

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет**

**ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА  
И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ  
ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**Методические указания  
к лабораторной работе № 66  
по дисциплине «Физика»**

**Уфа 2009**

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА  
И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ  
ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Методические указания

к лабораторной работе № 66  
по дисциплине «Физика»

Уфа 2009

Составитель Сагитова Эмма Вагизовна

УДК 535.1:531.21(07)

ББК 22.343:22.37(я7)

Изучение поляризованного света и внутренних напряжений в твердых телах оптическим методом: Методические указания к лабораторной работе № 66 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. Э.В. Сагитова. – Уфа, 2009. – 18 с.

Методические указания знакомят студентов с явлением поляризации света. Описывается метод экспериментальной проверки закона Малюса, а также метод фотоупругости, позволяющий рассчитывать внутренние напряжения в деформированных образцах.

Предназначены для студентов технических ВУЗов, выполняющих лабораторный практикум по разделу «Оптика» дисциплины «Физика».

Табл. 3. Ил. 6. Библиогр.: 3 назв.

Рецензенты: Краузе А.С.,  
Якупов Э.З.

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2009

Составитель САГИТОВА Эмма Вагизовна

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА  
И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ  
ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Методические указания

к лабораторной работе № 66  
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2009. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman Cyr.

Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отт. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.

Тираж 300 экз. Заказ №

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

## Содержание

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть .....	4
2.1. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса .....	4
2.2. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений.....	10
3. Описание установки .....	14
4. Требования по технике безопасности .....	14
5. Порядок выполнения работы .....	15
6. Требования к отчету .....	17
7. Контрольные вопросы .....	17
Список литературы .....	18

## Лабораторная работа № 66

### Изучение поляризованного света и внутренних напряжений в твердых телах оптическим методом

#### 1. Цель работы

Экспериментальная проверка закона Малюса и изучение механических напряжений в деформированной балке из оргстекла поляризационно – оптическим методом.

#### 2. Теоретическая часть

##### 2.1. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса

Из электромагнитной теории света вытекает, что световые волны поперечны. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  напряженностей электрического и магнитного полей волны взаимно перпендикулярны и лежат в плоскостях, перпендикулярных вектору скорости  $\vec{v}$  распространения волны (рис. 2.1).

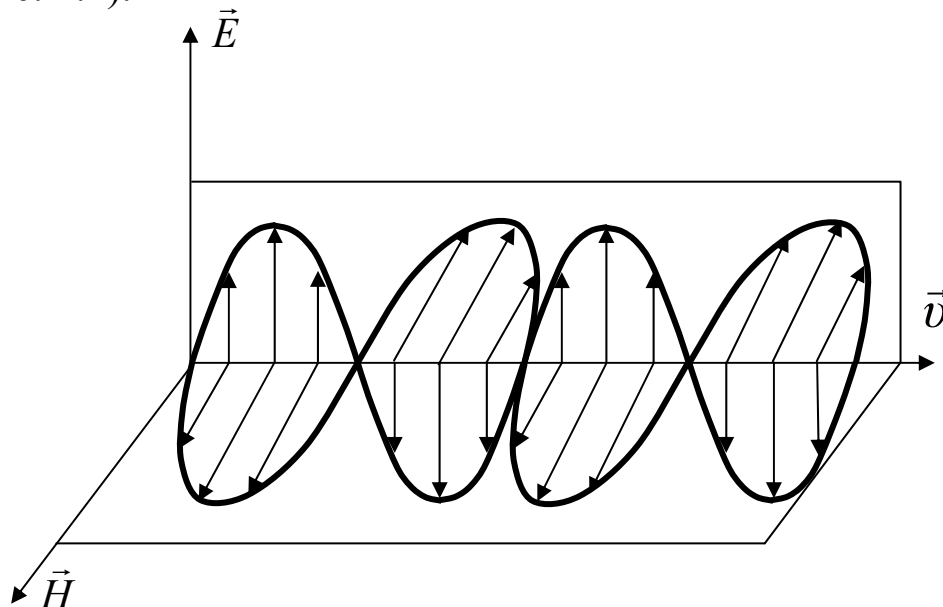


Рис. 2.1

Световая волна имеет сложную природу и представляет собой наложение огромного количества волн, испускаемых отдельными атомами (молекулами) светящегося тела. Атомы излучают световые волны независимо друг от друга.

Вследствие того, что атомы непрерывно изменяют свою пространственную ориентацию, изменяется с большой частотой и направление колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  – результирующей световой волны. При взаимодействии света с веществом таких как физиологическое и фотохимическое воздействия, люминесценция, фотоэффект и т.д. основное действие на вещество определяется вектором напряженности  $\vec{E}$  электрического поля, т.к. большинство явлений, наблюдаемых в веществе под действием света связаны с воздействием на электроны. Силы, действующие на электроны вещества со стороны электрических полей  $\vec{F}_{эл}$ , значительно превышают силы  $\vec{F}_{маг}$  со стороны магнитных полей. В связи с этим в дальнейшем, говоря о колебаниях в световом луче, будем рассматривать только колебания вектора  $\vec{E}$  и не будем упоминать о векторе  $\vec{H}$  магнитного поля.

Если в световой волне колебания вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля происходят по всевозможным направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению распространения (к лучу), то свет называется естественным (рис. 2.2, а; луч распространяется перпендикулярно плоскости рисунка).

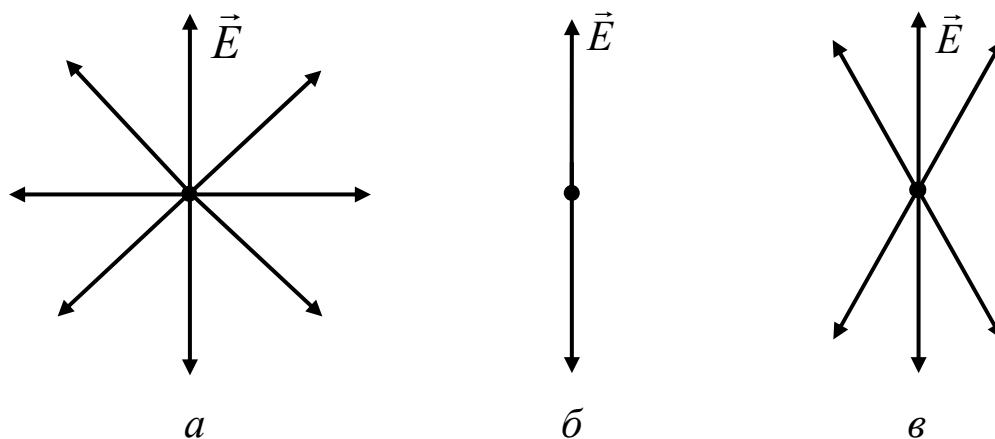


Рис. 2.2

Если колебания вектора  $\vec{E}$  происходят только в одном направлении, перпендикулярном лучу, то свет называется плоско поляризованным (или линейно поляризованным) (рис. 2.2, б). Если колебания светового вектора происходят преимущественно в одном направлении, то такой свет называется частично поляризованным (рис. 2.2, в).

Естественные источники света излучают волны неполяризованные.

Существует много способов выделения линейно поляризованного света (это называется поляризацией света) из естественного или частично поляризованного. Устройства, используемые при этом, называются поляризаторами.

Один из способов получения поляризованного света состоит в использовании явления отражения и преломления света на поверхности диэлектрика (рис. 2.3).

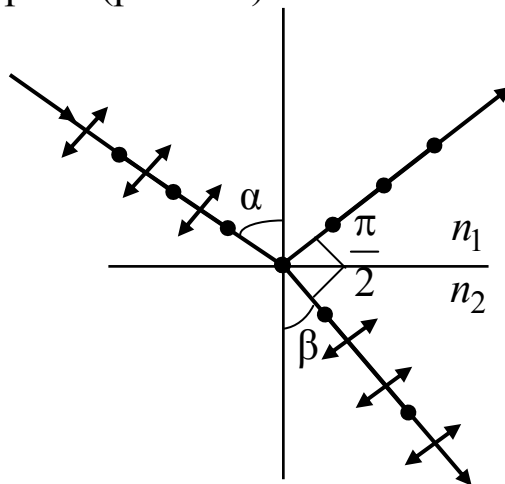


Рис. 2.3

Естественный луч света можно представить как луч, в котором колебания вектора  $\vec{E}$  происходят в двух взаимно перпендикулярных направлениях, например в плоскости чертежа, совпадающей с плоскостью падения (условно отмечаются черточками) и с плоскостью, перпендикулярной к ней (отмечаются точками). Эти два вида колебаний по-разному отражаются от поверхности диэлектрика. Если угол  $\alpha$  падения света на границу раздела двух диэлектриков с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  удовлетворяют условию  $\operatorname{tg}\alpha = n_{21}$ , то отраженный луч полностью поляризован, а преломленный – поляризован только частично.

Другой способ поляризации света основан на явлении двойного лучепреломления. Это явление объясняется анизотропией, различием физических свойств кристалла в разных направлениях. Луч света, падающий на поверхность кристалла, раздваивается в нем на два преломленных луча. Лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Один луч – обыкновенный (о), для него выполняется закон преломления света. Другой луч – необыкновенный (е),



для него закон преломления не выполняется (рис. 2.4).

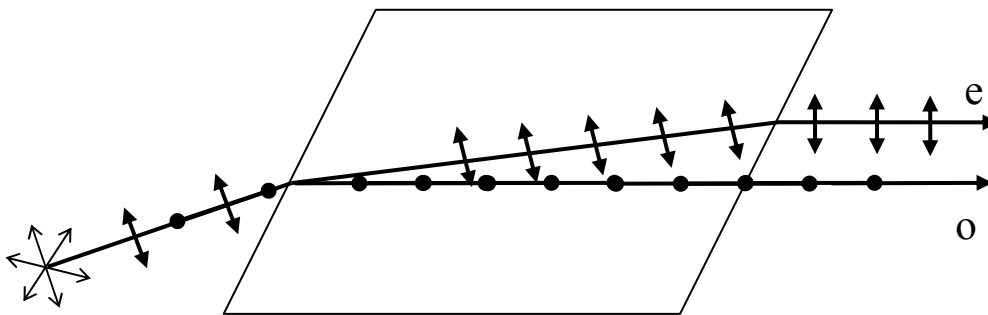


Рис. 2.4

В любом кристалле имеется направление, в котором отсутствует двойное лучепреломление, т.е.  $n_e = n_o$ . Это направление называется оптической осью кристалла. Плоскость, проходящую через падающий луч и оптическую ось кристалла, называют главным сечением кристалла.

Если луч света падает на кристалл под некоторым углом  $\varphi$  к его оптической оси, то можно разложить колебания в падающем луче на два взаимно перпендикулярных колебания: колебания, происходящие в плоскости сечения (e), и колебания, происходящие в плоскости, перпендикулярной главному сечению (o).

В учебных лабораториях для получения линейно поляризованного света используются поляроиды, в которых происходит явление оптического дихроизма, т.е. различного поглощения обыкновенного и необыкновенного лучей. Из поляроида выходит свет, поляризованный в одной плоскости, совпадающей с главной плоскостью поляроида.

Те же самые приборы, применяемые для исследования поляризованного света, называют анализаторами. Эти устройства свободно пропускают колебания, параллельные плоскости, называемой плоскостью пропускания, и полностью задерживают колебания, перпендикулярные к этой плоскости.

При падении естественного света на поляризатор П из последнего выходит поляризованный луч, интенсивность которого равна половине начальной.

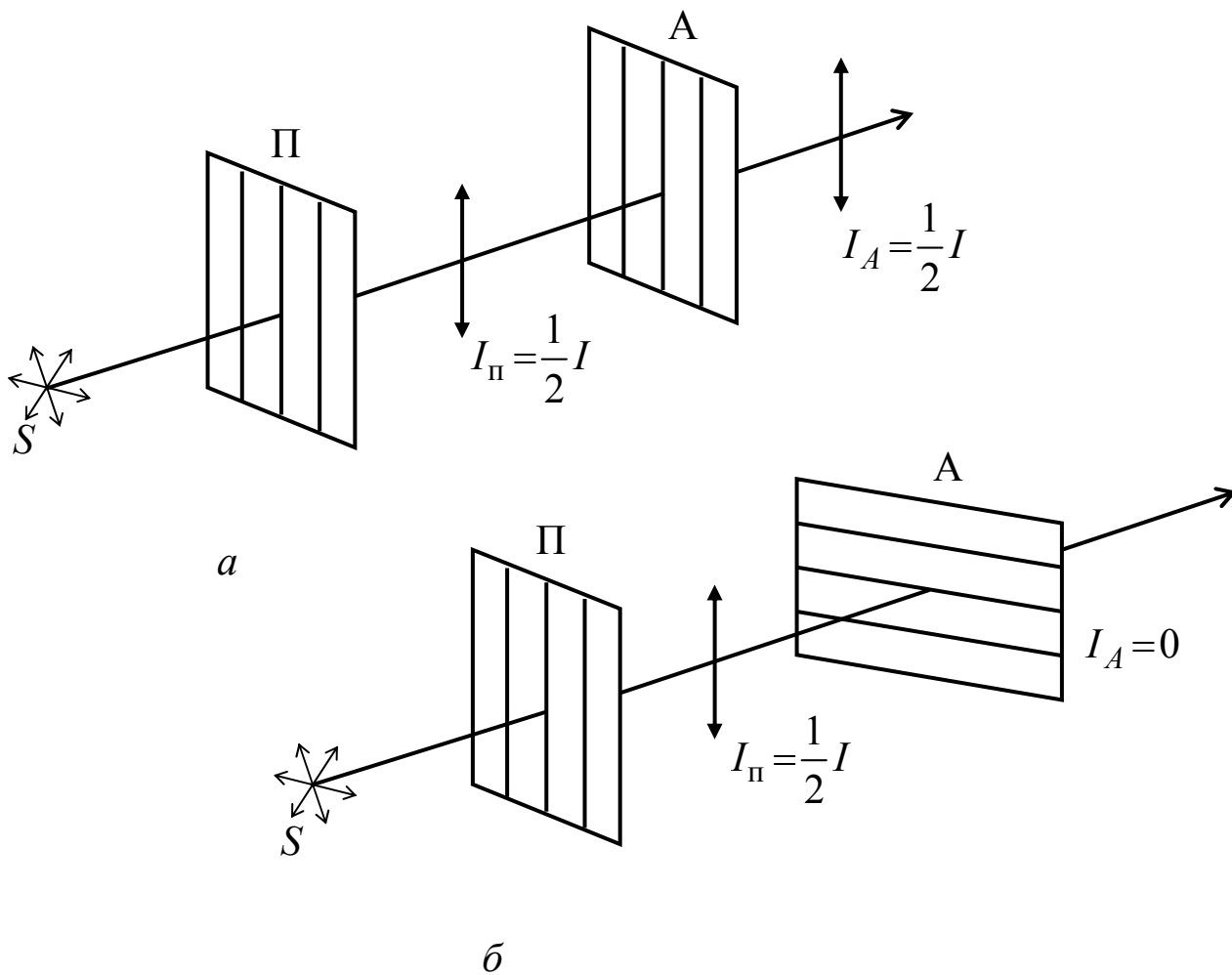


Рис. 2.5

Если на пути плоскополяризованного света поставить анализатор (А) так, чтобы плоскости пропускания поляризатора и анализатора были параллельны (рис. 2.5, а) друг другу, то поляризованный свет пройдет через анализатор, почти не снижая своей интенсивности. Если же плоскости пропускания анализатора и поляризатора перпендикулярны друг другу (рис. 2.5, б), то анализатор полностью погасит падающий на него поляризованный свет. В этом случае говорят, что анализатор и поляризатор скрещены. В промежуточных случаях интенсивность света, прошедшего через систему, будет зависеть от взаимной ориентации плоскостей пропускания анализатора и поляризатора (рис. 2.6).

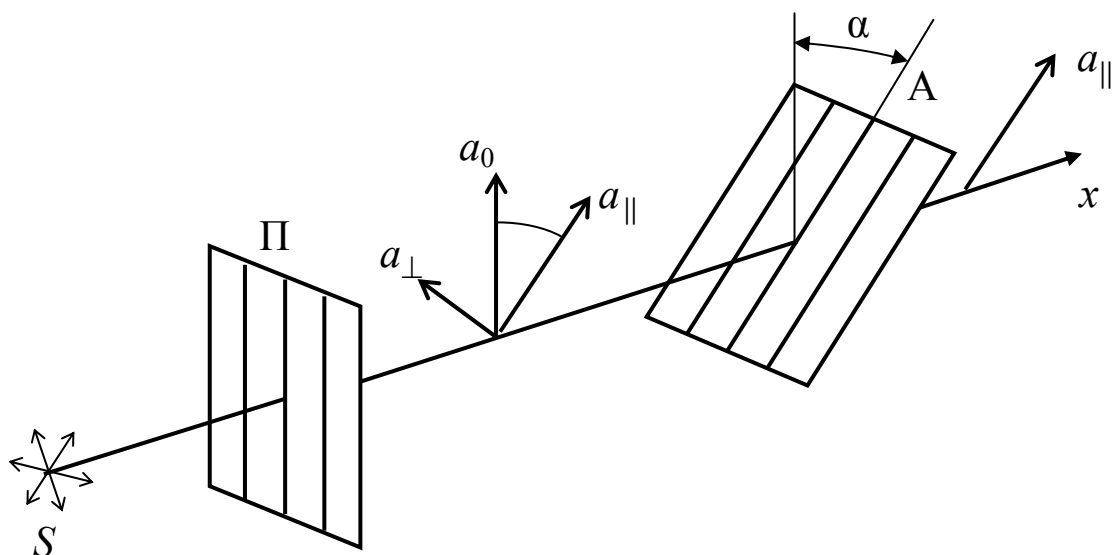


Рис. 2.6

Пусть естественный свет от источника  $S$  распространяется вдоль оси  $x$ . Интенсивность света, прошедшего через поляризатор  $I_0 \sim a_0^2$ , где  $a_0$  – амплитуда вектора напряженности электрического поля световой волны. Интенсивность света, прошедшего через анализатор,  $I \sim a_{\parallel}^2$ , где  $a_{\parallel}$  – составляющая амплитуды напряженности электрического поля световой волны, параллельная плоскости пропускания анализатора

$$a_{\parallel} = a_0 \cos \alpha,$$

$\alpha$  – угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора. Составляющая  $a_{\perp}$  не проходит через анализатор. Следовательно

$$I = a_{\parallel}^2 = a_0^2 \cos^2 \alpha = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (2.1)$$

Уравнение (2.1) выражает закон Малюса.

Поляризованный свет широко используется в различных устройствах, предназначенных для научных и технических целей: плавное изменение и регулировка интенсивности световых потоков, светоблокировка, метод фотоупругости, применяемый для изучения распределения механической нагрузки в прозрачных моделях деталей машин и строительных механизмов, сахариметрия, дефектоскопия, минералогия и т.д.

## 2.2. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений

Поляризационно-оптический метод определения напряженного состояния деталей машин и строительных конструкций на прозрачных моделях получил широкое распространение в последнее время и известен как метод фотоупругости. Большинство прозрачных изотропных аморфных материалов (стекло, целлулоид, желатин, пластмассы) под действием нагрузки становится оптически анизотропными.

Анизотропными называются такие вещества, в которых физические параметры зависят от направления.

Из электромагнитной природы света по закону Максвелла следует, что фазовая скорость электромагнитных волн

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n}.$$

Для большинства прозрачных сред магнитная проницаемость  $\mu = 1$ , поэтому приблизительно

$$n = \sqrt{\epsilon}, \quad (2.2)$$

$c$  – скорость света в вакууме,  $v$  – скорость света в диэлектрике.

Оптически анизотропия среды проявляется в различной по разным направлениям способностью среды реагировать на действие падающего света. Под действием поля световой волны происходит смещение электрических зарядов атомов вещества. Для оптически анизотропных сред величина смещения в поле данной напряженности зависит от направления электрического вектора световой волны. То есть диэлектрическая проницаемость, а значит и показатель преломления среды, различны для разных направлений. Следовательно, и скорость света зависит от направления распространения световой волны и плоскости ее поляризации. При переходе луча из среды изотропной в среду анизотропную, вследствие анизотропии поляризуемости молекул, наблюдается так называемое двойное лучепреломление. В результате преломления в анизотропной среде распространяется не один, а два луча – обыкновенный (о) и необыкновенный (е), которые линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях и распространяются с различными скоростями.

Под действием нагрузки (деформации) большинство изотропных материалов становятся оптически анизотропными, возникает искусственное двойное лучепреломление при деформации. При этом направления главных осей эллипсоида диэлектрической проницаемости материала совпадают с направлениями главных осей эллипсоида напряжений. В случае одностороннего сжатия или растяжения, например вдоль  $OO'$  (рис. 2.7), это направление становится выделенным и играет роль оптической оси. Оптические свойства деформированного таким образом тела соответствуют свойствам одноосного кристалла. Разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей  $n_o - n_e$  является мерой возникшей анизотропии. Иными словами скорость распространения в образце обыкновенного луча (о) не зависит от механического напряжения, а скорость распространения необыкновенного луча (е) зависит от механического напряжения. Поэтому, если даже (о) и (е) лучи пройдут в образце одинаковый геометрический путь, их оптические пути будут различны (т.е.  $ln_o \neq ln_e$ , где  $l$  – геометрическая длина пути). В результате этого между (о) и (е) лучами, после прохождения образца, появляется оптическая разность хода  $\Delta = l(n_o - n_e)$ .

Поместим исследуемый прозрачный образец между скрещенными поляризатором  $\Pi$  и анализатором  $A$  (рис. 2.7). При отсутствии деформации в образце свет, прошедший через поляризатор, согласно закону Малюса полностью задерживается анализатором.

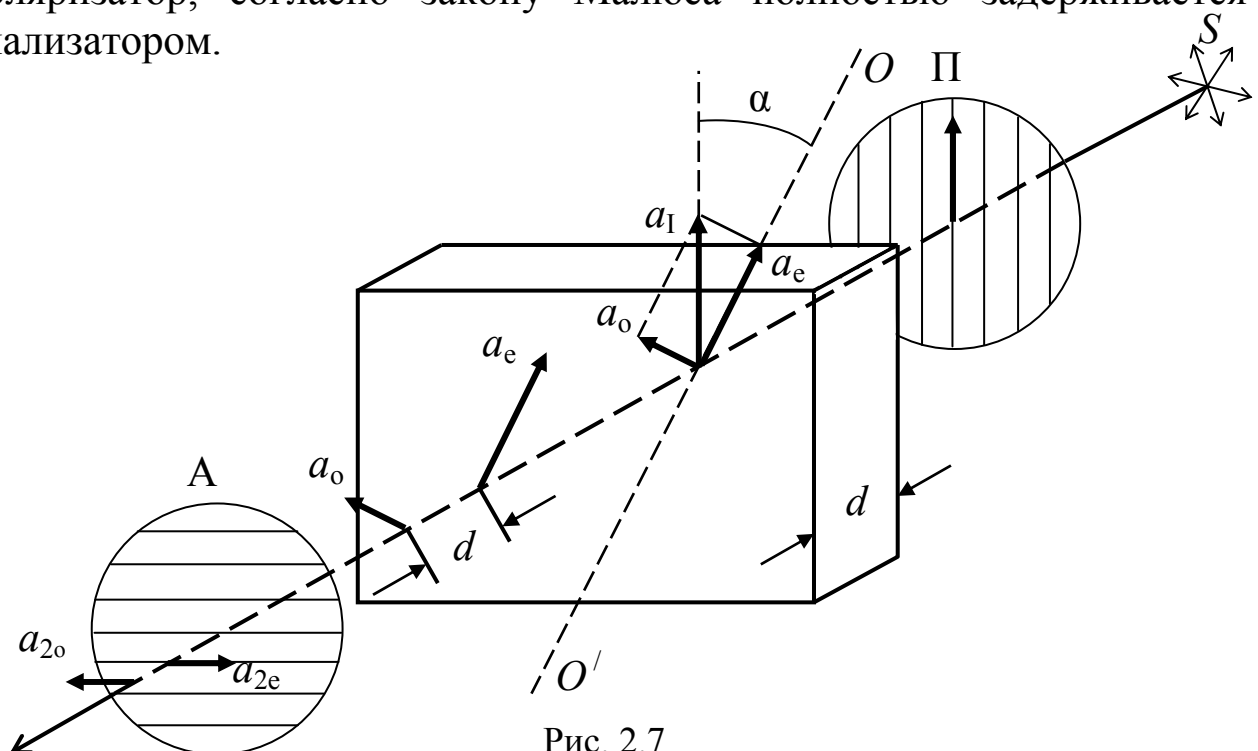


Рис. 2.7

Если же образец подвергнуть сжатию, например, вдоль оси  $OO'$ , составляющей некоторый угол  $\alpha$  с направлением плоскости пропускания поляризатора, то линейно поляризованный свет испытает в образце двойное лучепреломление.

Величина амплитуд обыкновенной  $a_o$  и  $a_e$  необыкновенной волн определится проекциями вектора  $a_1$  плоскополяризованного света, прошедшего через поляризатор П, на взаимно перпендикулярные направления. Эти направления определяют положение плоскостей колебаний обыкновенной и необыкновенной волн в исследуемом напряженном образце. Анализатор А сводит оба колебания к одной плоскости (амплитуда  $a_{2o}$  и  $a_{2e}$ ). Оба колебания, возникшие из одного линейнополяризованного колебания  $a_1$ , когерентны и поэтому могут интерферировать.

При нормальном падении света на параллельную оптической оси  $OO'$  грань напряженного образца обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь, но с различными скоростями  $v_o$  и  $v_e$ . В связи с этим между ними возникает разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e) d. \quad (2.3)$$

Разность фаз колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей, вышедших из напряженного образца,

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_o - n_e), \quad (2.4)$$

где  $d$  – путь, пройденный лучами в напряженном образце (толщина образца).

В результате сложения двух лучей, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях, получается эллиптически поляризованный свет, в котором конец вектора  $\vec{E}$  световой волны описывает эллипс с той же частотой, с которой совершаются исходные колебания. По выходе из анализатора пучок света не гасится и на экране наблюдается интерференционная картина.

Установлено, что оптическая разность хода

$$\Delta = C \sigma d, \quad (2.5)$$

где  $C$  – коэффициент фотоупругости, характеризующий данное вещество,  $\sigma$  – напряжение (сила, действующая на единицу площади сечения образца).

Местам одинаковых напряжений в образце соответствует одинаковый сдвиг фаз колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей.

Так как  $\delta$  зависит от  $\lambda$ , просветленное после деформации поле окрашено – оно будет состоять из цветных полос – результат интерференции поляризованных лучей. Каждая полоса – изохрома будет соответствовать одинаково деформированным местам тела. Следовательно, по характеру расположения полос, можно судить о распределении напряжений внутри образца. При вращении анализатора окраска меняется. Результат интерференции отчетливее всего наблюдается при  $\alpha = 45^\circ$ .

Опыт показывает, что два луча – обыкновенный (o) и необыкновенный (e), полученные после прохождения через напряженный образец естественного света не дают интерференции. Объясняется это тем, что в естественном свете колебания, которые происходят в разных плоскостях, испущены различными атомами, следовательно, они не связаны друг с другом, не имеют постоянную разность фаз, и значит они не когерентны.

Обыкновенный (o) и необыкновенный (e) лучи, полученные из одного плоскополяризованного луча, можно привести с помощью анализатора к одной плоскости, тогда лучи будут интерферировать.

Интерференция поляризованных лучей лежит в основе метода фотоупругости, который состоит в том, что из прозрачных изотропных материалов (например, оргстекла) изготавливают модели различных непрозрачных деталей и испытывают их описанным методом. Это позволяет решать ряд важных вопросов, связанных с наличием и распределением деформаций и напряжений в моделируемых деталях.

### 3. Описание установки

Схема установки представлена на рис. 3.1.

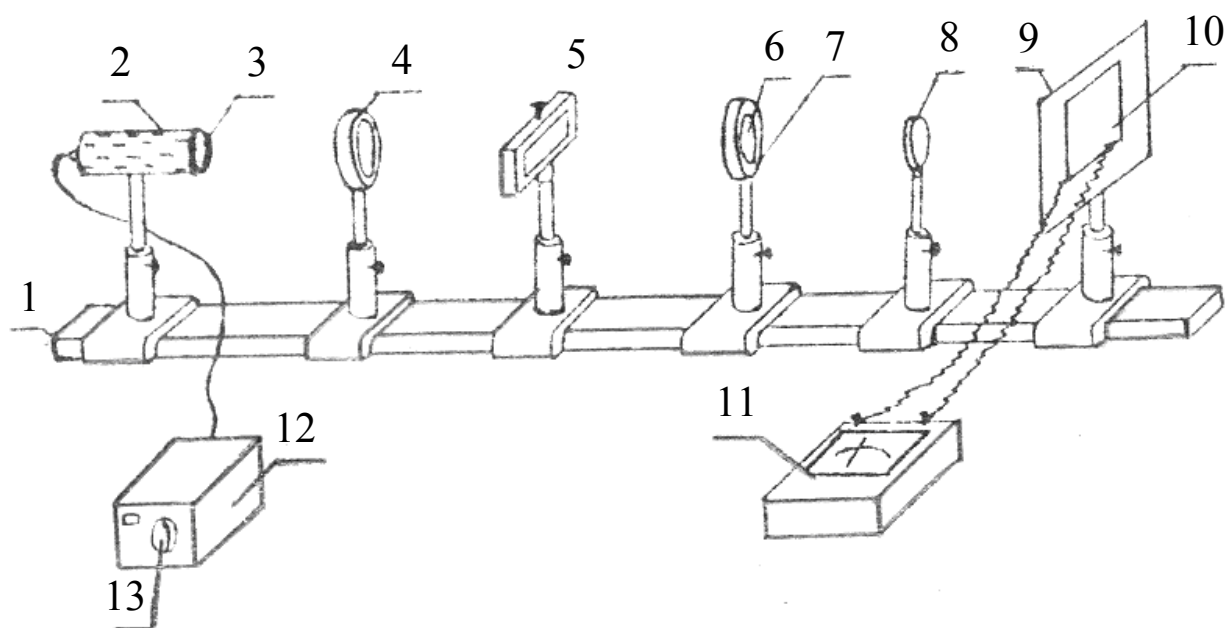


Рис. 3.1

На оптической скамье 1 установлены осветитель 2 с конденсором 3. Параллельный пучок света падает на поляризатор 4, затем на исследуемый образец 5 под винтовым прессом (при проверке закона Малюса образец убирается). Анализатор 6 снабжен круговой шкалой 7, позволяющей измерить угол поворота. Объектив 8 служит для фокусирования светового потока на рабочую поверхность фотоэлемента 10 (при проверке закона Малюса) или для получения изображения напряженной балки 5 на экране 9. Фототок регистрируется люксометром 11. Так как сила фототока  $i$  пропорциональна интенсивности падающего на фотоэлемент света  $I$  то, находя зависимость  $i$  от угла поворота анализатора, можно проверить также зависимость  $I$  от угла поворота.

### 4. Требования по технике безопасности

1. Перед включением блока питания в сеть проверить сохранность изоляции шнура.
2. Во избежание появления царапин не следует касаться руками оптических деталей (поляриды, конденсор и объектив).
3. Во избежание поломки прозрачного образца не допускать его пережимания прессом.



4. Ограждать защитным колпаком фотоэлемент от попадания на него света в нерабочем состоянии.

## 5. Порядок выполнения работы

### Задание 1. Проверка закона Малюса

1. Снять с оптической скамьи напряженный образец 5 и защитный колпачок с фотоэлемента.

2. Включить блок питания осветителя 12 в сеть (рис. 3.1).

3. Перемещением объектива 8 на оптической скамье, спроектировать световой пучок на рабочую поверхность фотоэлемента 10.

4. Установить анализатор 6 на «0» по круговой шкале 7.

5. Вращением поляризатора 4 добиться максимального показания по шкале люксметра, что соответствует максимуму интенсивности светового потока.

6. Вращая анализатор 6 от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  через каждые  $10^\circ$ , измерять показания люксметра. Результаты записать в табл. 5.1.

7. Так как максимумы повторяются через  $180^\circ$  (от начала отсчета), то каждая четверть окружности даст все измерения интенсивности. Поэтому результаты наблюдений для положения анализатора  $180^\circ \div 90^\circ$ ,  $180^\circ \div 270^\circ$ ,  $360^\circ \div 270^\circ$  через каждые  $10^\circ$  также записать в табл. 5.1.

8. Определить средние значения  $i_{cp}$  по горизонтальным строчкам таблицы.

9. Построить график зависимости  $i = f(\cos^2 \alpha)$  по экспериментальным данным. На этом же графике представить теоретическую зависимость согласно формуле Малюса

$$i = i_0 \cos^2 \alpha,$$

так как  $i \sim I$ , приняв за  $i_0$  – максимальное показание люксметра.

Таблица 5.1

$\alpha, ^\circ$	$i, \text{мкА}$	$\alpha, ^\circ$	$i, \text{мкА}$	$\alpha, ^\circ$	$i, \text{мкА}$	$\alpha, ^\circ$	$i, \text{мкА}$	$\alpha, ^\circ$	$i_{cp}$	$\cos^2 \alpha$
$0^\circ$		$180^\circ$		$180^\circ$		$360^\circ$		$0^\circ$		
$90^\circ$		$90^\circ$		$270^\circ$		$270^\circ$		$90^\circ$		

## Задание 2. Изучение внутренних напряжений в прозрачной балке методом фотоупругости

1. Закрыть колпачком фотоэлемент 10, повернуть экран 9, укрепить на нем лист белой бумаги.
2. Экран поместить на максимальном расстоянии от анализатора 6.
3. Вращением анализатора получить темное пятно на экране.
4. Между поляризатором и анализатором поместить винтовой пресс с предварительно напряженной моделью (балка из органического стекла).
5. Перемещая объектив 8 по оптической скамье, добиться резкого изображения балки на экране.
6. Зарисовать на бумаге контуры балки, изохромы нулевого порядка (темная область,  $\sigma = 0$ ), а также изохромы для хорошо различимых цветов (например: желтый, красный, синий, зеленый) по обе стороны от изохромы нулевого порядка.
7. Используя табл. 5.3, выписать значения разности хода для отмеченных изохром. Данные занести в табл. 5.2.  
Толщину образца принять равной 1 см.
8. Используя формулу (2.5), приняв  $C = 170 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$ , определить напряжения, соответствующие выбранным изохромам.
9. Построить график зависимости распределения напряжения  $\sigma$  вдоль каких-либо двух сечений образца  $\sigma = f(x)$  от нулевой линии.

Таблица 5.2

№ изохром на рисунке	Цвет	Порядок изохром	Разность хода	Напряжение

Таблица 5.3

Поря док	$\Delta \cdot 10^{10}$ м	Цвет	Поря док	$\Delta \cdot 10^{10}$ м	Цвет
I	500	Серо-стальной	III	11000	Фиолетовый
	2000	Серовато-белый		12000	Синевато-зеленый
	3000	Желтый		13000	Зеленый
	4250	Оранжевый		14250	Желтый
	5300	Красный		15000	Оранжевый
II	5650	Фиолетовый	IV	16650	Фиолетовый
	6400	Синий		18650	Зеленый
	7400	Зеленый		20900	Желтый
	8400	Желтовато- зеленый			
	8800	Желтый			
	9450	Оранжевый			
	10300	Красный			

Примечание. Смена цвета в порядке возрастания разности хода аналогична смене цвета изохром в напряженном образце, начиная от изохром нулевого порядка, – темно-серая область в центре картины.

## 6. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Краткие теоретические положения.
2. Результаты измерений и расчеты в виде таблиц.
3. Графики зависимости  $i_{\text{эксп}} = f(\cos^2 \alpha)$ ,  $i_{\text{теор}} = i_0 \cos^2 \alpha$ , а также  $\sigma = f(x)$ .
4. Выводы.

## 7. Контрольные вопросы

1. Какой свет называется естественным, плоскополяризованным?
2. Какие способы поляризации света вам известны?
3. Сформулируйте закон Малюса.
4. Физическая сущность двойного лучепреломления.
5. В чем суть метода фотоупругости?

### **Список литературы**

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 2007.
2. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – М.: Физматлит, 2003.
3. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Academia, 2007.