



6-3

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»  
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

Лабораторная работа № 6-3

# Изучение поляризации света

ИГУ, 2012

Иркутский государственный университет  
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

Описаны различные способы получения поляризованного света. Студентам предлагается экспериментально проверить закон Малюса. Предназначено для студентов 1 и 2 курсов дневного и заочного отделений естественных факультетов.

Составитель: к.ф.-м.н., ст. преп. Черных А.А.

# ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цель работы: ознакомление с методами получения и анализа поляризованного света.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья с осветителем (О) и набором держателей, экран (Э), фотоэлемент, ЛАТР, выпрямитель, вольтметр на 150В, микроамперметр на 100мкА, поляризатор (П), анализатор (А), стеклянная стопа (С), тепловой фильтр (Ф), кристалл исландского шпата, препарат в целлофане (Ц), модель рельса (М) в зажимной оправе.

## Краткая теория вопроса

### 1. Естественный и поляризованный свет.

Свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. Колебания волны происходят во взаимно-перпендикулярных плоскостях, но колеблются в этих плоскостях разные векторы:  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля и  $\vec{H}$  - вектор напряженности магнитного поля. Колеблущееся электрическое поле  $E$  обязательно создает колеблющееся магнитное поле  $H$  и наоборот (рис.1).

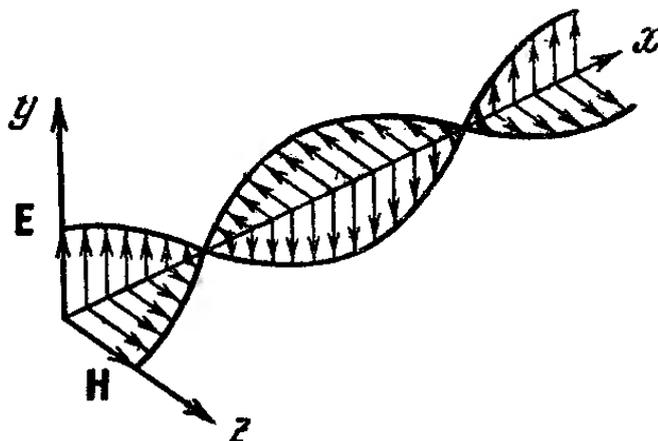


Рис. 1. Электромагнитная волна

Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы же излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора (рис.2; луч перпендикулярен плоскости рисунка). В данном случае равномерное распределение векторов  $\vec{E}$  объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов  $E$  - одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения какого из атомов. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $\vec{E}$  (и, следовательно,  $\vec{H}$ ) называется **естественным**. Опыт и теория показывают, что химическое, физиологическое и другие виды воздействия света на вещество обусловлены главным образом электрическими колебаниями.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется **поляризованным**.

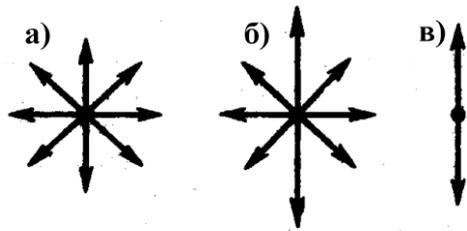


Рис.2. Естественный (а), частично поляризованный (б) и плоскополяризованный (в) лучи

Так, если в результате каких-либо внешних воздействий появляется преимущественное (но не исключительное!) направление колебаний вектора  $\vec{E}$  (рис. 2б), то имеем дело с *частично поляризованным светом*. Свет, в котором вектор  $\vec{E}$  (и, следовательно,  $\vec{H}$ ) колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (рис.2в), называется *плоскополяризованным* (линейно поляризованным).

Плоскость, в которой совершаются электрические колебания (колебания вектора  $\vec{E}$ ) называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость (в которой колеблется вектор  $\vec{H}$ ), называется **плоскостью поляризации**.

Естественный и поляризованный свет на глаз не различимы, поэтому для обнаружения и исследования поляризованного света применяются специальные приборы. В отличие от естественного света, поляризованный свет характеризуется не только интенсивностью (зависящей от квадрата амплитуды напряженности  $E$ ) и длиной волны, но и положением плоскости колебаний (углом её поворота).

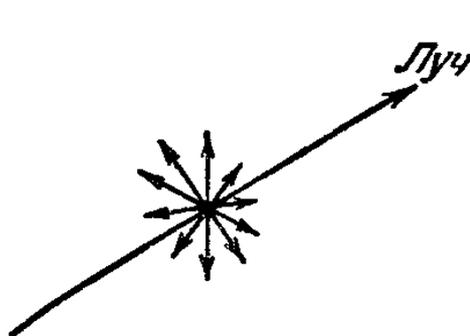


Рис.3а. Естественный свет

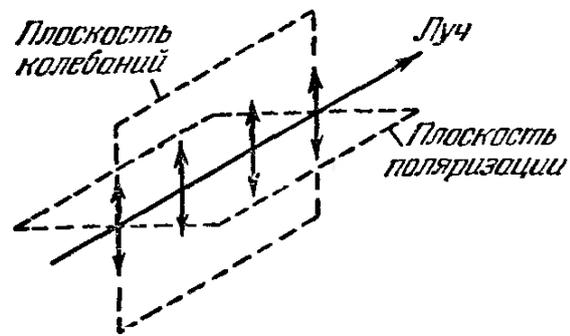


Рис.3б. Поляризованный свет

Естественный свет можно поляризовать, т.е. превратить в поляризованный. Для этого надо создать такие условия, при которых колебания вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , могли бы совершаться только вдоль одного определённого направления.

Для получения поляризованного света используют *поляризаторы* – специальные устройства, выделяющие плоскополяризованный луч из естественного. Простейшим по устройству и самым дешевым поляризатором является поляроид – специально изготовленная пленка, поверхности которой защищены стеклами. Изучение поляризованных потоков света производится с помощью *анализаторов*, в принципе устроенных аналогично поляризаторам и в некоторых случаях взаимозаменяемых.

Поляризаторы пропускают колебания только определенного направления (например, пропускают колебания, параллельные главной

плоскости поляризатора, и полностью задерживают колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора  $E$ , например кристаллы (их анизотропия известна). К природным кристаллам, поляризующим свет, относятся турмалин, кварц, исландский шпат. К искусственным поляризаторам относятся поляроиды (множество микроскопических кристаллов герпатита, внедрённых в прозрачную полимерную плёнку). В фотографии поляризационные фильтры используются для достижения различных художественных эффектов (устранение бликов, затемнение неба, для съёмки в условиях низкой освещённости).

Таким образом, из электрических колебаний естественного света, имеющих всевозможные направления, через кристалл проходят (без поглощения) только те колебания вектора  $\vec{E}$ , которые совершаются в плоскости, соответствующей минимуму поляризационного тока; остальные колебания в той или иной мере ослабляются. В результате, у света, прошедшего через кристалл, электрические колебания совершаются только в одной определенной плоскости, т.е. свет оказывается поляризованным. Измерения показывают, что скорость света в кристаллах зависит не только от направления его распространения, но и от ориентировки вектора  $\vec{E}$  относительно плоскости падения.

Однако в кристаллах существуют направления, вдоль которых скорость распространения света не зависит от ориентировки вектора  $\vec{E}$ . Эти направления называются оптическими осями кристалла. Существуют кристаллы одноосные, двуосные и т.д.

Вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен к направлению своего распространения. Если свет движется вдоль оптической оси кристалла, то вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен этой оси.

Плоскость, проходящая через данный луч и оптическую ось кристалла, называется **главной оптической плоскостью**.

В кристаллах различают два вида лучей:

- 1) обыкновенные лучи, у которых вектор  $\vec{E}$  ориентирован перпендикулярно главной оптической плоскости (и к главной оптической оси);
- 2) необыкновенные лучи, у которых вектор  $\vec{E}$  лежит в главной оптической плоскости и, следовательно, образует с оптической осью некоторый угол (рис.4)

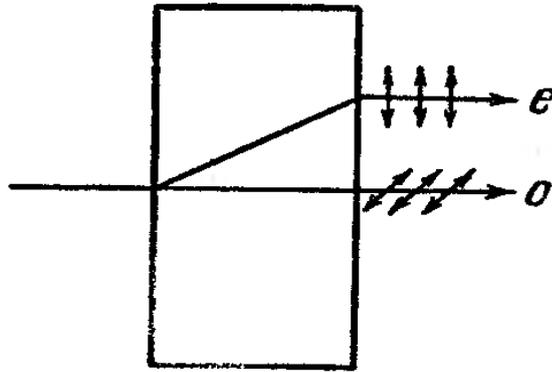


Рис.4. Прохождения естественного луча через двулучепреломляющий кристалл

Обыкновенные лучи подчиняется законам отражения и преломления света (в отличие от необыкновенных).

Обыкновенные лучи (o) распространяется в кристалле с постоянной скоростью  $v_o$ , а необыкновенные (e) - распространяется с различными скоростями  $v_e$  в зависимости от угла между вектором  $\vec{E}$  и оптической осью.

Так как скорости распространения обыкновенного и необыкновенного луча различны, то различны и показатели преломления для них. Обыкновенный луч (o) проходит, не преломляясь и не изменяя своего направления. Необыкновенный луч (e) внутри кристалла отклоняется, а при выходе идет параллельно обыкновенному (рис.3). Это явление называется двойным лучепреломлением. Оба луча поляризован во взаимно перпендикулярных плоскостях. При прохождении через диэлектрик свет частично поглощается, и его интенсивность уменьшается.

В анизотропном кристалле поглощение зависит от ориентации плоскости поляризации, т.е. обыкновенный и необыкновенный лучи будут поглощаться в разной степени. В кристалле турмалина необыкновенный луч практически полностью поглощается при толщине пластинки около 1 мм.

## 2. Закон Малюса

Естественный луч выходит из пластинки турмалина полностью поляризованным в одном направлении. Эту пластинку назовём поляризатором (P).

Пластинку, служащую для анализа степени поляризации света, назовём анализатором (A) (устанавливается после поляризатора). Обе пластинки совершенно одинаковы (их можно поменять местами). Если плоскости «пропускания» анализатора и поляризатора параллельны друг другу, то поляризованный свет пройдёт через анализатор почти без изменений (т.е. его интенсивности почти не уменьшится). Если же плоскости поляризатора и анализатора перпендикулярны друг другу, то анализатор почти полностью погасит падающий на него поляризованный луч (т.е. через анализатор свет не пройдёт). В промежуточных положениях интенсивность света, прошедшего через систему зависит от угла между плоскостями поляризации анализатора и поляризатора и определяется по закону Малюса.

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

Интенсивность света ( $I$ ), прошедшего через анализатор, равна интенсивности ( $I_0$ ) света прошедшего через поляризатор, умноженной на квадрат косинуса угла ( $\alpha$ ) между главными оптическими осями анализатора и поляризатора.

### 3. Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков

Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Устанавливая на пути отраженного и преломленного лучей анализатор (например, турмалин), убеждаемся в том, что отраженный и преломленный лучи частично поляризованы: при поворачивании анализатора вокруг лучей интенсивность света периодически усиливается и ослабевает (полного гашения не наблюдается!). Степень поляризации (степень выделения световых волн с определенной ориентацией электрического (и магнитного) вектора) зависит от угла падения лучей и показателя преломления. Шотландский физик Д. Брюстер (1781—1868) установил закон, согласно которому при угле падения  $\varphi_B$  (угол Брюстера), определяемого соотношением:

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n_{21}, \quad (2)$$

называемое **законом Брюстера**, где  $\varphi_B$  - угол падения лучей, при котором отраженный луч полностью поляризуется, называется **углом полной поляризации** (или **углом Брюстера**);  $n_{21}$  – показатель преломления второй среды относительно первой.

При выполнении закона Брюстера отраженный луч оказывается перпендикулярным к преломленному (рис.5).

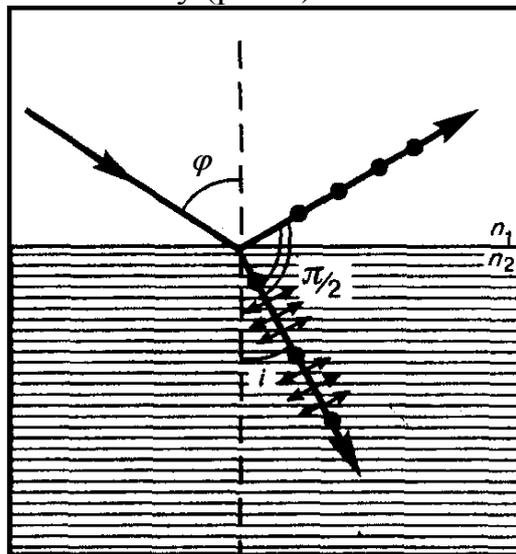


Рис. 5. Поляризация при отражении и преломлении

У отраженной волны вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен к плоскости падения, поэтому в преломленной волне энергия колебаний в плоскости падения будет больше, чем в перпендикулярной плоскости, и волна частично поляризуется.

Степень поляризации преломленного света может быть значительно повышена (многократным преломлением при условии падения света каждый раз на границу раздела под углом Брюстера). Если, например, для стекла

( $n=1.53$ ) степень поляризации преломленного луча составляет  $\sim 15\%$ , то после преломления на 8 - 10 наложенных друг на друга стеклянных пластинок вышедший из такой системы свет будет практически полностью поляризованным (рис.6). Такая совокупность пластинок называется *стопой* и, возможно впервые, была продемонстрирована Александром Григорьевичем Столетовым в 70-ых годах XIX века. Стопа может служить для анализа поляризованного света как при его отражении, так и при его преломлении.

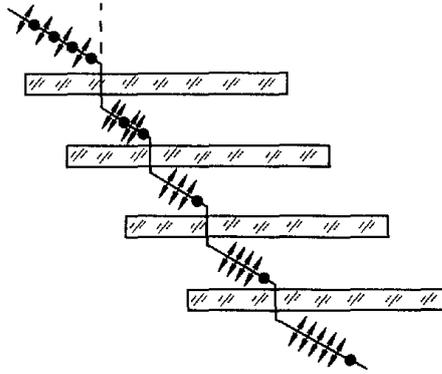


Рис.6. Поляризация при прохождении стопы пластинок

#### 4. Интерференция поляризованных лучей

Естественный луч, проходя через двулучепреломляющий кристалл, разделяется на 2 луча, поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Колебания (волны) в этих плоскостях испускаются различными атомами источника света в разное время, а значит не имеют постоянной разности фаз, поэтому оба разделенных луча некогерентны, и при их сложении интерференции наблюдаться не будет.

Если же на двулучепреломляющий кристалл будет падать луч, поляризованный под произвольным углом к плоскости падения, то колебания в обоих лучах представляют собой разложение одного и того же колебания на два взаимно-перпендикулярных. Значит, эти волны когерентны и могут интерферировать между собой.

Если свести эти два параллельных луча с помощью линзы в одну и ту же точку экрана, то появится разность фаз, обусловленная различием показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей внутри кристалла. Если толщина пластинки  $d$ , то оптическая разность хода лучей

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

Если оптическая разность хода лучей равна целому числу длин волн

$$\delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (5)$$

то получаемая окраска будет зависеть от толщины пленки  $d$  и длины волны  $\lambda$ .

Двоичепреломляющие кристаллы обладают дисперсией - т.е. показатели преломления обыкновенных и необыкновенных лучей зависят от длины волны падающего света, поэтому при интерференции монохроматических (белых) поляризованных лучей условия интерференции для разных цветов будут несколько различны и интерференционная картина будет окрашена.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На оптическую скамью (1) устанавливаются приборы (в зависимости от задания). Основные элементы: два поляроида (анализатор (А) и поляризатор (П)), осветитель (О) и экран (Э). С помощью крепежных винтов (2) можно фиксировать горизонтальное и вертикальное положения приборов. Осветитель подключается к ЛАТРу (лабораторный трансформатор), который в свою очередь питается через обычную розетку 220В. Регулируя напряжение с помощью ЛАТРа можно изменять яркость (интенсивность) света от осветителя. Включается осветитель тумблером 3. Поляризатор и анализатор можно поворачивать в вертикальной плоскости на разные углы за рычажок 4.

На каждом приборе есть соответствующая наклейка с обозначением.

**НЕ ТРОГАЙТЕ** рабочую поверхность приборов (поляроидные плёнки, стеклышко фильтра, линзу и т.д.).

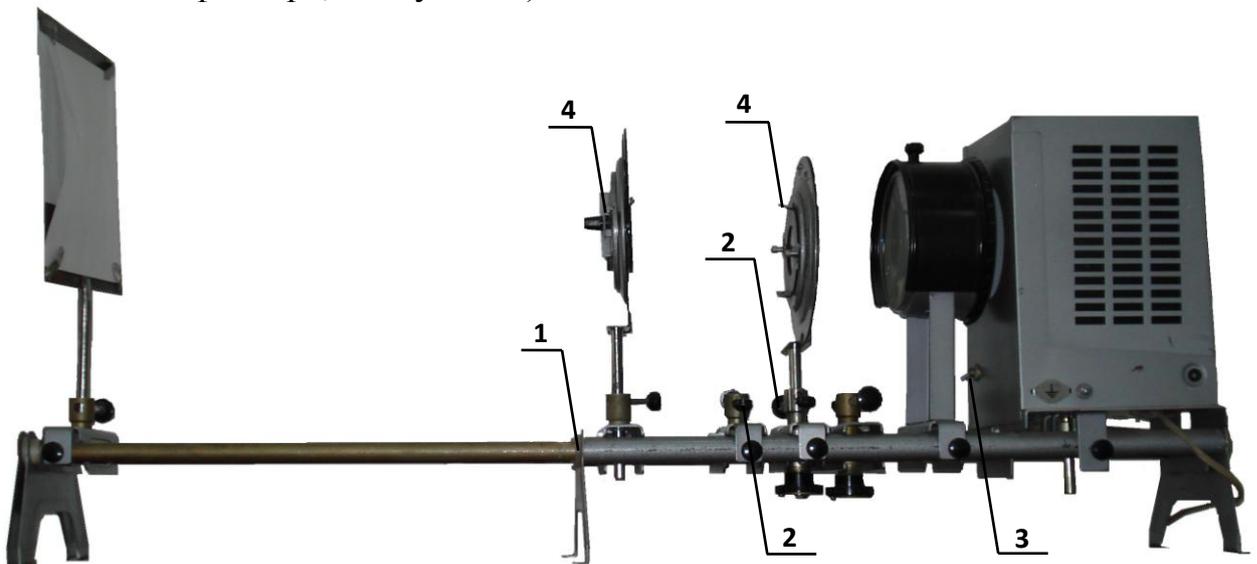


Рис.7. Фотография экспериментальной установки

### Порядок выполнения работы

Перед началом работы попросите инженера или преподавателя включить осветитель.

**Задание 1.** Проверка закона Малюса.

- 1) Установить на оптической скамье осветитель (О), линзу (Л) и фильтр (Ф), поляризатор (П), анализатор (А), экран (Э) в указанном на рис.7 порядке. На осветитель подать напряжение 150В (от ЛАТРа). Линза и фильтр нужны, чтобы сфокусировать световой поток и “вырезать” из него только “жёлтые” длины волн.

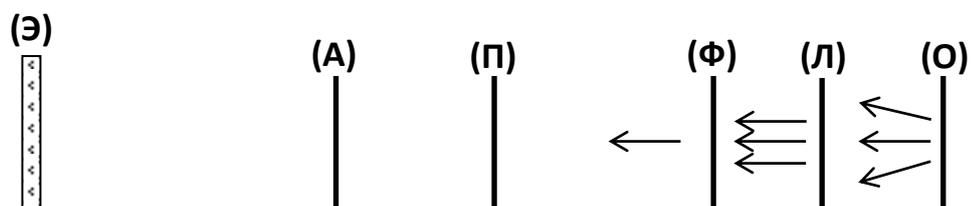


Рис.8.

Вращая анализатор и наблюдая освещенность экрана, убедиться в изменении интенсивности поляризованного света. При каком угле поворота анализатора на экране наблюдается минимальное по яркости пятно света? (при этом обычно говорят, что анализатор и поляризатор скрещены на темноту).

Запишите результат наблюдения и объясните его (вывод).

- 2) Для количественной проверки закона Малюса между осветителем (О) и поляризатором (П) нужно установить фильтр (Ф), вместо экрана (Э), поставить полупроводниковый фотодиод (ПП), преобразующий энергию света в электрический ток. Подключить фотодиод к миллиамперметру, переключатель шкалы миллиамперметра поставить на максимальное значение (7.5 мА) (это будет означать, что вся шкала прибора, 75 делений, соответствует 7.5 мА). После включения осветителя нужно переключить шкалу миллиамперметра так, чтобы “зайчик” был в конце шкалы (но прибор не зашкаливал). Определите цену деления миллиамперметра на выбранной шкале.

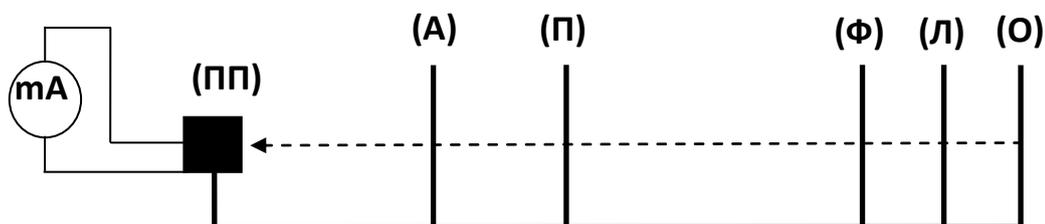


Рис.9.

Величина тока фотозлемента пропорциональна интенсивности падающего светового потока  $I$ :

$$i = kI \quad (6)$$

Используя закон Малюса (1), можно выразить этот ток через угол  $\alpha$ .

Построив график зависимости силы тока  $i$  от  $\cos^2\alpha$ , можно убедиться, что он представляет собой прямую линию (линейная зависимость), где  $\alpha$  – угол поворота между анализатором и поляризатором (угол между плоскостями поляризатора и анализатора).

Итак, для начала, нужно подать на осветитель напряжение 200В (с помощью ЛАТРа). Выбрать шкалу миллиамперметра так, чтобы он не зашкаливал. Поставить анализатор на деление 90, а поляризатор поворачивать до тех пор, пока показания микроамперметра не будут близки к нулю. Это означает, что главные оптические плоскости анализатора и поляризатора *скрещены на темноту*, т.е.  $\alpha=90^\circ$ . **Поляризатор больше не трогать.**

Меняя угол  $\alpha$  (поворотом анализатора) от  $90^\circ$  до  $0$  через  $10^\circ$ , снять показания микроамперметра (в мкА, с учётом рассчитанной цены деления). Повторить измерение тока и в обратном направлении (от  $0$  до  $90^\circ$ ). Результаты занести в таблицу 1.

Угол поворота $\alpha$	0°	10°	20°	...	90°
$i_{np}$ , мкА прямое направление					
$i_{обр}$ , мкА обратное направление					
$i_{cp}$ , мкА среднее					
$\text{Cos}^2\alpha$					

3) Рассчитать значение  $\text{Cos}^2\alpha$  и среднее значение силы тока.

$$i_{cp} = (i_{np} + i_{обр}) / 2.$$

Построить график зависимости среднего значения силы тока от  $\text{Cos}^2\alpha$ .

4) Сделать вывод, объяснить вид графика.

**Задание 2.** Пронаблюдать явление поляризации света при преломлении.

На оптическую скамью вместо поляризатора установите стопу стеклянных пластинок (С), вместо фотоэлемента – экран (Э).

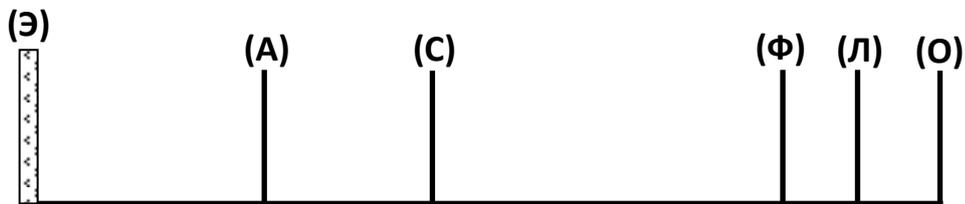


Рис.10.

Подайте на осветитель напряжение 150В. Вращая стопу по часовой стрелке, наблюдайте на экране изменение освещенности.

Запишите результат наблюдения (вывод).

**Задание 3.** Пронаблюдать явление анизотропии в сжатом органической стекле.

На оптической скамье принадлежности разместите согласно рис.11: осветитель (О) → поляризатор (П) → модель рельса (М) → анализатор (А) → линза (Л) → экран (Э).

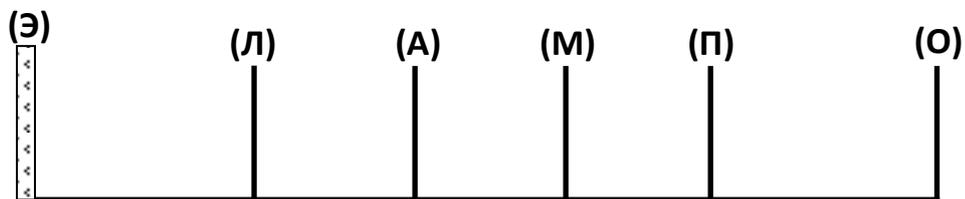


Рис.11.

Добейтесь на экране резкого изображения модели рельса (передвигая линзу). Если стекло свободно от деформации, то при скрещенных поляризаторе и анализаторе на экране будет темнота.

Если стекло (М) деформировать (вращая зажимный винт, который сдавливает стеклянный рельс), то на экране появятся в соответствующих местах светлые пятна, интенсивность и окраска которых характеризует степень деформации отдельных участков ”рельсы”.

Пояснить, почему это происходит (вывод).

**Задание 4.:** Для наблюдения явления интерференции в поляризованном свете принадлежности на оптической скамье размещают согласно рис.10. Здесь Ф - тепловой фильтр, Ц - препарат в целлофане.

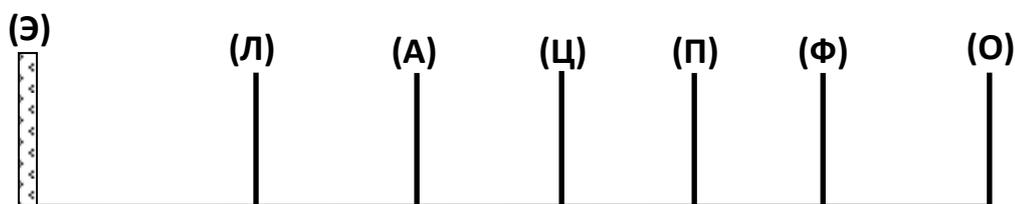


Рис.12.

Поляроиды скрещивают на темноту, затем препарат в целлофане помещают между поляроидами. На экране должны получиться яркие интерференционные цвета. Медленно поворачивая один из поляроидов, наблюдает постепенное изменение окраски изображения.

*Запишите результат наблюдения и объясните его (вывод).*

**Задание 5.:** Взять кристалл исландского шпата. Читая через него текст на бумаге, убедиться, что кристалл исландского шпата обладают двойным лучепреломлением.

*Запишите результат наблюдения и объясните его (вывод).*

#### **Контрольные вопросы:**

1. В чем заключается явление поляризации света?
2. Какой свет называется плоскополяризованным?
3. Что такое плоскость колебаний и плоскость поляризации?
4. Какие опыты указывают на поперечный характер световых волн?
5. Какими способами получают поляризованные лучи?
6. Можно ли употреблять анализатор в качестве поляризатора и наоборот?
7. Действие какого вектора напряженности, электрического или магнитного, вызывает световые ощущения?
8. Что такое двойное лучепреломление?
9. Особенности обыкновенного и необыкновенного луча.
10. В чем заключается закон Малюса, закон Брюстера?
11. Вычислить угол полной поляризации (угол Брюстера) для стекла с показателем преломления  $n=1.5$ .