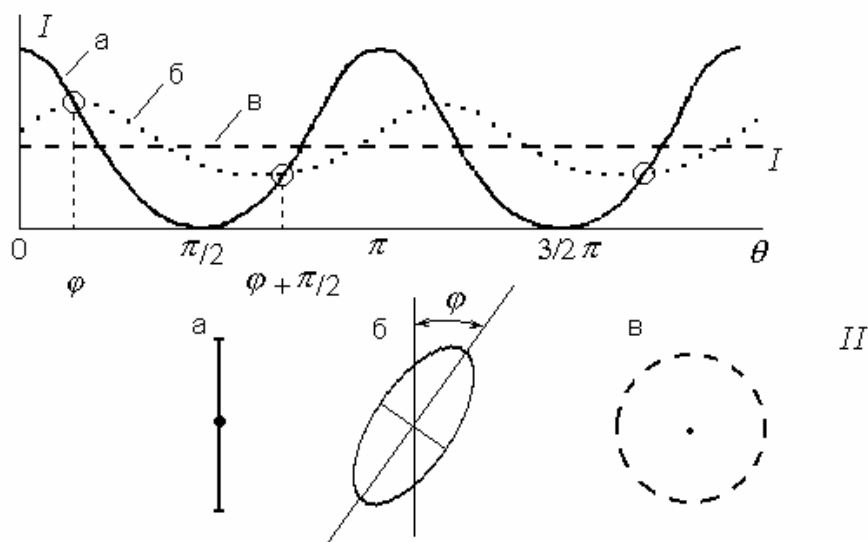


Рис.3

ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ. Рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся в анизотропной диэлектрической среде. В отличие от поляроида, здесь нет свободных электронов, так что излучение вообще не поглощается. Однако, электроны имеют различные “коэффициенты жесткости” для колебаний вдоль оси анизотропии и перпендикулярны ей. Электрическая восприимчивость (то есть наведенная поляризация на единицу напряженности падающего электрического поля) в направлении оси анизотропии будет отличаться от восприимчивости в перпендикулярном направлении. Таким образом, диэлектрическая проницаемость ϵ в направлении оси анизотропии и перпендикулярно ей имеет различные значения. Поскольку показатель преломления связан с величиной диэлектрической проницаемости, $n = \sqrt{\epsilon}$ то из анизотропии ϵ следует, что показатель преломления для световых волн с направлением вектора \vec{E} вдоль оси и перпендикулярно ей будет отличаться. Показатели преломления для этих поляризаций обычно обозначают n_e и n_0 соответственно.

ФАЗОВЫЕ ПЛАСТИНКИ. Пусть пластинка анизотропного материала вырезана так, что ось анизотропии лежит в плоскости пластинки, и пусть на пластинку нормально падает линейно поляризованный свет. Этот свет можно представить, согласно проведенному в первом параграфе рассмотрению, как результат сложения двух линейно поляризованных волн со взаимно перпендикулярными направлениями колебаний вектора \vec{E} . Выберем в качестве этих направлений ось анизотропии пластинки и перпендикуляр к ней. Тогда амплитуды двух волн E_e и E_0 , на которые мы раскладываем падающую световую волну, будут равны проекции вектора \vec{E} на выбранные направления. Поскольку показатели преломления в пластинке для этих двух волн различны, то за время прохождения через пластинку между ними возникнет оптическая разность хода:

$$\Delta = (n_e - n_0)d \quad (4),$$

которой соответствует разность фаз на выходе из пластинки:

$$\gamma = \frac{2\pi\Delta}{\lambda_0} \quad (5)$$

Здесь d – толщина пластины, λ_0 – длина волны света в вакууме.

а) Если толщина пластины такова, что $\Delta = \frac{\lambda_0}{4}$, то такая пластина называется пластиной в четверть длины волны и при прохождении через такую пластинку получается разность фаз $\pi/2$. Сложение двух волн E_e и E_0 со сдвигом фаз в $\pi/2$ дает эллиптически поляризованный свет, с полуосями, равными амплитуде волн. В нашем случае одна из полуосей получающегося эллипса поляризации направлена вдоль оптической оси пластинки. По величине полуоси эллипса равны проекциям вектора \vec{E} на направление оси и перпендикуляра к ней.

Если направление линейной поляризации падающего света составляет 45° с направлением оптической оси пластинки, то обе проекции E_e и E_0 равны и на выходе получается циркулярно поляризованный свет (эллипс вырождается в окружность).

Если направление линейной поляризации падающего света совпадает с направлением оси анизотропии или строго перпендикулярно ей, то его поляризация на выходе из пластины не меняется – вторая волна не возникает (соответствующая проекция вектора \vec{E} равна нулю) и эллипс вырождается в отрезок прямой. Поэтому в зависимости от ориентации пластинки на выходе можно получить свет с линейной, эллиптической или круговой поляризацией.

б) Если толщина пластинки такова, что разность хода составляет $\Delta = \lambda/2$, то такая пластинка называется пластинкой в пол длины волны, и сдвиг фаз двух лучей на выходе из пластинки составляет уже π . Таким образом, на выходе из пластинки одна из волн (например E_0) меняет фазу на противоположную. Как следует из рис. 4 это соответствует повороту направления линейной поляризации на угол в 2φ , где φ - угол между направлениями линейной поляризации и осью пластинки.

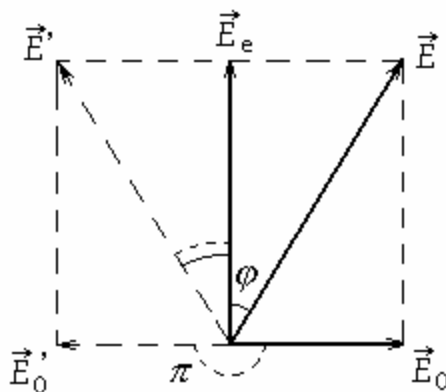


Рис.4

Отметим, что при прохождении через фазовые пластинки интенсивность света не изменяется, меняется лишь характер его поляризации.

УСТАНОВКА

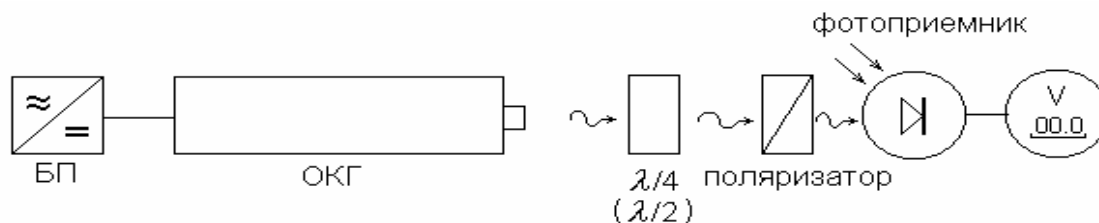


Рис.5

Схема установки показана на рис. 5. В качестве источника излучения используется лампа накаливания или гелиево-неоновый лазер с излучением на длине волны 632,8 нм. Излучение регистрируется фотоприемником, фототок которого пропорционален интенсивности света. Фототок измеряется по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении.

Перед приемником установлен поляризатор, который может вращаться относительно оси, совпадающей с лучом света. Между лазером и поляризатором может устанавливаться фазовые пластинки $\lambda/4$ и $\lambda/2$.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Подготовить приборы к работе.
2. Установить перед поляризатором и фотодетектором лампу накаливания. Включить лампу, детектор и вольтметр. Вращая поляризатор убедиться, что лампа накаливания излучает неполяризованный свет.
3. Выключить и убрать с оптической скамьи лампу накаливания. Включить лазер. Вращая поляризатор убедиться, что излучение лазера сильно поляризовано (интенсивность прошедшего через поляризатор света сильно зависит от угла поворота поляризатора). Снять зависимость интенсивности прошедшего через поляризатор света от ориентации поляризатора. Для этого, плавно вращая поляризатор найти положение, соответствующее максимальной интенсивности. Это подходит к случаю, когда ось пропускания поляризатора параллельна направлению поляризации излучения, угол $\theta=0$. Поворачивая поляризатор шагами по 10° от этого положения, снять зависимость интенсивности света от угла θ при изменении его на 360° . Полученную зависимость представить на графике. Проверить, насколько полученная зависимость соответствует закону Малюса. Для этого, перестроить ее в осях: $\cos^2 \theta$ по оси абсцисс и I/I_{\max} , по оси ординат.
4. Установить поляризатор в положение $\theta=0$ (максимум интенсивности прошедшего света). Установить между поляризатором и лазером четвертьволновую фазовую пластинку. Вращая пластинку, найти положение, соответствующее максимуму интенсивности прошедшего света. Этому удовлетворяет ориентация пластинки, когда оптическая ось (или перпендикулярные к ней) совпадают с направлением поляризации лазера. (угол $\varphi=0$). Дальнейшие измерения проводить для ориентации пластинки относительно этого направления под углом $\varphi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$. Для каждого из этих положений пластинки, вращая поляризатор, по максимальным и минимальным интенсивностям прошедшего света, определить величины полуосей эллипса поляризации света, прошедшего через пластинку, и ориентацию этих полуосей (угол φ) относительно направления поляризации света лазера.

По этим данным (величина и ориентация полуосей) построить эллипсы поляризации света, вышедшего из пластинки. Определить, как меняется поляризация света, прошедшего через фазовую пластинку $\lambda/4$, при изменении ее ориентации. Данные представить на диаграммах, аналогичных рис. 3.11.

5. Аналогичные измерения провести для пластинки $\lambda/2$.
6. Результаты оформить в виде графиков зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризатор, от угла поворота поляризатора (см. рис. 3.1) и диаграмм, с изображением эллипсов поляризации света, прошедшего через фазовые пластинки при разной их ориентации.