

## Лабораторная работа № 17.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

**Задача работы:** исследование поляризованного света гелий-неонового лазера, знакомство с типами поляризации.

### СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Любые волны, включая электромагнитные, образуются по одному общему принципу. Возмущение, возникающее в какой-нибудь точке в известный момент времени, проявляется позже на некотором расстоянии от начальной точки. В электромагнитной волне возмущениями являются векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Простейшая электромагнитная волна — это *плоская волна*, в которой векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  зависят только от времени и одной декартовой координаты. Так как в свободной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  изменяются синфазно, достаточно рассматривать только электрическую составляющую волны (вектор  $\vec{E}$ ), что имеет определенный физический смысл, так как взаимодействие излучения с веществом определяется в основном электрическим, а не магнитным полем. Если вектор  $\vec{E}$  изменяется по гармоническому закону, т. е. изменения его модуля описываются синусоидальной функцией, волну называют монохроматической.

Плоская монохроматическая волна, распространяющаяся в направлении оси  $z$ , может быть записана в следующем виде:

$$E(z,t) = A \cos \left[ \left( \frac{2\pi}{T} \right) \left( t - \frac{z}{v} \right) + \varphi_0 \right] \quad (1)$$

Величину  $A$  называют *амплитудой волны*, аргумент — *фазой*, а  $\varphi_0$  — *начальной фазой*. Вид функции (1) показывает, что она периодична во времени с периодом  $T$ . Эта функция периодична также в пространстве с периодом  $\lambda = vT$ , называемым *длиной волны*. Параметр  $v$  представляет собой скорость распространения поверхности равной фазы колебания и называется *фазовой скоростью волны*. Кроме перечисленных используются следующие параметры волны:  $\nu = 1/T$  — частота,  $\omega = 2\pi/T$  — круговая частота,  $\sigma = 1/\lambda$  — волновое число, а также параметр  $k = 2\pi/\lambda$ . Вектор  $k$ , по модулю равный  $2\pi/\lambda$  и указывающий направление распространения волны, называют *волновым вектором*.

Фазовая скорость  $v$  связана с другими параметрами следующими соотношениями:

$$v = \lambda/T = \omega/k.$$

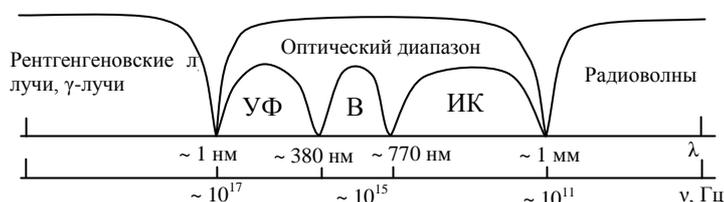


Рис. 1. Шкала электромагнитных волн.

Электромагнитные волны могут существовать с любой длиной волны  $\lambda$ . Общепринято разделять спектр электромагнитных волн на радиодиапазон ( $\lambda > 1$  мм), оптический диапазон ( $1$  нм  $< \lambda < 1$  мм), диапазон рентгеновского излучения и  $\gamma$ -лучей ( $\lambda < 1$  нм).

Оптический диапазон обычно разделяют на ультрафиолетовую (УФ,  $1 \text{ нм} < \lambda < 380 \text{ нм}$ ), видимую (В,  $380 \text{ нм} < \lambda < 770 \text{ нм}$ ) и инфракрасную (ИК,  $770 \text{ нм} < \lambda < 1 \text{ мм}$ ) области. Границы диапазонов и областей носят условный характер. Электромагнитные волны видимого диапазона вызывают в глазу человека зрительное ощущение, и их называют светом.

При решении многих задач, например при суммировании волн, вместо тригонометрической формы записи волны (1) удобнее использовать экспоненциальную запись. Функции  $\cos \psi$  и  $\sin \psi$  согласно формуле Эйлера являются соответственно действительной  $\text{Re}$  и мнимой  $\text{Im}$  частями комплексной функции  $\exp(i\psi)$ . С учетом введенных параметров  $\omega$  и  $k$  запишем плоскую монохроматическую волну (1) в экспоненциальной форме:

$$E(z, t) = A \text{Re} \exp[-i(\omega t - kz + \varphi_0)]. \quad (2)$$

Символ  $\text{Re}$  обычно не пишут в промежуточных выкладках, и осуществляют переход от экспоненты к ее действительной части лишь в окончательных выражениях. Произвольную монохроматическую волну можно записать в следующем виде:

$$E(r, t) = A(r) \exp\{-i[\omega t - \varphi(r)]\}, \quad (3)$$

где  $r$  — радиус-вектор произвольной точки пространства.

Удобным понятием является комплексная амплитуда

$$U = A \exp i\varphi,$$

характеризующая и амплитуду, и фазу волны. Подставляя выражение (3) в волновое уравнение, можно показать, что комплексная амплитуда должна удовлетворять уравнению Гельмгольца:

$$(\nabla^2 + k^2) U = 0,$$

где  $\nabla^2$  — оператор Лапласа.

Геометрическое место точек, в которых фаза волны в данный момент времени имеет одно и то же значение [ $\varphi(r) = \text{const}$ ], называют *волновой поверхностью* или *фронтом волны*. Нормали к волновому фронту свободной волны совпадают со световыми лучами, вдоль которых осуществляется передача световой энергии. В плоской волне волновой фронт плоский. Световая волна от точечного источника имеет сферический волновой фронт. Уравнение сферической волны имеет вид:

$$E(r, t) = \left(\frac{A}{r}\right) \exp[-i(\omega t - kr)], \quad (4)$$

где  $A$  — амплитуда на единичном расстоянии  $r$  от источника. В практической оптике источник считают точечным, если расстояние  $r$  превышает линейные размеры источника не менее чем в 10 раз.

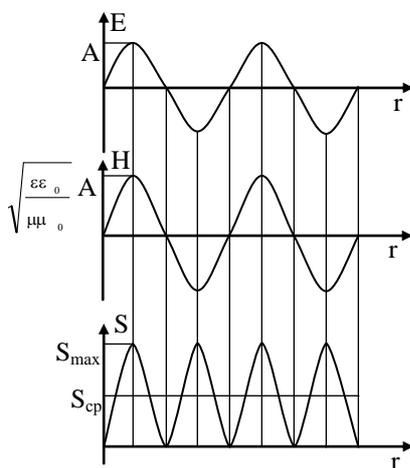


Рис. 2. Графики электрической и магнитной напряженностей и плотности потока энергии  $S$  для монохроматической волны.

Оптический диапазон характеризуется очень большой частотой колебаний ( $\nu \sim 10^{15}$  Гц), и поэтому мгновенное значение амплитуды волны измерять практически невозможно вследствие инерционности реальных фотоприемников. Для человеческого глаза инерционность составляет  $1/50$  с, а для самых быстродействующих фотоприемников ее значение  $\approx$  нескольким наносекундам. Вследствие инерционности фотоприемников имеется возможность регистрировать только усредненные значения энергетических величин. Введем для усредненной во времени плотности потока энергии следующее обозначение:  $\langle S \rangle$

Графики синусоидально изменяющихся во времени

напряженностей электрического и магнитного полей, а также плотности потока энергии для случая монохроматической волны изображены на рис. 2. Из формул : (1),

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

следует, что  $S_{\min} = 0$ , а  $S_{\max} = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} A^2$ . Следовательно, среднее значение плотности потока энергии

$$\langle S \rangle = S_{\text{cp}} = \frac{(S_{\min} + S_{\max})}{2} = 0,5 \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} A^2 \quad (5)$$

Величину, пропорциональную квадрату амплитуды электромагнитного колебания, называют *интенсивностью I* света:

$$I = kA^2 = kUU^*, \quad (6)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $U^*$  — величина, комплексно сопряженная с комплексной амплитудой  $U$ .

Световую волну в любой точке пространства однозначно задает правовинтовая тройка векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{v}$ , однако векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  могут быть произвольно ориентированы относительно направления распространения волны (вектора  $\vec{v}$ ). Это свойство световой волны характеризуют термином *поляризации*, введенным в начале XIX в. Малюсом.

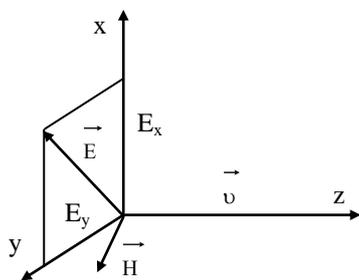


Рис. 3. Произвольное расположение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  относительно вектора  $\vec{v}$ .

Свет называют *поляризованным*, если направление векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  остается постоянным во времени или изменяется по определенному закону.

Для неполяризованного (естественного) света направления колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  быстро и беспорядочно сменяют друг друга, причем эта совокупность колебаний статистически симметрична относительно направления распространения волны. Рассмотрим возможные состояния поляризации света на примере монохроматической волны. Тройка

векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{v}$  с произвольной ориентацией векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  относительно вектора  $\vec{v}$ , совпадающего с осью  $Z$  прямоугольной системы координат  $XYZ$ , изображена на рис. 3. Проекции вектора  $\vec{E}$  на оси координат  $X$  и  $Y$  можно представить как гармонические колебания с амплитудами  $A_x$ ,  $A_y$  и некоторой разностью фаз  $\delta\varphi$ . Известно, что конец вектора  $\vec{E}$  описывает в плоскости  $XY$  кривую, имеющую следующее уравнение:

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{A_x}\right)\left(\frac{E_y}{A_y}\right)\cos(\delta\varphi) = \sin^2(\delta\varphi). \quad (7)$$

Последнее уравнение задает эллипс, большая ось которого наклонена под некоторым углом к оси  $X$  (рис. 4, а). Следовательно, световая волна в общем случае поляризована эллиптически. Поляризацию называют правой (ПР), когда наблюдателю, смотрящему навстречу световому лучу, кажется, что конец электрического вектора описывает эллипс, двигаясь по часовой стрелке, и левой — при противоположном движении. Для поляризованного света разность фаз  $\delta\varphi$  колебаний вдоль осей  $X$  и  $Y$  остается постоянной за время наблюдения. Если  $\delta\varphi = m\pi$ , где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , то эллипс (7) вырождается в прямую линию:

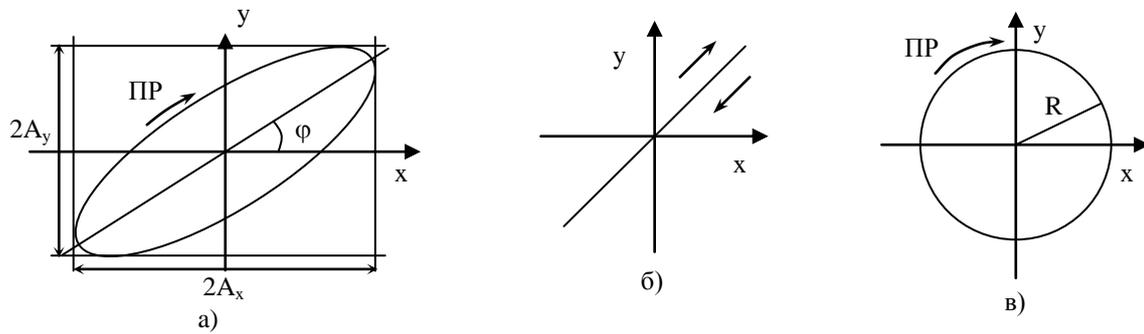


Рис. 4. Поляризация света: а - эллиптическая; б - линейная; с - круговая.

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^m \frac{A_y}{A_x}$$

В этом случае свет называют *линейно-* или *плоскополяризованным* (рис. 4, б). При выполнении условий  $A_x = A_y = R$  и  $\delta\varphi = m\pi/2$ , где  $m = \pm 1, \pm 3, \dots$  эллипс (7) превращается в окружность, и свет называют *циркулярно поляризованным* или *поляризованным по кругу* (рис. 4, с).

Понятие *поляризация* относится к поведению световой волны в одной точке поля, и в общем случае состояние поляризации может быть неодинаковым в различных точках поля.

Для выделения линейно поляризованного света используют оптические устройства, называемые поляризаторами. Действие любого поляризатора заключается в том, что он разделяет пучок света на два ортогонально поляризованных пучка, пропускает один из них и поглощает или отклоняет другой. Поляризаторы, применяемые для анализа состояния поляризации света, называют анализаторами. При последовательном прохождении естественного света через поляризатор *П* и анализатор *А* интенсивности  $I_0$  и  $I_A$  входящего в поляризатор и выходящего из анализатора пучков связаны законом Малюса (рис. 5, а):

$$I_A = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между направлениями поляризации пучков, пропускаемых поляризатором и анализатором соответственно.

Закон Малюса следует из того, что поляризатор и анализатор пропускают только проекцию колебания на свою плоскость поляризации (рис. 5, б). Для изменения

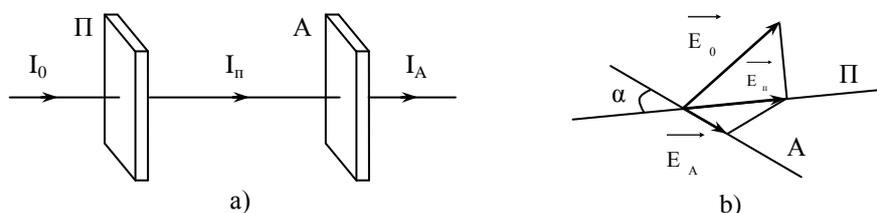


Рис. 5. Прохождение света через поляризатор и анализатор: а) обозначение интенсивности света при последовательном прохождении через поляризатор и анализатор; б) векторная диаграмма для нахождения амплитуды колебаний световой волны после поляризатора и анализатора.

состояния поляризации применяют фазовые пластины, действие которых основано на разделении поляризованного пучка света на два взаимно ортогонально линейно поляризованных пучка, введении разности фаз между этими пучками и повторном соединении их в единый пучок. В зависимости от введенной разности фаз  $\pi/2$ ,  $\pi$  и  $2\pi$  фазовую пластину называют четвертьволновой, полуволновой и волновой.

Рассмотрим распространение света в одноосном кристалле в направлении, перпендикулярном оптической оси. Возьмем плоскопараллельную кристаллическую пластинку, грани которой вырезаны вдоль оптической оси. Опыт показывает, что падающий нормально пучок света распространяется в пластинке в прежнем направлении. Однако состояние поляризации света при прохождении через пластинку изменяется: если падающий свет поляризован линейно, прошедший свет в общем случае поляризован эллиптически. Изменение поляризации легко понять, если падающую волну разложить на две составляющих, в одной из которых вектор  $\vec{E}$  параллелен оптической оси, в другой — перпендикулярен. Оказывается, что эти составляющие распространяются с разными скоростями и при прохождении через пластинку между ними возникает сдвиг по фазе.

Различие скоростей этих волн можно объяснить на основе электронной теории дисперсии. Одинаковым смещениям оптического электрона атома вдоль оптической оси и в перпендикулярном направлении соответствуют разные квазиупругие возвращающие силы. Поэтому будут различаться и собственные частоты  $\omega$  колебаний электрона в этих взаимно перпендикулярных направлениях. Поляризуемость атома определяется разностью квадратов частоты  $\omega$  света и частоты собственных колебаний электрона. Следовательно, различным направлениям колебаний в световой волне определенной частоты соответствуют различные значения поляризуемости, диэлектрической проницаемости и показателя преломления.

Обозначим  $n_o$  показатель преломления для волны, в которой вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен оптической оси,  $n_e$  — для волны, в которой вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости, содержащей оптическую ось и направление распространения волны. Этим волнам с ортогональными направлениями поляризации соответствуют различные фазовые скорости  $v_o = c/n_o$  и  $v_e = c/n_e$ . Пусть на пластинку падает линейно поляризованная волна. Тогда на входе обе волны имеют одинаковую фазу. Разность их фаз  $\delta$  на выходе из пластинки зависит от ее толщины  $d$ :

$$\delta = (\omega/c)(n_o - n_e)d. \quad (8)$$

Разумеется, необходимая разность фаз получится только для света определенной частоты. Это обусловлено как прямой зависимостью  $\delta$  от  $\omega$  в (8), так и дисперсией показателей преломления  $n_o$  и  $n_e$ . Свет круговой поляризации получается при условии, что плоскость поляризации падающей волны составляет угол  $\pm\pi/4$  с оптической осью пластинки (рис. 6), так как только в этом случае равны амплитуды волн, между

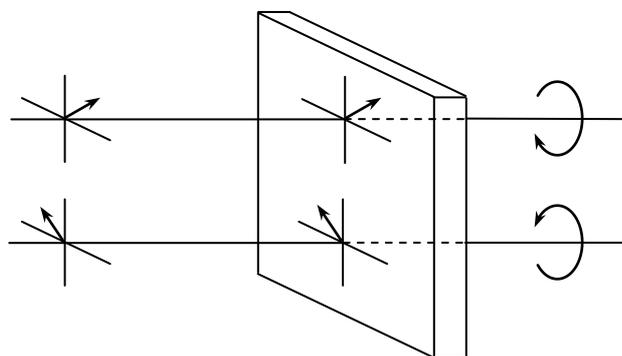


Рис. 6. Получение света круговой поляризации.

которыми пластинка  $\lambda/4$  вносит сдвиг фаз  $\pi/2$ . Пластинки  $\lambda/4$  изготавливают обычно из кварца или из тонких листочков слюды. Качество пластинки  $\lambda/4$  можно проверить, исследуя с помощью анализатора выходящий из нее циркулярно поляризованный свет.

При правильно подобранной толщине пластинки вращение анализатора не должно приводить к изменению интенсивности проходящего света.

Пластинка  $\lambda/4$  может быть использована и для обратного превращения циркулярно поляризованного света в линейно поляризованный. Ясно, что направление

поляризации выходящего света при этом составляет угол  $\pi/4$  с оптической осью пластинки.

С помощью четвертьволновой пластинки можно также отличить на опыте свет круговой поляризации от естественного, а эллиптический — от частично поляризованного. Одного только поляризационного прибора (анализатора) недостаточно, чтобы различить типы поляризации. Как для поляризованного по кругу, так и света естественного, интенсивность после прохождения через анализатор одинакова при любой его ориентации. Если же предварительно ввести пластинку  $\lambda/4$ , то поляризованный по кругу свет превратится в линейно поляризованный, который можно полностью погасить при определенной ориентации анализатора. Естественный свет можно рассматривать как наложение двух волн одинаковой интенсивности с ортогональными поляризациями, разность фаз между которыми изменяется в течение времени наблюдения случайно. Внесение четвертьволновой пластинкой дополнительной постоянной разности фаз между ними не может изменить характера соотношения фаз ортогональных составляющих. Поэтому прошедший через четвертьволновую пластинку свет остается неполяризованным и его интенсивность не меняется при повороте анализатора.

Эллиптически поляризованный свет можно представить как сумму двух волн, линейно поляризованных вдоль главных осей эллипса, разность фаз между которыми  $\pm\pi/2$ . Пропуская исследуемый свет через пластинку  $\lambda/4$ , к этой разности можно добавить еще  $\pm\pi/2$  и тем самым сделать ее равной 0 или  $\pi$ , т. е. Превратить эллиптическую поляризацию в линейную, в чем можно убедиться с помощью анализатора. Для этой цели пластинка  $\lambda/4$  должна быть ориентирована так, чтобы ее главные направления (т. е. направление оптической оси и перпендикулярное ей) совпадали с главными осями эллипса колебаний, определенными предварительно с помощью анализатора (напомним, что для превращения света круговой поляризации в линейную пластинка может быть ориентирована как угодно). Таким образом, по направлению оптической оси пластинки определяют ориентацию осей эллипса колебаний, а по положению анализатора, при котором гасится выходящий из пластинки пучок, — отношение этих осей.

Описанным выше методом можно легко отличить эллиптически поляризованный свет от частично поляризованного, который можно рассматривать как смесь линейно поляризованного света с естественным. И в том, и в другом случае при повороте анализатора наблюдается лишь изменение интенсивности света между некоторыми максимальным и минимальным значениями. Если же предварительно ввести в пучок пластинку  $\lambda/4$ , соответственным образом ее ориентируя, то эллиптически поляризованный свет превратится в линейно поляризованный и может быть полностью погашен анализатором. В случае, частично поляризованного света пластинка  $\lambda/4$  при указанной ориентации никакого влияния не оказывает, т. е. выходящий из нее свет не будет погашен анализатором ни при какой его ориентации.

## Описание установки и методики эксперимента

Для проведения работы используется следующее оборудование: квантовый генератор ЛГ-75, селеновый фотоэлемент, регистрирующий микроамперметр, поляририд, пластинка в четверть волны и оптическая скамья. Все это составляет единую установку, схема которой представлена на рис. 7.

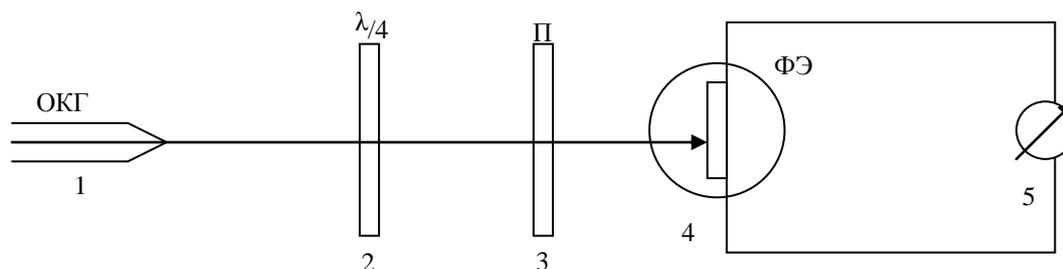


Рис. 7.

Свет от гелий-неонового лазера 1, пройдя слюдяную пластинку в четверть волны 2 и поляририд 3, падает на фотоэлемент 4. Возникающий фототок регистрируется микроамперметром. Слюдяная пластинка в четверть волны и поляририд-анализатор помещены во вращающиеся оправы с круговой шкалой и смонтированы на одном держателе. Слюдяная пластинка может выниматься из оправы. Пластинка в  $\lambda/4$  необходима для получения эллиптически поляризованного света, а при строго определенных положениях пластинки и для получения света, поляризованного по кругу. Стрелка на оправе пластинки соответствует направлению Пр.

Поляририд анализирует падающий на него пучок света. Вращая поляририд вокруг оси светового пучка, можно пропускать составляющие светового вектора по любым направлениям. Стрелка на оправе поляриоида соответствует направлению, перпендикулярному оптической оси.

Селеновый фотоэлемент открывается только на время измерения.

### Порядок выполнения работы:

Включить гелий-неоновый лазер. ВКЛЮЧЕНИЕ ЛАЗЕРА ПРОВОДИТСЯ ТОЛЬКО ЛАБОРАНТОМ.

#### Исследование линейно-поляризованного света:

1. осторожно вынуть слюдяную пластинку из оправы;
2. найти положение поляриоида, соответствующее минимальному значению фототока. Принять данный отсчет за нулевой;
3. поворачивая поляририд, через 15 градусов снять значение силы фототока;
4. построить график зависимости силы фототока от угла поворота поляриоида в полярной системе координат;
5. на той же координатной сетке построить график функции  $\text{Cos}^2 \alpha$ .

#### Исследование света поляризованного по кругу:

1. установить поляририд так, чтобы показание микроамперметра было минимальным;
2. поместить в оправу пластинку в четверть волны и поворачивать вокруг оси пучка, отмечая значение фототока через каждые  $15^\circ$  ;
3. по результатам измерений построить график зависимости фототока от угла поворота пластинки и найти четыре точки, в которых интенсивность света минимальна;
4. в одно из этих положений установить пластинку, а затем повернуть ее на  $45^\circ$ ;

5. вращая поляроид-анализатор вокруг пучка, снять значения фототока через  $20^\circ$ ;
6. построить график зависимости фототока от угла поворота поляроида.

#### **Исследование эллиптически поляризованного света:**

1. изменить ориентацию слюдяной пластинки на  $30^\circ$  в ту или иную сторону от положения, необходимого для получения света, поляризованного по кругу;
2. вращать анализатор, через каждые  $15^\circ$  отмечая значения силы фототока;
3. построить график зависимости силы фототока от угла поворота анализатора относительно оси светового пучка.

#### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ**

- 1) Поляризованным или нет является излучение газового лазера ?
- 2) Получите в параметрической форме уравнения колебания взаимно перпендикулярных компонент вектора  $E$  для света, поляризованного по кругу, по эллипсу. Как записать в декартовых координатах уравнение траектории, описываемой в этих случаях электрическим (магнитным) вектором световой волны ?
- 3) Почему вполне монохроматическим светом может быть только поляризованный свет ?
- 4) Как можно охарактеризовать колебания вектора  $E$  в естественном свете при безинерционном наблюдении его состояния колебаний, при инерционной регистрации явления ?
- 5) Есть ли различия в физическом смысле утверждений о существовании равенства амплитуд тех двух взаимноперпендикулярных компонент, на которые можно разложить вектор  $E$ , для света, поляризованного по кругу и для естественного света ?
- 6) Почему для получения эллиптически поляризованного света путем сложения двух взаимноперпендикулярных колебаний необходимо располагать обязательно когерентными колебаниями ?
- 7) Объяснить действие пластинок в четверть и пол-волны.
- 8) Как отличить свет, поляризованный по кругу, от естественного света? Как установить направление вращения вектора  $E$  в свете, поляризованном по кругу ?
- 9) Каким будет состояние поляризации эллиптически поляризованного света, если он дополнительно пройдет через пластинку в четверть волны ? Оптическая ось пластинки параллельна одной из осей эллипса поляризации света.
- 10) Почему все опыты по получению света с данным состоянием полной поляризации путем применения кристаллических пластинок нельзя проводить в белом свете?

#### **Рекомендуемый список литературы**

1. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: Учебник – М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. 656 С.
2. Прикладная оптика. Под общ. ред. Заказнова Н.П. – М.: Машиностроение. 1988. 312 С.
3. Москалев В.А. Теоретические основы оптико-физических исследований. – Л.: Машиностроение. 1987. 318 С.
4. Жевандров Н.Д. Анизотропия и оптика. – М.: Наука. 1974. 167 С.