

**010504. Двухлучепреломление. Четвертьволновая фазовая пластинка.**

**Цель работы:** получение эллиптически поляризованного света из линейно поляризованного с помощью четвертьволновой пластинки и его анализ.

**Требуемое оборудование:** Модульный учебный комплекс МУК-ОВ

*Краткое теоретическое введение*

**ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА.** Свет представляет собой электромагнитную волну. Световые волны являются поперечными. Три вектора -  $\vec{E}$  (напряженность электрического поля),  $\vec{H}$  (напряженность магнитного поля) и  $\vec{V}$  (скорость распространения света) - взаимно перпендикулярны и составляют правовинтовую систему. Однако взаимно перпендикулярное расположение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  может быть произвольно ориентировано относительно направления распространения волны  $\vec{V}$ . Т.к. положение вектора  $\vec{H}$  всегда можно легко определить исходя из положений векторов  $\vec{V}$  и  $\vec{E}$ , то обычно он исключается из дальнейшего рассмотрения.

Рассмотрим световую волну, распространяющуюся в направлении оси  $z$ . 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:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E}_x &= iE_{x0}\cos\omega t \\ \vec{E}_y &= jE_{y0}\cos(\omega t + \delta)\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\omega$  - частота колебаний,

$\delta$  - разность фаз между взаимно перпендикулярными колебаниями  $E_x$  и  $E_y$

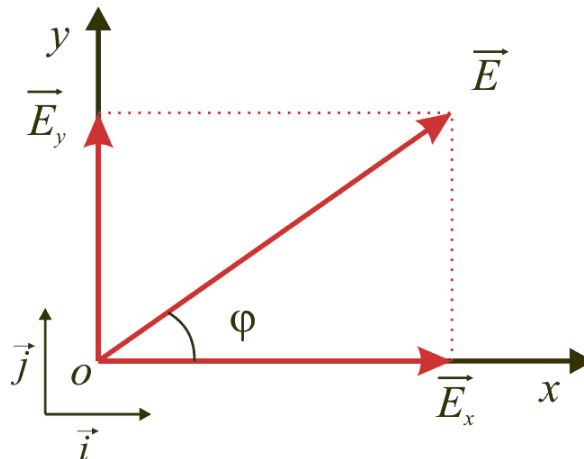


Рис. 1

Угол между направлениями вектора  $\vec{E}$  и осью  $Ox$  определяется следующим соотношением:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{E_{y0} \cos(\omega t + \delta)}{E_{x0} \cos \omega t} \quad (2)$$

Если разность фаз  $\delta$  претерпевает случайные хаотические изменения, то угол  $\theta$ , т.е. направление светового вектора  $\mathbf{E}$  будет испытывать случайные, скачкообразные, неупорядоченные изменения. Такая ситуация характерна для естественного света. Таким образом, естественный свет всегда можно представить как наложение двух волн с колебаниями в двух взаимно перпендикулярных направлениях, имеющих одинаковую интенсивность, но переменную разность фаз.

Рассмотрим два важных случая поляризации.

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

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{const}$$

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

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

б)  $\delta = \pm \pi/2$  и  $E_{x0} = E_{y0}$ . Согласно (2) имеем:

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

Отсюда вытекает, что направление колебаний поворачивается вокруг направления луча с угловой скоростью, равной частоте колебаний  $\omega$ . Конец вектора  $\mathbf{E}$  в этом случае описывает в плоскости ХУ окружность. Такая волна называется **циркулярно поляризованной** (обладает круговой поляризацией). Случаи  $\delta = +\pi/2$  и  $\delta = -\pi/2$  отличаются направлением вращения  $\mathbf{E}$ .

Если  $\delta = \pm \pi/2$ , а  $E_{x0} \neq E_{y0}$ , то имеет место вращение  $\mathbf{E}$  по эллипсу, причем полуоси эллипса равны соответствующим амплитудам  $E_{x0}$  и  $E_{y0}$ . Такая волна называется **эллиптически поляризованной**.

**ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ.** Основные методы получения циркулярно и эллиптически поляризованного света связаны с использованием оптически анизотропных сред. Показатель преломления среды  $n = \sqrt{\mu\epsilon} \approx \sqrt{\epsilon}$  (т.к. для большинства прозрачных веществ магнитная проницаемость  $\mu \approx 1$ ). В оптически анизотропных кристаллах диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  зависит от направления. Поэтому волнам с разным направлением колебаний вектора  $\mathbf{E}$  соответствуют разные показатели преломления и, следовательно, разные скорости ( $v = c/n$ , где  $c$  – скорость света в вакууме).

Если на анизотропное вещество падает линейно поляризованный свет, то он рождает в среде в общем случае две волны, линейно поляризованные во взаимно-перпендикулярных направлениях и распространяющихся с разными скоростями. Для одноосных кристаллов существует единственное направление, называемое оптической осью, вдоль которого обе волны распространяются с одинаковой скоростью. В двуосных кристаллах два таких направления (две оптические оси).

**ФАЗОВЫЕ ПЛАСТИНКИ.** Рассмотрим особенности распространения света в одноосных кристаллах. Пусть анизотропная пластинка толщиной  $d$  вырезана параллельно оптической оси и нормально к ней падает линейно поляризованный свет (рис. 2.).

Выберем систему координат  $xу$  таким образом, чтобы ось ОХ совпадала с направлением главной оси кристалла. Световой вектор падающей линейно поляризованной волны с амплитудным значением  $E_0$  будет составлять угол  $\varphi$  с оптической осью. В этом случае свет можно представить, как результат сложения распространяющихся в одном направлении двух линейно поляризованных волн со взаимно перпендикулярными направлениями колебаний вектора  $\mathbf{E}$ . Таким образом, в пластинке будут распространяться две волны - обыкновенная с показателем преломления  $n_o$  и необыкновенная с показателем преломления  $n_e$ . Направление колебаний светового вектора обыкновенной волны (направление  $\perp$ ) перпендикулярно главной плоскости, т.е. плоскости, проходящей через направление распространения и оптическую ось. У второй волны световой вектор колеблется в главной плоскости вдоль оптической оси (направление  $\parallel$ ).

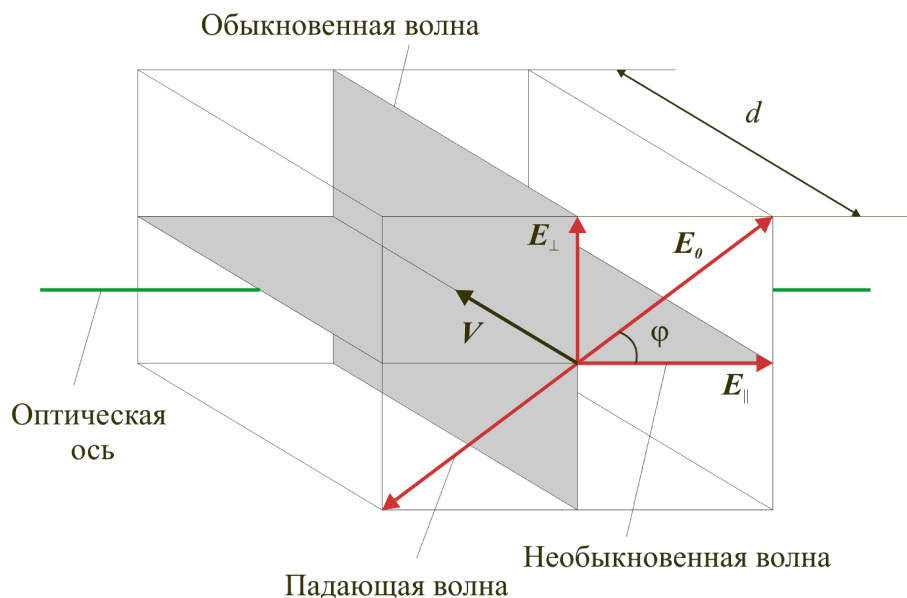


Рис. 2

Амплитуды световых векторов обыкновенной и необыкновенной волны равны соответственно:

$$\begin{aligned} E_{\parallel} &= E_0 \cos \varphi \\ E_{\perp} &= E_0 \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку показатели преломления в пластинке для этих двух волн различны, то за время прохождения через пластинку между ними возникнет оптическая разность хода:

$$\Delta = (n_e - n_o)d \quad (4)$$

которой соответствует разность фаз на выходе из пластинки:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

где  $\lambda_0$  – длина волны света в вакууме.

Таким образом, на выходе из пластинки имеются два взаимно перпендикулярных световых колебания

$$\begin{aligned} E_{\parallel} &= E_0 \cos \varphi \cos(\omega t - \delta) \\ E_{\perp} &= E_0 \sin \varphi \cos \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

Знак «-» перед  $\delta$  связан с тем, что необыкновенная волна отстает от обыкновенной.

Пусть свет, вышедший из кристаллической пластинки, проходит через анализатор (поляризатор). На рис. 3 ОА - направление пропускания анализатора,  $\alpha$  - угол между вектором  $E_0$  и направлением ОА.

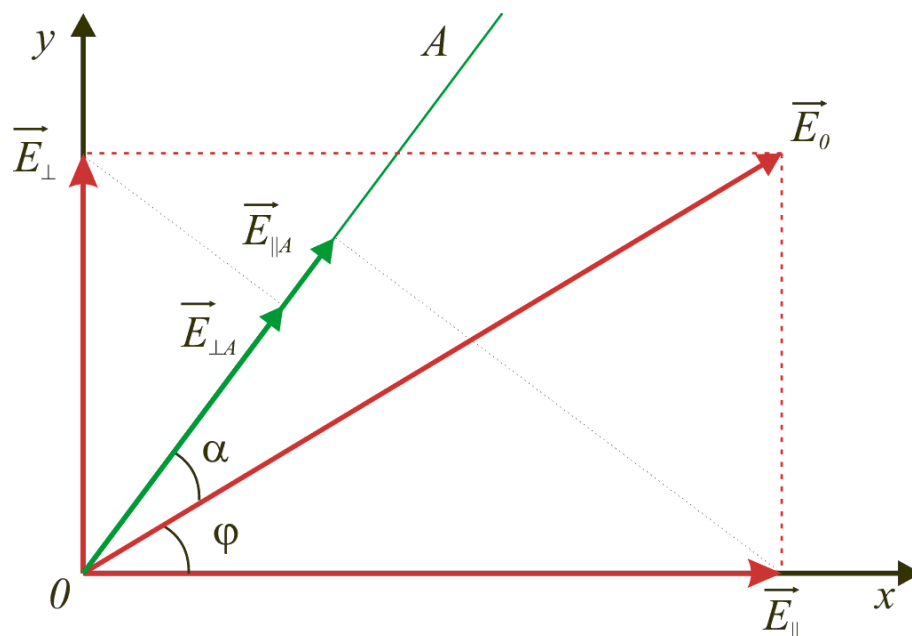


Рис. 3

Как видно из рис. 3, анализатор пропускает составляющие обыкновенной и необыкновенной волн вдоль одного направления ОА, амплитуды которых равны соответственно

$$\begin{aligned} E_{\perp A} &= E_0 \sin \varphi \sin(\alpha + \varphi) \\ E_{\parallel A} &= E_0 \cos \varphi \cos(\alpha + \varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку обыкновенная и необыкновенная волны, возбуждаемые в кристалле, когерентны, то вышедшие из анализатора лучи интерферируют. Результирующая интенсивность ( $I \sim E^2$ ), используя закон сложения однонаправленных колебаний (теорема косинусов), может быть определена как:

$$I = I_0 \left[ \sin^2 \varphi \sin^2(\alpha + \varphi) + \cos^2 \varphi \cos^2(\alpha + \varphi) + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \sin 2(\alpha + \varphi) \cos \delta \right] \quad (7)$$

Полученная выше формула описывает зависимость интенсивности световой волны прошедшей через фазовую пластинку, расположенную между поляризатором анализатором при любом взаимном расположении. Эта формула не учитывает потери в поляризаторе, анализаторе и фазовой пластинке.

Если в качестве двулучепреломляющего образца используется четвертьволновая пластинка ( $\delta = \pi/2$ ), то для нее формула (7) может быть представлена в виде:

$$I = I_0 [\sin^2 \varphi \sin^2(\alpha + \varphi) + \cos^2 \varphi \cos^2(\alpha + \varphi)] \quad (8)$$

### Методика эксперимента



Рис. 4

Лабораторная работа выполняется с помощью модульного учебного комплекса МУК-ОВ (рис. 4). Он содержит вертикальную оптическую скамью, лазер, поляризатор, четвертьволновую пластинку, анализатор, фотоприемник. Оптическая схема представлена на рис. 5.

Источником света 1 служит полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 650 нм, жестко закрепленный на оптической скамье. Поляризационные приспособления состоят из поляризатора 2, четвертьволновой пластинки 3 и анализатора 4. Четвертьволновая пластинка, изготовленная из кристаллического кварца, помещена во вращающуюся оправу с нанесенными градусными делениями ценой  $1^\circ$ . Анализатором и поляризатором служит пленочный поляризатор. Он установлен в аналогичной оправе. При этом его ориентация в оправе такова, что отсчет  $0^\circ$  соответствует максимуму пропускания линейно поляризованного излучения

лазера. Используемый в формулах 7 и 8 угол  $\alpha$  может быть вычислен как  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ , где  $\alpha_1$  – значение угла поворота поляризатора, а  $\alpha_2$  – анализатора.

Измерения интенсивности света производятся фотоприемником 5 и измерительным устройством 6. Последнее представляет собой усилитель напряжения с цифровым вольтметром. Измерения интенсивности производятся в относительных единицах.

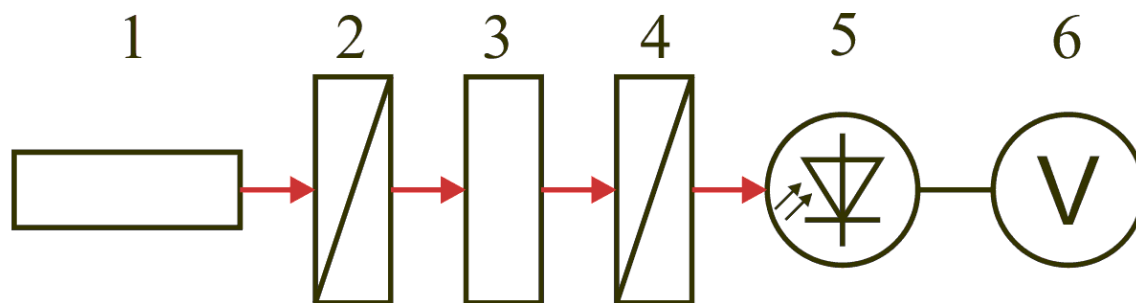


Рис.5

### *Рекомендуемое задание к работе*

1. Включите кнопку «Сеть» электронного блока. Кнопкой выбора фотоприемников выберете фотоприемник №4. Включите лазер.
2. Установите поляризатор в положение  $\alpha_1 = 0^\circ$  (максимум интенсивности прошедшего света).
3. Установите анализатор в положение  $\alpha_2 = 90^\circ$  (минимум интенсивности прошедшего света).
4. Установите между поляризатором и анализатором четвертьволновую фазовую пластинку.
5. Меняя угол  $\varphi$  через каждые  $10^\circ$ , измерьте значения относительной интенсивности  $J/J_0$ . Произведите нормировку полученных данных (путем деления на максимальное значение) и постройте график. В тех же координатах постройте график теоретической зависимости. Сравните полученные данные.
6. Для значений  $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ , меняя угол  $\alpha_2$  через каждые  $10^\circ$  измерьте значения относительной интенсивности  $J/J_0$ . Произведите нормировку полученных данных и постройте график. В тех же координатах постройте график теоретической зависимости. Сравните полученные данные.

Июнь 2012