

535(07)

О – 627

№5111



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Южный федеральный университет»

**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

**ОПТИКА**

Практикум по физике

(для укрупненных групп направлений подготовки:  
математические и естественные науки;  
инженерное дело, технологии и технические науки)

**ЕГФ**

Таганрог 2013

УДК 535 (076.5)

Составители: Куповых Г.В. (№501); Нестюрина Е.Е., Филиппева Н.Н. (№502, 504.-2, 506); Погорелов Е.Н., Филиппева Н.Н. (№503); Колпачева О.В. (№504.-1); Доценко И.Б. (№505); Гатько Л.Е. (№507); Какурин Ю.Б. (№508), Какурина Н.А. (№509).

Оптика: Практикум по физике. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 115 с.

Содержит необходимый теоретический материал для выполнения лабораторных работ по оптике, схемы установок и последовательность выполнения заданий.

Табл. 1. Ил. 44. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент Ю.П. Пасичный, канд. техн. наук доцент кафедры физики ЮФУ.

## **501. ИЗУЧЕНИЕ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД**

### **501.1. Цель работы**

Определение показателя преломления прозрачных сред в процессе опыта.

### **501.2. Разделы теории**

Основные законы оптики. Полное внутреннее отражение [1. Гл. 21, §165]; [2. Гл. XVI, §115]; [3. Гл. 3, 3.6].

### **501.3. Приборы и принадлежности**

Рефрактометр, микроскоп, микрометр, набор пробирок с исследуемыми жидкостями, набор стеклянных пластин.

### **501.4. Теоретическое введение**

Геометрическая оптика – предельный случай волновой оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и условия получения изображений в системах, в которых длину волны света можно считать бесконечно малой (более строгое определение будет дано при изучении явления дифракции света). Для описания оптических явлений вводится понятие светового луча, под которым понимается направление, по которому световой волной переносится энергия. Основные законы геометрической оптики, установленные опытным путем следующие.

1. *Закон прямолинейного распространения света:* в однородной среде свет распространяется прямолинейно.

2. *Закон независимого распространения лучей:* отдельные лучи распространяются независимо. Если в какой-либо точке

лучи сходятся, то освещенности, создаваемые ими, складываются.

3. *Закон отражения*, который устанавливает изменение направления луча в результате падения на отражающую (зеркальную) поверхность: падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения, и эта нормаль делит угол между лучами на две равные части (рис. 501.1), т.е. угол отражения ( $\alpha'$ ) равен углу падения ( $\alpha$ ).

4. *Закон преломления*, который устанавливает изменение направления луча при переходе из одной однородной среды в другую: падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к преломляющей поверхности в точке падения луча (рис. 501.1), а направления этих лучей связаны соотношением

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}. \quad (501.1)$$

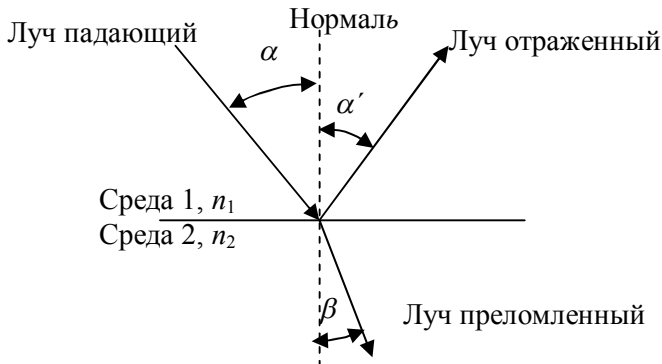


Рис. 501.1

Величина  $n_{21}$  называется относительным показателем преломления (второй среды по отношению к первой). Относительный показатель преломления определяется через абсолютные показатели преломления сред  $n_1$  и  $n_2$  как



$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Абсолютный показатель преломления среды равен отношению скорости распространения света ( $c$ ) в вакууме к скорости распространения света в данной среде ( $v$ )

$$n = \frac{c}{v}.$$

Вещество с большим показателем преломления называется оптически более плотным.

Используя выражение (501.1), закон преломления света можно записать следующим образом:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

Из этой формулы следует, что при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ) преломленный луч отклоняется от направления падающего луча к границе раздела двух сред. Увеличение угла падения  $\alpha$  сопровождается более быстрым ростом угла преломления  $\beta$ , и по достижении углом  $\alpha$  значения  $\alpha_{\text{пред}} = \arcsin n_{21}$  угол  $\beta$  становится равным  $\pi/2$ . Угол  $\alpha_{\text{пред}}$  называется предельным углом (рис. 501.2).

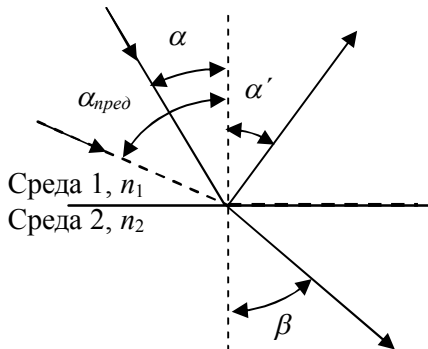


Рис. 501.2

Энергия, которую несет с собой падающий луч, распределяется между отраженным и преломленным лучами. По мере

увеличения угла падения интенсивность отраженного луча растет, интенсивность же преломленного убывает, обращаясь в ноль при предельном угле. При углах падения от  $\alpha_{пред}$  до  $\pi/2$  свет во вторую среду не проникает, интенсивность отраженного луча равна интенсивности падающего. Это явление называется *полным внутренним отражением*.

При преломлении света сложного, немонахроматического состава происходит его разделение на составные цвета в спектр. Явление, обусловленное зависимостью показателя преломления вещества от длины волны (частоты) проходящего света, называется *дисперсией света*. Величины  $\frac{dn}{d\lambda}$  и  $\frac{dn}{d\nu}$ , показывающие скорость изменения показателя преломления при изменении длины волны ( $\lambda$ ) и частоты ( $\nu$ ), используют для характеристики дисперсии. При  $\frac{dn}{d\lambda} < 0$  дисперсия вещества увеличивается по мере перехода от длинных волн к коротким. Такая дисперсия называется *нормальной*. В случае  $\frac{dn}{d\lambda} > 0$  дисперсию называют *аномальной*. Она наблюдается вблизи полос поглощения вещества.

Дисперсионную способность вещества характеризуют *средней дисперсией* ( $n_F - n_C$ ), где  $n_F$  - показатель преломления для волн длиной 486,1 нм (синяя линия водорода,  $F$ ), а  $n_C$  - показатель преломления для волн длиной 656,3 нм (красная линия водорода,  $C$ ). На практике обычно используется безразмерная величина *коэффициент дисперсии* или *число Аббе*. Число Аббе ( $\gamma$ ) определяется по формуле

$$\gamma = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

где  $n_D$  - показатель преломления для  $\lambda = 589,3$  нм (среднее значение из длин волн двух близких желтых линий натрия).

Средняя дисперсия и число Аббе используются при расчетах сложных систем для оптических наблюдений, фотографиро-

вания и микроскопии (ахроматические призмы, сложные спектральные призмы, спектральные призмы прямого зрения, ахроматические линзы для объективов биноклей и фотоаппаратов, объективы-апохроматы для микроскопов). Чем меньше значение числа Аббе, тем больше искажения («паразитная» дисперсия света, проходящего через оптическую систему). Из-за неодинаковой преломляемости лучей различных длин волн, параллельный пучок белого света после линзы даст изображение предмета с цветными контурами, которых у предмета нет (*хроматическая aberrация*).

Значения основных характеристик для промышленных оптических стекол:

Физическая величина	Обозначение	Значение
Абсолютный показатель преломления	$n_D$	1,43–2,17
Средняя дисперсия	$(n_F - n_C) \times 10$	639–3178
Коэффициент дисперсии (число Аббе)	$\gamma$	17–95

### 501.5. Описание установки и вывод расчетных формул

Рефрактометр предназначен для непосредственного измерения показателя преломления жидкостей и твердых тел, их средней дисперсии, а также для экспресс-анализа определения концентраций водных, спиртовых, эфирных и других растворов по показателю преломления  $n$ .

Принцип действия рефрактометра (рис.501.3) основан на явлении полного внутреннего отражения при прохождении светом границы раздела двух сред с разными показателями преломления. Прибор позволяет исследовать вещества, показатель преломления которых меньше показателя преломления измерительной призмы. **Все измерения выполняются в белом свете.**

#### *1. Определение показателя преломления прозрачных жидкостей*

Определение показателя преломления прозрачных жидкостей проводится в проходящем свете (метод скользящего луча).

Несколько капель исследуемой жидкости помещают между двумя гипотенузными гранями призм *I* и *II* (рис. 501.4). Призма *I* с хорошо отполированной плоской гранью *AB* является измерительной, а призма *II* с матовой гранью *A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>* – осветительной.

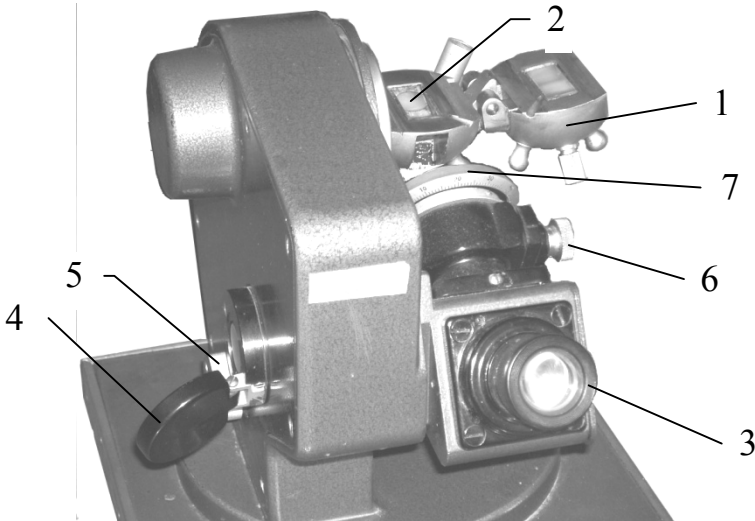


Рис. 501.3

От источника света лучи падают на грань  $C_1B_1$ , преломляются и попадают на матовую поверхность  $A_1B_1$ . Вследствие рассеивания света матовой поверхностью в исследуемую жидкость входят лучи различных направлений. Далее они проходят слой исследуемой жидкости и падают на поверхность  $AB$  призмы *I*. Так как показатель преломления исследуемой жидкости меньше показателя преломления измерительной призмы *I*, то лучи всех направлений, преломившись на границе жидкости и стекла, войдут в призму *I*.

По закону преломления имеем

$$n \sin i' = n_c \sin i, \quad (501.2)$$

где  $n$  – показатель преломления исследуемой жидкости;  $i'$  – угол

падения луча;  $n_c$  – показатель преломления измерительной призмы;  $i$  – угол преломления луча.

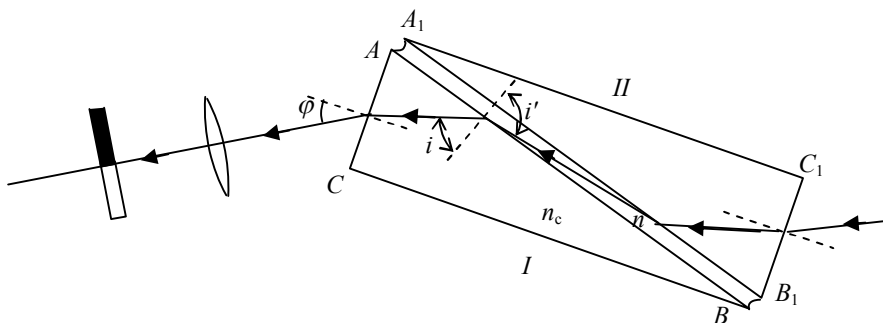


Рис. 501.4

Из уравнения (501.2) следует:

$$\sin i = \frac{n \sin i'}{n_c}. \quad (501.3)$$

С увеличением угла  $i'$  угол  $i$  также увеличивается, достигая максимального значения при угле падения  $i' = 90^\circ$ , т.е. когда падающий луч скользит по поверхности  $AB$ .

Максимальное значение угла преломления луча, соответствующее углу падения  $90^\circ$ , называется предельным углом преломления.

Так как зазор между призмами  $I$  и  $II$  мал, то можно приблизительно считать, что лучи с наибольшим углом падения являются скользящими. Подставляя значение  $i' = 90^\circ$  в формулу (501.3), получим

$$\sin i = \frac{n}{n_c},$$

откуда  $n = n_c \sin i$ .

В действительности формула для определения показателя преломления несколько сложнее, так как выходящие из призмы  $I$  лучи преломляются на грани  $AC$ .

Если на пути лучей, выходящих из призмы, поставить зри-

тельную трубу, то нижняя часть её поля зрения будет освещена, а верхняя останется темной. Получающаяся граница света и тени определяется лучом, выходящим из призмы под минимальным углом  $\varphi$ .

Наблюдая в окуляр 3 зрительной трубы рефрактометра (см. рис. 501.3), совмещают границу раздела света и тени с перекрестием визирной сетки и непосредственно по шкале прибора снимают отсчеты величины показателя преломления.

Вследствие явления дисперсии в белом свете граница раздела будет окрашенной. Для устранения окрашенности наблюдаемой границы раздела служит компенсатор, состоящий из двух призм прямого зрения (призм Амичи). Маховиком 6 можно поворачивать призмы одновременно в разные стороны, меняя при этом дисперсию компенсатора и устраняя цветную кайму границы раздела (при повороте барабана на  $180^{\circ}$  дисперсия компенсатора пройдет все значения от нуля до двойного значения дисперсии одной призмы). С компенсатором связан барабан 7 со шкалой (см. рис. 501.3). Шкала дисперсионного лимба барабана 7 разделена на 120 частей, 60 делений –  $180^{\circ}$ . По шкале определяют параметр дисперсии  $Z$ . Параметр дисперсии  $Z$  позволяет рассчитать среднюю дисперсию вещества.

## *2. Определение показателя преломления прозрачных твердых тел*

Показатель преломления прозрачных твердых тел, если он меньше показателя преломления призм  $n_c$ , можно измерять рефрактометром, поместив образец в виде тонкой пластины между призмами. Существуют и другие методы определения показателя преломления прозрачных твердых тел, например при помощи микроскопа. Этот способ применим для измерения показателей преломления любых твердых прозрачных тел.

Микроскоп представляет оптическую систему, состоящую из двух ступеней увеличения: 1 – обеспечивается объективом (полезное увеличение); 2 – обеспечивается окуляром. Предмет, помещенный вблизи главного фокуса объектива, образует за объективом действительное, увеличенное и перевернутое изображение. Это промежуточное изображение рассматривается в оку-

ляр, как в увеличительное стекло. Окончательное увеличенное изображение, наблюдаемое через окуляр, является мнимым, расположенным на расстоянии наилучшего видения от глаза наблюдателя. Приблизительно определить увеличение микроскопа можно, умножив увеличение объектива на увеличение окуляра. Например, увеличение микроскопа с 8-кратным объективом и 10-кратным окуляром будет  $8 \times 10 = 80$  крат. На объективе указывается его собственное увеличение и числовая апертура. На оправе окуляра наносится его собственное увеличение.

В основе метода измерений лежит явление кажущегося уменьшения толщины стеклянной пластинки вследствие преломления лучей на границе раздела двух сред. Наблюдаемая точка  $S$  расположена на нижней поверхности пластинки (рис. 501.5), луч 1, падающий перпендикулярно к верхней поверхности, пройдет без преломления, а лучи 2 и 2' преломятся и выйдут в воздух над пластинкой под углом  $\beta$ .

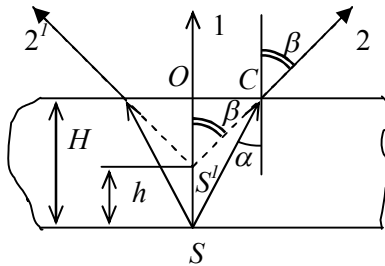


Рис. 501.5

На продолжении этих лучей в точке их пересечения с лучом 1 получим мнимое изображение  $S'$  наблюдаемой точки  $S$ . Толщина пластинки зрительно уменьшилась на величину  $h$ . Через верхнюю поверхность пластинки лучи выходят в среду оптически менее плотную ( $n_{\text{возд.}}=1$ ). Закон преломления света запишется в виде

$$\frac{1}{n} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (501.4)$$

где  $n$  – показатель преломления пластинки.

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы, следовательно, их синусы можно при-

равнять к тангенсам. Вместо равенства (501.4) получаем

$$\frac{1}{n} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (501.5)$$

После подстановки  $\operatorname{tg}\alpha = |OC|/H$  и  $\operatorname{tg}\beta = |OC|/(H-h)$  в формулу (501.5) получаем величину  $n$ , равную

$$n = \frac{H}{H-h}. \quad (501.6)$$

Формула (501.6) является расчетной при измерении показателя преломления прозрачных твердых тел с помощью микроскопа. Определение показателя преломления сводится к измерению действительной и кажущейся толщины пластинки. Для проведения измерений на тубусе микроскопа закреплен микрометр 1 (рис.501.6). Цена деления большой круглой шкалы 0,01 мм, а малой – 1 мм.

Для определения кажущейся толщины пластинки на ее верхнюю и нижнюю поверхности нанесены риски друг против друга. Пластинку кладут на предметный столик микроскопа. Перемещая тубус микроскопа, добиваются четкого изображения риски на нижней поверхности пластинки, затем на верхней поверхности, снимая соответствующие отсчеты  $h_1$  и  $h_2$  по шкалам микрометра. Разность полученных отсчетов равна кажущейся толщине пластинки:

$$H - h = h_1 - h_2.$$

Действительную толщину пластинки  $H$  измеряют микрометром. Подставляя измеренные значения  $H$  и  $(h_1 - h_2)$  в формулу (501.6), находят неизвестный показатель преломления:

$$n = \frac{H}{h_1 - h_2}. \quad (501.7)$$

### **501.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений**

#### **Упражнение 1. Измерение показателя преломления жидких сред при помощи рефрактометра.**

1. Откинуть верхнюю часть измерительной головки 1 реф-



рактометра (см. рис. 501.3). На поверхность измерительной призмы 2 нанести пипеткой 1–2 капли исследуемой жидкости и аккуратно закрыть измерительную головку.

2. Изменяя положение зеркала 4, подсветить шкалу рефрактометра. Вращая кольцо с насечкой окуляра 3, настроить резкое изображение перекрестия визирной сетки и шкалы рефрактометра.

3. Наблюдая в окуляр и вращая маховик 5, найти границу раздела света и тени, совместить ее с перекрестием.

4. Вращая маховик 6, добиться устранения спектральной (радужной) размытости границы света и тени. Вновь совместить (маховик 5) полученную четкую границу света и тени с перекрестием визирной сетки. Снять значение показателя преломления по шкале рефрактометра с точностью до тысячных долей.

5. Открыть измерительную головку. Удалить салфеткой остатки исследуемой жидкости. Тщательно протереть призмы.

6. Произвести указанные измерения по пп.1–4 для других растворов, число которых взять по указанию преподавателя. Результаты записать в таблицу.

7. Проанализировать полученные результаты измерения показателя преломления жидкостей.

### **Упражнение 2. Измерение средней дисперсии воды.**

1. Откинуть верхнюю часть измерительной головки 1 рефрактометра (см. рис. 501.3). На поверхность измерительной призмы 2 нанести пипеткой 1–2 капли дистиллированной воды и аккуратно закрыть измерительную головку.

2. Определить параметр дисперсии  $Z$ . Наблюдая в окуляр и вращая маховик 5, найти границу раздела света и тени, совместить ее с перекрестием. Добиться устранения (маховик 6) спектральной (радужной) размытости границы света и тени. Вновь совместить (маховик 5) полученную четкую границу света и тени с перекрестием визирной сетки. Записать значение отсчета двигающейся шкалы барабана 7, соответствующее красной точке на неподвижной части барабана 7. Это значение  $Z_1$ .

Продолжая вращать маховик 6 в том же направлении, повторно добиться четкой границы раздела света и тени. Считать значение отсчета шкалы барабана 7 –  $Z_2$ . Считывание делений шкалы барабана 7 производить слева направо. Сделать не менее трех отсчетов с двух сторон барабана и найти среднее арифметическое  $Z$ .

3. По формуле  $(n_F - n_C) = A + B\sigma$  вычислить величину средней дисперсии воды. Коэффициенты  $A, B$  определяют по показателю преломления  $n_D$  из табл. 1, коэффициент  $\sigma$  – по среднему значению  $Z$  из табл. 2. Если величина параметра дисперсии  $Z > 30$ , то коэффициент  $\sigma$  принимает отрицательное значение (табл. 1 и 2 см. на установке).

4. Определить коэффициент дисперсии (*число Аббе*) по формуле

$$\gamma = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

где  $n_D$  – показатель преломления дистиллированной воды, измеренный в упр.1.

5. Сравнить полученные результаты со справочными данными для воды.

### **Упражнение 3. Определение концентрации водного раствора спирта.**

1. Произвести измерения показателей преломления эталонных растворов (см. упр.1). Начать измерения следует с дистиллированной воды, затем спиртовые растворы в порядке увеличения концентрации эталонных проб. По полученным результатам построить градуировочный график – зависимость показателя преломления от концентрации раствора  $n = n(C)$ . График вычертить на миллиметровой бумаге в возможно большем масштабе.

2. Измерить показатель преломления пробы исследуемого раствора.

3. Определить с помощью градуировочного графика про-

центное содержание спирта в исследуемом растворе (пробе).

4. Проанализировать полученные результаты измерения показателя преломления водных растворов спирта.

#### **Упражнение 4. Измерение показателя преломления прозрачных твердых тел при помощи микроскопа.**

***Внимание: при настройке резкости следите за тем, чтобы объективом не раздавить исследуемый образец!***

1. Поставить микроскоп на лабораторном столе, расположив шкалу микрометра прямо напротив себя. Наблюдая в окуляр, повернуть зеркало так, чтобы все поле зрения оказалось равномерно освещено.

2. Установить показание микрометра «на ноль». Выставить «ноль» малой круглой шкалы микрометра, вращая маховик 2 микроскопа. Установка «ноля» большой шкалы производится поворотом кольца с насечкой на корпусе микрометра после установки «ноля» малой шкалы. При правильной установке микрометра «на ноль» шуп 3 должен **касаться** предметного столика микроскопа (рис. 501.6,а).

3. Положить исследуемый образец под шуп микрометра, приподняв шток микрометра 4, измерить действительную толщину образца. Измерение толщины произвести в трех различных точках. Полученные результаты занести в таблицу. На рис.501.6,б показано измерение толщины образца. Толщина образца по показаниям микрометра – 1,97 мм.

4. Положить исследуемую пластину на предметный столик микроскопа так, чтобы точка пересечения верхней и нижней рисок находилась под объективом. Вращая маховики 2 против часовой стрелки, опустить тубус так, чтобы объектив оказался от плоскости предметного столика на расстоянии 6–8 мм. (***Внимание: при настройке резкости следите за тем, чтобы объективом не раздавить исследуемый образец!***)

5. Наблюдая в окуляр, медленно поднимать тубус до тех пор, пока в поле зрения появится изображение. Найдя изображение, плавным вращением маховиков добиться наиболее рез-

кого изображения нижней риски. Следует фокусировать край риски или какую-нибудь мелкую деталь края риски на стекле. Щуп микрометра должен упираться в предметный столик микроскопа. Снять показания со шкал микрометра, записать в таблицу.

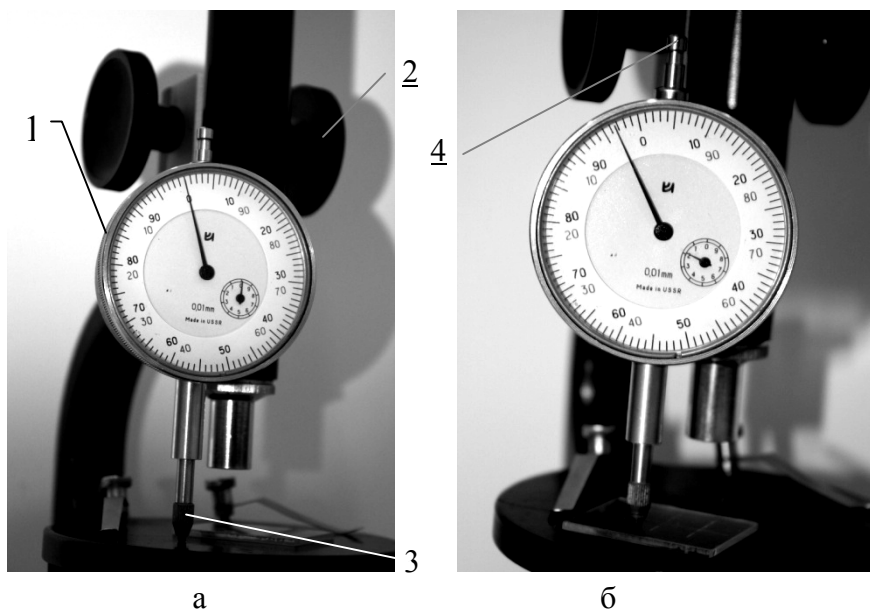


Рис. 501.6

6. **Не переворачивая** пластинку, получить четкое изображение верхней риски, плавно поднимая объектив вверх. Снять показания со шкал микрометра, записать в таблицу.

7. Выполнить пп. 5–6 в двух других точках (перекрестиях) этого же образца. Полученные результаты занести в таблицу.

8. Рассчитать среднее арифметическое значение величин  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $H$ . Рассчитать показатель преломления по формуле (501.7). Результат вычислений занести в таблицу.

9. Выполнить пп. 2–8 для других образцов.

10. Проанализировать полученные результаты измерения показателя преломления пластин, оценить погрешности измере-

ний.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое абсолютный и относительный показатели преломления?
2. Какой луч (угол) называется предельным?
3. Какое явление называется полным внутренним отражением?
4. Как вычислить показатель преломления, если бы рефрактометр измерял только минимальный угол выхода луча из призм?
5. Используя законы преломления, объясните природное оптическое явление "мираж".
6. Объясните, почему происходит преломление света.
7. Почему из-под воды небо видно только в виде сравнительно узкого круга?
8. В каких пределах можно измерять показатель преломления на изученном вами рефрактометре?

## **502. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МИКРОСКОПА**

### **502.1. Цель работы**

Изучение интерференционного микроскопа МИИ-4. Определение толщины напыления, радиуса кривизны сферической поверхности.

### **502.2. Разделы теории**

Интерференция световых волн, когерентность.

[1. Гл. 22, §171–179]; [2. Гл. XVII, §119 – 120]; [3. Гл. 4, 4.1, 4.2].

### 502.3. Приборы и принадлежности

Интерференционный микроскоп МИИ-4, шарик в оправе, пластина с напылением.

### 502.4. Вывод расчётной формулы

Получение когерентных световых волн в интерференционных схемах достигается путём искусственного разделения светового потока от одного источника на два луча. Лучи проходят разные пути, а затем их собирают в одном месте.

Пучок параллельных лучей падает слева на полупрозрачную пластинку  $\Pi$  (рис. 502.1). Чтобы выяснить, каким образом в этой схеме возникает интерференционная картина, достаточно проследить за поведением пучка лучей. Пластина  $\Pi$  разделяет пучок на две части: прошедший луч 1 и отраженный вверх луч 2. Луч 1, отразившись от зеркала  $З_1$  и пластины  $\Pi$ , попадает в точку  $M$  плоскости  $\mathcal{E}$ . Луч 2, отразившись от зеркала  $З_2$  (исследуемая поверхность) и пройдя пластину  $\Pi$ , также попадает в точку  $M$ .

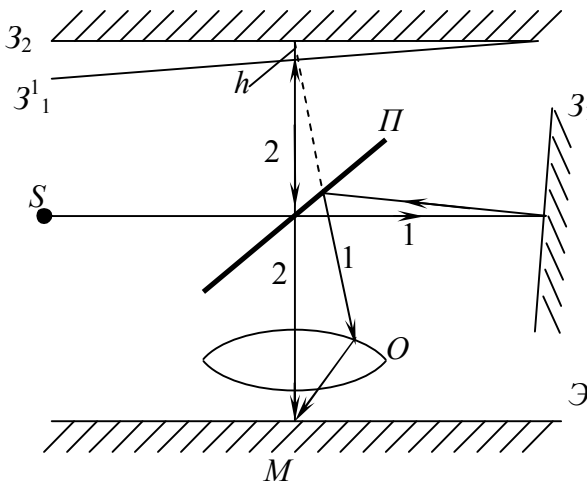


Рис. 502.1

Оба луча (1 и 2) когерентны, так как возникли из одного луча. В плоскости Э наблюдается устойчивая интерференционная картина. Разность хода  $\Delta$  лучей, как видно из рис. 502.1, кратна удвоенной толщине воздушного слоя  $h$ , образованного зеркалом  $Z_2$  и мнимым изображением  $Z'_1$  зеркала  $Z_1$  в пластине П.

Условие образования максимумов и минимумов интерференционной картины имеет вид

$$\Delta = 2nh_k = \begin{cases} k\lambda, & \text{максимумы;} \\ (k + 1/2)\lambda, & \text{минимумы,} \end{cases} \quad (502.1)$$

где  $n$  – показатель преломления среды ( $n = 1$ );  $\lambda$  – длина волны света;  $k$  – порядок интерференции ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Переход от одного максимума к другому отвечает изменению толщины воздушного клина на  $\lambda/2$ .

Если оба зеркала плоские, то интерференционная картина будет иметь вид полос, параллельных ребру клина.

Если одно зеркало плоское, а другое сферическое, то полосы будут иметь вид колец и можно определить радиус кривизны сферической поверхности (рис. 502.2). На рис.502.2 обозначено:

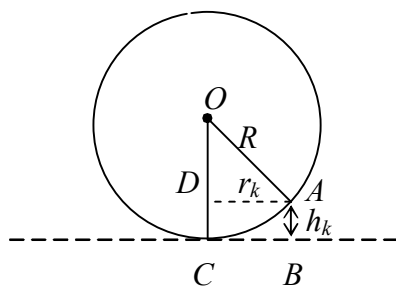


Рис. 502.2

$OA = R$  – радиус сферической поверхности;  $AB = h_k$  – толщина воздушной прослойки;  $BC = AD = r_k$  – радиус  $k$ -го интерференционного кольца.

По теореме Пифагора,  $(AO)^2 = (AD)^2 + (OD)^2$ , или  $R^2 = r_k^2 + (R - h_k)^2$ . Так как  $h_k \ll R$ , получаем

$$r_k^2 \approx 2Rh_k. \quad (502.2)$$

Решая уравнения (502.1) и (502.2), получим выражения для радиусов светлых и тёмных колец в отраженном свете:

$$r_k^2 = \begin{cases} k\lambda R, \text{ светлые;} \\ (k + 1/2)\lambda R, \text{ темные.} \end{cases} \quad (502.3)$$

Из выражения (502.3) получаем расчётную форму для определения радиуса кривизны поверхности

$$R = \frac{r_m^2 - r_k^2}{(m - k)\lambda}, \text{ или } R = \frac{d_m^2 - d_k^2}{4(m - k)\lambda}, \quad (502.4)$$

где  $m$  и  $k$  – номера колец (порядки);  $d_m$ ,  $d_k$  – диаметры соответствующих колец.

### 502.5. Описание установки

Микроинтерферометр Линника МИИ-4 является специальным прибором, предназначенным для визуальной оценки и измерения высоты неровностей тонкообработанных поверхностей. Прибор позволяет измерять высоты неровностей в пределах от 1 до 0,03 микрона.

Оптическая схема прибора показана на рис. 502.3. Здесь 1 – осветитель; 2 – сменный светофильтр; 3 – ирисовая диафрагма; 4 – коллиматорный объектив; 5 и 6 – объектив и окуляр зрительной трубы микроскопа;  $O_1$  и  $O_2$  – микрообъективы, в фокальных плоскостях которых расположены эталонное зеркало  $Z_1$  и исследуемая поверхность  $Z_2$ ;  $\Pi$  – светоразделительная стеклянная пластинка (её нижняя поверхность покрыта полупрозрачным слоем);  $\Pi_1$  – компенсационная пластинка.



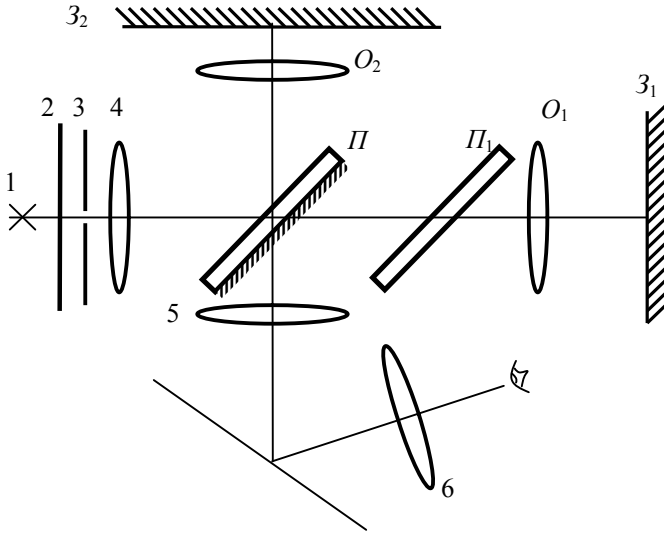


Рис. 502.3

Внешний вид прибора показан на рис. 502.4: 1 – винты для центровки лампы осветителя; 2 – передвижная шторка с тремя отверстиями (в одном из отверстий установлен светофильтр); 3 – кольцо с накаткой для изменения диаметра открытия отверстия ирисовой диафрагмы; 4 – микрометрические винты (цена деления 0,005 мм) для перемещения предметного столика микроскопа 5 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Изменение направления и смещение интерференционных полос в поле зрения микроскопа происходит при повороте кольца 6. Ширина полос изменяется при вращении винта 7.

Рукоятка 8 связана со шторкой, закрывающей эталонное зеркало. На торце этой рукоятки нанесена стрелка. При горизонтальном положении стрелки эталонное зеркало открыто, при вертикальном – закрыто.

Микрометрическим винтом 9 (цена деления 0,003 мм) производится фокусировка микроскопа. Изображение наблюдают через винтовой окулярный микрометр 10.

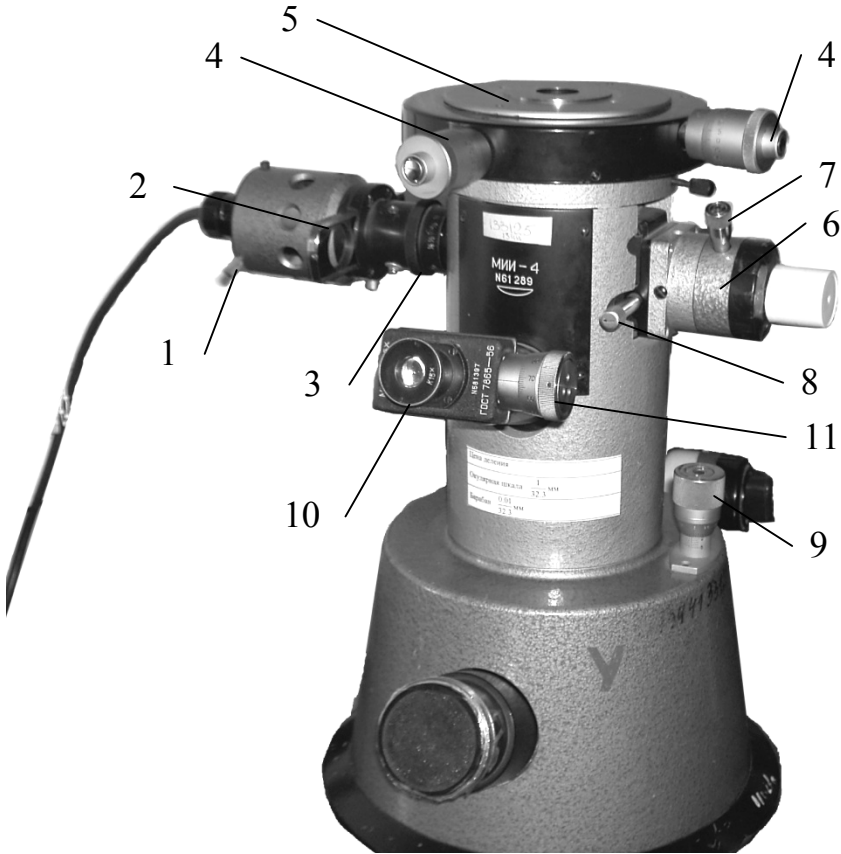


Рис. 502.4

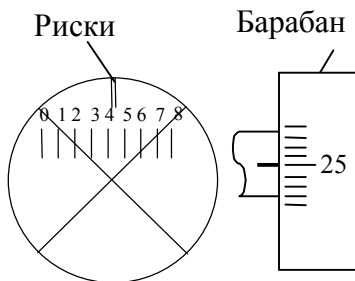


Рис. 502.5

В фокальной плоскости окуляр-микрометра расположены неподвижная шкала с делениями от 0 до 8 мм (цена деления 1мм) и подвижные перекрестие и отсчетный индекс в виде двойной риски (рис. 502.5). Перекрестие и двойная риска перемещаются в поле зрения окуляра относительно неподвижной шкалы путем вращения микрометрического винта 11 (рис. 502.4). Шаг винта равен 1 мм, т.е. при совершении одного полного оборота барабана двойная риска и перекрестие переместятся на одно деление неподвижной шкалы. Перекрестие служит для наведения на объект, а двойная риска – для отсчета целых миллиметров (полных оборотов барабана микрометрического винта). Шкала барабана разделена на 100 частей; поворот барабана на одно деление соответствует перемещению перекрестия на 0,01 мм.

Полный отсчет по шкалам окулярного микрометра складывается из отсчета по неподвижной шкале и отсчета по барабану винта. Отсчет по неподвижной шкале в поле зрения окуляра определяется положением двойной риски, т.е. числом полных делений, на которые переместилась двойная риска, считая от нулевого деления шкалы.

Отсчет по барабану микрометрического винта определяется делением шкалы барабана, находящимся против индекса-штриха, нанесенного на неподвижном цилиндре. На рис.502.5 показан отсчет по шкалам микрометра равный 4,25 мм (двойная риска расположена между 4 и 5 делениями неподвижной шкалы, а индекс-штрих находится против деления 25 шкалы барабана).

### **502.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений**

#### **Упражнение 1. Определение толщины напыления.**

1. Положить образец на предметный столик исследуемой стороной вниз.

2. Включить блок питания SPS-1230. Регулятором VOLTAGE установить на выходе источника питания напряжение 5 В. Наблюдая в окуляр и поворачивая кольцо с накаткой передней

линзы окуляра, сфокусировать шкалу микрометра.

3. Вращая винт фокусировки 9 (рис. 502.4), получить четкое изображение поверхности образца (указатель-стрелка рукоятки 8 направлен вертикально). В окуляре должна быть видна линия границы напыления, разделяющая поле зрения на две части разных тонов. Найти границу напыления можно, выполнив небольшие перемещения объектива винтами 4 или аккуратно передвинув образец на предметном столике.

4. Получить интерференционную картину, повернув рукоятку 8 против часовой стрелки (указатель-стрелка рукоятки 8 направлен горизонтально). Если полосы не видны, повторить фокусировку микроскопа плавным вращением винта 9. Для улучшения контрастности полос рекомендуется изменить отверстие диафрагмы поворотом кольца 3.

5. Внимательно рассмотреть полученное изображение. Смещая объектив микрометрическими винтами 4, выбрать исследуемую область – «ступеньку» напыления. При правильной настройке интерферометра в его поле зрения видны одновременно испытываемая поверхность и интерференционные полосы, имеющие излом на линии границы напыления.

При измерениях интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно к границе напыления. Совместить одну из **нитей** перекрестия с линией границы напыления. Для чего повернуть микрометр 10 на тубусе микроскопа и, вращая барабан 11, навести **нить** перекрестия на линию границы напыления. Угол поворота микрометра обычно не превышает  $30^{\circ}$ . После этого закрепить микрометр зажимным винтом.

6. Расположить интерференционные полосы параллельно второй **нити** перекрестия микрометра при помощи кольца 6 (рис. 502.4). При необходимости изменить (увеличить) ширину линий, вращая винт 7.

7. Измерения производятся **в белом свете по двум черным полосам** интерференционного минимума. Ширина интерференционной полосы и величина излома полосы выражается в делениях окулярной шкалы микрометра. Для большей точности

измерения наводку нити перекрестия лучше всего производить посередине, а не по краю полосы.

*Для устранения ошибок, возникающих из-за люфта в микрометрическом винте, перекрестие нитей всегда должно подводиться с одной стороны (движение барабанчика по часовой стрелке).*

8. Наблюдая в окуляр и вращая барабан 11 микрометра, совместить **нить** перекрестия, параллельную интерференционным полосам, с нижней черной полосой на светлой части поля зрения, снять отсчет  $N_1$  со шкал микрометра. Переместить **нить** перекрестия на вторую черную полосу на светлой поверхности, снять отсчет  $N_2$ .

Разность показаний микрометра  $|N_2 - N_1|$  равна ширине интерференционной полосы ( $l$ ).

9. Перевести **нить** перекрестия на черные полосы темной части поля зрения. Сделать такие же измерения положения черных полос, снять отсчеты  $N'_1$  и  $N'_2$ .

10. Определить величину излома интерференционной полосы  $\Delta l$  как разность показаний микрометра  $|N'_1 - N_1|$  или  $|N'_2 - N_2|$  (рис. 502.6).

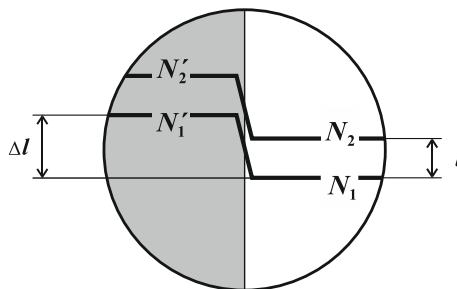


Рис. 502.6

11. Рассчитать толщину напыления при работе в белом свете по формуле

$$x = 0,27 \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot n \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

или

$$x = 0,27 \cdot \frac{|N'_1 - N_1|}{|N_2 - N_1|} \cdot n \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

где  $n$  – число интервалов между полосами (для соседних полос  $n = 1$ ),  $x$  – толщина напыления.

12. Провести измерения по пп. 8, 9 для различных точек поверхности образца не менее 5 раз, не меняя установленного положения интерференционных полос и нитей перекрестия микрометра, а перемещая винтами 4 объектив. (Диапазон перемещения объектива – 10 мм, цена деления барабанчика микрометрического винта объектива – 0,005 мм.) Данные занести в таблицу. Рассчитать толщину напыления в каждой измеренной точке, рассчитать среднюю толщину напыления на образце.

13. Проанализировать полученные результаты измерения толщины напыления, оценить погрешности измерений.

## **Упражнение 2. Определение радиуса кривизны сферической поверхности.**

1. Положить оправу с шариком на предметный столик шариком вниз. Объектив должен находиться в центре отверстия предметного столика.

2. Наблюдая в окуляр, сфокусировать микроскоп на поверхность шарика (винт 9). Указатель-стрелка рукоятки 8 – вертикально. Поворачивая оправу с шариком на предметном столике, совместить центр сферической поверхности с центром поля зрения так, чтобы только в центре поля оказался наиболее четкий участок.

3. Открыть эталонное зеркало. Указатель-стрелка 8 – горизонтально. В поле зрения появляется система интерференционных полос в виде радужных колец. Центр колец должен совпадать с центром поля зрения. Если видна лишь дуга радужных полос, образец следует немного переместить (повернуть) на

предметном столике или с помощью винтов 4 переместить объектив. Повторить фокусировку плавным вращением винта 9.

4. Ввести светофильтр ( $\lambda=589,3$  нм) (шторка 2 на рис. 502.4). Поворотом кольца 3 изменить отверстие диафрагмы, чтобы получилось наиболее контрастное изображение интерференционных полос. В монохроматическом свете наблюдают систему светлых и темных круглых колец. Перекрестие подвижной сетки микрометра переместить в центр шкалы (цифра 4). Перекрестие нитей микрометра должно находиться в середине центрального темного пятна (рис. 502.7,а).

5. Вращая барабан 11 микрометра против часовой стрелки, установить перекрестие на середину какого-либо достаточно удаленного от центра, но еще отчетливо видимого темного (светлого) кольца (рис.502.7,б). Центральное темное пятно не учитывается при подсчете порядков (номера) наблюдаемых колец.

*Для устранения ошибок, возникающих из-за люфта в микрометрическом винте, перекрестие нитей всегда должно подводиться с одной стороны (движение барабанчика по часовой стрелке).*

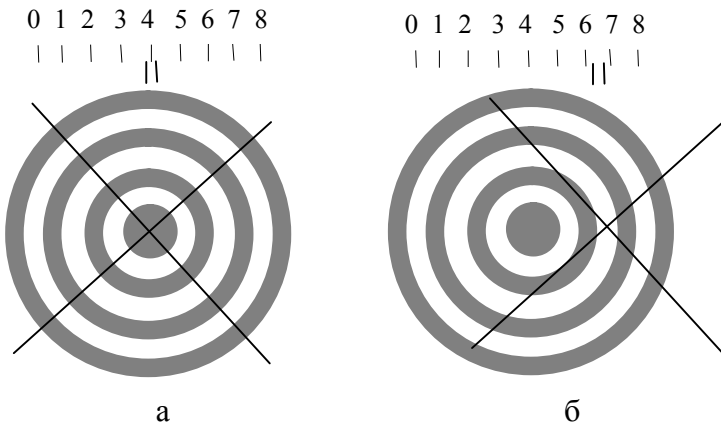


Рис. 502.7

6. Перемещая перекрестие с помощью барабана 11 влево,

последовательно устанавливать **крест нитей** на середины темных (светлых) колец и снимать соответствующие показания со шкал микрометра. После прохождения через центральное черное пятно продолжить измерения, записывая возрастающие номера колец и соответствующие показания микрометра. Измерения проводить до того же порядка кольца, с которого начинали справа. Полученные результаты занести в таблицу.

7. Понизить напряжение на блоке питания SPS 1230 до нуля и выключить блок питания.

8. По данным таблицы произвести расчеты радиуса кривизны шарика. Радиусы близких к центру 2–3 колец рекомендуется не использовать при расчетах, так как эти радиусы дадут самую большую относительную погрешность измерения.

По разности показаний микрометра определить диаметры колец. В поле зрения окуляра микроскопа наблюдается увеличенное изображение интерференционной картины. Истинное значение диаметра кольца получаем умножением полученного результата измерений на цену деления окулярной шкалы (цена деления указана на микроскопе, определяется при измерениях на объект-микрометре). Рассчитать радиус шарика  $R$  по формуле (502.4) для нескольких пар колец. Из полученных значений взять среднее арифметическое. Следует выбирать  $r_m$  и  $r_k$  таким образом, чтобы числа  $m$  и  $k$  были возможно дальше друг от друга (например, 4 и 10, 5 и 8).

9. Построить график зависимости  $r_m^2$  от номера  $m$  кольца. Наклон прямой определяется радиусом кривизны  $R$  и длиной волны света (измерения выполняются в монохроматическом желтом свете  $\lambda = 589,3$  нм).

10. Проанализировать полученные результаты измерения радиуса кривизны шарика, оценить погрешности измерений.

### Контрольные вопросы

1. Почему интерференционная картина, наблюдаемая в



этом интерферометре, состоит из ограниченного числа полос?

2. Чем отличаются интерференционные полосы равного наклона от полос равной толщины?

3. При наблюдении с помощью интерференционного микроскопа колец Ньютона в монохроматическом свете оказалось, что центральное пятно светлое. Что можно сказать об оптической разности хода интерферирующих лучей в этом месте?

4. В чем заключается принцип действия кольца б, с помощью которого производят смещение полос?

5. Какая картина будет наблюдаться в этом интерферометре, если воздушный клин (см. рис. 502.1) превратить поворотом зеркала  $Z_1$  в плоскопараллельный зазор?

### **503. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН СВЕТОВЫХ ВОЛН ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ**

#### **503.1. Цель работы**

Определение длин световых волн при помощи установки с бипризмой Френеля. Вычисление преломляющего угла бипризмы.

#### **503.2. Разделы теории**

Интерференция световых волн, когерентность, способы наблюдения интерференции света. [1. Гл.22, §172,173]; [2. §119 – 123]; [3. Гл.4, 4.1 – 4.4].

#### **503.3. Приборы и принадлежности**

Оптическая скамья, осветитель, собирающая линза, бипризма Френеля, набор светофильтров, микрометр окулярный винтовой, линейка.

### 503.4. Теоретическое введение

Наша задача состоит в том, чтобы с помощью бипризмы Френеля получить на экране интерференционную картину и, измерив ширину интерференционной полосы, вычислить длину световой волны. Такой расчет для установки с бипризмой Френеля является не очень простым. Поэтому мы проведем его в два этапа. Вначале рассмотрим формирование интерференционной картины методом щелей Юнга и найдем ширину интерференционной полосы для установки Юнга с заданными параметрами. Затем используем этот результат для расчетов в опыте с бипризмой.

Все устройства, с помощью которых получают когерентные волны (когерентные источники), работают по одному и тому же принципу: световой пучок от **одного** источника разделяют на два пучка (или выделяют два пучка) и затем эти два пучка сводят в некоторой области. Волновые пучки, порожденные **одним** источником, – когерентны. Соответствующие этим когерентным пучкам когерентные источники могут быть как действительными (щели Юнга), так и мнимыми (опыт с бипризмой).

#### Щели Юнга

Метод щелей Юнга является широко известным методом получения когерентных источников (когерентных волн). На рис. 503.1 показана схема опыта Юнга.

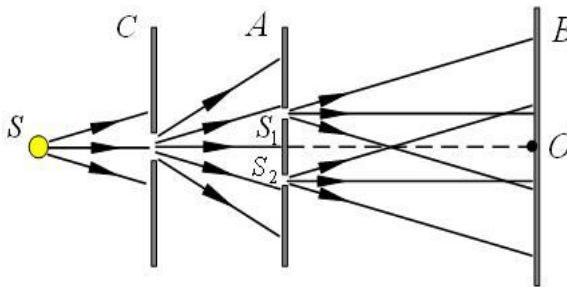


Рис. 503.1

Монохроматический свет от источника  $S$  падает на непрозрачный экран  $C$  со щелью. Свет, прошедший через эту щель, падает на параллельный  $C$  непрозрачный экран  $A$  с двумя узкими параллельными щелями  $S_1$  и  $S_2$ . Эти щели могут рассматриваться как когерентные источники монохроматического излучения. Когерентные световые волны от щелей  $S_1$  и  $S_2$  приходят на экран  $B$ . На этом экране наблюдается интерференционная картина. Щели  $S_1$  и  $S_2$  – источники вторичных волн (принцип Гюйгенса – Френеля). Если экраны со щелями расположены симметрично относительно плоскости  $SO$ , перпендикулярной плоскости чертежа (см. рис. 503.1), то  $S_1$  и  $S_2$  излучают синфазно (в фазе). Это означает, что в точках прямой, расположенной на одинаковых расстояниях от щелей  $S_1$  и  $S_2$ , фазы цилиндрических волн, приходящих от  $S_1$  и  $S_2$ , – одинаковы. Будем считать, что щели  $S_1$  и  $S_2$  имеют одинаковую ширину, так что на упомянутой прямой и амплитуды волн одинаковы. Одна из таких прямых проходит через точку  $O$  экрана  $B$  (она перпендикулярна плоскости чертежа). На этой прямой мы имеем интерференционный максимум нулевого порядка (или – центральный максимум). Интерференционные полосы на экране – прямолинейные и располагаются параллельно щелям  $S_1$  и  $S_2$ . **Отметим**, что наличие дополнительного экрана  $C$  отвечает требованию **пространственной когерентности** излучения.

Рассчитаем ширину интерференционной полосы в опыте Юнга. Пусть  $\lambda$  – длина световой волны,  $d$  – расстояние между щелями  $S_1$  и  $S_2$ ,  $L$  – расстояние от щелей до экрана  $B$ ;  $S_1$  и  $S_2$  **излучают в фазе**. Рассмотрим прямую на экране, точки которой имеют координату  $y$  (рис. 503.2).

Условие того, что на этой прямой мы имеем максимум порядка  $m$ :

$$\Delta \ell \equiv \ell_2 - \ell_1 = m\lambda. \quad (503.1)$$

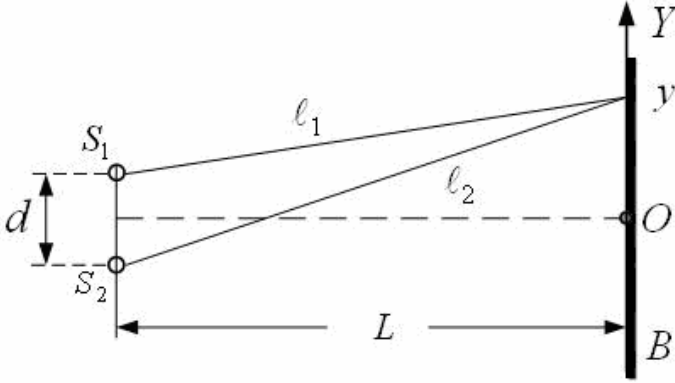


Рис. 503.2

Очевидно,

$$\ell_1 = \sqrt{L^2 + \left(y_m - \frac{d}{2}\right)^2}, \quad \ell_2 = \sqrt{L^2 + \left(y_m + \frac{d}{2}\right)^2}, \quad (503.2 \text{ а, б})$$

$$\begin{aligned} \Delta\ell &= \sqrt{L^2 + \left(y_m + \frac{d}{2}\right)^2} - \sqrt{L^2 + \left(y_m - \frac{d}{2}\right)^2} = \\ &= \frac{2d y_m}{\sqrt{L^2 + \left(y_m + \frac{d}{2}\right)^2} + \sqrt{L^2 + \left(y_m - \frac{d}{2}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (503.3)$$

Размер области на экране, в которой наблюдается интерференционная картина, – мал по сравнению с  $L$ :

$$|y| \ll L. \quad (503.4 \text{ а})$$

Кроме того,

$$d \ll L. \quad (503.4 \text{ б})$$

Поэтому (503.3) можно заменить приближенным равенством

$$\Delta\ell = \frac{2d y_m}{2L} = \frac{d y_m}{L}. \quad (503.5)$$

Условие максимума (503.1) перепишем в виде

$$\frac{d y_m}{L} = m\lambda. \quad (503.6)$$

Для максимума порядка  $(m + 1)$  имеем:

$$\frac{d y_{m+1}}{L} = (m+1)\lambda. \quad (503.7)$$

Ширина интерференционной полосы – расстояние между соседними максимумами (или между соседними минимумами):

$$h = y_{m+1} - y_m. \quad (503.8)$$

Вычитая уравнение (503.6) из уравнения (503.7), получаем

$$\lambda = \frac{d}{L} h, \quad (503.9)$$

$$h = \frac{L}{d} \lambda. \quad (503.10)$$

Последние два равенства эквивалентны. Первое соответствует задаче вычисления длины световой волны при известной ширине интерференционной полосы, а второе служит для расчета ширины полосы при заданной длине световой волны.

### Установка с бипризмой Френеля

В установке с бипризмой источником света является щель в непрозрачном экране, закрывающем осветитель (лампа накаливания). Ширину щели можно регулировать. Бипризма представляет собой две одинаковые призмы с малыми преломляющими углами  $\theta$  (порядка  $1^0$ ), сложенные основаниями. Падающий от щели  $S$  пучок света после преломления бипризмой разделяется на два перекрывающихся пучка, как бы исходящих от двух мнимых изображений щели  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 503.3).

Источники  $S_1$  и  $S_2$  когерентны, и в пространстве за бипризмой в области перекрывания пучков можно наблюдать интерференцию. Бипризму располагают так, что ребро тупого двугранного угла параллельно щели  $S$ , а сама бипризма перпендикулярна плоскости, проходящей через это ребро и щель  $S$ . Экран для наблюдения интерференционной картины располагается параллельно бипризме (рис. 503.3). В нашей установке роль экрана выполняет расположенное в фокальной плоскости окуляра стекло с отсчетным приспособлением (см. ниже).

Роль бипризмы состоит в формировании двух когерентных волновых пучков и соответствующих мнимых когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$ . Если положения  $S_1$  и  $S_2$  известны, то про бипризму можно забыть: она свое дело сделала, и задача теперь сводится к расчету интерференционной картины от двух щелевых источников  $S_1$  и  $S_2$ , – как в методе Юнга. Но мы этот расчет уже произвели и можем теперь пользоваться уравнениями (503.9), (503.10). Осталась одна проблема: как определить положения мнимых источников  $S_1$  и  $S_2$  для данной установки с бипризмой?

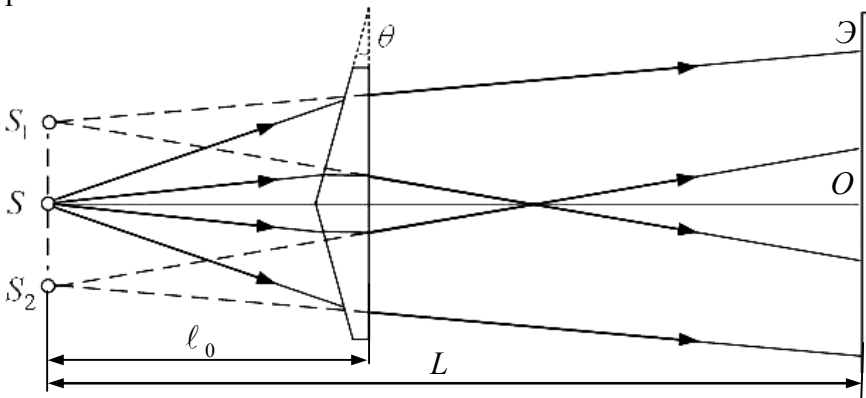


Рис. 503.3

### Расчет положений мнимых источников

Если обозначить:  $D$  – размер бипризмы в плоскости чертежа,  $\ell_0$  – расстояние от щели  $S$  до бипризмы,  $L$  – расстояние от  $S$  до экрана (рис. 503.3), то для реальной установки, помимо малости преломляющих углов ( $\theta \ll \pi/2$ ), имеем

$$D \ll \ell_0, \quad D \ll L - \ell_0. \quad (503.11 \text{ а,б})$$

Это означает, что все лучи: как падающие на бипризму, так и преломленные, образуют очень малые ( $\ll \pi/2$ ) углы с направлением оптической оси  $SO$ . При этом условии (и мы это покажем) изображения щели  $S$  – когерентные мнимые щелевые

источники  $S_1$  и  $S_2$  – оказываются расположенными в одной плоскости с  $S$  на расстоянии  $\ell_0$  от плоскости бипризмы (рис. 503.3).

Найдем положение источника  $S_1$ , формируемого верхней половиной бипризмы. Вначале рассмотрим луч, падающий на бипризму от щели  $S$  (рис. 503.4), и рассчитаем направление преломленного бипризмой луча ( $BG$ ), т.е. найдем угол  $\varphi$  между преломленным лучом и прямой  $BH$ , которая параллельна оптической оси системы (прямая  $SMO'$ ). Угол  $\gamma$  между падающим лучом  $SA$  и осью  $SMO'$  считаем заданным.

На рис. 503.4 показано прохождение луча через верхнюю половину бипризмы;  $n$  – показатель преломления вещества бипризмы. Пунктиром отмечены перпендикуляры ( $EAC$  и  $CBH$ ) к граням бипризмы. Поскольку

$$\theta \ll \pi/2, \quad \gamma \ll \pi/2, \quad (503.12 \text{ а,б})$$

то, очевидно, все интересующие нас углы на рис. 503.4 – малы:

$$\alpha, \beta, \delta, \varphi \ll \pi/2. \quad (503.13)$$

Это позволяет использовать приближенные равенства типа

$$\sin \beta = \tg \beta = \beta. \quad (503.14)$$

Углы в треугольнике  $SAM$  подчинены равенству

$$\gamma + (\pi/2 - \alpha) = \pi/2 - \theta, \quad (503.15)$$

откуда следует

$$\alpha = \gamma + \theta. \quad (503.16)$$

Четырехугольник  $RACB$  содержит два прямых угла, поэтому

$$\angle ACB + \theta = \pi. \quad (503.17)$$

Из треугольника  $ACB$ :

$$\angle ACB + \beta + \delta = \pi. \quad (503.18)$$

Сравнивая (503.17) и (503.18), получаем

$$\beta + \delta = \theta. \quad (503.19)$$

Запишем еще закон преломления на гранях  $MAR$  и  $RBO'$ , заменив синусы углов на сами углы (см. (503.14)):

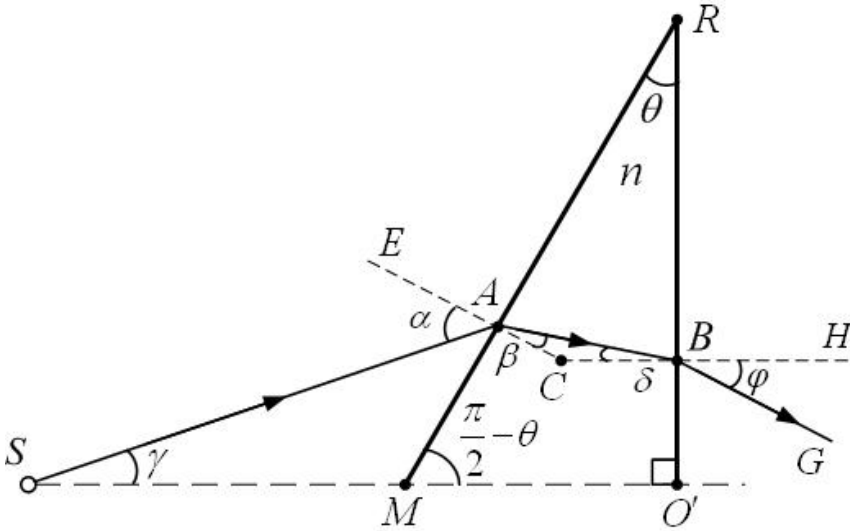


Рис. 503.4

$$\frac{\alpha}{\beta} = n, \quad (503.20)$$

$$\frac{\delta}{\varphi} = \frac{1}{n}. \quad (503.21)$$

Из системы уравнений (503.16), (503.19), (503.20), (503.21) находим угол  $\varphi$ :

$$\varphi = (n-1)\theta - \gamma. \quad (503.22)$$

На рис. 503.5 показано преломление луча верхней половиной бипризмы, т.е. то же самое, что и на рис. 503.4. Здесь, однако, учтены реальные масштабы. В частности, учтено то обстоятельство, что толщина бипризмы ( $MO'$  на рис. 503.4) мала по сравнению с расстоянием  $\ell_0$  между источником (щелью)  $S$  и бипризмой. Поэтому половинка бипризмы изображается отрезком: грань  $MAR$  (рис. 503.4) совмещена с гранью  $RBO'$ , точка  $A$  совпадает с точкой  $B$ , а точка  $M$  – с точкой  $O'$ .

Угол  $\varphi'$ , отмеченный на рис. 503.5, – алгебраическое значение угла  $\varphi$  (рис. 503.4) между преломленным лучом  $BG$  и осью  $O'X$ . Очевидно,



$$\varphi' = -\varphi = \gamma - (n-1)\theta. \quad (503.23)$$

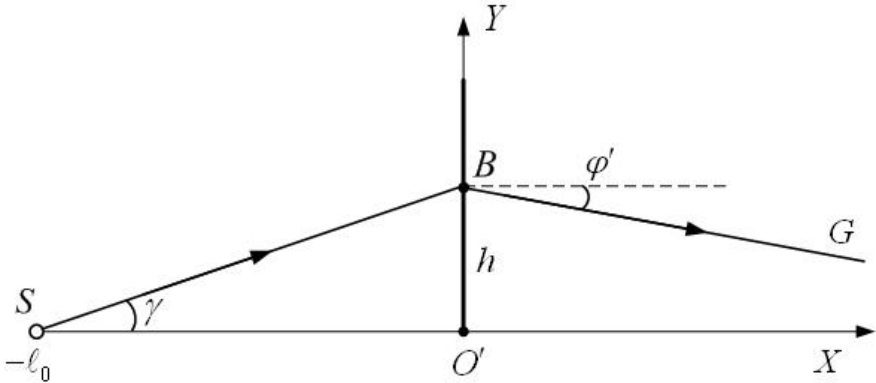


Рис. 503.5

Запишем уравнение прямой, содержащей преломленный луч  $BG$ :

$$y = \operatorname{tg} \varphi' \cdot x + h. \quad (503.24)$$

Учитывая малость углов

$$\operatorname{tg} \varphi' = \varphi', \quad h = \ell_0 \operatorname{tg} \gamma = \ell_0 \gamma, \quad (503.25a, б)$$

вместо (503.24) получаем

$$y = \varphi' \cdot x + \ell_0 \gamma. \quad (503.26)$$

Подставив в (503.26) выражение (503.23), имеем окончательно:

$$y = (\gamma - (n-1)\theta) \cdot x + \gamma \ell_0. \quad (503.27)$$

Уравнение (503.27) следует понимать так. Если источник (щель)  $S$  испускает луч под углом  $\gamma$  к оптической оси  $O'X$ , падающий на бипризму, то преломленный бипризмой луч лежит на прямой, определяемой уравнением (503.27). Ясно, что мнимый источник  $S_1$  также лежит на этой прямой.

Если падающий от  $S$  на бипризму луч образует угол  $\gamma_1$  с оптической осью, то прямая, на которой лежит преломленный луч, задается уравнением

$$y = (\gamma_1 - (n-1)\theta) \cdot x + \gamma_1 \ell_0. \quad (503.28)$$

Мнимый источник  $S_1$  расположен в точке пересечения прямых (503.27) и (503.28). Найдем координаты  $x_1$  и  $y_1$  точки пересечения. При этом следует иметь в виду, что в уравнениях прямых (503.27), (503.28)  $\gamma$  и  $\gamma_1$  – **произвольные** малые углы, и координаты  $x_1$ ,  $y_1$  источника  $S_1$  не должны зависеть от  $\gamma$  и  $\gamma_1$ . Решая систему

$$y_1 = (\gamma - (n-1)\theta) \cdot x_1 + \gamma \ell_0, \quad (503.29 \text{ а})$$

$$y_1 = (\gamma_1 - (n-1)\theta) \cdot x_1 + \gamma_1 \ell_0, \quad (503.29 \text{ б})$$

получаем:

$$x_1 = -\ell_0, \quad y_1 = (n-1)\theta \cdot \ell_0. \quad (503.30 \text{ а,б})$$

Ясно, что координаты второго мнимого источника  $S_2$ , определяющего преломление света нижней половиной бипризмы, находятся аналогично:

$$x_2 = -\ell_0, \quad y_2 = -(n-1)\theta \cdot \ell_0. \quad (503.31 \text{ а,б})$$

Равенства (503.30 а), (503.31 а) показывают, что мнимые источники  $S_1$  и  $S_2$  лежат в одной плоскости со щелью  $S$ , а равенства (503.30 б), (503.31 б) определяют расстояние между мнимыми источниками:

$$d = 2(n-1)\theta \cdot \ell_0. \quad (503.32)$$

Из рис. 503.6 видно, каким образом описание интерференции в системе щель ( $S$ ) – бипризма – экран сводится к описанию в системе Юнга: щели ( $S_1$  и  $S_2$ ) – экран. Мы можем теперь пользоваться формулами (503.9), (503.10), имея в виду, что расстояние между  $S_1$  и  $S_2$  определяется равенством (503.32).

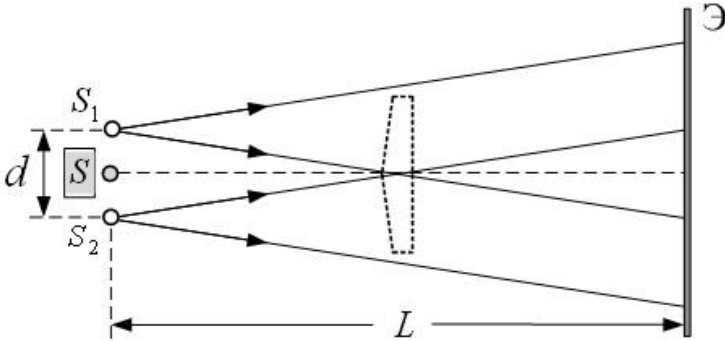


Рис. 503.6

В данной лабораторной работе преломляющий угол би-призмы  $\theta$  считается неизвестным. Поэтому равенство (503.32) для вычисления расстояния  $|S_1 S_2| = d$  непосредственно не используется,  $d$  определяется на основе дополнительного опыта с линзой (см. ниже). Тем не менее, равенство (503.32) является крайне важным. Система (503.9), (503.10), (503.32) позволяет определить, как зависит интерференционная картина в установке с бипризмой от длины световой волны, от параметров бипризмы и от позиции бипризмы и экрана на оптической скамье. В частности, становится понятным, зачем преломляющий угол  $\theta$  нужно делать поменьше. При уменьшении преломляющего угла расстояние между мнимыми источниками уменьшается (см. (503.32)), а ширина интерференционной полосы (см. (503.10)) соответственно увеличивается. Картину с большей шириной полосы легче наблюдать.

### 503.5. Описание установки

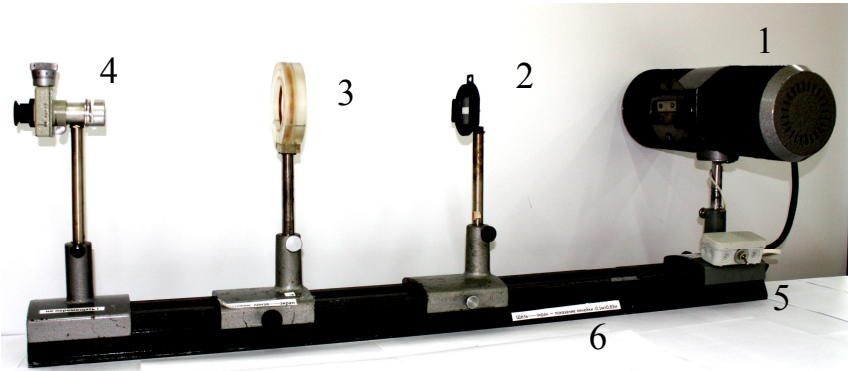
Установка (рис. 503.7, а, б) состоит из оптической скамьи 5, осветителя 1 в защитном кожухе с лампой накаливания и регулируемой щелью, бипризмы 2, линзы 3 и окулярного микрометра 4 со сменным светофильтром. Скамья снабжена линейкой 6 с ценой деления 1 мм. Все детали смонтированы на рейтерах,

имеющих указатели для отсчета их положения. Элементы установки возможно также перемещать вверх и вниз и закреплять их в требуемом положении с помощью винта на рейтере.

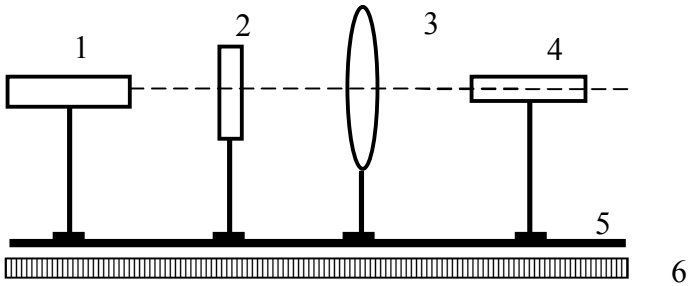
Отсчетное приспособление окуляр-микрометра состоит из неподвижной шкалы и подвижной сетки, которые расположены в фокальной плоскости окуляра, а также микрометрического винта с отсчетным барабанчиком. Шкала разделена на 8 делений (через 1 мм). Деления пронумерованы. На подвижной сетке нанесены перекрестие и две риски. Перекрестие служит для наводки на объект (например, на середину светлой полосы на экране), а риски – для отсчета целых миллиметров. Шкала барабанчика разделена на 100 делений. Каждый полный оборот барабанчика соответствует одному делению окулярной шкалы, т.е. доли миллиметра отсчитываются по барабанчику (цена деления равна 0,01 мм). Результат измерения – вертикальная координата объекта (с которым совмещено перекрестие), определенная с точностью до одной сотой миллиметра. На рис. 503.7,в показан отсчет по шкале микрометра 4,25 мм.

На расстоянии 20 – 40 см от щели устанавливается бипризма 2 в оправе так, чтобы ребро ее тупого угла было строго параллельно щели и на одной с ней высоте (при соблюдении этих условий интерференционная картина имеет максимальную яркость при достаточном расстоянии между отдельными полосами). На расстоянии 30 – 50 см от бипризмы помещается окулярный микрометр 4. С помощью собирающей линзы 3 получают изображения  $S'_1, S'_2$  мнимых источников  $S_1, S_2$  в виде двух ярких светлых полос в поле зрения окуляр-микрометра (рис. 503.8).

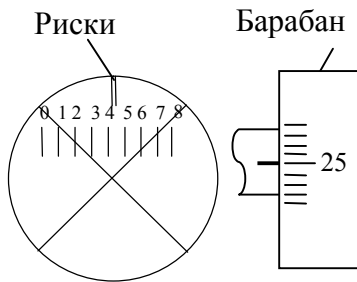
Линза размещается между бипризмой и микрометром. Если обозначить расстояние от источников до микрометра через  $L$ , от микрометра до линзы – через  $\ell$ , расстояние между изображениями  $S'_1, S'_2$ , наблюдаемыми в окуляр-микрометр, –



a



б



в

Рис. 503.7

через  $d'$ , то расстояние  $d$  между мнимыми источниками  $S_1, S_2$  определяется с помощью формулы увеличения линзы

$$\frac{d'}{d} = \frac{\ell}{L-\ell}; \quad d = d' \frac{L-\ell}{\ell}. \quad (503.33 \text{ а,б})$$

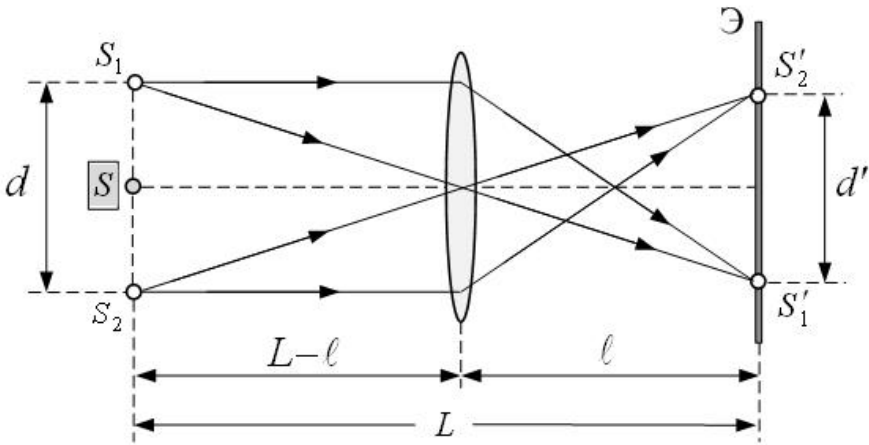


Рис. 503.8

### 503.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. На оптической скамье установить осветитель 1 с горизонтальной щелью, бипризму и окулярный микрометр так, чтобы щель, бипризма и окуляр-микрометр находились на одной оптической оси (см. рис. 503.7). Линзу 3 при этом нужно снять.

2. Включить тумблером осветитель 1.

3. Сфокусировать шкалу микрометра, поворачивая накатанное кольцо передней линзы окуляра. Вращая барабан микрометра, расположить риски подвижной сетки в центре шкалы (цифра 4).

4. Производя небольшие перемещения бипризмы вдоль оптической скамьи, получить отчетливую интерференционную картину в белом свете (система горизонтальных радужных по-

лос) в центре поля зрения окуляр-микрометра. Для большей контрастности изображения можно изменить ширину щели. Закрепить винтом рейтер бипризмы в выбранном положении на оптической скамье. Поместить светофильтр перед микрометром. В монохроматическом свете интерференционная картина представляет собой систему темных и светлых полос. Измерить по линейке на оптической скамье расстояние  $L$  от щели до фокальной плоскости микрометра (используя указатели на рейтерах). Измерить расстояние  $\ell_0$  от щели до бипризмы.

5. Поставить линзу на оптическую скамью между бипризмой и окуляр-микрометром. Добиться (перемещая линзу по скамье и регулируя высоту ее установки в рейтере) четкого изображения мнимых источников в виде двух ярких светлых полос. Измерить расстояние  $\ell$  от линзы до фокальной плоскости микрометра.

6. Навести перекрестие микрометра на нижнюю яркую полосу ( $S'_1$ ). **Для устранения ошибок, возникающих из-за люфта в микрометрическом винте, перекрестие нитей всегда должно подводиться с одной стороны.** Наводить перекрестие лучше на середину, а не на край полосы. Пользуясь окулярной шкалой микрометра и шкалой барабана, определить положение полосы – вертикальную координату середины полосы  $Y'_1$ . Определить положение верхней полосы ( $S'_2$ ), сняв отсчет  $Y'_2$ .

Прямые измерения величин  $\ell$ ,  $Y'_1$ ,  $Y'_2$  (пп. 5, 6) повторить не менее 5 раз, каждый раз начиная с выбора оптимального положения линзы (п. 5). Результаты этих измерений обработать методом Стьюдента.

Расстояние между изображениями мнимых источников  $S'_1$  и  $S'_2$  равно разности координат полос  $Y'_2$  и  $Y'_1$ :

$$d' = Y'_2 - Y'_1, \quad (503.34)$$

поэтому расстояние между мнимыми источниками  $S_1$  и  $S_2$  выражается через результаты прямых измерений формулой

$$d = \frac{L - \ell}{\ell} (Y'_2 - Y'_1), \quad (503.35)$$

см. (503.33 б).

7. Убрать линзу с оптической скамьи. В поле зрения окуляр-микрометра отчетливо наблюдается 5–7 горизонтальных интерференционных полос. Пронумеруем (для удобства) светлые полосы (0, 1, 2, ...), присвоив номер 0 нижней из отчетливо наблюдаемых полос. Для вычисления ширины интерференционной полосы достаточно измерить координаты двух светлых полос. Выбор пары (или пар) полос определяется преподавателем. Рекомендация: выбирать полосы, расположенные подальше друг от друга.

8. Навести перекрестие микрометра на середину  $k$ -й светлой полосы и измерить координату середины полосы  $y(k)$ . Измерить координату  $y(m)$  середины  $m$ -й светлой полосы ( $m > k$ ). Снова установить перекрестие на середину  $k$ -й светлой полосы и измерить координату  $y(k)$  еще раз. Повторить измерения величин  $y(k)$ ,  $y(m)$  не менее 5 раз, подводя перекрестие микрометра к серединам полос только снизу. Результаты измерений обработать методом Стьюдента.

Ширина интерференционной полосы по результатам прямых измерений п. 8 определяется равенством

$$h = \frac{y(m) - y(k)}{m - k}. \quad (503.36)$$

9. Вычислить длину волны монохроматического света с помощью **расчетной формулы**, полученной на основе (503.9), (503.35) и (503.36):

$$\lambda = \frac{L - \ell}{\ell L(m - k)} (Y'_2 - Y'_1)(y(m) - y(k)). \quad (503.37)$$

10. Вычислить преломляющий угол бипризмы с помощью **расчетной формулы**, полученной на основе (503.32) и (503.35):

$$\theta = \frac{L - \ell}{2(n - 1)\ell_0 \ell} (Y'_2 - Y'_1). \quad (503.38)$$



Положить для показателя преломления вещества бипризмы  $n = 1,544$  (кварц).

11. Вычислить погрешности величин  $\lambda$ ,  $\theta$ , считая, что отличны от нуля погрешности только для тех прямых измерений, которые выполнялись многократно:  $\Delta \ell$ ,  $\Delta Y'_1$ ,  $\Delta Y'_2$ ,  $\Delta y(k)$ ,  $\Delta y(m)$ . Формулы для погрешностей  $\lambda$ ,  $\theta$  вывести самостоятельно.

12. Повторить проведенные измерения и вычисления с другими светофильтрами (по указанию преподавателя).

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется явлением интерференции?
2. Что такое фаза волны?
3. Какие волны называются когерентными?
4. При каких значениях разности фаз двух волн наблюдается их взаимное усиление? ... взаимное ослабление?
5. Запишите выражение для фазы плоской монохроматической волны, распространяющейся в однородной среде.
6. Два источника монохроматических волн излучают в фазе. При каких значениях оптической разности хода волн (до точки наблюдения) в точке наблюдения имеет место интерференционный максимум? ... минимум? Длина световой волны известна.
7. Устройства, с помощью которых наблюдают интерференцию: щели Юнга, бипризма Френеля, зеркало Ллойда и т.д., формируют когерентные волновые пучки фактически одним способом. Что это за способ? Как он реализуется в установке с бипризмой Френеля?
8. Как изменяется наблюдаемая интерференционная картина при перемещении окуляр-микрометра вдоль оптической скамьи?
9. Как изменяется наблюдаемая интерференционная картина при перемещении бипризмы вдоль оптической скамьи?
10. Как зависит ширина интерференционной полосы от

преломляющего угла бипризмы при фиксированных положениях осветителя, бипризмы и окуляр-микрометра?

11. Как зависит ширина интерференционной полосы от длины световой волны при фиксированных положениях осветителя, бипризмы и окуляр-микрометра?

12. Как используется линза в данной лабораторной работе? Какая величина измеряется в опыте с линзой?

## **504.-1. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВЫХ ВОЛН ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ НЬЮТОНА**

### **504.1. Цель работы**

Наблюдение колец Ньютона, определение радиуса кривизны линзы и длин волн света видимого диапазона.

### **504.2. Разделы теории**

Интерференция света в тонких пленках [1. Гл.22, §174]; [2. Гл.XVII, §122]; [3. Гл.4, 4.3].

### **504.3. Приборы и принадлежности**

Поляризационный микроскоп LABOVAL ро1, микрометр, исследуемая линза, светофильтр.

### **504.4. Вывод расчетной формулы**

Перераспределение интенсивности излучения в пространстве в результате наложения когерентных волн называют интерференцией.

Рассмотрим систему стекло–воздух–стекло. Пусть из стекла с показателем преломления  $n_1$  распространяется плоская волна  $I$  (рис. 504.1). Вследствие отражения от верхней поверхности воздушного слоя, а также преломления и последующего отра-

жения световой волны от нижней поверхности воздушного слоя образуются две волны  $I'$  и  $2'$ . Толщина воздушного слоя  $AB = d_k$ , а показатель преломления  $n = 1$ .

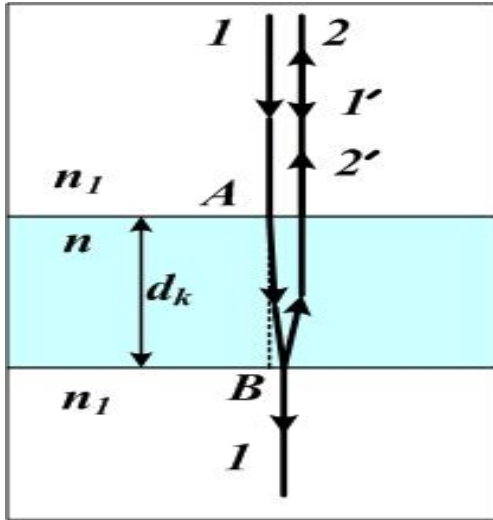


Рис. 504.1

Для определения положения светлых полос необходимо найти оптическую разность хода лучей  $I'$  и  $2'$ . Интерференционный максимум наблюдается, если разность хода между лучами равна

$$\Delta = k\lambda, \quad (504.1)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$

В точке  $B$  происходит отражение света от подложки, имеющей показатель преломления  $n_1 > n$ , поэтому при вычислении оптической разности  $\Delta$  хода учтем дополнительную разность фаз  $\pi$ , добавляя  $\lambda/2$  или вычитая  $\lambda/2$ .

Вычислим разность хода лучей  $I'$  и  $2'$ :

$$\Delta = 2|AB| \pm \frac{\lambda}{2}.$$

$$\Delta = k\lambda = 2d_k \pm \frac{\lambda}{2}. \quad (504.2)$$

Наблюдение колец Ньютона возможно с помощью установки, представленной на рис.504.2.

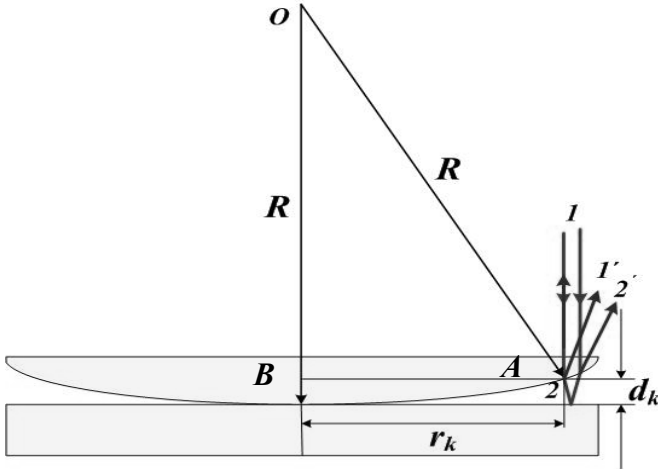


Рис. 504.2

Кольца Ньютона наблюдается, если на плоскую зеркальную поверхность положить плосковыпуклую линзу выпуклой стороной вниз и направить на ее плоскую поверхность падающий нормально параллельный пучок лучей. Лучи  $1'$  и  $2'$  являются когерентными и при сложении будут усиливать или ослаблять друг друга в зависимости от разности хода  $\Delta$ , которая определяется толщиной воздушного зазора  $d_k$ . Воздушный зазор можно считать тонкой пленкой между стеклянной линзой и стеклянной подложкой аналогично системе на рис.504.1. При нормальном падении лучей условие усиления принимает вид

$$\Delta = k\lambda = 2d_k + \frac{\lambda}{2}, \quad (504.3)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,

а условие ослабления

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} = 2d_k + \frac{\lambda}{2}, \quad (504.4)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Так как измерить толщину воздушного зазора трудно, то ее обычно исключают, выражая через радиусы колец. Для этого рассмотрим треугольник  $OAB$  (рис. 504.2):

$$R^2 = r_k^2 + (R - d_k)^2.$$

Учитывая, что толщина  $d_k$  очень мала по сравнению с радиусом кривизны линзы  $R$ , пренебрегаем  $d_k^2$  и находим

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R}.$$

Подставляя  $d_k$  в формулы (504.3) и (504.4), находим выражения для радиусов светлых колец

$$r_k = \sqrt{R(2k-1) \frac{\lambda}{2}}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (504.5)$$

и темных колец

$$r_k = \sqrt{R k \lambda}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

если наблюдения производятся в отраженном свете.

Формула (504.5) является расчетной при выполнении данной работы. Если измерить радиус светлого кольца  $r_k$ , то при заданной длине волны из выражения (504.5) можно вычислить радиус линзы  $R$  и, наоборот, при заданном  $R$ , можно определить длину волны.

На практике невозможно добиться идеального соприкосновения сферической линзы и плоской пластинки в одной точке, поэтому более правильный результат получится, если вычислить  $R$  по разности радиусов двух колец. Обычно измеряют радиусы двух светлых колец  $r_m$  и  $r_k$ , для которых из формулы (504.5) можно записать выражение

$$r_m^2 - r_k^2 = R\lambda(m - k).$$

Отсюда получаем расчетные формулы:

$$R = \frac{r_m^2 - r_k^2}{(m - k)\lambda}; \quad (504.6)$$

$$\lambda = \frac{r_m^2 - r_k^2}{(m - k)R}. \quad (504.7)$$

#### 504.5. Описание установки и методики измерения

Наблюдение и измерения колец Ньютона в отраженном свете выполняются с помощью микроскопа LABOVAL pol (рис. 504.3).

На предметный столик 1 помещается держатель с полированной пластинкой из черного стекла. К пластинке при помощи трех винтов и пружинного кольца прижимается исследуемая линза 2. Между окуляром и объективом микроскопа в оптической трубе 4 расположен opak-иллюминатор – специальное устройство для освещения объекта при работе в отраженном свете. Внутри opak-иллюминатора находится полупрозрачная стеклянная пластина  $P$ , наклоненная под углом  $45^{\circ}$  к оптической оси микроскопа. Свет от источника 3, пройдя светофильтр 6, частично отражается от пластины  $P$ , проходит через объектив микроскопа и попадает на исследуемый объект. Лучи, отраженные от линзы 2 и пластинки, наблюдаются через окуляр-микрометр 7, установленный на оптической трубе 4. В фокальной плоскости окуляр-микрометра расположены неподвижная шкала с делениями от 0 до 8 мм (цена деления 1 мм) и подвижное перекрестие и отсчетный индекс в виде двойной риски (рис. 504.4). Перекрестие и двойная риска перемещаются в поле зрения окуляра относительно неподвижной шкалы путем вращения микрометрического винта окуляр-микрометра. Шаг винта равен 1 мм, т.е. при совершении одного полного оборота барабана двойная риска и перекрестие переместятся на одно деление неподвижной шкалы. Перекрестие служит для наведения на объект, а двойная риска – для отсчета целых миллиметров (полных оборотов барабана микрометрического винта). Шкала барабана разделена на 100 частей; поворот барабана на одно деление соответствует перемещению перекрестия на 0,01 мм.

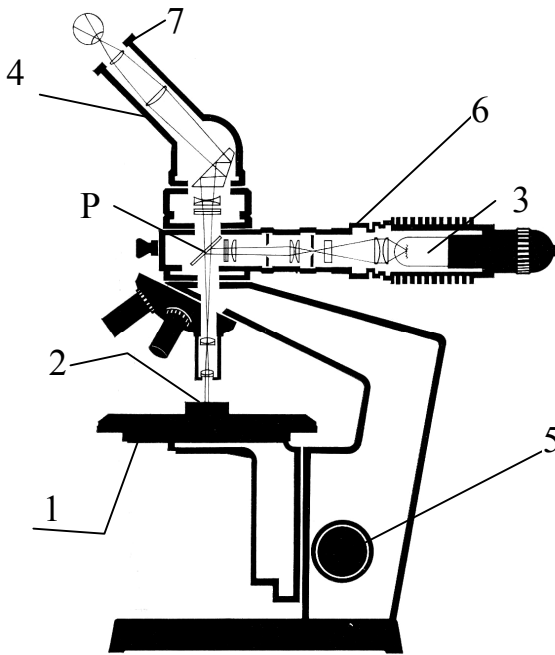


Рис. 504.3

Полный отсчет по шкалам окулярного микрометра складывается из отсчета по неподвижной шкале и отсчета по барабану винта. Отсчет по неподвижной шкале в поле зрения окуляра определяется положением двойной риски, т.е. числом полных делений, на которые переместилась двойная риска, считая от нулевого деления шкалы. Отсчет по барабану микрометрического винта определяется делением шкалы барабана, находящимся против индекса-штриха, нанесенного на неподвижном цилиндре.

На рис. 504.4 показан отсчет по шкалам микрометра 4,25 мм (двойная риска расположена между 4 и 5 делениями неподвижной шкалы, а индекс-штрих находится против деления 25 шкалы барабана).

В поле зрения микрометра в монохроматическом свете

видны чередующиеся светлые и темные кольца. Наведение на резкость изображения колец производится винтом 5 (рис. 504.4).

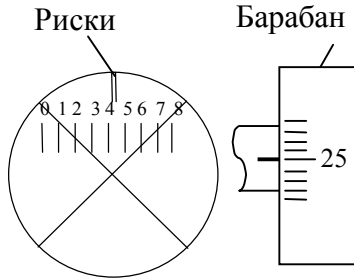


Рис. 504.4

Для определения радиуса кривизны линзы измеряют несколько пар радиусов светлых (темных) колец ( $r_m$ ,  $r_k$ ). Длина волны  $\lambda$  считается известной и берется из таблицы длин волн. Затем по формуле (504.6) вычисляется радиус кривизны линзы  $R$ .

Используя кольца Ньютона, можно на практике определить длину волны падающего излучения, если взять линзу с известным радиусом кривизны. Измерения длины световой волны аналогичны измерению радиуса кривизны линзы.

Освещая ту же систему монохроматическим светом с другим значением  $\lambda_2$ , измеряют радиусы тех же светлых колец  $r_m$  и  $r_k$  и вычисляют длину волны  $\lambda_2$ , используя формулу (504.7).

### 504.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Включить блок питания GPR-0830 HD (или SPS1230) кнопкой POWER. Поворачивая ручку VOLTAGE COARSE, выставить рабочий режим лампы микроскопа  $I=2,4$  А;  $U=7,5$  В.
2. Вращая барабан микрометра, установить риски подвиж-



ной сетки окуляр-микрометра на центр шкалы (цифра 4).

3. Найти систему колец Ньютона невооруженным глазом. Темное пятно в точке соприкосновения линзы и пластины хорошо заметно. Размер темного пятна зависит от усилия, с которым линза прижата к пластине. Если оно велико, следует аккуратно ослабить прижимные винты держателя. Расположить на предметном столике микроскопа держатель с исследуемой линзой так, чтобы темное пятно точки соприкосновения находилось приблизительно в центре светлого пятна, рассматриваемого через объектив.

4. Наблюдая в окуляр, сфокусировать изображение колец Ньютона, вращая винт 5 микроскопа (см. указатель на штативе). Крест нитей окуляр-микрометра должен проходить через середину центрального темного пятна интерференционной картины – системы радужных колец. В случае отсутствия совпадения центров аккуратно изменить положение держателя с линзой на предметном столике.

5. Вставить светофильтр в щель 6 (см. рис. 504.3) и зафиксировать кольцом. В монохроматическом свете наблюдают светлые и темные кольца (рис. 504.5,а).

6. Вращая барабан микрометра против часовой стрелки, установить перекрестие на середину какого-либо достаточно удаленного от центра, но еще отчетливо видимого темного (светлого) кольца (рис. 504.5,б). Центральное темное пятно не учитывается при подсчете порядков (номера) наблюдаемых колец.

*Для устранения ошибок, возникающих из-за люфта в микрометрическом винте, перекрестие нитей всегда должно подводиться с одной стороны (движение барабана по часовой стрелке).*

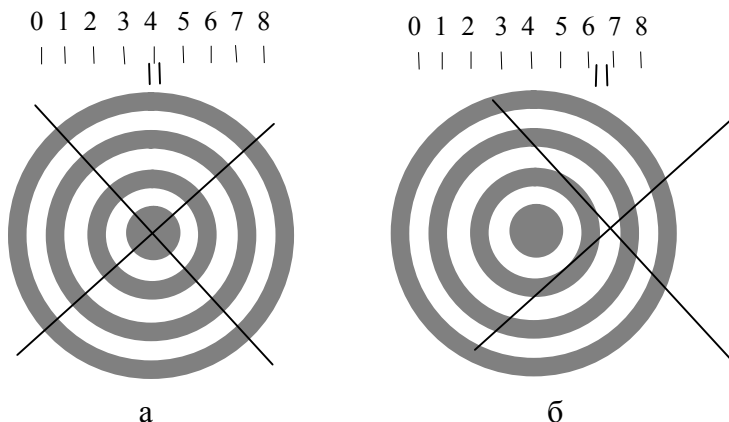


Рис. 504.5

7. Перемещая перекрестие с помощью барабана микрометра влево, последовательно устанавливая крест нитей на середины темных (светлых) колец и снимая соответствующие показания со шкал микрометра.

После прохождения через центральное черное пятно продолжить измерения, записывая возрастающие номера колец и соответствующие показания микрометра. Измерения проводить до того же порядка кольца, с которого начинали справа. Полученные результаты занести в таблицу.

8. Понизить напряжение на блоке питания GPR-0830 HD (или SPS 1230) до нуля и выключить блок питания.

9. По данным таблицы произвести расчеты радиуса линзы ( $R$ ).

Радиусы близких к центру 2–3 колец рекомендуется не использовать при расчетах, так как эти радиусы дают самую большую относительную погрешность измерения.

По разности показаний микрометра определить диаметры колец. В поле зрения окуляра микроскопа наблюдается увеличенное изображение интерференционной картины. Истинное значение диаметра кольца получаем умножением полученного результата измерений на цену деления окулярной шкалы (цена деления указана на микроскопе, определяется при измерениях

на объект-микрометре).

Рассчитать радиус линзы  $R$  по формуле (504.6) для нескольких пар колец. Следует выбирать  $r_m$  и  $r_k$  таким образом, чтобы числа  $m$  и  $k$  были возможно дальше друг от друга (например, 4 и 7, 5 и 8). Из полученных значений  $R_i$  рассчитать среднее арифметическое значение  $R$ .

10. Построить график зависимости  $r_m^2$  от номера  $m$  кольца. Наклон прямой определяется радиусом кривизны  $R$  и длиной волны света (измерения выполняются в монохроматическом красном свете  $\lambda = 700$  нм).

11. Проанализировать полученные результаты измерения радиуса линзы, оценить погрешности измерений.

12. По формуле (504.7) определить длины волн других цветов в интерференционной картине (по указанию преподавателя). Для этого провести дополнительные измерения по пп. 5–7, считая известным радиус кривизны линзы  $R$ . Проанализировать полученные результаты, вычислить погрешность  $\Delta\lambda$ .

### Контрольные вопросы

1. Чем отличаются интерференционные картины при наблюдении колец Ньютона в отраженном и проходящем свете?

2. Почему при удалении от центра линзы расстояние между кольцами Ньютона становится меньше?

3. Когда и почему кольца Ньютона оказываются окрашенными?

4. Какие источники волн называют когерентными? Какие волны называются когерентными?

5. Как изменится интерференционная картина, если воздушную прослойку заполнить жидкостью с показателем преломления стекла ( $n > n_{ст}$ )?

6. В каком случае и почему учитывается изменение разности хода двух лучей от когерентных источников на  $\lambda/2$ ?

7. При каких разностях фаз две когерентные волны при наложении дадут максимум, при каких – минимум?

## 504.-2. НАБЛЮДЕНИЕ КОЛЕЦ НЬЮТОНА С ПОМОЩЬЮ ВИДЕООКУЛЯРА DCM-310

### Цель работы

Измерение радиусов колец с использованием программы «ScopePhoto».

### Приборы и принадлежности

Поляризационный микроскоп LABOVAL pol, видеоокуляр DCM 310, ПК, объект-микромметр, держатель с исследуемой линзой, светофильтр.

**Объект-микромметр** представляет собой металлическую пластинку с отверстием в центре. В отверстие помещена стеклянная вставка с измерительной шкалой длиной 1 мм, разделенной на 100 частей, т.е. **цена деления шкалы объект-микромметра – 0,01 мм.**

### Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

*Определение увеличения оптической системы  
«Объектив–видеокамера».*

1. Включить блок питания GPR–0830 HD кнопкой POWER. Поворачивая ручку VOLTAGE COARSE, выставить рабочий режим лампы микроскопа  $U=6$  В.

2. Положить на предметный столик микроскопа **объект-микромметр** так, чтобы надпись цены деления была сверху, а его стеклянная вставка находилась в центре светлого пятна рассматриваемого через объектив.

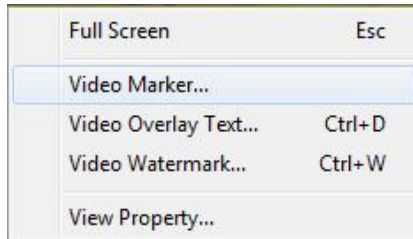
3. Запустить программу «ScopePhoto», используя ярлык «ScopePhoto» на рабочем столе ПК. В открывшемся окне нажать ссылку «ScopeTek DCM310» – камера включена, окно с видеоизображением открыто.

4. На панели инструментов выбрать масштаб видеоизображения 50 %.

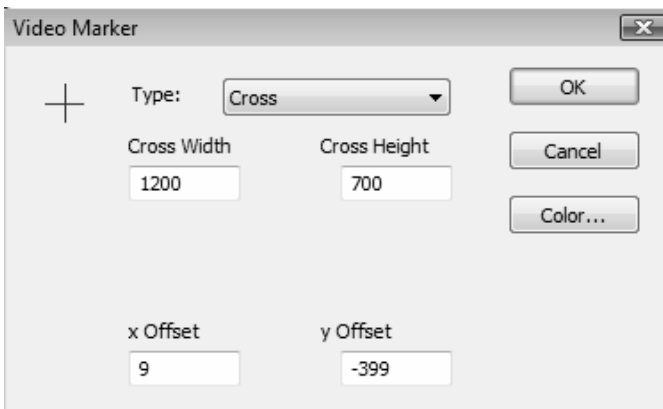


5. Фокусируя микроскоп винтом 5 (см. метку-указатель на штативе, рис. 504.4 лаб. раб. №504.-1), получить четкое изображение шкалы объект-микрометра. Аккуратно перемещая объект-микрометр по предметному столику микроскопа, добиться расположения изображения шкалы в центре окна.

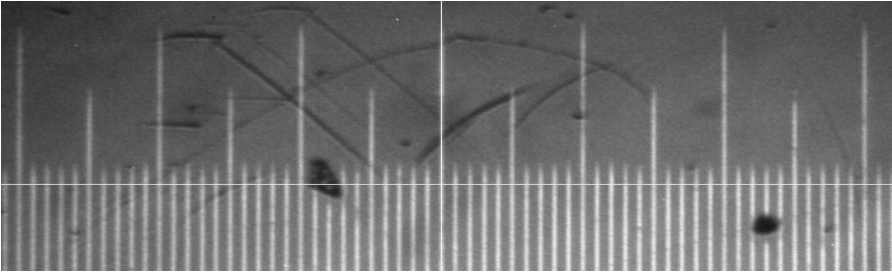
6. Выбрать масштаб видеоизображения 100 %, навести курсор на видеоизображение. Нажать правую клавишу мыши. В появившемся меню выбрать пункт “Video Marker”



В открывшемся окне выбрать тип маркера “Cross” (“Перекрестие”) и установить указанные ниже параметры: размер и координаты центра перекрестия:



Поворотами предметного столика или изменением положения объект-микрометра на предметном столике расположить шкалу так, чтобы один из её штрихов совмещался с вертикальной линией перекрестия. Перекрестие можно переместить, изменив координаты его центра в “Video Marker” (программа принимает только нечетные значения координат).

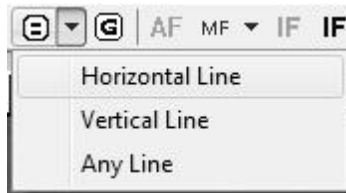


7. Определение линейного увеличения оптической системы «Объектив/видеокамера».

7.1. Измерив на видеоизображении расстояние между делениями шкалы в пикселях, а также зная истинное расстояние между ними в миллиметрах и увеличение объектива, определим увеличение системы. Масштаб видеоизображения 100 %.

*Измерение на видеоизображении расстояния между делениями шкалы:*

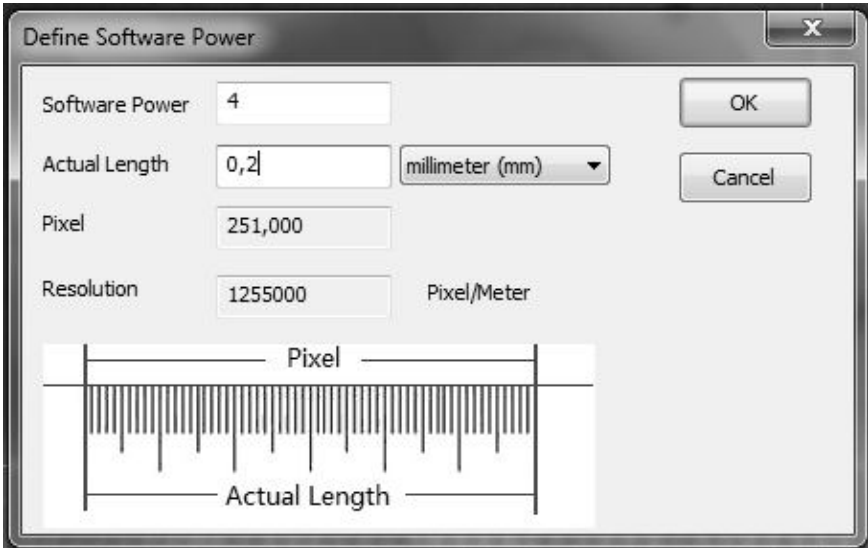
7.2. Выбрать пункт меню “Horizontal Line”:



7.3. Совместить курсор с одним из длинных делений шкалы, нажать левую кнопку мыши (начальная точка измерения), переместить курсор на любое другое выбранное длинное деление шкалы (конечная точка измерения), нажать левую кнопку мыши.

*Вычисление линейного увеличения оптической системы:*

7.4. В окно “Define Software Power” ввести увеличение объектива (“Software Power”) равное 4. Вычислить, зная цену деления шкалы – 0,01 мм, истинную длину измеренного отрезка – расстояние между выбранными делениями шкалы, ввести его в строку “Actual Length”. “Resolution” – полученное значение линейного увеличения. Десятичные дроби вводить с использованием запятой. Нажать кнопку «OK».



7.5. Полученное увеличение системы будет отражено в нижней строке окна программы и использовано для последующих измерений.



7.6. Проверить правильность полученного значения линейного увеличения. Произвести измерение длины шкалы объект-микрометра.





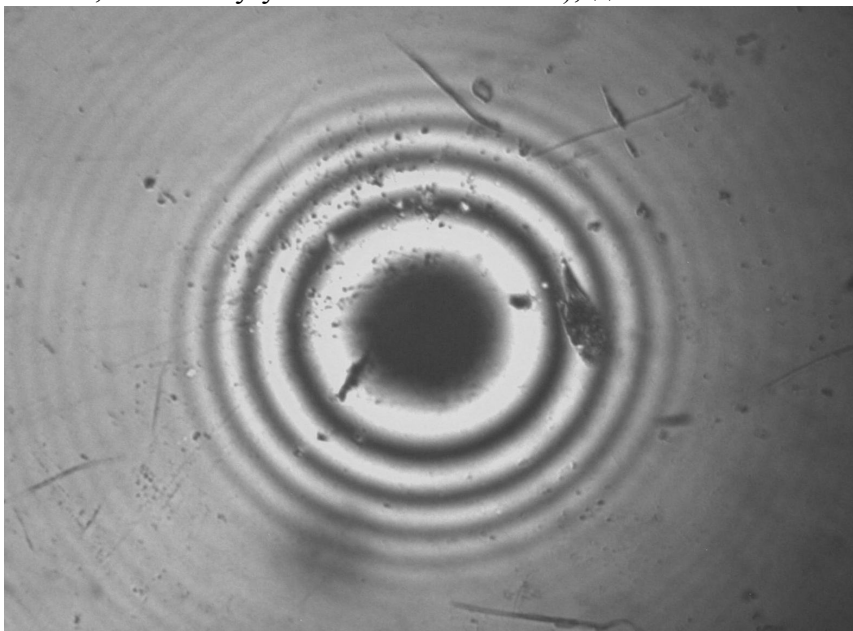
7.9. Убрать объект-микрометр с предметного столика микроскопа.

### **Измерение радиусов колец Ньютона**

1. Найти систему колец Ньютона невооруженным глазом. Темное пятно в точке соприкосновения линзы и пластины хорошо заметно. Размер темного пятна зависит от усилия, с которым линза прижата к пластине. Если оно велико, следует аккуратно ослабить прижимные винты держателя. Расположить на предметном столике микроскопа держатель с исследуемой линзой так, чтобы темное пятно точки соприкосновения находилось приблизительно в центре светлого пятна, рассматриваемого через объектив.

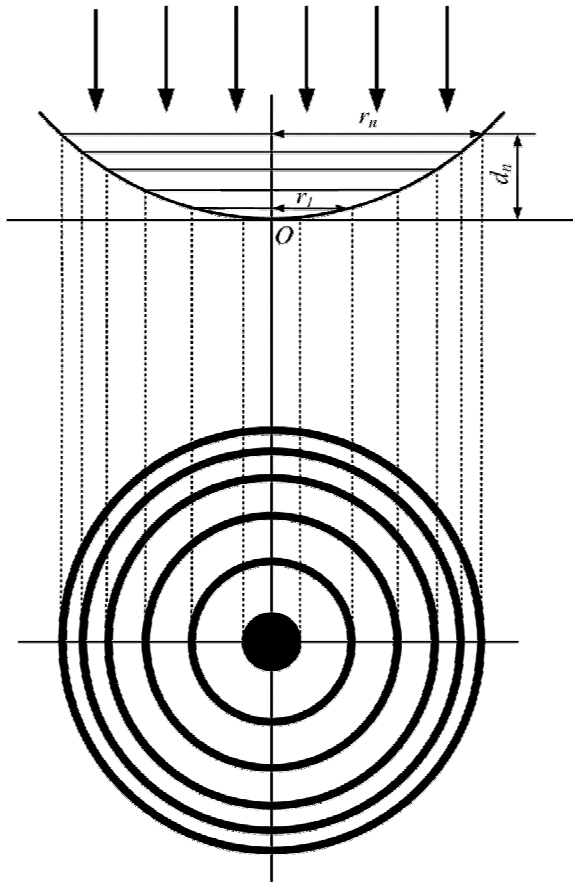
2. На панели инструментов выбрать масштаб видеоизображения 33 %.

Фокусируя микроскоп винтом 5 (рис. 504.4 лаб. раб. №504.-1, см. метку-указатель на штативе), добиться появления



четкого изображения колец Ньютона в центре поля видеоокна. При отсутствии картинки аккуратно переместить держатель с линзой по предметному столику.

3. Вставить светофильтр в щель для светофильтров 6 (см. рис. 504.3 лаб. раб. №504.-1) и зафиксировать кольцом. В монохроматическом свете наблюдают светлые и темные кольца.




4. Сделать фотографию изображения, выбрав пункт меню




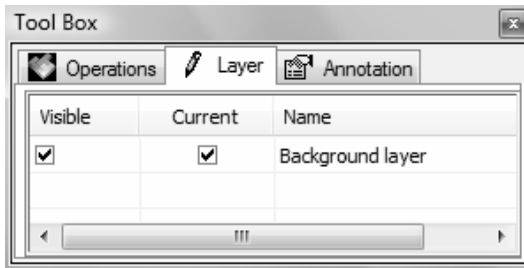
на панели инструментов. Изображение появится в новом

окне. Измерения радиусов колец будут проводиться на полученном снимке.

5. Закрыть окно с видеоизображением. Понизить напряжение питания лампы микроскопа. Выключить блок питания SPS-1230.

6. На панели инструментов выбрать масштаб видеоизображения, , удобный для измерений (достаточно крупный).

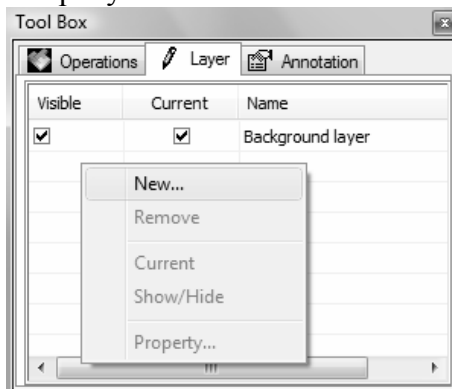
7. На панели инструментов нажать кнопку . В появившемся окне выбрать вкладку «Layer» («Слой»).



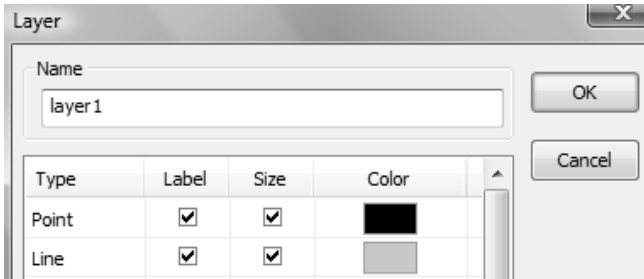
**Программа работает со слоями изображения.**

8. Чтобы создать новый слой, необходимо:

8.1. Нажать правой кнопкой мыши на поле окна «Tool Box» и выбрать строку «New...»:



8.2. В появившемся окне в поле «Name» ввести имя слоя:

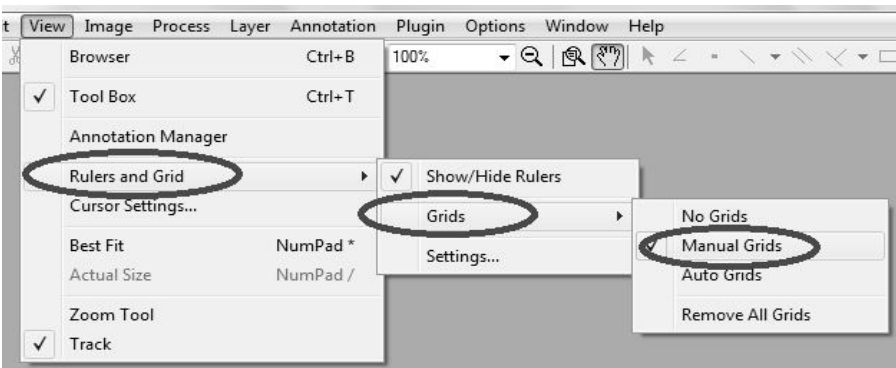


Созданный слой отобразится в окне «Tool Box».

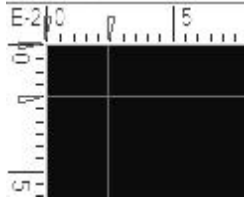
## ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### А. Измерение диаметров колец с помощью линий.

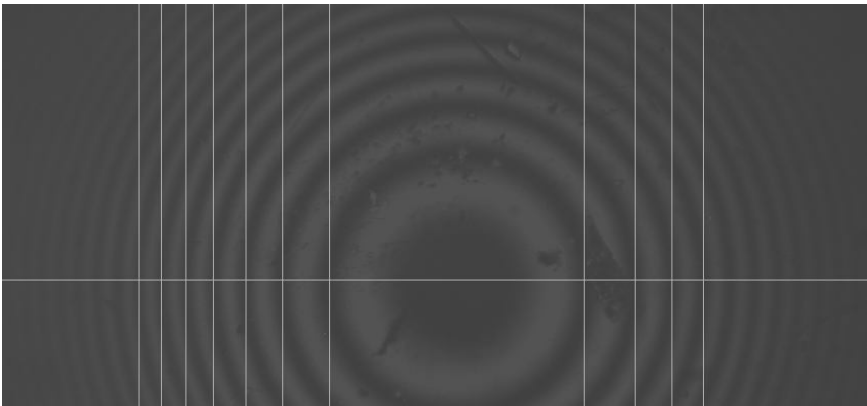
1. Создать слой (см. п. 8).
2. Выбрать в строке верхнего меню вкладку «View» и далее следующие пункты: «Rulers and Grid» – «Grids» – «Manual Grids»:



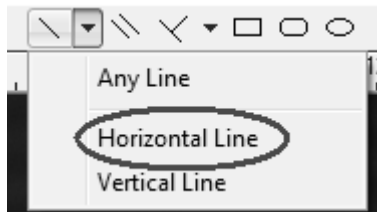
В левом верхнем углу появятся две красные метки, с помощью которых можно нанести вертикальные и горизонтальные линии на изображение. Для этого нужно навести курсор на метку и левой кнопкой мыши перенести метку на поле измерений.



3. Пометить вертикальными линиями середины темных (светлых) колец. Рассматривать максимально возможное число колец. Центральное темное пятно не учитывается при подсчете порядков (номеров) наблюдаемых колец.

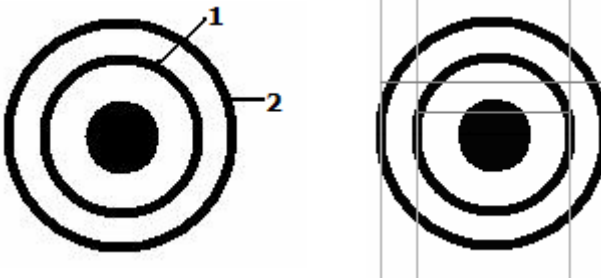



4. Выбрать на панели инструментов пункты меню «Измерение длины горизонтальной линии»:



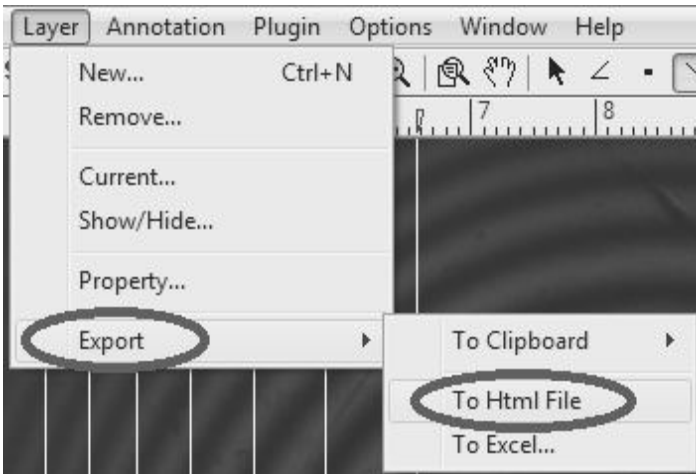
5. Измерить диаметры колец, проводя горизонтальные линии между вертикальными, обозначающими диаметры темных (светлых) колец. На линиях будет указана их истинная длина,

соответствующая диаметрам колец, в миллиметрах. Измерения проводить в порядке возрастания диаметров колец. Число измерений данным способом указывается преподавателем.



Для удаления неправильно проделанного измерения выбрать на панели инструментов , выделить неверную линию, нажать клавишу «Delete» на клавиатуре, затем подтвердить удаление.

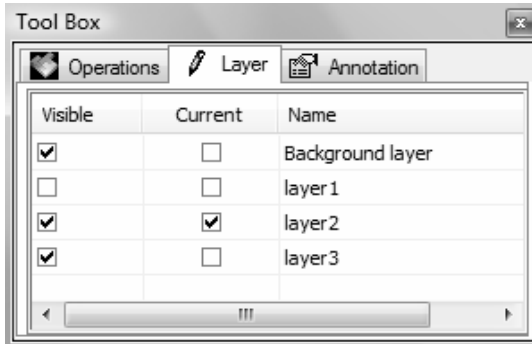
6. Вывести результаты измерений в таблицу, нажав в строке верхнего меню вкладку «Layer» («Слой»), выбрать пункты меню «Export», «To Html File»:



Layer Name	Index	Name	Center	Radius	Area	Length	Angle	Start	End
layer2	1	L1	(1074,00, 388,00)			512,00	-0,00	(1330,00, 388,00)	(818,00, 388,00)
	2	L2	(1068,00, 320,00)			716,00	-0,00	(1426,00, 320,00)	(710,00, 320,00)
	3	L3	(1066,00, 232,00)			1088,00	-0,00	(1610,00, 232,00)	(522,00, 232,00)
	4	L4	(1048,00, 182,00)			1280,00	-0,00	(1688,00, 182,00)	(408,00, 182,00)

## Б. Измерение радиусов колец с помощью окружностей.

1. Создать новый слой (см. п. 8).
2. В окне «Tool Box» сделать невидимым и неактивным предыдущий слой, убрав метки состояния «Visible» и «Current»

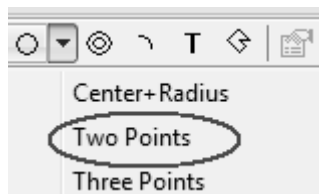


в строке с именем предыдущего слоя. Окно «Tool Box» показывает состояние слоя:

- слой «layer1» – невидимый и неактивный;
- слой «layer2» – видимый и активный (на нём можно проводить измерения);
- слой «layer3» – видимый и неактивный;
- слой «Background layer» – само изображение интерференционной картины, его нельзя делать невидимым и проводить на нём измерения.

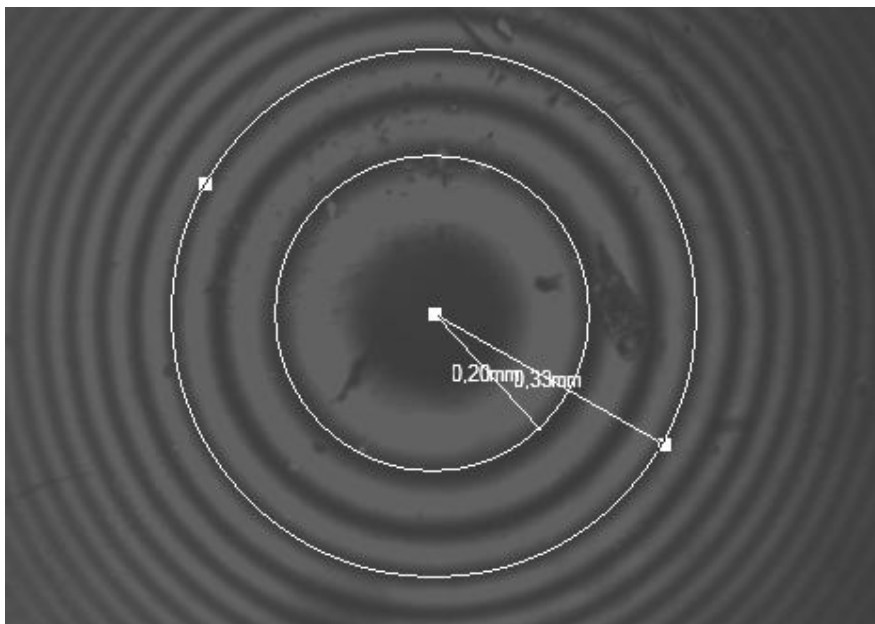
3. Убрать сетку, выбрав в строке верхнего меню «View» и далее следующие пункты: «Rulers and Grid» – «Grids» – «No Grids».

4. Выбрать на панели инструментов пункт меню «Рисование окружности по двум точкам»:

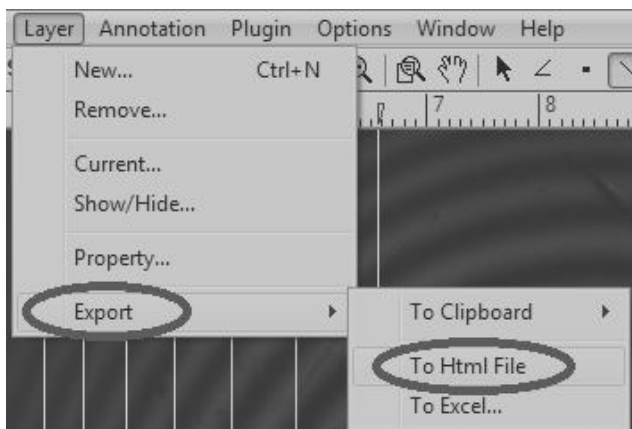


5. Поставить курсор на середину тёмного (светлого) кольца.

6. Нарисовать окружность, совпадающую с тёмным (светлым) кольцом. Цифрами будет указан радиус кольца.



7. Занести результаты измерений в таблицу, нажав в строке верхнего меню вкладку «Layer» («Слой»), выбрать пункты меню «Export», «To Html File»:



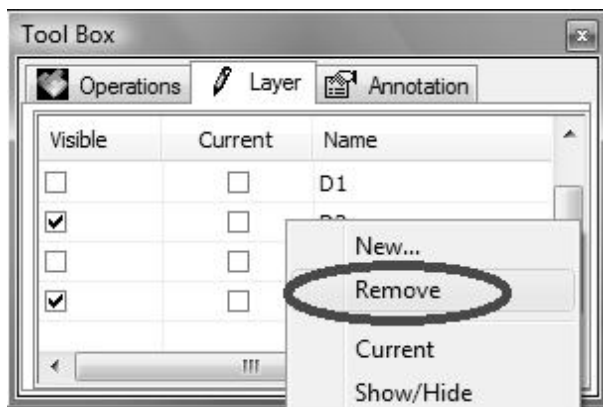


Layer Name	Index	Name	Center	Radius	Area	Length	Angle	Start	End
layer3	1	C1	(528,50, 332,00)	152,21	72788,35	956,39			
	2	C2	(847,50, 415,50)	102,48	32994,58	643,91			
	3	C3	(713,50, 371,50)	122,73	47320,24	771,13			

Length Unit: millimeter, Angle Unit: radian

## В. Измерения для определения погрешности.

1. За погрешность измерений примем ширину тёмного (светлого) кольца. Измерения ширины колец выполнить при масштабе 100 % любым вышеизложенным методом А или Б.
2. Перенести данные из таблицы измерений в протокол.
3. Закрыть вкладку с таблицей.
4. Удалить все слои измерений. В окне «Tool Box» нажать на выбранном слое правую кнопку мыши, выбрать «Remove» (удалить можно только неактивный слой).



5. Закрыть программу, не сохраняя изображение.
6. Вычислить радиус кривизны линзы по формуле (504.6) (см. лаб. раб. №504.-1). Рассчитать радиус линзы  $R$  для нескольких пар колец. Из полученных измерений взять среднее арифметическое  $R$ .

7. Построить график зависимости  $r_m^2$  от номера  $m$  кольца. Наклон прямой определяется радиусом кривизны  $R$  и длиной волны света  $\lambda$  (измерения выполняются в монохроматическом красном свете  $\lambda = 700$  нм).

8. Проанализировать полученные результаты измерений радиуса кривизны плосковыпуклой линзы, оценить погрешность измерений. Формулу для вычисления погрешности определения радиуса линзы  $R$  получить самостоятельно.

## **505. ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКИХ ВОЛН ОТ ЩЕЛИ И НИТИ. ОДНОМЕРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА**

### **505.1. Цель работы**

Изучение дифракции от щели, нити и одномерной дифракционной решетки. Определение длины волны излучения лазера и периода дифракционной решетки.

### **505.2. Разделы теории**

Дифракция Фраунгофера на одной щели, на дифракционной решетке [1. Гл.23, §176–181]; [2. Гл.XVIII, §125–130]; [3. Гл.5, 5.1–5.6].

### **505.3. Приборы и принадлежности**

Оптический квантовый генератор (лазер) ЛГН208А, раздвижная щель, нить, дифракционные решетки, экран, оптическая скамья.

### **505.4. Описание установки**

Использование газового лазера в качестве источника излучения позволяет наблюдать дифракционную картину непосредственно на экране (без собирающей линзы). Это возможно вследствие высокой когерентности и достаточно большой мощности излучения лазера (1 мВт).

Экспериментальная установка собирается по схеме рис. 505.1. Лазер 1 устанавливается на оптической скамье так,

чтобы часть скамьи (не менее 1 м ) оставалась свободной. На оптической скамье устанавливают стойку 2 с держателем для дифракционных элементов (щель, нить, дифракционные решетки) и экран для наблюдений 3. Стойка может перемещаться и фиксироваться винтом в любом положении на скамье. Держатель имеет поворотное кольцо для установки дифракционного элемента, высота держателя регулируется шайбой на стойке. Для отсчета положения стойки относительно лазера и экрана в комплект оборудования входит рулетка длиной 1 м с ценой деления 1 мм.

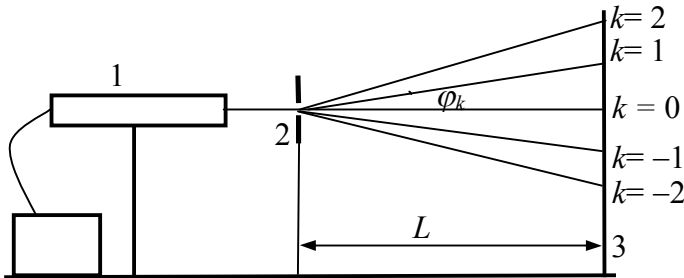


Рис. 505.1

На панели лазерного излучателя (рис. 505.2) располагаются оптические блоки 1, выполненные в виде револьверных головок. Каждая из головок имеет собственную оптическую ось вдоль оси распространения лазерного луча. Шторка 2 предназначена для экранирования лазерного излучения.



Рис. 505.2

**При выключенном приборе, установке или смене дифракционных элементов шторка должна быть установлена рисковей против черной точки.** На панели имеются также индикатор работы лазера 3 и выключатель прибора 4.

Используемые в работе дифракционные решетки представляют собой прозрачные пластинки с нанесенными параллельными полосками. Полоски играют роль темного промежутка между щелями – прозрачными участками пластинки. Необходимо отметить, что обращение с дифракционными решетками требует осторожности ввиду их хрупкости, брать их следует только за края держателя (пластинки).

Для определения характерных размеров препятствий или длины волны излучения лазера надо рассчитать углы дифракции, под которыми расположены на экране дифракционные максимумы (см. рис. 505.1)

$$\sin \varphi_k = \frac{l_k}{\sqrt{L^2 + l_k^2}} \approx \frac{l_k}{L}, \quad (505.1)$$

так как  $l_k \ll L$ ,

где  $L$  – расстояние от щели (нити, дифракционной решетки) до экрана;  $l_k$  – расстояние от центрального максимума до максимума  $k$ -го порядка ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Условие дифракционного максимума на одной щели выражается в виде

$$b \sin \varphi_k = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (505.2)$$

где  $k$  – порядок максимума;  $b$  – ширина щели;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Из выражения (505.2) с учетом (505.1) ширина щели определяется по формуле

$$b = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{L}{l_k}. \quad (505.3)$$

При наблюдении дифракции от нити и определении толщины нити учитывается тот факт, что дифракционные картины от препятствия (нить) и от равного ему отверстия (щель) долж-

ны быть одинаковы. Таким образом, дифракционная картина от нити будет такой же, как и от щели, ширина которой равна толщине нити. Поэтому для определения толщины нити можно пользоваться формулой (505.3).

Период дифракционной решетки, угловое положение дифракционных максимумов и длина волны излучения связаны соотношением

$$d \sin \varphi = k \lambda . \quad (505.4)$$

В работе изучается распределение максимумов и минимумов в наблюдаемых дифракционных картинах. Отметим, что наблюдаемые дифракционные картины обладают центральной симметрией. Поэтому, распределение дифракционных максимумов и минимумов однозначно определяется измерением их положений относительно центрального максимума нулевого порядка.

### **505.5. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений**

1. Включить лазер кнопкой 4. При этом на панели лазера должен загореться индикатор 3 (см. рис. 505.2).

**Внимание!** *Не допускайте случайного попадания в глаза прямого или отраженного лазерного луча!*

2. Открыть шторку 2 (риска установлена против красной точки), на экране появляется «пятно» лазерного пучка.

#### **Упражнение 1. Изучение дифракции на одномерной решетке и определение длины волны излучения лазера.**

1. Поместить на скамью между лазером и экраном стойку. На стойку установить и зафиксировать винтами дифракционную решетку с известной постоянной (периодом) дифракционной решетки. Открыть шторку лазерного излучателя. Перемещая стойку вдоль оптической скамьи, получить на экране дифракционную картину, содержащую главные максимумы не менее третьего порядка.

2. Выяснить, как изменяется дифракционная картина при повороте решетки вокруг вертикальной оси. Результат наблюдений записать в отчет.

3. Установить плоскость решетки строго перпендикулярно падающему на нее лучу лазера. Зарисовать полученную дифракционную картину на миллиметровой бумаге.

4. Измерить расстояние от решетки до экрана  $L$ , а также расстояния  $l_k$  между главным максимумом нулевого порядка и главными максимумами 1, 2 и 3-го порядков в отдельности. Результаты занести в таблицу.

5. Определить длину волны излучения лазера по формуле (505.4).

6. Сделать выводы по результатам наблюдений. Оценить погрешность измерений.

### **Упражнение 2. Изучение дифракции от щели.**

1. Поместить на скамью между лазером и экраном стойку. На стойку установить и зафиксировать винтами раздвижную щель. Открыть шторку лазерного излучателя. Используя винты, повернуть держатель щели так, чтобы лазерный луч был расположен симметрично щели, и на экране появилась четкая дифракционная картина в виде центрального наиболее яркого максимума и системы симметричных, относительно него, максимумов высших порядков.

2. Провести несколько раз наблюдения, изменяя ширину щели микрометрическим винтом. Следует начинать с относительно широкой щели, когда видны дифракционные максимумы нескольких порядков. Затем, наблюдать изменение дифракционной картины до ситуации, когда на экране виден только один широкий и слабый дифракционный максимум нулевого порядка (центральный или главный максимум).

3. Установить ширину щели такой, чтобы наблюдаемая картина была удобной для измерений (расстояние между минимумами не менее 2 мм). Зарисовать полученную дифракционную картину на миллиметровой бумаге.

4. Измерить расстояние  $L$  от щели до экрана. Определить расстояния  $l_k$  между центрами главного максимума и максимумов 1, 2 и 3-го порядков в отдельности. Записать значения  $L, l_k$  в таблицу.

5. Повторить измерения по п. 4, изменив расстояние  $L$ .

6. Рассчитать ширину щели по формуле (505.3).

7. Сделать выводы по результатам наблюдений. Оценить погрешность измерений.

### **Упражнение 3. Изучение дифракции от нити.**

1. Поместить на скамью между лазером и экраном стойку. На стойке установить и зафиксировать винтами держатель с нитью. Открыть шторку лазерного излучателя. Используя винты, повернуть держатель так, чтобы лазерный луч попал на нить. На экране должна появиться четкая дифракционная картина в виде центрального наиболее яркого максимума и системы симметричных, относительно него, максимумов высших порядков. Зарисовать полученную дифракционную картину на миллиметровой бумаге.

2. Измерить расстояние  $L$  от нити до экрана. Определить расстояния  $l_k$  между центрами главного максимума и максимумов 1, 2 и 3-го порядков в отдельности. Записать значения  $L$  и  $l_k$  в таблицу.

3. Повторить измерения по п. 2, изменив расстояние  $L$ .

4. Рассчитать толщину нити по формуле (505.3).

5. Сделать выводы по результатам наблюдений. Оценить погрешность измерения.

### **Упражнение 4. Определение периода одномерной дифракционной решетки.**

1. Получить дифракционную картину от решетки с неизвестным периодом. Произвести все измерения аналогично тому, как описано в пп. 1–4 упр. 1.

2. Рассчитать период (постоянную) дифракционной решетки, пользуясь формулой (505.4). Определить число штрихов  $N$ ,

приходящихся на 1 мм длины решетки.

3. Оценить погрешность измерений.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
2. Чем отличается дифракция Фраунгофера от дифракции Френеля?
3. В чем заключается метод зон Френеля?
4. Как изменяется дифракционная картина, если поворачивать дифракционную решетку относительно луча?
5. Как изменяется дифракционная картина от щели при изменении ширины щели?
6. Чем отличаются дифракционные картины белого и монохроматического света?
7. Объяснить изменения в дифракционной картине при изменении числа щелей дифракционной решетки.
8. Записать условие минимумов и максимумов при дифракции на щели.

## **506. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

### **506.1. Цель работы**

Измерение показателя преломления газов с помощью интерферометра.

### **506.2. Разделы теории**

Интерферометры [1. Гл. 22, §175]; [2. Гл. XVII, §123,124]; [3. Гл.4, 4.5,4.6].

### **506.3. Приборы и принадлежности**

Интерферометр L1-3 (интерферометр Релея), манометри-



ческая система.

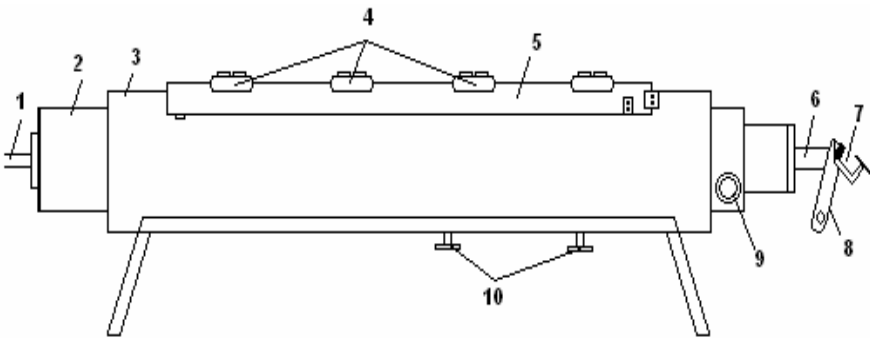
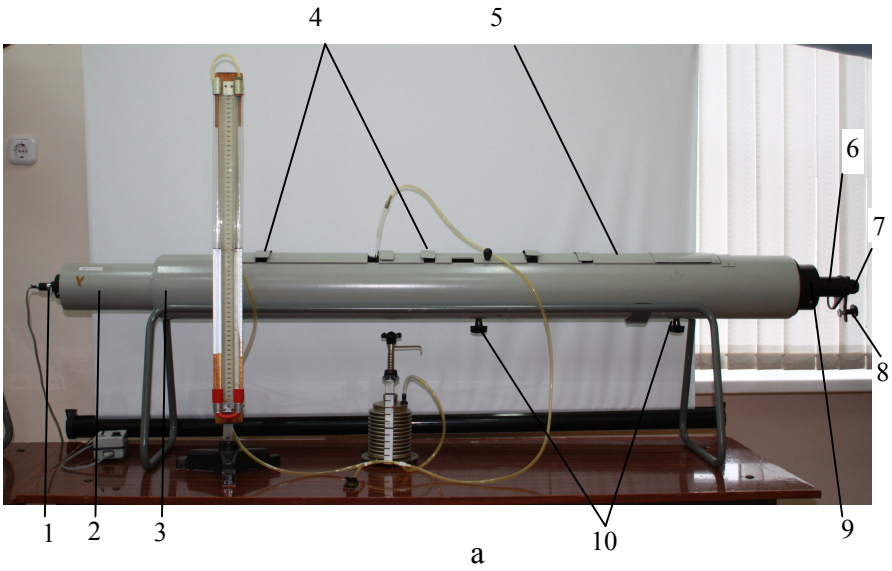
#### 506.4 Описание установки

Интерферометр Релея (LI-3) является прецизионным прибором для измерения показателей преломления газов и жидкостей. Чувствительность прибора позволяет измерять изменения показателя преломления до 8-го десятичного знака. Интерферометр применяется также для определения примесей различных газов в воздухе. Внешний вид интерферометра показан на рис. 506.1.

В интерферометре Релея используется дифракция Фраунгофера на двух щелях. Оптическая схема интерферометра показана на рис. 506.2.

Свет от источника 1 освещает вертикальную входную щель 2, расположенную в фокальной плоскости объектива коллиматора 3. Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, падает на диафрагму 4 с двумя щелями. Прошедший через эти щели свет получен разделением фронта волны одного светового пучка, вышедшего из одного источника. Щели являются когерентными источниками света, а испускаемые ими световые волны – когерентными волнами. Дифрагированные от этих щелей световые пучки перекрываются в фокальной плоскости объектива 6, в которой и создается интерференционная картина – чередующиеся темные и спектральные полосы, расположенные симметрично относительно центральной белой полосы.

Из рис. 506.2,а видно, что верхняя часть пучков проходит через двойную кювету 5, а нижняя – проходит под кюветой непосредственно в объектив 6. Обе системы полос рассматриваются с помощью окуляра 7, представляющего собой сильную цилиндрическую линзу. (Цилиндрическая линза обеспечивает фокусировку лучей, расходящихся в горизонтальной плоскости, но не дает вертикальной фокусировки.)



б  
Рис. 506.1

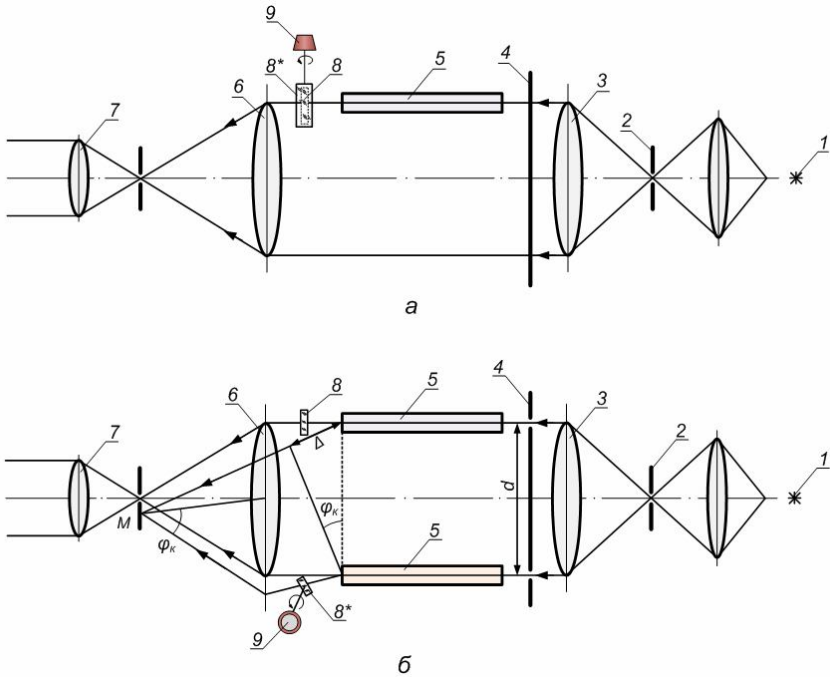


Рис. 506.2

На рис. 506.3 показаны системы интерференционных полос, наблюдаемых в окуляре 7: а – системы полос полностью совмещены; б – верхняя система полос смещена относительно нижней.

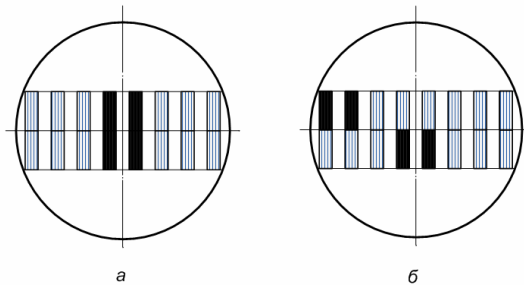


Рис. 506.3

Интерференционные максимумы определяются оптической

разностью хода  $\Delta = \pm k\lambda$ , где  $k$  – порядок интерференции,  $\lambda$  – длина световой волны.

Когда оптическая разность хода в отделениях кюветы равна нулю (кювета заполнена воздухом при одинаковых давлении и температуре), обе системы полос совпадают друг с другом. В центре поля зрения возникает нулевой максимум (светлая полоса), далее симметрично расположены максимумы более высоких порядков (спектрально окрашенные полосы). Если в одном из отделений кюветы изменится давление газа (воздуха) и, следовательно, его показатель преломления, то появится дополнительная разность хода. Она зависит от разности показателей преломления газов  $\delta n = (n_2 - n_1)$  и от длины кюветы  $l$ . Оптическая разность хода для лучей, образующих верхнюю систему полос, выразится следующим образом:

$$\Delta' = \Delta + l\delta n = d \sin \varphi_k + l\delta n,$$

где  $d$  – расстояние между щелями,  $\varphi_k$  – угол дифракции интерферирующих лучей (в центре  $\varphi_0 = 0$ ),  $l\delta n$  – дополнительная разность хода, возникающая из-за существования разности показателей преломления  $\delta n$  газов в отделениях кюветы.

Нижняя система интерференционных полос образована световыми пучками, проходящими ниже двойной кюветы. В точке М (см. рис. 506.2,б) разности хода  $\Delta'$  в верхней системе полос будет соответствовать разность хода  $\Delta = d \sin \varphi_k = k\lambda$  в нижней системе полос. Смещение интерференционной картины на одну полосу соответствует изменению оптического хода лучей на одну длину волны. Отметив смещение на  $k$  полос, можно записать:

$$l(n_2 - n_1) = l\delta n = k\lambda. \quad (506.1)$$

Смещение может происходить и не на целое число полос. В этом случае  $k$  будет дробным числом. При измерениях нижняя система интерференционных полос остается неподвижной и служит индексом, по которому производится отсчет смещения верхней системы полос.

Для измерения смещения полос служат компенсационные пластины 8 (компенсатор Жамена) на рис. 506.2,б. Одна из них неподвижна, другая может поворачиваться вокруг вертикальной оси с помощью поворотного рычага. Положение рычага можно изменять, вращая измерительный барабан 9. Поворот пластины изменяет ее эффективную толщину, следовательно, вносимая ею дополнительная разность хода будет полностью компенсировать разность хода лучей  $\Delta'$  в отделениях кюветы. Обе системы полос, верхняя и нижняя, будут полностью совпадать друг с другом  $\Delta' = \Delta$ .

Внешний вид интерферометра LI-3 показан на рис. 506.1. К трубчатому корпусу 3 привинчен коллиматор 2 с защитным колпаком и ламповым патроном 1. Внутри корпуса имеются гнёзда для крепления двойных измерительных кювет при помощи крепёжных винтов 10. На другом конце трубчатого корпуса находится оптическая система наблюдения с измерительным устройством (рис. 506.4). Интерференционная картина наблюдается в окуляре 7. Отсчёты производятся по измерительному барабану компенсатора 9, используя лупу 8.

Шкала 12 измерительного барабана компенсатора имеет 100 делений. Один полный оборот измерительного барабана соответствует 100 единицам интерферометрической величины  $i$ . Число оборотов барабана считывается по горизонтальной шкале 11, имеющей 30 делений. Перед началом измерений следует определить начало отсчета (деление барабана, при котором системы полос совмещены). Затем необходимо проградуировать измерительный барабан компенсатора. Градуировка проводится в длинах волн с использованием монохроматического светофильтра.

При измерениях крышка 5 корпуса (рис.506.1) должна быть закрыта. Трубки для подвода исследуемых газов проходят через соответствующие выемки и закрываются задвижками 4 (рис.506.1). В левом отделении кюветы находится эталонный газ (воздух) и давление в нем всегда равно атмосферному. В правом отделении кюветы давление воздуха меняется. Изменение дав-

ления производится с помощью сиффона, соединенного трубкой с правой частью кюветы.

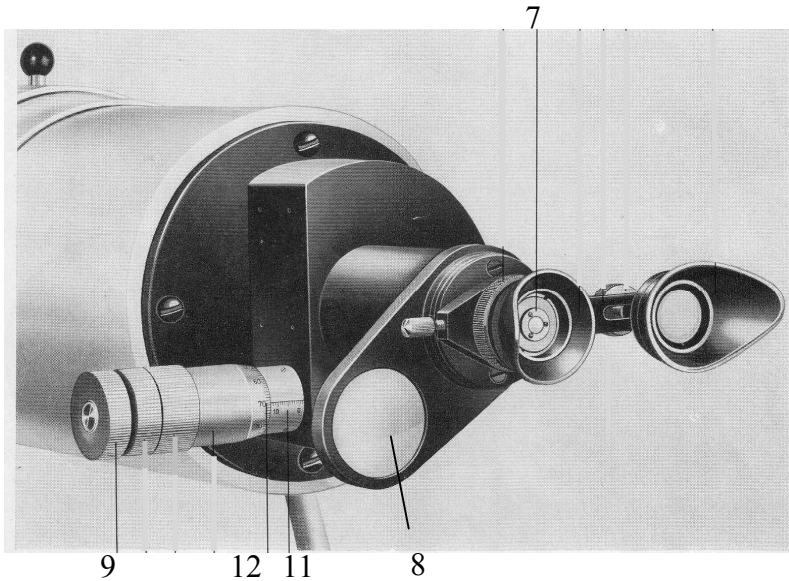


Рис.506.4

Сиффон 1 (рис. 506.5) представляет собой сосуд переменного объема. Вращая рукоятку, можно уменьшать или увеличивать объем сиффона, при этом соответственно будет увеличиваться или уменьшаться давление в соединенном с ним отделении кюветы 4.

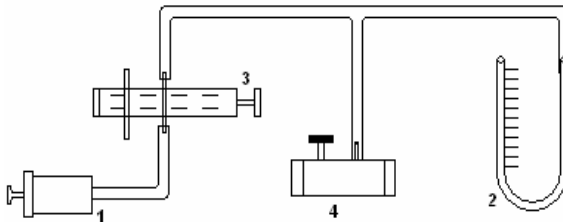


Рис. 506.5

Клапан 3 позволяет выравнивать давление в кювете и

сильфоне с атмосферным. Давление измеряется жидкостным (водяным) манометром 2, цена деления шкалы равна 1 мм вод. ст.

### 506.5. Изучение зависимости коэффициента преломления газа от давления и температуры

Коэффициент преломления газа связан с его плотностью соотношением

$$n - 1 = 2\pi N\alpha, \quad (506.2)$$

где  $N$  – число молекул в единице объема,  $\alpha$  – поляризуемость молекулы.

С другой стороны

$$p = NKT, \quad (506.3)$$

где  $K$  – постоянная Больцмана. Из формул (506.2) и (506.3) имеем

$$n - 1 = \frac{2\pi\alpha}{KT} p. \quad (506.4)$$

Из (506.4) следует, что при постоянной температуре изменение показателя преломления  $\Delta n$  и изменение давления  $\Delta p$  связаны зависимостью

$$\Delta n = \frac{2\pi\alpha}{KT} \Delta p. \quad (506.5)$$

Величина  $\Delta n$  измеряется с помощью интерферометра,  $\Delta p$  – с помощью манометра. Одновременное измерение этих величин (и температуры) позволяет определить поляризуемость молекул воздуха и, следовательно, рассчитать коэффициент преломления воздуха для любых значений  $p$  и  $T$  по формуле (506.4). Следует отметить, что воздух является смесью нескольких газов; поэтому под поляризуемостью молекул воздуха нужно понимать некоторую среднюю величину, определяемую соотношением

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_i \alpha_i N_i, \quad (506.6)$$

где  $\alpha_i$  и  $N_i$  – поляризуемость и концентрация молекул различных газов, входящих в состав воздуха,  $N$  – общее число молекул в единице объема.

Формула (506.4) позволяет установить связь коэффициента преломления газа  $n$  при температуре  $T$  и давлении  $p$  с коэффициентом преломления воздуха  $n_0$  при нормальных условиях ( $T_0 = 273^0 K, p_0 = 1,013 \cdot 10^5 Pa$ ):

$$n - 1 = (n_0 - 1) \frac{T_0 p}{T p_0}. \quad (506.7)$$

### 506.6 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Записать показания барометра  $P'_a$  и термометра  $t'$ , показывающие температуру и атмосферное давление в лаборатории.

2. Открыть крышку корпуса прибора и убедиться в наличии и целостности кюветы для газа длиной 0,5 м (0,25 м). Красная маркировочная точка на кювете должна быть обращена к окуляру. Левое отделение кюветы открыто в атмосферу, а правое соединено трубками с системой изменения давления (сильфоном и манометром).

3. При открытом клапане 3 увеличить объем сильфона до красной отметки по шкале, вращая винт сильфона против часовой стрелки.

4. Включить тумблер блока питания лампы интерферометра. Закрыть аккуратно крышку интерферометра.

5. Наблюдая в окуляр, рассмотреть интерференционную картину – верхнюю и нижнюю системы полос. Окуляр можно сфокусировать, поворачивая накатанное кольцо окуляра.

**Внимание!** Вращение микрометрического винта барабана компенсатора следует совершать медленно. При этом естественный люфт микрометрического винта будет минимален.

6. Наблюдая интерференционную картину через окуляр, вращением микрометрического винта 9 привести системы верх-



них и нижних полос к полному совмещению по центральной нулевой полосе и по двум центральным тёмным полосам (см. рис. 506.3,а). **Очень важно**, чтобы верхние полосы соответствовали нижним и по цвету, и по освещенности.

7. Снять отсчет по измерительному барабану компенсатора. Нулевое деление шкалы барабана должно совпадать с нулевым делением горизонтальной шкалы. При отсутствии совпадения «0», операцию совмещения верхней и нижней систем полос провести 4 – 5 раз, нарушая совмещение полос и вновь восстанавливая его (допустимы отклонения в пределах 10 делений).

Записать результаты определения «нулевого деления», вычислить среднее значение  $N_0$ . Среднее значение  $N_0$  необходимо вычитать из каждого отсчета интерферометрического числа  $i$  при измерениях. Интерферометрическое число  $i$  – есть отсчет по барабану компенсатора, полученный при смещении полос.

8. Выполнить калибровку шкалы микрометрического винта барабана компенсатора в длинах волн монохроматического света ( $\lambda = 5,7 \cdot 10^{-7}$  м).

Надеть на окуляр насадку со светофильтрами. Проверить видимость интерференционной картины через «белый светофильтр». Затем, поворачивая кассету по часовой стрелке, установить зеленый светофильтр. В окуляре видна отчетливая интерференционная картина в монохроматическом свете.

Снять градуировочный график (график зависимости интерферометрического числа  $i$  от смещенных полос  $k$ ).

Для этого, вращая микрометрический винт против часовой стрелки, последовательно совместить первую, вторую, и т.д. (до 6–7 полос) подвижные верхние светлые полосы с нулевой нижней неподвижной полосой. Записать соответствующие отсчеты по барабану  $i$  в таблицу. Провести измерения в обратном направлении, усреднить полученные значения числа  $i$  и построить график  $i_{cp} = f(k)$ . График вычертить на миллиметровой бумаге в возможно большем масштабе.

9. Убрать насадку со светофильтрами. Проверить совмещение систем полос в окуляре, положение нуля шкалы бараба-

на. Присоединить сиффон и манометр к кювете, закрыв клапан 3 (см. рис. 506.5, уровни жидкости в обоих столбиках манометра должны быть на нулевой отметке).

10. Плавно поворачивая винт сиффона по часовой стрелке, создать в правом отделении кюветы избыточное давление ( $\Delta p$ ) в 10 мм вод. ст. (см. вклейку «Измерение давления жидкостным манометром»). Подождать 1–2 минуты для установления температуры, произвести совмещение систем интерференционных полос. По шкале барабана компенсатора взять отсчёты числа  $i$ .

Продолжить измерения, увеличивая давление в кювете с шагом 10 мм вод. ст. до давления 100 мм вод. ст. Значения избыточных давлений ( $\Delta p$ ) и соответствующие отсчёты числа  $i$  записать в таблицу.

Измерения повторить 3 раза для тех же значений избыточного давления и рассчитать среднее значение интерферометрического числа  $i_{cp}$  для каждого значения давления ( $\Delta p$ ).

11. По окончании измерений выровнять давление в кювете с атмосферным, открыв клапан 3. Увеличить объем сиффона до исходного значения (красной отметки на шкале). Совместить системы полос в окуляре. Выключить осветитель интерферометра.

12. С помощью градуировочного графика определить число сместившихся полос  $k$  для каждого значения избыточного давления ( $\Delta p$ ). Вычислить изменение показателя преломления  $\delta n$  для каждого значения избыточного давления ( $\Delta p$ ), используя формулу (506.1), в которой:  $k$  – число сместившихся интерференционных полос;  $\lambda = 5,7 \cdot 10^{-7}$  м – средняя длина волны видимого света;  $l = 0,5$  м – длина кюветы.

13. По полученным результатам построить графики зависимостей  $\delta n = f(\Delta p)$ ,  $\delta n = f(P)$ ,  $n = f(P)$  (по указанию преподавателя).

14. Используя график зависимости  $\delta n = f(\Delta p)$ , вычислить по формуле (506.5) среднюю поляризуемость  $\alpha$  молекул возду-

ха.

Средняя поляризуемость  $\alpha$  молекул воздуха равна тангенсу угла наклона графика  $\delta n = f(\Delta p)$  к оси  $\Delta p$

$$\alpha = \frac{\Delta n}{\Delta p}.$$

15. Определить коэффициент преломления воздуха  $n$  при условиях опыта (506.4).

16. Определить значение коэффициента преломления воздуха  $n_0$  при нормальных условиях (506.7).

17. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешности измерения  $\delta n$  и  $k$ , сделать выводы.

Справочные данные:

$K$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

1 атмосфера = 101325 Па =  $1,013 \cdot 10^5$  Па; 1 бар =  $10^5$  Па;

1 мм рт. ст. = 133,3 Па; 1 мм вод. ст. = 9,81 Па;

$n_0 = 1,000292$  – показатель преломления воздуха при нормальных условиях.

### Контрольные вопросы

1. Каким способом получают когерентные источники в исследуемом интерферометре?

2. Какая картина будет наблюдаться, если щель 2 (см. рис. 506.2) заменить малым круглым отверстием?

3. Почему тёмные полосы, наблюдаемые в интерферометре, имеют цветные каёмки?

4. Какая картина будет наблюдаться, если использовать монохроматический источник?

5. Точность совмещения полос в данном приборе равна приблизительно  $1/30$  ширины полосы. Какова при этом погрешность в определении разности показателей преломления газа в кюветах?

## **507. ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА И ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА БРЮСТЕРА**

### **507.1. Цель работы**

Проверка закона Брюстера и определение коэффициента отражения.

### **507.2. Разделы теории**

Поляризация, отражение и преломление света, закон Брюстера [1. Гл. 25, §190–192]; [2. Гл. XIX, §134,135]; [3. Гл.6, 6.1–6.2].

### **507.3. Приборы и принадлежности**

Экспериментальная установка, состоящая из источника света, поляризатора, фотодатчика и набора отражающих пластин с различными показателями преломления. Мультиметр АВМ-4306, блок питания SPS-1230.

### **507.4. Теоретическое введение**

Рассмотрим, как происходит поляризация естественного света при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков. При падении такого света, например, из воздуха на поверхность стекла под произвольным углом часть света отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде, при этом отраженный и преломленный лучи частично поляризованы. На рис. 507.1,а схематически изображены колебания светового (электрического) вектора  $\vec{E}$  в падающем, отраженном и преломленном лучах. Колебания  $\vec{E}$ , перпендикулярные плоскости падения, обозначены на рис. 507.1 точками, а колебания в плоскости падения – стрелками. В падающем луче 1 естественного света равновероятны оба вида колебаний, в пре-

ломленном луче 2 преобладают колебания  $\vec{E}$  в плоскости падения, в отраженном луче 3 – колебания, перпендикулярные плоскости падения.

Степень поляризации (степень выделения световых волн с определенной ориентацией светового вектора) зависит от угла падения лучей и показателя преломления. При угле падения  $\alpha_0$ , когда отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны (рис. 507.1, б), отраженный луч полностью поляризован и электрический вектор в нем колеблется перпендикулярно плоскости падения, преломленный луч при этом тоже максимально поляризован.

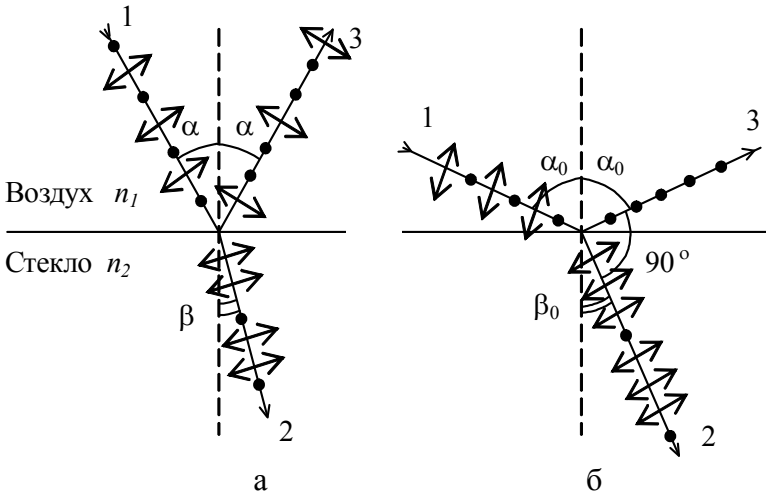


Рис. 507.1

Запишем закон преломления света  $n_1 \sin \alpha_0 = n_2 \sin \beta_0$ . Учитывая, что  $(\alpha_0 + \beta_0) = \frac{\pi}{2}$ , получим

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (507.1)$$

где  $\alpha_0$  – угол Брюстера;  $n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Соотношение (507.1) аналитически выражает закон Брюстера, согласно которому отраженный луч будет полностью поляризован, если тангенс угла падения луча света на границу раздела двух сред равен относительному показателю преломления второй среды относительно первой.

Для объяснения явления поляризации света удобно рассматривать вектор  $\vec{E}$  естественного света как векторную сумму  $\vec{E} = \vec{E}_\perp + \vec{E}_\parallel$ , где  $\vec{E}_\perp$  и  $\vec{E}_\parallel$  – световые векторы одинаковых по интенсивности линейно-поляризованных световых волн, колеблющиеся соответственно перпендикулярно и параллельно плоскости падения луча. Когда электромагнитное излучение попадает во вторую среду, под действием светового вектора преломленной волны валентные электроны вещества начинают колебаться около положений равновесия в направлениях, представленных векторами  $\vec{E}'_\perp$  и  $\vec{E}'_\parallel$ , перпендикулярными преломленному лучу 2 (рис. 507.2, а). Вынужденные колебания электронов вещества формируют вторичное электромагнитное излучение – луч отраженного света 3. При произвольном угле падения вклад в формирование этого луча будет полностью давать только компонента светового вектора, перпендикулярная плоскости падения ( $E'_\perp = E''_\perp$ ). Компонента  $E'_\parallel$ , лежащая в плоскости падения, не перпендикулярна отраженному лучу, ее вклад частичен:  $E''_\parallel < E'_\parallel$ .

При угле падения  $\alpha_0$  (рис. 507.2, б)  $\vec{E}'_\parallel$  параллельна отраженному лучу и ее вклад в излучение в этом направлении равен нулю. Поэтому отраженный под углом  $\alpha_0$  луч полностью поляризован и электрический вектор  $\vec{E}''_\perp$  в нем колеблется перпендикулярно плоскости чертежа.

Таким образом, используя явление Брюстера, можно получить плоскополяризованный свет. Прибор, с помощью которого получают поляризованный свет, называется поляризатором.

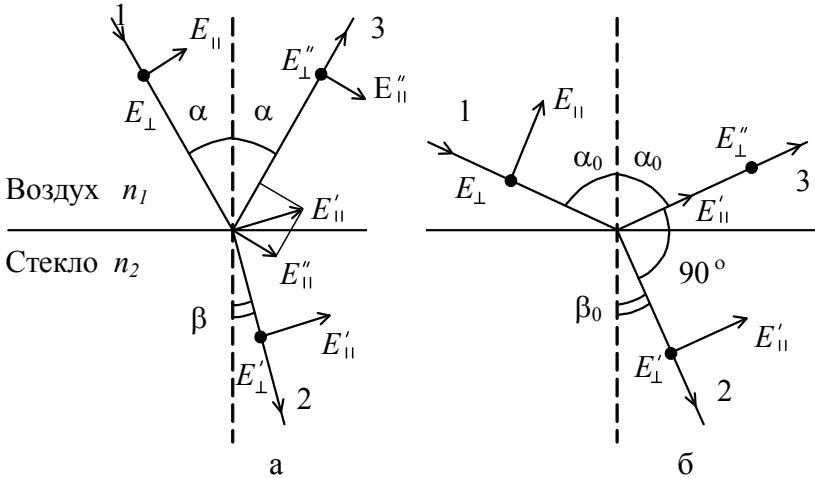


Рис. 507.2

В теоретическом курсе доказывается, что коэффициент отражения луча  $k$  при нормальном падении на поверхность раздела двух диэлектриков, равный отношению интенсивностей, связан с показателем преломления  $n_{21}$  при отсутствии поглощения соотношением

$$k = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = \left( \frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2, \quad (507.2)$$

где  $I_{\text{отр}}$ ,  $I_{\text{пад}}$  – интенсивность отраженного и падающего лучей.

Следовательно, если будет найден показатель преломления, по формуле (507.2) можно подсчитать коэффициент отражения света при нормальном падении.

### 507.5. Описание установки и методики измерений

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 507.3. Свет от лампы 1 проходит через конденсорную линзу 2, после которой параллельный пучок лучей направляется на поляризатор 3, поляризуется и под углом  $\varphi$  падает на стеклянную пластину 4. Отразившись от исследуемой поверхности, лучи по-

падают на фотодатчик 5. ЭДС, генерируемая в цепи фотодатчика (пропорциональная интенсивности отраженного света), измеряется вольтметром (мультиметром) V.

Все детали установки, кроме вольтметра V и блока питания лампы 1, смонтированы внутри светонепроницаемой камеры. На ее панели размещены стрелка 6, жестко скрепленная с пластиной 4 и стрелка 7, жестко скрепленная с фотодатчиком 5. Стрелки 6 и 7 могут независимо поворачиваться вокруг вертикальной оси O, проходящей через середину пластины 4. Для отсчета углов поворота стрелок 6 и 7 панель имеет шкалу 9, цена деления которой  $1^\circ$ . Поляризатор 3 может поворачиваться вокруг направления распространения луча, что позволяет изменять плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  поляризованного луча, падающего на пластину 4. Оправа поляризатора имеет шкалу от  $0^\circ$  (положение "Параллельно") до  $90^\circ$ , цена деления  $10^\circ$ . Окно 8 служит для смены исследуемых пластин.

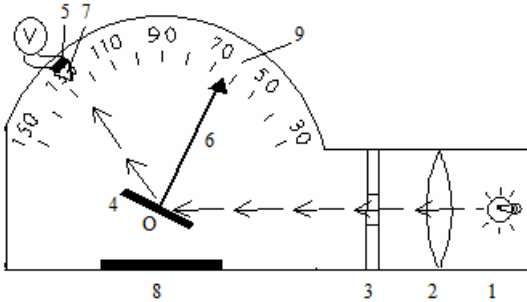


Рис. 507.3

При установке поляризатора в положение "Параллельно" в луче, падающем на пластину, колебания вектора  $\vec{E}$  лежат в плоскости падения. При некотором угле падения, удовлетворяющем условию  $\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ , свет с такими колебаниями не должен отражаться. При больших и меньших углах отражение



имеет место. Лучи с колебаниями вектора  $\vec{E}$ , перпендикулярными плоскости падения (поляризатор в положении  $90^0$ ), частично отражаются при любом угле падения, причем их интенсивность постепенно увеличивается с увеличением угла падения. В наблюдении этого эффекта и состоит проверка закона Брюстера.

### **507.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений**

1. Поставить поляризатор 3 по шкале на оправе в положение "Параллельно".
2. Выставить начальное положение отражающей пластины. Стрелка 6 указывает угол падения луча  $40^\circ$  по шкале 9.
3. Установить фотодатчик в направлении распространения отраженного луча. Стрелка 7 должна указывать угол  $80^\circ$  (угол отражения равен углу падения).
4. Включить мультиметр АВМ-4306 кнопкой POWER. На дисплее высвечиваются произвольные цифры.
5. Включить блок питания SPS-1230. Регулятором VOLT-AGE установить режим работы лампы 10 В, 1,7 А.
6. Измерить значение ЭДС фотодатчика при начальном положении пластины, записать в таблицу.
7. Снять зависимость ЭДС фотодатчика от угла падения луча на пластину. Перемещая по шкале 9 стрелки 6 и 7, изменять с шагом  $5^\circ$  угол падения луча от  $40^\circ$  до  $80^\circ$ , а угол отражения луча – соответственно от  $80^\circ$  до  $160^\circ$ . Данные записать в таблицу.
8. Из сделанных измерений выбрать угол падения луча  $\varphi_B$  с наименьшим значением ЭДС и произвести повторные измерения ЭДС фотодатчика с шагом  $1^\circ$  в окрестностях найденного угла ( $\varphi_B - 5^\circ$ ;  $\varphi_B + 5^\circ$ ). Уточненный угол  $\varphi_B$  и есть угол Брюстера.
9. Оставляя положение исследуемой пластины неизмен-

ным, соответствующим углу полной поляризации, снять зависимость ЭДС фотодатчика от угла поворота поляризатора 3. Для этого поворачивать поляризатор по шкале на оправе поляризатора от положения "Параллельно" до положения  $90^{\circ}$  – "Перпендикулярно". Данные записать в таблицу.

10. Снять зависимость ЭДС фотодатчика от угла падения луча на пластину при положении поляризатора 3, равном  $90^{\circ}$ . Перемещая по шкале 9 стрелки 6 и 7, изменять с шагом  $5^{\circ}$  угол падения луча от  $40^{\circ}$  до  $80^{\circ}$ , а угол отражения луча соответственно от  $80^{\circ}$  до  $160^{\circ}$ . Данные записать в таблицу.

11. Построить графики зависимостей по таблицам, снятым в пп. 7, 9, 10.

12. Вычислить по формуле (507.1) относительный показатель преломления и коэффициент отражения по формуле (507.2).

13. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешности измерения  $n$  и  $k$ , сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какой свет называется плоскополяризованным? Чем он отличается от естественного света?
2. Какой угол называется углом полной поляризации?
3. В какой плоскости происходят колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в отраженном луче при полной поляризации?
4. Каким образом можно получить полностью поляризованный преломленный луч?
5. Почему углу полной поляризации соответствует минимальное значение ЭДС датчика?
6. Чем отличается явление поляризации при отражении света от диэлектриков и металлов?
7. Начертите и объясните ход лучей в стопе стеклянных пластинок.

## **508. ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА КРИСТАЛЛАМИ. ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА**

### **508.1. Цель работы**

Проверка закона Малюса.

### **508.2. Разделы теории**

Поляризация света, закон Малюса. [1. Гл.25, §190–196]; [2. Гл.XIX, §134–140]; [3. Гл.6, 6.1, 6.3–6.7].

### **508.3. Приборы и принадлежности**

Экспериментальная установка, включающая поляризатор, анализатор, фотодатчик, микроамперметр, источник света с оптической системой, блок питания Б2-2.

### **508.4. Теоретическое введение**

Интенсивность излучения  $I$  прямо пропорциональна квадрату амплитуды световых колебаний

$$I = kA^2,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Плоскополяризованный свет получают, пропуская естественный свет через поляризаторы, в качестве которых используются среды, анизотропные в отношении колебаний вектора  $\vec{E}$ , например кристаллы турмалина. Поляризаторы можно использовать и для анализа поляризованного света, тогда их называют анализаторами. Поляризаторы свободно пропускают колебания, параллельные главному сечению поляризатора, и полностью или частично задерживают колебания, перпендикулярные главному сечению поляризатора.

Если поляризаторы ориентированы произвольно, то интенсивность прошедшего через них света будет зависеть от угла  $\varphi$

(рис. 508.1) между главными сечениями поляризатора и анализа-

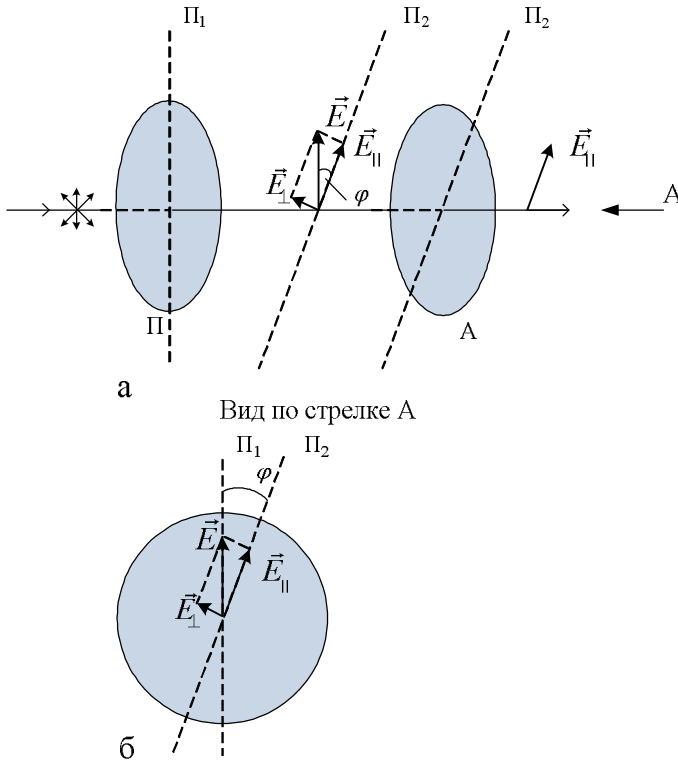


Рис. 508.1

тора  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  соответственно. Обозначим амплитуду электрического вектора, прошедшего через поляризатор  $\Pi$ ,  $\vec{E}$ . Разложим вектор  $\vec{E}$  на две компоненты: параллельную главному сечению анализатора А ( $\vec{E}_{\parallel}$ ) и перпендикулярную ему ( $\vec{E}_{\perp}$ ).

Тогда  $E_{\parallel} = E \cos \varphi$ , а интенсивность света, проходящего через А, равна  $I = kE_{\parallel}^2 = kE^2 \cos^2 \varphi = I_1 \cos^2 \varphi$ , или

$$I = I_1 \cos^2 \varphi, \quad (508.1)$$

где  $I_1$  – интенсивность плоскополяризованного света, падающе-

го на  $A$ ;  $\varphi$  – угол между плоскостью колебания вектора  $\vec{E}$  и главным сечением поляризатора  $A$ .

Соотношение (508.1) является аналитическим выражением закона Малюса.

Если на поляризатор падает естественный свет, у которого направление колебаний вектора  $\vec{E}_0$  хаотически меняется в пространстве, то  $\cos^2 \varphi$  равновероятно принимает значения от 0 до 1. Тогда, при прохождении поляризатора интенсивность света будет уменьшаться в два раза, так как

$$I_1 = \langle I_0 \cos^2 \varphi \rangle = I_0 \langle \cos^2 \varphi \rangle = \frac{1}{2} I_0, \quad (508.2)$$

где  $\langle \rangle$  – обозначает усреднение по времени меняющейся величины.

### 508.5. Описание установки и методики измерений

Для проверки закона Малюса в работе используется экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 508.2. Луч естественного света от лампы 1 падает на поляризатор 2, жестко закрепленный в корпусе прибора, его главное сечение фиксировано. Вышедший поляризованный луч интенсивностью  $I_1$  направляется на анализатор 3 и, пройдя через него и матовое стекло 4, попадает на фотодатчик 5. Ток датчика, пропорциональный интенсивности света  $I$ , пропущенного системой двух поляризаторов, регистрируется микроамперметром 6. Анализатор 3 скреплен с барабаном 7, который поворачивается вокруг направления распространения луча. На ободе барабана нанесена шкала 8, позволяющая измерять угол поворота барабана. Цена деления шкалы барабана –  $1^\circ$ .

Интенсивность  $I$  линейно поляризованного света после прохождения через анализатор 3 зависит от угла  $\varphi$ , образованного плоскостью колебаний падающего на анализатор луча с главным сечением анализатора. Если главное сечение анализатора

совпадает с плоскостью колебаний луча ( $\varphi = 0^0$ ), то интенсивность выходящего луча будет максимальной (равна интенсивности  $I_1$  падающего луча) и минимальной при угле  $\varphi = 90^0$ .

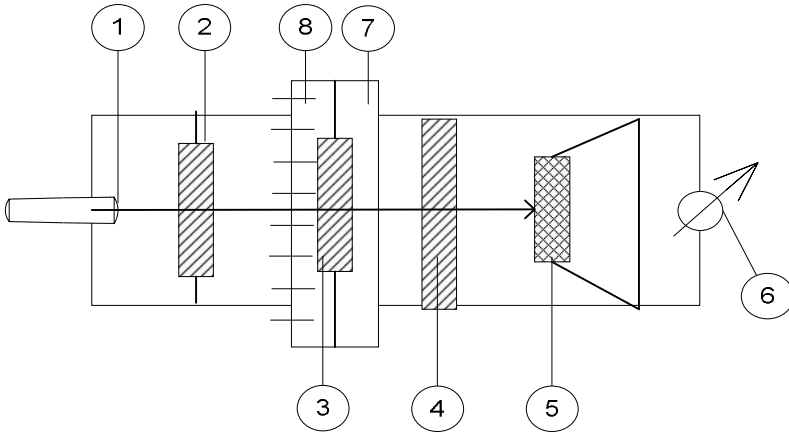


Рис. 508.2

### 508.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Включить блок питания Б2-2, включить осветитель прибора (выключатель на шнуре питания).

3. Медленно вращая барабан 7 с анализатором 3, добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра 6. Согласно формуле (508.1), для этого положения  $\varphi = 0^0$  интенсивность  $I_1 = I = I_{\max}$ . Отметить указателем-стрелкой на барабане 7 положение нуля шкалы 8. Повернуть барабан по шкале на  $90^0$ , отклонение стрелки прибора 6 должно быть минимально. Вернуть барабан в начальное положение, отмеченное указателем-стрелкой и проверить показания микроамперметра. Если они не совпадают с первоначальными, повторить настройку установки.

4. Снять зависимость интенсивности света (силы тока, протекающего через микроамперметр) от угла поворота анализатора (барабана). Поворачивая барабан  $\gamma$  в пределах от  $0$  до  $180^{\circ}$  с шагом  $10^{\circ}$ , снять показания значений силы тока. Полученные данные записать в таблицу.

5. По результатам эксперимента построить график зависимости  $I = I(\varphi)$ .

6. Построить теоретический график зависимости  $I = I_1 \cos^2 \varphi$ , принимая  $I_1 = I_{\max}$ .

7. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Малюса.
2. Какая электромагнитная волна называется поляризованной? Степень и виды поляризации.
3. Почему и как естественный луч в кристалле делится на два луча?
4. Чем отличается обыкновенный луч от необыкновенного?
5. Как изменятся интенсивности естественного и плоскополяризованного лучей, проходящих через анализатор?
6. Укажите, как надо расположить двоякопреломляющий кристалл, чтобы обыкновенный и необыкновенный лучи имели одинаковое направление.
7. Между двумя скрещенными поляризаторами поместили третий. Как будет меняться на экране интенсивность света при вращении третьего поляризатора? Выразите интенсивность прошедшего через систему света аналитически.

## **509. ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ КОЛЕБАНИЙ В КВАРЦЕ И САХАРНОМ РАСТВОРЕ**

### **509.1. Цель работы**

Изучение явления вращения плоскости колебаний, определение концентрации сахара в растворе и толщины кварцевой пластины.

### **509.2. Разделы теории**

Поляризация света, вращение плоскости колебаний [1. Гл.25, §196]; [2. Гл. XIX; § 134, 138–141].

### **509.3. Приборы и принадлежности**

Поляриметр, набор трубок с раствором сахара различной концентрации, пластины право- и левовращающего кварца, светофильтр.

### **509.4. Теоретическое введение**

Напомним, что, световой луч, вышедший из поляризатора, содержит колебания в плоскости его главного сечения, для луча эта плоскость называется плоскостью колебаний, а перпендикулярная ей плоскость – плоскостью поляризации.

Вещества, способные вращать плоскость колебаний светового луча, называются оптически активными. К их числу относятся двоякопреломляющие кристаллы (кварц, исландский шпат  $\text{CaCO}_3$ , киноварь  $\text{HgS}$  и др.). Наибольшей вращательной способностью они обладают в случае, когда свет распространяется вдоль оптической оси кристалла, при этом двойного лучепреломления не происходит. Оптически активными являются и некоторые оптически изотропные кристаллы кубической симметрии (например, хлорат натрия  $\text{NaClO}_3$ , бромат натрия  $\text{NaBrO}_3$  и



др.). Наряду с названными кристаллами, оптически активными являются многие твердые кристаллические органические вещества (сахар, камфора, кокаин), смеси ряда органических веществ (нефть, патока), некоторые чистые жидкости (скипидар, никотин), а также растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (камфоры в бензоле, водные растворы сахара, винной кислоты, глюкозы) и их расплавы и пары. В общем оптически активные вещества подразделяются на два типа. Вещества, относящиеся к 1-му типу, – оптически активны в любом агрегатном состоянии, к примеру, сахар и водный раствор сахара, ко 2-му – активны только в кристаллической фазе, к примеру, кварц, киноварь. У веществ 1-го типа оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул, у веществ 2-го типа – асимметрией поля сил, связывающих частицы в кристаллической решётке.

Для наблюдения явления вращения плоскости колебаний нужно установить на оптической скамье два скрещенных поляризатора. Такая система не пропускает монохроматический свет. Если между поляризаторами внести пластину кварца, вырезанную перпендикулярно оптической оси, свет через систему будет проходить. Вращением одного из поляризаторов можно снова погасить проходящие лучи. Это означает, что после прохождения через оптически активное вещество свет остаётся линейно поляризованным, но плоскость колебаний оказывается повернутой. Если же через эту систему пропустить естественный свет, то, как и при монохроматическом освещении, наступает просветление поля зрения, но вращение второго поляризатора в этом случае ни при каком угле поворота не приводит к его полному затемнению, а лишь изменяет цвет пропускаемых лучей. Экспериментально установлено, что угол поворота плоскости колебаний пропорционален длине пути луча в веществе и зависит от длины волны проходящего света, т.е. имеет место дисперсия вращательной способности.

Кристаллы оптически активных веществ в зависимости от направления вращения плоскости колебаний разделяются на

право- и левовращающие. Если поворот плоскости колебаний совершается по часовой стрелке (для наблюдателя, смотрящего навстречу проходящему лучу), то вещество называется правовращающим. Если вращение происходит против часовой стрелки, то левовращающее. Решётка правовращающего кристалла зеркально-симметрична решётке левовращающего и не может быть пространственно совмещена с нею.

Явление вращения плоскости колебаний можно объяснить, используя гипотезу Френеля. Плоскополяризованная электромагнитная волна (плоскополяризованный свет) с произвольным направлением плоскости колебаний (вектор  $\vec{E}$ ), попадая в оптически активную среду, разлагается на две поляризованные по кругу волны – одну с правым (вектор  $\vec{E}_{\text{П}}$ ), другую с левым направлением вращения (вектор  $\vec{E}_{\Lambda}$ ) (рис 509.1, а).

Эти волны распространяются в оптически активной среде с разными фазовыми скоростями:  $v_{\Lambda}$  – для волны с левым вращением,  $v_{\text{П}}$  – для волны с правым вращением. Показатели преломления  $n_{\Lambda}$  и  $n_{\text{П}}$  этих волн будут различны. После того как свет пройдет слой вещества  $l$ , поляризованная по левому кругу волна  $\vec{E}_{\Lambda}$  отстанет по фазе на угол  $\varphi_{\Lambda} = 2\pi \frac{l}{\lambda_{\Lambda}}$ , а волна  $\vec{E}_{\text{П}}$  – на угол

$\varphi_{\text{П}} = 2\pi \frac{l}{\lambda_{\text{П}}}$ ;  $\lambda_{\Lambda}$  и  $\lambda_{\text{П}}$  – соответствующие длины волн.

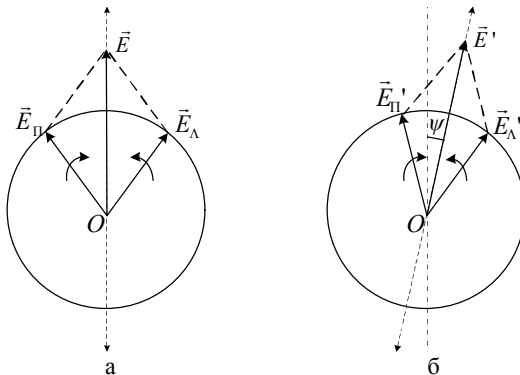


Рис. 509.1

Предположим, что величина  $l$  такова, что угол  $\varphi_\Lambda$  кратен  $2\pi$ . Тогда вектор  $\vec{E}_\Lambda$  займет снова прежнее положение, вектор же  $\vec{E}_\Pi$ , для которого  $\varphi_\Pi \neq \varphi_\Lambda$ , займет некоторое новое положение (рис. 509.1,б). Это новое положение будет повернуто на угол

$$\Delta\varphi = \varphi_\Lambda - \varphi_\Pi = 2\pi \left( \frac{l}{\lambda_\Lambda} - \frac{l}{\lambda_\Pi} \right).$$

Результирующий вектор  $\vec{E}$  займет новое положение –  $\vec{E}'$ , а угол поворота будет равен

$$\psi = \frac{\Delta\varphi}{2} = \pi l \left( \frac{1}{\lambda_\Lambda} - \frac{1}{\lambda_\Pi} \right). \quad (509.1)$$

Если выразить длины волн через скорости их распространения в данном веществе и циклическую частоту колебаний  $\omega$ ,

$$\lambda_\Lambda = \frac{2\pi v_\Lambda}{\omega} \quad \text{и} \quad \lambda_\Pi = \frac{2\pi v_\Pi}{\omega},$$

и подставить в (509.1), то получим

$$\psi \cong l\omega \left( \frac{1}{v_\Lambda} - \frac{1}{v_\Pi} \right). \quad (509.2)$$

В случае, показанном на рис. 509.1,б, плоскость колебаний оказывается повернутой по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу. Такое вращение плоскости колебаний называется *правым* и определяется как *положительное*. Из (509.2) следует, что вещества, в которых быстрее распространяются лучи с вращением по часовой стрелке  $v_\Pi > v_\Lambda$ , носят название *правовращающие*. Если  $v_\Lambda > v_\Pi$ , вещества – *левоповорачивающие*.

Угол поворота плоскости колебаний можно выразить через показатели преломления  $n_\Lambda$  и  $n_\Pi$  поляризованных по кругу компонент световой волны. Подставив в формулу (509.2) выражение для длины волны в вакууме  $\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega}$  и известные соотношения

ния

$$v_{\Lambda} = \frac{c}{n_{\Lambda}}, \quad v_{\Pi} = \frac{c}{n_{\Pi}},$$

получаем

$$\psi \cong \frac{\pi l}{\lambda_0} (n_{\Lambda} - n_{\Pi}). \quad (509.3)$$

Отношение угла поворота плоскости колебаний к длине пути волны в данной среде численно равно так называемой *постоянной вращения* для кристаллических веществ или *удельному вращению* для растворов и обозначается

$$\psi_0 = \frac{\psi}{l}.$$

Из (509.3) следует, что  $\psi_0$  определяется по формуле

$$\psi_0 \cong \frac{\pi}{\lambda_0} (n_{\Lambda} - n_{\Pi}).$$

Разность  $(n_{\Lambda} - n_{\Pi})$  очень мала по сравнению с единицей. Для большинства оптически активных веществ она имеет величину порядка  $10^{-4}$ . При обычном двойном лучепреломлении разность показателей преломления имеет величину порядка от  $10^{-3}$  до  $10^1$ . Однако в выражении (509.3) длина волны  $\lambda_0$  очень мала по сравнению с макроскопической величиной  $l$ ; это означает, что, несмотря на малость  $(n_{\Lambda} - n_{\Pi})$ , угол вращения  $\psi$  может иметь значительную величину. Например, известно, что кварцевая пластинка толщиной 1 мм поворачивает плоскость колебаний желтых лучей ( $\lambda=0,5890$  мкм) на  $21,7^\circ$ , а фиолетовых ( $\lambda = 0,4047$  мкм) – на  $48,9^\circ$ ; в ультрафиолетовой части спектра вращение плоскости колебаний еще больше: та же пластинка поворачивает плоскость колебаний лучей с длиной волны  $\lambda = 0,2147$  мкм на  $236^\circ$ .

На практике используют следующие выражения для расчета углов поворота плоскости колебаний в кристаллах:

$$\psi = \psi_0 l \quad (509.4)$$

и в растворах оптически активных веществ

$$\psi = \psi_0 l z, \quad (509.5)$$

где  $z$  – концентрация заданного вещества в растворе.

Необходимо отметить, что теория Френеля является в значительной мере формальной, поскольку не дает связи между величиной угла вращения и характерными свойствами данного оптически активного вещества. Современная электромагнитная теория оптической активности развивает теорию Френеля. Каждая молекула вещества или ячейка кристаллической решетки рассматривается как совокупность осцилляторов. Вращение плоскости колебаний является результатом взаимодействия проходящих через вещество световых волн и этих осцилляторов, при этом доказывается, что оптическая активность проявляется лишь у веществ, обладающих асимметрией строения самих молекул.

Рассмотренное выше явление вращения плоскости колебаний является естественным. Некоторые вещества приобретают свойство оптической активности при помещении их во внешнее магнитное поле. Вращение плоскости колебаний света в веществе при наличии внешнего магнитного поля называется эффектом Фарадея.

### **509.5. Описание установки и методики измерений**

В работе используется прибор – полутеневого поляриметр. Поляриметр (сахариметр) служит для определения концентрации сахара в растворах и является контрольно-измерительным прибором, широко применяемым в заводских и научно-исследовательских лабораториях.

Оптическая схема поляриметра показана на рис. 509.2, где S – источник света, С – светофильтр, П – поляризатор (призма Николя), ПП – полутеневая пластинка, Т – камера для трубок с раствором сахара, К – кварцевый компенсатор, А – анализатор (призма Николя), О – окуляр для наблюдения полей зрения и шкалы. Поляриметр имеет окуляр для наблюдения поля зрения и окуляр для наблюдения отсчетной шкалы.

Свет, идущий от источника  $S$  через светофильтр  $C$ , попадает на призму-поляризатор  $\Pi$ , которая преобразует его в поляризованный свет.

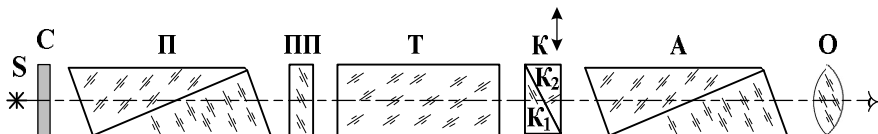


Рис. 509.2

Поскольку человеческий глаз очень чувствителен к небольшим различиям в освещенности двух рядом расположенных площадок (если их освещенность не слишком мала), установка системы поляризатор–анализатор настраивается на равенство затемнения двух половин поля зрения. Применяются различные так называемые полутеневые устройства. Одним из таких устройств является полутеневая пластинка  $\text{ПП}$ , состоящая из двух половинок: стеклянной  $C$  и кварцевой  $K$ ;  $MN$  – граница раздела стекла и кварца (рис. 509.3,а). Световой поток, проходя через полутеневую пластинку, делится ею на две половины линией раздела. Пластина  $\text{ПП}$  рассчитана и установлена так, что плоскости колебаний обеих половин светового потока составляют одинаковые углы с главным сечением анализатора (порядка  $2^{\circ}30'$ ).

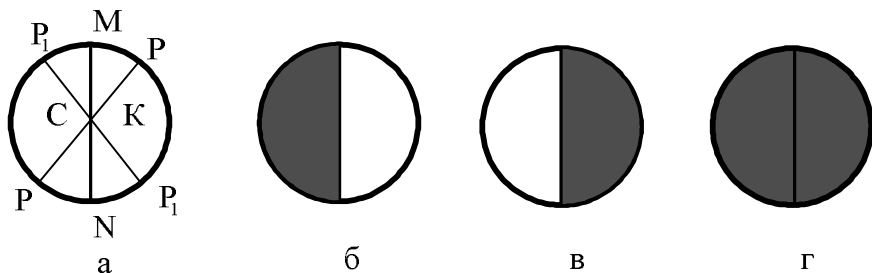


Рис. 509.3

Пусть на пластинку ПП падает монохроматический линейно-поляризованный свет с плоскостью колебаний  $PP$ . Через стеклянную часть пластинки свет пройдет, не изменив плоскости колебаний, а через кварцевую пластинку выйдет свет с новой плоскостью колебаний  $P_1P_1$  (кварц – оптически активное вещество). Если затем пропустить оба луча через анализатор, у которого главное сечение, например, совпадает с плоскостью, перпендикулярной  $PP$ , то луч левой половины поля зрения С будет погашен, и поле зрения в этой половине будет темное (рис. 509.3,б), тогда как часть света правой половины К будет пропущена анализатором, и поле этой половины будет светлое. Если плоскость колебаний, пропускаемых анализатором, перпендикулярна  $P_1P_1$ , то будет обратное явление (рис. 509.3,в). В среднем положении анализатора, при котором обе половины поля зрения будут одинаково затемнены (одинаково слабо освещены), получим *нулевую точку* (рис. 509.3,г).

При помещении раствора сахара между полутеневого пластинкой и анализатором, предварительно установленным на *нулевую точку*, равенство полей зрения нарушается, так как исследуемый раствор поворачивает плоскость колебаний света. Угол, на который надо повернуть анализатор, чтобы получить равное затемнение полей сравнения (зрения), равен углу поворота плоскости колебаний  $\psi$ .

В поляриметре, используемом в работе, для компенсации угла поворота плоскости колебаний луча, вызванного раствором сахара, применяется кварцевый компенсатор. Он состоит из двух клиньев, сделанных из левовращающего кварца. Один клин  $K_1$  – неподвижный, второй  $K_2$  – подвижный. Перемещая  $K_2$  относительно  $K_1$ , можно изменять величину левого вращения плоскости колебаний, даваемого клиньями  $K_1$  и  $K_2$ . Раствор сахара вращает плоскость колебаний вправо (по часовой стрелке), это вращение компенсируется левым вращением кварцевого компенсатора, при этом происходит уравнивание затемнения полей зрения.

Подвижный клин  $K_2$  кварцевого компенсатора перемеща-

ется вместе со шкалой. Линейное перемещение клина пропорционально углу вращения плоскости колебаний. Шкала прибора проградуирована в угловых единицах Международной сахарной шкалы S ( $100^0\text{S}$  этой шкалы соответствуют  $34,62^0$ ). Для точного отсчета шкала (рис. 509.4) имеет нониус, цена деления нониуса  $-0,05^0\text{S}$ . По нулевому делению нониуса определяют значение шкалы, соответствующее одинаковому затемнению обеих половин полей зрения (*нулевую точку*).

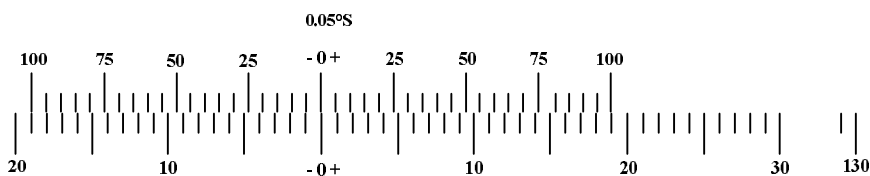


Рис. 509.4

Отсчет показаний при помощи нониуса поясняется рис. 509.5. На рисунке показано положение шкалы и нониуса, соответствующее отсчету « $+12,85^0\text{S}$ ». Значение целых величин определяется по нижней шкале, дробная часть – по верхней шкале (нониусу). Ноль нониуса расположен правее нуля шкалы (« $-0+$ ») на 12 полных делений. Находим, где в положительной части нониуса деления шкалы и нониуса совпадают. В нашем примере это значение «85». Следовательно, измеренная величина угла равна « $+12,85^0\text{S}$ ».

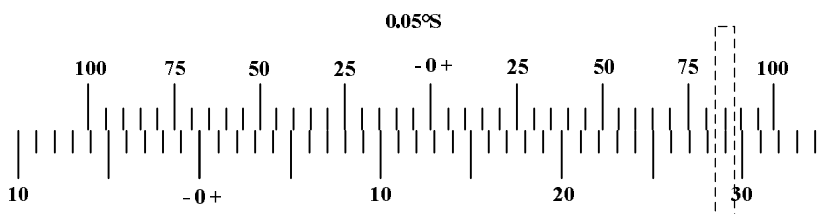


Рис. 509.5



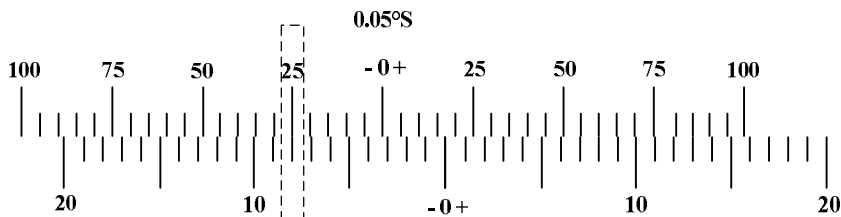


Рис. 509.6

На рис. 509.6 показано положение шкалы и нониуса, соответствующее отсчету « $-3,25^0\text{S}$ ». Ноль нониуса расположен левее нуля шкалы (« $-0+$ ») на 3 полных деления. Находим, где в отрицательной части нониуса деления шкалы и нониуса совпадают. В нашем примере это значение «25». Следовательно, измеренная величина угла равна « $-3,25^0\text{S}$ ».

Внешний вид поляриметра показан на рис. 509.7. Осветительный узел 1 и измерительный блок 3 (компенсатор и анализатор) соединены между собой траверсой, на которой укреплены камера для трубок 8 с исследуемым веществом, оправа с поляризатором 2 и диск со светофильтром 7. Измерительный блок имеет окуляр 4 для отсчета показаний по шкале и окуляр 5 для наблюдения полей зрения. В нижней части измерительного блока расположена рукоятка 6 для перемещения подвижного кварцевого клина и связанной с ним шкалы. Траверса крепится к основанию. На основании находится тумблер (кнопка) включения прибора.

В работе предлагается определить удельное вращение и концентрацию сахарного раствора, а также толщину кварцевой пластинки. Измерив угол поворота плоскости колебаний  $\psi$  для известных значений концентрации  $z$  сахарного раствора и зная длину трубки  $l$ , из (509.5) можно вычислить удельное вращение  $\psi_0$ . Размерность удельного вращения  $[\psi_0] = \left[ \frac{\text{град}}{z / \text{см}^3 \times \text{дм}} \right]$ . Определение неизвестной концентрации  $z_x$  сахарного раствора производится путём сравнения результатов измерений угла поворота плоскости колебаний для трубок с неизвестным и из-

вестным (эталонным) значениями концентрации. Для этого вначале измеряется угол поворота плоскости колебаний  $\psi$  сахарного раствора в эталонной трубке, определяемый соотношением  $\psi = \psi_0 \cdot z_0 \cdot l$ . Затем эталонная трубка заменяется трубкой с неизвестной концентрацией  $z_x$  и вновь измеряется угол  $\psi_x$ , определяемый соответственно выражением  $\psi_x = \psi_0 \cdot z_x \cdot l$ .

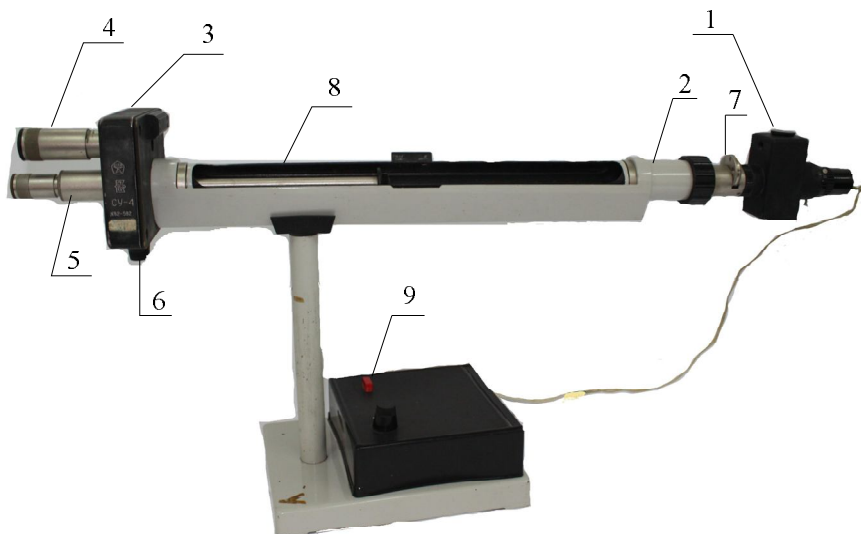


Рис. 509.7

Тогда неизвестная концентрация вычисляется по формуле

$$z_x = z_0 \frac{\psi_x}{\psi}. \quad (509.6)$$

Толщина кварцевой пластины  $l$  находится из выражения (509.4). Для этого производятся необходимые измерения углов поворота плоскости колебаний света кварцевой пластиной. Величина постоянной вращения кварца считается известной.

## 509.6. Порядок выполнения работы

### Упражнение 1. Определение удельного вращения и концентрации сахара в растворе.

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, методикой измерений и порядком выполнения работы, начертить таблицу для записи результатов измерений.

2. Включить прибор с помощью тумблера (кнопки) «Сеть».

3. Поставить желтый светофильтр ( $\lambda = 589,3$  нм) на диске 7 в нижнее положение. Вращая окуляр 4, добиться четкой фокусировки шкалы и нониуса. Вращая окуляр 5, добиться отчетливой видимости линии раздела поля зрения.

4. Медленно вращая рукоятку 6 (компенсатор), в отсутствие трубки с раствором установить одинаковое затемнение обеих половин поля зрения и записать показания нониуса  $n_i$ . Повторить отсчет этого положения 5 раз, каждый раз предварительно немного смещая рукоятку 6 вправо или влево. Результаты записать. Среднее арифметическое пяти измерений принимаем за нулевую точку –  $n_0$ .

5. Поместить трубку с сахарным раствором заданной концентрации  $z_0$  в камеру 8, расположить ее ближе к окуляру. Глядя в окуляр и поворачивая трубку вокруг оси, установить ее в такое положение, чтобы линия раздела делила поле зрения на две равные части. (При необходимости произвести дополнительную фокусировку поля зрения – **линия раздела должна быть четко видна** (см. п. 3).) Обе половины поля зрения будут освещены различно.

6. Вращая рукоятку 6, добиться одинакового затемнения обеих половин поля зрения и произвести отсчет угла поворота плоскости колебаний  $\psi'$  по шкале и нониусу. Провести измерения 5 раз, каждый раз предварительно немного смещая рукоятку 6 вправо или влево. Результаты записать.

7. Среднее арифметическое пяти измерений принимаем за угол поворота  $\psi'_{cp}$ . «Истинный» угол поворота плоскости коле-

баний определяется по формуле  $\psi = \psi'_{cp} - n_0$ .

8. Выполнить действия по пп. 5–7 для раствора с концентрацией  $z_x$ .

9. По формуле (509.6) рассчитать неизвестную концентрацию сахарного раствора.

10. Произвести расчет удельного вращения сахарного раствора по формуле  $\psi_0 = \frac{\psi}{z_0 l}$ . (Градусы сахарной шкалы перевести в угловые, а длину трубки  $l$  взять равной 2 дм.)

11. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешность определения концентрации сахарного раствора  $\Delta z_x$ , сделать выводы.

## **Упражнение 2. Определение толщины кварцевой пластинки.**

1. Ознакомиться с порядком выполнения работы, начертить таблицу для записи результатов измерений.

2. Поместить в камеру прибора трубку с кварцевой пластиной. Измерить угол поворота плоскости колебаний кварцевой пластиной, выполнив действия, описанные в пп. 5–7 предыдущего упражнения.

3. По формуле (509.4) рассчитать толщину кварцевой пластины. Градусы сахарной шкалы перевести в угловые, а величину постоянной вращения для кварца взять равной  $\psi_0 = 21,72^\circ \times \text{мм}^{-1}$  ( $\lambda = 589,3 \text{ нм}$ ).

4. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешность определения толщины кварцевой пластинки  $\Delta l$ , сделать выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Какие вещества называются оптически активными? Приведите примеры.

2. Объясните явление поворота плоскости колебаний при

прохождении света через оптически активные вещества, используя гипотезу Френеля.

3. Объясните понятие постоянной вращения и удельного вращения для твердых и жидких оптически активных веществ.

4. Приведите известные количественные соотношения между углом поворота плоскости колебаний света при прохождении оптически активного вещества и характеристиками данного вещества.

5. По каким характеристикам оптически активные вещества условно делят на правовращающие и левовращающие?

6. Почему величина угла поворота плоскости поляризации в кварце значительна?

7. Объясните различие между явлениями двойного лучепреломления и вращения плоскости колебаний света в веществах.

8. Расскажите об устройстве поляриметра. Какие закономерности распространения поляризованного света используются в работе поляриметра?

### **Библиографический список**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2011. – 487 с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Лань, 2007. – 496 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика. – М.: ООО "Изд-во Астрель": ООО "Изд-во АСТ" 2004. – 256 с.

4. Лабораторный практикум по физике/ Под ред. А.С. Ахматова. – М.: Высшая школа, 1980. – 360 с.

5. Руководство к лабораторным занятиям по физике/ Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 688 с.

6. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.

## Содержание

501. Изучение преломления света и определение показателя преломления прозрачных сред.....	3
502. Изучение интерференционного микроскопа.....	17
503. Изучение явления интерференции света и определение длин световых волн при помощи бипризмы Френеля.....	29
504.-1. Измерение длины световых волн при помощи интерференционных колец Ньютона.....	46
504.-2. Наблюдение колец Ньютона с помощью видеоокуляра DCM-310.....	56
505. Дифракция плоских волн на щели и нити. Одномерная дифракционная решетка.....	70
506. Изучение интерферометра.....	76
507. Изучение поляризации света и опытная проверка закона Брюстера.....	88
508. Изучение поляризации света кристаллами. Проверка закона Малюса.....	95
509. Изучение вращения плоскости поляризации в кварце и сахарном растворе.....	100
Библиографический список.....	113

Куповых Геннадий Владимирович  
Нестюрина Елена Евгеньевна  
Филиппьева Наталья Николаевна  
Погорелов Евгений Николаевич  
Колпачева Ольга Валерьевна  
Доценко Игорь Борисович  
Гатько Людмила Евстафьевна  
Какурина Наталья Андреевна  
Какурин Юрий Борисович

## ОПТИКА

### Практикум по физике

(для укрупненных групп направлений подготовки:  
математические и естественные науки;  
инженерное дело, технологии и технические науки)

Ответственный за выпуск Нестюрина Е.Е.  
Редактор Проценко И.А.  
Корректор Надточий З.И.

ЛР №020565 от 23.06.1997 г. Подписано к печати 10.12.2013 г.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная

Офсетная печать.

Усл. п.л. – 7,2.

Уч.-изд.л. – 7,2.

Заказ №

Тираж 150 экз.

"С"

---

Издательство ЮФУ

ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44

Типография ЮФУ

ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44