

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4-5: Проверка закона Малюса

Студент \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Допуск \_\_\_\_\_ Выполнение \_\_\_\_\_ Защита \_\_\_\_\_

**Цель работы:** экспериментальная проверка закона Малюса.

**Приборы и принадлежности:** установка, состоящая из фотоэлемента, двух поляроидов, ламповый выпрямитель, микроамперметр.

### Описание установки

В металлическом корпусе размещены перед фотоэлементом два поляроида: сначала поляризатор P, затем анализатор A. Анализатор может вращаться относительно поляризатора с помощью ручки, на которой нанесена визирная линия. Отсчет углов между главными плоскостями поляроидов производится по лимбу, укрепленному неподвижно на корпусе прибора.

Цепь фотоэлемента состоит из микроамперметра и выпрямителя, включаемого в сеть 220 В (см. рис.1.). Источник света S располагается перед поляризатором.

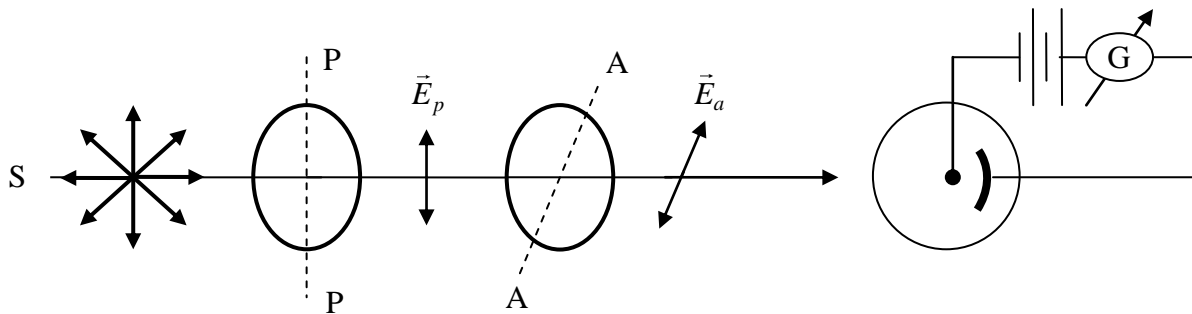


Рис. 1.

Из законов для внешнего фотоэффекта известно, что величина фототока прямо пропорциональна интенсивности  $I$  падающего на фотоэлемент света. Если между источником света и фотоэлементом разместить два поляроида (поляризатор и анализатор), то интенсивность света, падающего на фотоэлемент, будет ослаблена в соответствии с законом Малюса в  $\cos^2 \varphi$  раз, где  $\varphi$  - угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Следовательно, уменьшится в  $\cos^2 \varphi$  раз и величина фототока в фотоэлементе.

Цель данной лабораторной работы состоит в проверке закона Малюса для линейно поляризованного света: *интенсивность света, прошедшего через анализатор  $I_a$ , равна интенсивности линейно поляризованного света, падающего на анализатор  $I_p$ , умноженной на квадрат косинуса угла  $\varphi$  между плоскостью поляризации падающего на анализатор света и плоскостью пропускания анализатора*

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi .$$

### Порядок выполнения работы

1. Включите в сеть выпрямитель и осветитель. Вместе с анализатором вращается диск, на котором нанесены деления, соответствующие углу поворота плоскости поляризации анализатора. Поворачивая анализатор, добейтесь того, чтобы микроамперметр показывал минимальную величину фототока. Это будет означать, что плоскости поляризатора и анализатора оказались взаимно перпендикулярными, то есть, угол между ними равен  $90^\circ$  (то есть  $\varphi = 90^\circ$ ). В этот момент посмотрите на визирную линию. Значение, которое она будет показывать на шкале примите за  $\varphi = 90^\circ$ .
2. Отметьте на неподвижном лимбе точку, соответствующую углу поворота  $90^\circ$ .
3. С помощью ручки «установка нуля» установите стрелку микроамперметра в нулевое положение (так как согласно закону Малюса, фототок при  $\varphi = 90^\circ$  должен быть равен нулю ( $\cos 90^\circ = 0$ )).
4. Далее, поворачивая анализатор на  $10^\circ$  относительно отмеченной на неподвижном лимбе точки, соответствующей углу  $\varphi = 90^\circ$ , снимайте показания микроамперметра через каждые  $10^\circ$ .
5. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

**Таблица 1.** Зависимость фототока  $I$  в фотоэлементе от угла  $\varphi$  между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора

$I, \text{мкА}$										
$\varphi$	$90^\circ$	$80^\circ$	$70^\circ$	$60^\circ$	$50^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$20^\circ$	$10^\circ$	$0^\circ$
$\cos \varphi$										
$\cos^2 \varphi$										

6. Постройте график зависимости  $I = f(\cos^2 \varphi)$ .

7. Анализируя график, сделайте вывод о справедливости закона Малюса (согласно этому закону, зависимость между интенсивностью света  $I_a$ , прошедшего через анализатор, и  $\cos^2 \varphi$  должна быть линейной).

### Контрольные вопросы

1. Свет и его природа.
2. Какой свет называется естественным, поляризованным, плоско поляризованным? Какие виды поляризованного света Вы знаете?.
3. Что называют плоскостью поляризации света?
4. Что такое степень поляризации света?
5. Дайте понятие о главной оптической оси и главном сечении поляризатора?
6. Расскажите о способах получения плоско поляризованного света.
7. Сформулируйте закон Малюса и закон Брюстера.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Светом** называются электромагнитные волны с длиной волны от 380 нм до 760 нм, воспринимаемые органами зрения человека ( $1 \text{ нм (нанометр)} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

**Электромагнитной волной** называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

**Поляризацией света** называется физическая характеристика оптического излучения, которая описывает поперечную анизотропию световых волн.

Иногда **поляризацией света** называют процесс получения поляризованного света из естественного или частично поляризованного.

Понятие «поляризация света» ввёл в физику английский учёный И. Ньютон в 1704 г.

Поляризация света нашла своё объяснение в электромагнитной теории света английского физика Дж. Максвелла. Из этой теории следует, что электромагнитная волна является поперечной (см. рис 1).

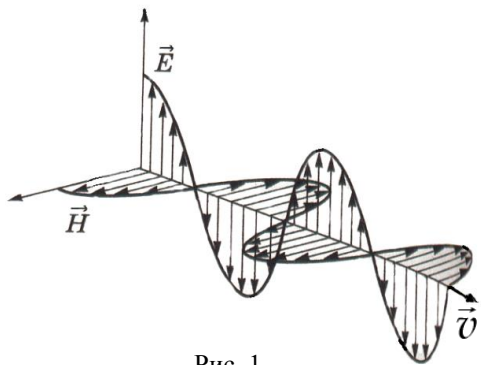
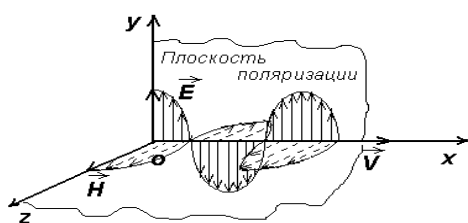


Рис. 1



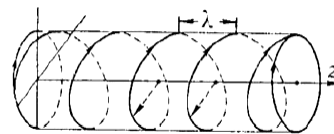
В электромагнитной волне вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  колеблются в одинаковых фазах во взаимно перпендикулярных плоскостях и одновременно перпендикулярно вектору скорости  $\vec{v}$  распространения волны (перпендикулярно лучу). Поскольку  $\vec{E} \perp \vec{H}$ , то при рассмотрении поляризации света достаточно исследовать поведение лишь одного из них. Наблюдения показывают, что физиологические, фотохимические, фотоэлектрические и другие свойства света обусловлены колебаниями электрического вектора  $\vec{E}$  в световой волне. Поэтому вектор  $\vec{E}$  называют обычно световым вектором и исследуют только его.

**Поляризованным** называется свет, в котором направления колебаний вектора  $\vec{E}$  каким-либо образом упорядочены.

Если при распространении волны вектор  $\vec{E}$  колеблется всё время в какой-либо одной плоскости, свет называют **линейно поляризованным** или **плоско поляризованным**.

Плоскость, проходящая через направление колебаний вектора  $\vec{E}$  плоско поляризованного света и направление распространения этой волны, называется **плоскостью поляризации света**.

Если конец вектора  $\vec{E}$  при движении волны описывает эллипс, то свет называют **эллиптически поляризованным**.



Если конец вектора  $\vec{E}$  при движении волны описывает окружность, то свет называют **циркулярно поляризованным** или **поляризованным по кругу**.

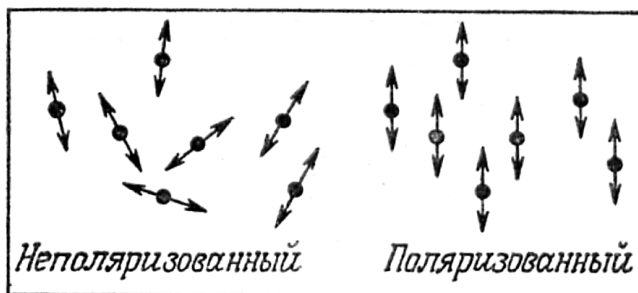


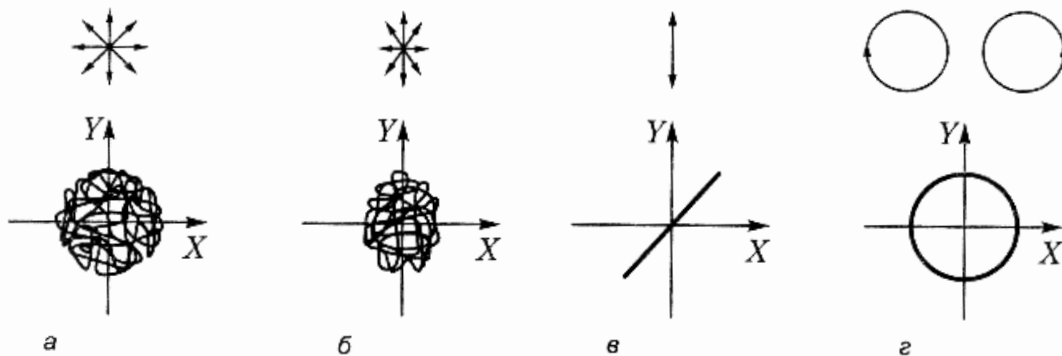
Свет представляет собой поток особых частиц, называемых **квантами** света или **фотонами**, которые представляют собой ограниченные в пространстве цуги электромагнитного поля.

Квант света, испускаемый атомом, всегда линейно поляризован. В реальных источниках света одновременно излучают множество атомов, причём каждый атом излучает квант света с произвольной ориентацией вектора  $\vec{E}$ . Поэтому в результирующей световой волне направление колебаний вектора  $\vec{E}$  в каждый момент времени непредсказуемо и все направления перпендикулярные распространению световой волны оказываются равновероятными. Такой свет называется **естественным** или **неполяризованным**.



Чаще всего имеется какое-либо преимущественное направление колебаний вектора  $\vec{E}$ . В этом случае говорят, что свет является **частично поляризованным** в плоскости, проходящей через это направление.





Движение вектора  $\vec{E}$  в естественном (а), частично поляризованном (б) и полностью поляризованном (в, г) свете

Для получения и анализа поляризованного света применяют специальные приборы: поляризаторы и анализаторы.

**Поляризатором** называется устройство для получения поляризованного света.

Человеческий глаз не отличает естественный свет от поляризованного, поэтому для анализа поляризации света используют устройство, называемое **анализатором**.

Поляризатором и анализатором может служить один и тот же прибор в зависимости от того, для каких целей его используют: для получения поляризованного света или для его анализа.

### Способы получения линейно поляризованного света

Для получения полностью или частично поляризованного света обычно используют одно из трёх физических явлений:

- поляризация света при его отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков,
- явление двойного лучепреломления,
- явление линейного дихроизма.

### Поляризация при отражении и преломлении света на границе раздела двух диэлектриков

При падении естественного света на границу двух диэлектриков (например, воздух и стекло), отражённый и преломлённый лучи оказываются частично поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях, причём, в отражённом луче вектор  $\vec{E}$  совершает колебания преимущественно в плоскости перпендикулярной плоскости падения света, а в преломлённом луче, преимущественно в плоскости падения света.

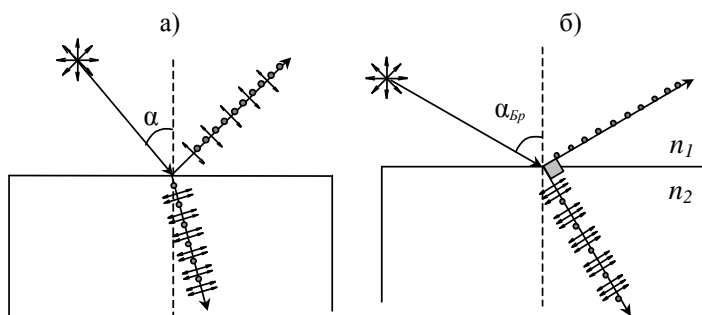


Рис. 2

**Плоскостью падения света** называется плоскость, проходящая через падающий луч и перпендикуляр, восстановленный в точку падения.

Степень поляризации  $P$  этих лучей зависит от их угла падения  $\alpha$  на диэлектрик.

Сначала степень поляризации  $P$  монотонно возрастает с увеличением угла падения  $\alpha$  (см. случай а) на рис. 2 и достигает своего максимального значения  $P_{max}$  при угле  $\alpha_{Br}$ , называемом **углом Брюстера** (см. случай б) на рис. 2), а затем монотонно убывает.

При падении естественного света под углом Брюстера  $\alpha_{Br}$  преломлённый луч достигает своей максимальной степени поляризации и оказывается перпендикулярным к отражённому лучу (см. рис. 2 случай б)).

Угол Брюстера  $\alpha_{Br}$ , при котором наблюдается линейная поляризация отражённого от границы раздела двух диэлектриков света, определяется по **закону Брюстера**:  $tg \alpha_{Br} = n_{21}$ ,

где  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой,

а  $n_1$  и  $n_2$  - абсолютные показатели преломления первой и второй среды соответственно.

### Явление двойного лучепреломления

**Двойным лучепреломлением** называется явление раздвоения падающего на анизотропную среду (например, на прозрачный кристалл) светового луча, обусловленное зависимостью скорости распространения света в этой среде

(т.е. показателя преломления среды  $n$ ) от направления колебания вектора  $\vec{E}$  в световой волне.

У кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением, существует одно (**одноосные кристаллы**) или два (**двуосные кристаллы**) направления, в которых раздвоения луча не происходит. Это направление называется **оптической осью кристалла**.

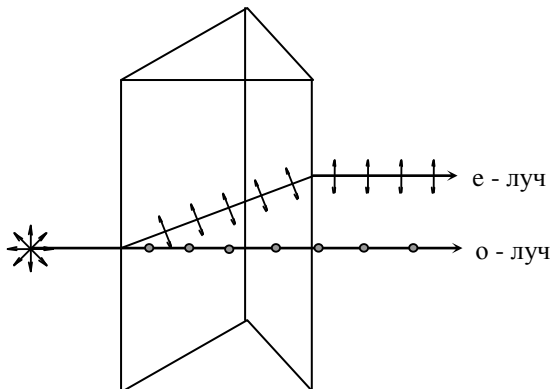


Рис. 3

При падении неполяризованной световой волны на одноосный кристалл она расщепляется на два луча со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации.

Один из лучей имеет плоскость поляризации перпендикулярную главному сечению кристалла и подчиняется законам геометрической оптики (этот луч называют **обыкновенным** и обозначают **О – лучом**), а другой луч имеет плоскость поляризации параллельную главному сечению кристалла и не подчиняется законам геометрической оптики (поэтому этот луч называют **необыкновенным** и обозначают **е – лучом**).

Таким образом, при выходе из кристалла оба луча оказываются линейно поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях (см. рис 3).

**Главным сечением** кристалла называется плоскость, проходящая через направление падающего светового луча и оптическую ось кристалла.

Скорость распространения **О-луча**  $a$ , следовательно, и его показатель преломления  $n_o$  не зависят от направления распространения этого луча в кристалле, (т.е.  $n_o = \text{const}$ ), а скорость **е-луча** и, следовательно,  $n_e$  зависят от его направления распространения в кристалле (т.е.  $n_e \neq \text{const}$ ).

При распространении света вдоль оптической оси кристалла  $n_o = n_e$ , поэтому явление двойного лучепреломления не наблюдается.

### Явление линейного дихроизма

**Линейным дихроизмом** называется явление, при котором среды, обладающие двойным лучепреломлением, неодинаково поглощают лучи с разными плоскостями поляризации.

Например, пластинка из кристалла **турмалина** толщиной всего в 1 мм уже пропускает свет только одного направления колебаний вектора  $\vec{E}$  и полностью поглощает свет всех других направлений. Поэтому такие пластинки раньше использовали в качестве поляризаторов.

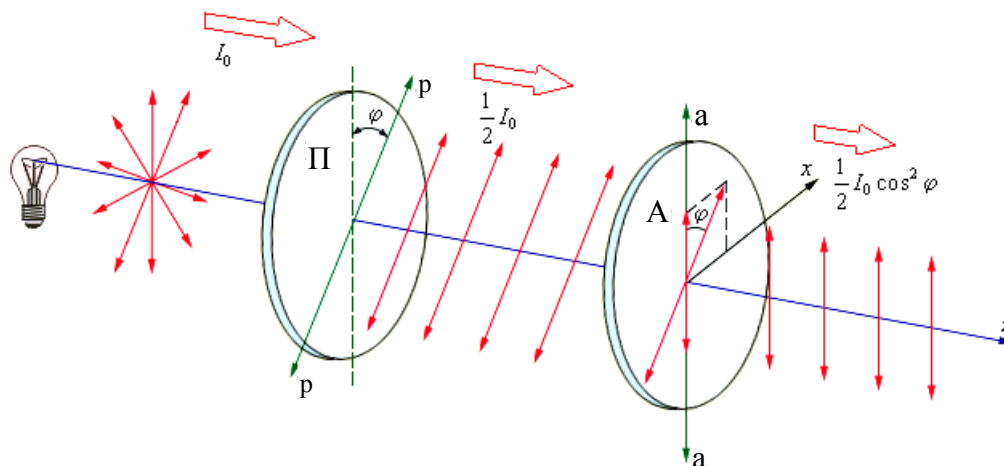


Рис. 4

На рис. 4 поляризатор  $\Pi$  преобразует падающий на него естественный свет интенсивностью  $I_0$  в плоско поляризованный, интенсивность которого при прохождении через поляризатор уменьшается в два раза, то есть,

$I_p = \frac{1}{2} I_0$ , а затем этот свет проходит через анализатор  $A$ , который, в свою очередь ослабляет свет ещё в  $\cos^2 \varphi$ , где  $\varphi$  -

это угол между главными плоскостями поляризатора  $p - p$  и анализатора  $a - a$ .

**Главной плоскостью поляризатора** (плоскостью пропускания поляризатора) называется плоскость, в которой колеблется вектор  $\vec{E}$ , прошедшего через поляризатор линейно поляризованного света (аналогичное определение для **главной плоскости анализатора**).

Если на анализатор падает линейно поляризованный свет интенсивностью  $I_p$ , то интенсивность света, вышедшего из анализатора  $I_a$ , можно определить по **закону Малюса**:

*Интенсивность света, прошедшего через анализатор  $I_a$ , равна интенсивности линейно поляризованного света, падающего на анализатор  $I_p$ , умноженной на квадрат косинуса угла  $\cos^2 \varphi$  между плоскостью поляризации падающего на анализатор света и плоскостью пропускания анализатора:*

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi.$$

**Степенью поляризации света** называют величину равную

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  соответственно максимальная и минимальная интенсивности света, пропускаемого анализатором.

- для естественного света  $I_{\max} = I_{\min}$  и, следовательно,  $P = 0$ ,
- для линейно поляризованного света  $I_{\min} = 0$  и, следовательно,  $P = 1$ ,
- для частично поляризованного света  $I_{\max} \neq I_{\min}$  и, следовательно,  $0 < P < 1$ .